

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

**ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO
DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADOS
EM RESPOSTAS DINÂMICAS**

REBECA FREITAS VASCONCELOS

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Brasília

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADOS EM RESPOSTAS DINÂMICAS

REBECA FREITAS VASCONCELOS

Tese submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutora em Estruturas e Construção Civil.

Orientadora: Prof^ª Dra. Graciela Nora Doz de Carvalho
Co-Orientador: Prof. Dr. José Luís Vital de Brito

Brasília
2025

Vasconcelos, Rebeca Freitas.

Estudo de métodos de detecção de danos estruturais baseados em respostas dinâmicas / Rebeca Freitas Vasconcelos. – Brasília, 2025.

Lxxxii, 555 f. : il, color., figs., tabs., apênds.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Graciela Nora Doz de Carvalho; Co-orientador: Prof. Dr. José Luís Vital de Brito.

Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, 2025.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, tabelas, gráficos, abreviaturas, siglas e tabelas.

Apêndices.

1. Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM) 2.

Parâmetros estatísticos 3. Análise no domínio do tempo e da frequência 4. Dados brutos de aceleração 5. k-means 6. Scott-Knott
I. Título.

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

ESTUDO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADOS EM RESPOSTAS DINÂMICAS

REBECA FREITAS VASCONCELOS

Tese submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutora em Estruturas e Construção Civil.

APROVADA POR:

Prof.^a Dra. Graciela Nora Doz de Carvalho (UnB/FT/ENC)
(Orientadora)

Prof.^a Dra. Maria Alzira de Araújo Nunes (UnB/FCTE)
(Examinador interno)

Prof. Dr. Ney Roitman (COPPE/UFRJ)
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Flávio de Souza Barbosa (FACENG/UFJF)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 21 DE AGOSTO DE 2025

*A Deus, ao meu marido e aos meus
filhos, por serem meu alicerce,
minha alegria, minha força e minha
razão para nunca desistir.*

AGRADECIMENTOS

Ao final desta longa jornada, é com imensa gratidão que registro os meus sinceros agradecimentos.

A Deus, primeiramente, pela vida, saúde, sustento, força, pelas pessoas que colocou em meu caminho e pela capacitação, que me sustentaram e me trouxeram até aqui. Sem Ele, eu não teria conseguido.

Ao meu marido, Luís Henrique, por me apresentar o *Scott-Knott* e me introduzir à estatística, por ser meu exemplo de pesquisador, meu arrimo, por suportar os tempos difíceis ao meu lado e me substituir em todas as funções possíveis para que essa jornada chegasse ao fim.

Aos meus filhos, Benício e Anelise, que nasceram durante essa caminhada e por tantas vezes sofreram com a minha ausência. Saibam que vocês foram, e são, a principal motivação para seguir em frente a cada dia.

Ao meu pai, Jessé, e à minha avó, Vera, pelo exemplo e incentivo contínuo aos estudos, pelas orações e por acreditarem em mim mesmo nos dias em que eu duvidei.

À minha orientadora, Prof.^a Graciela, por sua paciência, compreensão, orientação contínua, persistência e pelos puxões de orelha. Obrigada por cada reunião e por ser um exemplo de profissional, mãe, esposa e mulher. A senhora me inspirou a acreditar que, sim, é difícil, mas é possível.

Ao meu coorientador, Prof. Brito, por sua infinita calma e sabedoria, por estar sempre presente e por me conduzir ao longo de toda a minha formação no doutorado. Nunca irei me esquecer da agitação do Benício em minha barriga ao ouvir a voz do senhor durante as aulas.

Ao Prof. Marcus Girão, pela organização, orientação, companhia, proatividade e disponibilidade durante os ensaios. Foram dias que contribuíram muito para minha formação.

À UnB e ao PECC, por me proporcionarem uma formação de qualidade, com orientadores e professores fantásticos e experiências ímpares.

Ao Grupo de Dinâmica de Vibração do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, por ceder o Laboratório, a estrutura e o suporte necessário para a condução dos ensaios.

Ao Instituto Federal do Tocantins, juntamente ao Governo Federal, por proporcionarem e financiarem a minha capacitação com direito ao afastamento.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, o meu mais sincero muito obrigada.

RESUMO

A busca por indicadores de dano cada vez mais robustos e confiáveis tem crescido significativamente no contexto da detecção de falhas estruturais. Diversos métodos têm sido propostos e avaliados quanto à sua eficácia, com o objetivo de contribuir para o avanço do Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM – Structural Health Monitoring). Este trabalho apresenta um estudo centrado em métodos de detecção de danos baseados exclusivamente em respostas dinâmicas, os quais lidam com grandes volumes de dados na tentativa de identificar diferentes estados estruturais.

Para representar adequadamente os sinais de aceleração sem perder informações relevantes — e, por vezes, até realçando-as —, diversos autores propõem a compactação desses dados por meio de parâmetros representativos. Neste estudo, são analisados trinta parâmetros estatísticos, além dos valores resultantes da Análise de dados Simbólicos (ADS), cujas categorias foram definidas com base na regra de Sturges (1926), extraídos dos sinais de aceleração nos domínios do tempo e da frequência (via Transformada Rápida de Fourier – FFT).

Os parâmetros foram aplicados aos dados de cinco estruturas distintas: três experimentais (Viga Biapoiada, *Shear Building* de 10 pavimentos e pá eólica) — sendo que, em duas delas, os ensaios foram desenvolvidos pela própria autora —, um modelo estrutural (*Benchmark*) e uma estrutura real (Ponte Ferroviária KW51). A eficácia individual de cada parâmetro na identificação dos diferentes estados de estruturais foi avaliada por meio do método de agrupamento proposto por *Scott-Knott* (1974).

Após a caracterização dos dados por meio de *boxplots*, foram apresentados os resultados de identificação para cada métrica, sendo então propostos conjuntos de parâmetros, validados por meio do agrupamento multivariado com o algoritmo *k-means*, e comparados a conjuntos previamente sugeridos na literatura. Dois dos conjuntos propostos pela autora (PAR 12 e F-SD) destacaram-se por sua robustez, sensibilidade e adequação na identificação de danos estruturais, considerando diferentes estruturas e tipos de excitação (impacto, shaker e passagem de trem).

Palavras-chave: Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM), Detecção de Danos, Parâmetros Estatísticos, Análise de Dados Simbólicos (ADS), Análise no Domínio do Tempo e da Frequência; Dados Brutos de Aceleração, *k-means*, *Scott-Knott*, Sturges.

ABSTRACT

The search for increasingly robust and reliable damage indicators has grown significantly in the context of structural fault detection. Several methods have been proposed and evaluated regarding their effectiveness, with the aim of contributing to the advancement of Structural Health Monitoring (SHM). This work presents a study focused on damage detection methods based exclusively on dynamic responses, which handle large volumes of data in an attempt to identify different structural states.

To adequately represent acceleration signals without losing relevant information — and, in some cases, even enhancing it — several authors propose compressing this data through representative parameters. In this study, thirty statistical parameters are analyzed, in addition to the values resulting from Symbolic Data Analysis (SDA), whose categories were defined based on Sturges' rule (1926), extracted from acceleration signals in the time and frequency domains (via Fast Fourier Transform – FFT).

The parameters were applied to data from five different structures: three experimental ones (a Simply Supported Beam, a 10-story Shear Building, and a wind turbine blade) — two of which were tested by the author herself —, one structural model (Benchmark), and a real structure (KW51 Railway Bridge). The individual effectiveness of each parameter in identifying different structural states was assessed through the clustering method proposed by Scott-Knott (1974).

After characterizing the data through boxplots, the identification results for each metric were presented, and parameter sets were then proposed, validated through multivariate clustering with the k-means algorithm, and compared with sets previously suggested in the literature. Two of the sets proposed by the author (PAR 12 and F-SD) stood out for their robustness, sensitivity, and suitability in the identification of structural damage, considering different structures and types of excitation (impact, shaker, and train passage).

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), Damage Detection, Statistical Parameters, Symbolic Data Analysis (SDA), Time and Frequency Domain Analysis, Raw Acceleration Data, k-means, Scott-Knott, Sturges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ponte Hintze Ribeiro após o colapso.	2
Figura 2.1 – Placas analisadas por Cawley e Adams (1979).	8
Figura 2.2 – Plataforma <i>offshore</i> e o posicionamento dos excitadores e acelerômetros.	10
Figura 2.3 – Viga danificada e seus parâmetros.	12
Figura 2.4 – Esquema da viga espacial usada por Chen e Garba (1988), com os números dos nós para a análise de elementos finitos.	13
Figura 2.5 – Amostra nº 12 das estruturas de plástico reforçado com fibra vidro (PRFV) ensaiadas.	17
Figura 2.6 – Localização e extensão de dano da treliça de 8 baias da NASA.	18
Figura 2.7 – Detecção do dano estrutural utilizando a 1ª frequência natural do modelo da viga.	38
Figura 2.8 – Detecção de danos em estrutura contraventada.	41
Figura 3.1 – Modelo geral para a análise exploratória de dados.	62
Figura 3.2 – Exemplo da transformação das acelerações (dados clássicos) em dados simbólicos.	64
Figura 3.3 – Diferentes formas de distribuição de frequências.	67
Figura 3.4 – Posição dos quartis e extremos em distribuições diferentes quanto à dispersão e assimetria.	71
Figura 3.5 – Representação da distribuição de densidade dos dados com divisão em quartis.	72
Figura 3.6 – Posições da média e mediana, segundo a forma (simétrica ou assimétrica) da distribuição.	76
Figura 3.7 – Classificação quanto a simetria da distribuição.	78
Figura 3.8 – Classificação quanto a curtose da distribuição.	79
Figura 3.9 – Boxplots de dados transformados.	86
Figura 3.10 – Sinal no domínio do tempo e resultado da FFT no domínio da frequência.	87
Figura 3.11 – Um diagrama de caixas com suas partes componentes destacadas.	89

Figura 3.12 – Quatro distribuições hipotéticas examinadas através de seus <i>boxplots</i> . ..	90
Figura 3.13 – Diagrama em caixas de diferentes tipos de distribuição.	91
Figura 3.14 – Fluxograma do método <i>Scott-Knott</i>	99
Figura 3.15 – Exemplo de saída do método <i>Scott-Knott</i> utilizando o SISVAR.	102
Figura 3.16 – Resultado do exemplo pelo SISVAR.	110
Figura 4.1 – Módulo em aço e suas dimensões.	116
Figura 4.2 – <i>Shear Building</i> com dez pavimentos.	117
Figura 4.3 – Ancoragem do modelo à laje de reação.	118
Figura 4.4 – Sistema modular de aquisição SIRIUS Modular (Dewesoft).	119
Figura 4.5 – Martelo de impacto.	120
Figura 4.6 – Locação dos acelerômetros na fase 1.	121
Figura 4.7 – Identificação das entradas utilizadas no sistema modular de aquisição... ..	121
Figura 4.8 – Ponto de excitação do martelo de impacto.	122
Figura 4.9 – Exemplo dos registros de excitação por impacto dos três canais da DAQ em função do tempo.	123
Figura 4.10 – Interface do arquivo de dados com excitação por impacto.	123
Figura 4.11 – Estrutura de aquisição de dados usada na fase I dos ensaios do <i>Shear Building</i>	125
Figura 4.12 – Espectro da Frequência do <i>Shear Building</i> – Fase I.	126
Figura 4.13 – Posicionamento dos acelerômetros em x e y na fase II dos ensaios.	128
Figura 4.14 – <i>Shaker</i> utilizado por Tavares (2024).	128
Figura 4.15 – Tentativa de fixação do <i>Shaker</i> externamente a estrutura.	129
Figura 4.16 – Fixação do <i>Shaker</i> (45°) no topo da estrutura, com massa adicionada no 9° andar.	129
Figura 4.17 – <i>Shaker</i> em x com excentricidade aproximada de 2 cm.	130
Figura 4.18 – <i>Shaker</i> posicionado no topo da estrutura com acelerômetro conectado.	131
Figura 4.19 – Gerador de função arbitrária.	131
Figura 4.20 – Amplificador de sinal.	132

Figura 4.21 – Exemplo dos registros de excitação pelo <i>shaker</i> dos três canais da DAQ em função do tempo. Aceleração de entrada, de saída em X e em Y, respectivamente. ...	133
Figura 4.22 – Interface do arquivo de dados com excitação pelo <i>shaker</i>	133
Figura 4.23 - Estrutura de aquisição de dados usada na fase II dos ensaios do <i>Shear Building</i>	136
Figura 4.24 – Espectro da Frequência do <i>Shear Building</i> – Fase II (Impacto).	137
Figura 4.25 – Nós e coordenadas do <i>Shear Building</i> inseridos no editor de geometria do software.	138
Figura 4.26 – Modos de flexão na direção de X na Fase I do <i>Shear Building</i>	140
Figura 4.27 – CMIF no domínio da frequência da Fase I do <i>Shear Building</i>	141
Figura 4.28 – Critério de garantia modal (MAC) da Fase I do <i>Shear Building</i>	141
Figura 4.29 – CMIF no domínio da frequência da Fase II do <i>Shear Building</i>	142
Figura 4.30 - Critério de garantia modal (MAC) da Fase II do <i>Shear Building</i>	143
Figura 4.31 – Turbina Eólica Verne 555 da ENERSUD.	144
Figura 4.32 – Materiais e detalhes da estrutura da pá.	144
Figura 4.33 – Desenho geométrico da pá em CAD e suas respectivas seções transversais (mm).	146
Figura 4.34 – Medição da massa da estrutura.	147
Figura 4.35 – Vista posterior da pá eólica engastada ao suporte inercial GDS.	147
Figura 4.36 – Vista frontal da pá eólica engastada ao suporte inercial GDS.	148
Figura 4.37 – Detalhe de fixação e cunhamento da pá eólica.	148
Figura 4.38 – Posicionamento dos acelerômetros na pá.	149
Figura 4.39 – Local de impacto do martelo na pá.	150
Figura 4.40 – Exemplo dos sinais de força de impacto e de acelerações registrados em função do tempo.	151
Figura 4.41 – Massa de 130g adicionada no ponto F.	151
Figura 4.42 – Interface do arquivo de dados.	152
Figura 4.43 – Espectro da Frequência da Pá Eólica.	155

Figura 4.44 – Nós da pá inseridos no editor de geometria do software DewesoftX. ...	156
Figura 4.45 – Gráfico no domínio da frequência das leituras nos pontos 7 e 8.	158
Figura 4.46 – Quatro primeiros modos de flexão da pá.	158
Figura 4.47 – Visualização por gradiente de cor do Critério de Garantia Modal (MAC).	159
Figura 4.48 – Viga de aço biapoçada e instrumentada.....	160
Figura 4.49 – Viga de aço sob impacto de martelo, contendo dano provocado por furo de 12mm.....	161
Figura 4.50 – Exemplos de ensaios de vibração realizados em laboratório: Impacto (esquerda) e vibração aleatória (direita).	161
Figura 4.51 – Espectro da Frequência da Viga Biapoçada.	162
Figura 4.52 – Modelo do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE Fase I.....	164
Figura 4.53 – Estrutura real do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE.	165
Figura 4.54 – Padrões de danos da Fase Analítica I do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE referência.	166
Figura 4.55 – Localização dos sensores.	167
Figura 4.56 - Exemplo de ensaio de vibração simulado no FEA para o <i>Benchmark</i> IASC- ASCE, contendo os registros dos acelerômetros 15 e 16.	167
Figura 4.57 – Matriz de casos de simulação do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE SHM Fase I.	168
Figura 4.58 – Espectro da Frequência do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE.	170
Figura 4.59 – Ponte Ferroviária KW51.	172
Figura 4.60 – Reforço nas conexões das diagonais. (a) Ligações originais; (b) ligações reforçadas; (c) andaimes instalados na ponte durante a reforma.	173
Figura 4.61 – Visão geral da configuração de medição. (a) Sensores instalados nas diagonais e arcos (vista lateral); (b) Sensores instalados no tabuleiro da ponte (vista superior).....	174
Figura 4.62 – Acelerômetro aBD17Az e aBD17Ay.....	175

Figura 4.63 – Gráfico de <i>Gantt</i> da operação dos acelerômetros no tabuleiro da ponte ferroviária KW51.....	175
Figura 4.64 – Histórico temporal da temperatura da superfície sob o tabuleiro da ponte (preto) e da temperatura do ar no Edifício Vliet (azul).	176
Figura 4.65 – Evolução das frequências naturais identificadas ao longo do tempo. Azul: modos laterais dos arcos; vermelho: modos laterais do tabuleiro; verde: modos verticais globais; magenta: modos torcionais globais.	176
Figura 4.66 – Dados de aceleração correspondentes à passagem de um trem em 4 de novembro de 2019, às 8:01:20 (UTC).	177
Figura 4.67 – Espectro da Frequência da Ponte Ferroviária KW51.....	178
Figura 5.1 – Exemplo de planilha de entrada de dados no SISVAR.....	182
Figura 5.2 – Fluxograma da metodologia adotada.	184
Figura 5.3 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e a estrutura intacta.	185
Figura 5.4 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 10º andar.	186
Figura 5.5 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.	186
Figura 5.6 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 2º andar.	187
Figura 5.7 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 10º andar.	187
Figura 5.8 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.	188
Figura 5.9 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e a estrutura intacta.	188

Figura 5.10 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e a estrutura intacta.	189
Figura 5.11 - Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e a estrutura intacta.	189
Figura 5.12 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e a estrutura intacta.	190
Figura 5.13 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.	190
Figura 5.14 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a estrutura intacta.	191
Figura 5.15 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, para estrutura intacta.	191
Figura 5.16 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, antes da realização dos reparos.	192
Figura 5.17 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, após os reparos.	192
Figura 5.18 – Resumo das médias de identificação da Viga Biapoiada variando o número de ensaios analisados.	202
Figura 5.19 – Exemplo de segmentação de um registro de aceleração por diferentes janelas de tempo.	205
Figura 5.20 – Médias de identificação para diferentes tamanhos de janelas de dados do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE.	205
Figura 5.21 – Comparativo das médias de identificação nas Fases I e II do Shear Building.	207
Figura 5.22 – Comparativo das análises da Pá Eólica com e sem as menores massas.	208

Figura 5.23 – Representação gráfica da Tabela 5.18.....	218
Figura 5.24 – Representação gráfica da Tabela 5.19.....	218
Figura 5.25 – Representação gráfica da Tabela 5.27.....	227
Figura A.1 – Modelo de nomenclatura padronizada dos arquivos de dados (.mat).	247
Figura B.1 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e a estrutura intacta.	253
Figura B.2 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 0,5 kg no 10º andar.	253
Figura B.3 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 1 kg no 10º andar.	254
Figura B.4 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 2 kg no 10º andar.	254
Figura B.5 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 10º andar.	254
Figura B.6 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 6 kg no 10º andar.	255
Figura B.7 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.	255
Figura B.8 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 0,5 kg no 10º andar.	255
Figura B.9 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 1 kg no 10º andar.	256

Figura B.10 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 2 kg no 10º andar.	256
Figura B.11 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 5 kg no 10º andar.	256
Figura B.12 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 6 kg no 10º andar.	257
Figura B.13 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 8º andar.	257
Figura B.14 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 6º andar.	257
Figura B.15 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 4º andar.	258
Figura B.16 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 2º andar.	258
Figura B.17 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.	259
Figura B.18 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 130 g no 9º andar.	259
Figura B.19 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 220 g no 9º andar.	259

Figura B.20 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 500 g no 9º andar.	260
Figura B.21 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 1 kg no 9º andar.	260
Figura B.22 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 2 kg no 9º andar.	260
Figura B.23 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 3 kg no 9º andar.	261
Figura B.24 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 5 kg no 9º andar.	261
Figura B.25 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 6 kg no 9º andar.	261
Figura B.26 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e a estrutura intacta.	262
Figura B.27 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 130 g posicionada no 9º andar.	262
Figura B.28 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 220 g posicionada no 9º andar.	262
Figura B.29 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 500 g posicionada no 9º andar.	263

Figura B.30 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 1 kg posicionada no 9º andar.	263
Figura B.31 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 2 kg posicionada no 9º andar.	263
Figura B.32 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 3 kg posicionada no 9º andar.	264
Figura B.33 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 5 kg posicionada no 9º andar.	264
Figura B.34 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na direção de x, e massa de 6 kg posicionada no 9º andar.	264
Figura B.35 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e a estrutura intacta.	265
Figura B.36 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 130 g posicionada no 9º andar.	265
Figura B.37 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 220 g posicionada no 9º andar.	265
Figura B.38 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 500 g posicionada no 9º andar.	266
Figura B.39 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 1 kg posicionada no 9º andar.	266

Figura B.40 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 2 kg posicionada no 9º andar.	266
Figura B.41 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 3 kg posicionada no 9º andar.	267
Figura B.42 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 5 kg posicionada no 9º andar.	267
Figura B.43 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por <i>shaker</i> com sinal <i>CHIRP</i> senoidal na diagonal, e massa de 6 kg posicionada no 9º andar.	267
Figura B.44 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e a estrutura intacta.	268
Figura B.45 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 10 g posicionada em F.	268
Figura B.46 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 15 g posicionada em F.	268
Figura B.47 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em F.	269
Figura B.48 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 70 g posicionada em F.	269
Figura B.49 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 130 g posicionada em F.	269
Figura B.50 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em F.	270

Figura B.51 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 430 g posicionada em F.	270
Figura B.52 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em C.	270
Figura B.53 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em D.	271
Figura B.54 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em E.	271
Figura B.55 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em G.	271
Figura B.56 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em H.	272
Figura B.57 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em J.	272
Figura B.58 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em L.	272
Figura B.59 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em E.	273
Figura B.60 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em G.	273

Figura B.61 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em H.	273
Figura B.62 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em J.	274
Figura B.63 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em L.....	274
Figura B.64 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e a estrutura intacta.	274
Figura B.65 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 10 g posicionada em F.	275
Figura B.66 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 15 g posicionada em F.	275
Figura B.67 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 30 g posicionada em F.	275
Figura B.68 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 70 g posicionada em F.	276
Figura B.69 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 130 g posicionada em F.....	276
Figura B.70 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 220 g posicionada em F.....	276
Figura B.71 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 430 g posicionada em F.....	277

Figura B.72 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.	277
Figura B.73 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.	278
Figura B.74 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.	278
Figura B.75 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a massa de 500 g.	278
Figura B.76 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a massa de 500 g.	279
Figura B.77 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a massa de 500 g.	279
Figura B.78 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 12 mm.	279
Figura B.79 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 12 mm.	280
Figura B.80 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 12 mm.	280
Figura B.81 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 16 mm.	280

Figura B.82 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 16 mm.	281
Figura B.83 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 16 mm.	281
Figura B.84 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 22,5 mm.	281
Figura B.85 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 22,5 mm.	282
Figura B.86 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 22,5 mm.	282
Figura B.87 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 32 mm.	282
Figura B.88 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 32 mm.	283
Figura B.89 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 32 mm.	283
Figura B.90 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a estrutura intacta.	283
Figura B.91 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a estrutura intacta.	284

Figura B.92 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a estrutura intacta.	284
Figura B.93 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a massa de 500 g.	284
Figura B.94 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a massa de 500 g.	285
Figura B.95 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e a massa de 500 g.	285
Figura B.96 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 12 mm.	285
Figura B.97 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 12 mm.	286
Figura B.98 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 12 mm.	286
Figura B.99 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 16 mm.	286
Figura B.100 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 16 mm.	287
Figura B.101 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 16 mm.	287

Figura B.102 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 22,5 mm.	287
Figura B.103 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 22,5 mm.	288
Figura B.104 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 22,5 mm.	288
Figura B.105 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 32 mm.	288
Figura B.106 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 32 mm.	289
Figura B.107 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> , e o furo de 32 mm.	289
Figura B.108 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, para estrutura intacta.	289
Figura B.109 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, e sem rigidez na diagonais do 1º andar.....	290
Figura B.110 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, e sem rigidez na diagonais do 1º andar e do 3º andar.....	290
Figura B.111 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, e sem rigidez em uma diagonal do 1º andar.	290

Figura B.112 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, e sem rigidez em uma diagonal do 1º andar e uma diagonal do 3º andar.....	291
Figura B.113 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, e sem rigidez em uma diagonal do 1º andar, uma diagonal do 3º andar e enfraquecimento de uma conexão viga-coluna.....	291
Figura B.114 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do <i>Benchmark</i> , com excitação por <i>shaker</i> utilizando ruído branco, e sem 2/3 da rigidez de uma diagonal do 1º andar.....	291
Figura B.115 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, antes da realização dos reparos.	292
Figura B.116 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, após os reparos.	292
Figura E.1 – Massa com 9,63 g \approx 10 g.....	330
Figura E.2 – Massa com 14,93 g \approx 15 g.....	331
Figura E.3 – Massa com 29,74 g \approx 30 g.....	331
Figura E.4 – Massa com 69,17 g \approx 70 g.....	332
Figura E.5 – Massa com 130,74 g \approx 130 g.....	332
Figura E.6 – Massa com 220,12 g \approx 220 g.....	333
Figura E.7 – Massa com 428,99 g \approx 430 g.....	333
Figura E.8 – Massa com 0,468 kg \approx 0,5 kg.....	334
Figura E.9 – Massa com 0,998 kg \approx 1 kg.....	334
Figura E.10 – Massa com 2,002 kg \approx 2 kg.....	335
Figura E.11 – Massa com 4,992 kg \approx 5 kg.....	335
Figura E.12 – Massa do <i>shaker</i> e dos sargentos utilizados (4,598 kg).....	336
Figura F.1 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	337

Figura F.2 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapojada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	338
Figura F.3 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	338
Figura F.4 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	339
Figura F.5 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	339
Figura F.6 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	340
Figura F.7 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	340
Figura F.9 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapojada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	341
Figura F.10 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s.	342
Figura F.11 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s.	342
Figura F.12 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	343
Figura F.13 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	343
Figura F.14 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	344
Figura F.15 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapojada, sob excitação de impacto a cada 10s.	344
Figura F.16 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapojada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	345
Figura F.17 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	345

Figura F.18 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase II), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	346
Figura F.19 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	346
Figura F.20 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	347
Figura F.21 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	347
Figura F.22 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	348
Figura F.23 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	348
Figura F.24 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	349
Figura F.25 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building, (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	349
Figura F.26 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	350
Figura F.27 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	350
Figura F.28 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	351
Figura F.29 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	351
Figura F.30 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	352
Figura F.31 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	352

Figura F.32 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	353
Figura F.33 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	353
Figura F.34 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	354
Figura F.35 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	354
Figura F.36 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	355
Figura F.37 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	355
Figura F.38 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	356
Figura F.40 – Gráfico de tendência do da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	357
Figura F.41 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	357
Figura F.42 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	358
Figura F.43 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	358
Figura F.44 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	359
Figura F.45 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	359
Figura F.46 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	360

Figura F.47 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	360
Figura F.48 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	361
Figura F.49 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	361
Figura F.51 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	362
Figura F.52 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	363
Figura F.53 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	363
Figura F.54 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	364
Figura F.55 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	364
Figura F.57 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	365
Figura F.58 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	366
Figura F.59 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	366
Figura F.60 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	367
Figura F.61 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	367

Figura F.62 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	368
Figura F.63 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	368
Figura F.64 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	369
Figura F.65 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	369
Figura F.66 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	370
Figura F.67 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	370
Figura F.68 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.....	371
Figura F.69 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	371
Figura F.70 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	372
Figura F.71 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	372
Figura F.72 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	373
Figura F.73 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	373
Figura F.74 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	374
Figura F.75 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.....	374
Figura F.76 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	375

Figura F.77 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	375
Figura F.78 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	376
Figura F.79 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	376
Figura F.81 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	377
Figura F.82 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	378
Figura F.83 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	378
Figura F.84 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	379
Figura F.85 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	379
Figura F.86 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	380
Figura F.87 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	380
Figura F.88 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	381
Figura F.89 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	381
Figura F.90 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	382
Figura F.91 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	382

Figura F.92 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	383
Figura F.93 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	383
Figura F.94 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	384
Figura F.95 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	384
Figura F.96 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	385
Figura F.97 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	385
Figura F.98 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	386
Figura F.99 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	386
Figura F.100 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	387
Figura F.101 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	387
Figura F.102 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	388
Figura F.103 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	388
Figura F.104 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	389
Figura F.105 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.	389

Figura F.106 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	390
Figura F.107 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	390
Figura F.108 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	391
Figura F.109 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	391
Figura F.110 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	392
Figura F.111 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	392
Figura F.112 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.	393
Figura F.113 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	394
Figura F.114 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	394
Figura F.115 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.....	395
Figura F.116 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	395
Figura F.117 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	396
Figura F.118 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	396
Figura F.119 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	397

Figura F.120 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	397
Figura F.121 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	398
Figura F.122 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	398
Figura F.123 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	399
Figura F.124 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	399
Figura F.125 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	400
Figura F.126 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	400
Figura F.127 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	401
Figura F.128 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	401
Figura F.129 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	402
Figura F.130 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	402
Figura F.131 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	403
Figura F.132 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	403
Figura F.133 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	404

Figura F.134 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	404
Figura F.135 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	405
Figura F.136 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	405
Figura F.137 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	406
Figura F.138 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	406
Figura F.139 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	407
Figura F.140 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	407
Figura F.141 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	408
Figura F.142 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	408
Figura F.143 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	409
Figura F.144 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	409
Figura F.145 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	410
Figura F.146 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	410
Figura F.147 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	411

Figura F.148 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	411
Figura F.149 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	412
Figura F.150 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	412
Figura F.151 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	413
Figura F.152 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	413
Figura F.153 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	414
Figura F.154 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	414
Figura F.155 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	415
Figura F.156 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	415
Figura F.157 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	416
Figura F.158 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	416
Figura F.159 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	417
Figura F.160 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	417
Figura F.161 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	418
Figura F.162 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	418

Figura F.163 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	419
Figura F.164 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	419
Figura F.165 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	420
Figura F.166 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	420
Figura F.167 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	421
Figura F.169 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	422
Figura F.170 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	422
Figura F.171 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.....	423
Figura F.172 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	423
Figura F.173 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s. ...	424
Figura F.174 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	424
Figura F.175 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	425

Figura F.176 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	425
Figura F.177 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	426
Figura F.178 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.....	426
Figura F.179 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	427
Figura F.180 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s. ...	427
Figura F.181 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	428
Figura F.182 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	428
Figura F.183 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	429
Figura F.184 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	429
Figura F.185 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	430
Figura F.186 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	430
Figura F.187 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	431

Figura F.188 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	431
Figura F.190 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	432
Figura F.191 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	433
Figura F.192 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	433
Figura F.193 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	434
Figura F.194 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.....	434
Figura F.195 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	435
Figura F.196 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	435
Figura F.197 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	436
Figura F.198 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	436
Figura F.199 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	437
Figura F.200 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	437
Figura F.201 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	438
Figura F.202 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	438
Figura F.203 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	439

Figura F.204 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	439
Figura F.205 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	440
Figura F.206 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	440
Figura F.207 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	441
Figura F.208 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	441
Figura F.209 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	442
Figura F.210 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	442
Figura F.211 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	443
Figura F.212 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	443
Figura F.213 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	444
Figura F.214 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	444
Figura F.215 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	445
Figura F.216 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	445
Figura F.217 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	446

Figura G.1 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	447
Figura G.2 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	448
Figura G.3 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	448
Figura G.4 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	449
Figura G.5 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	449
Figura G.6 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	450
Figura G.7 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	450
Figura G.8 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	451
Figura G.9 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	451
Figura G.10 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s...	452
Figura G.11 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s...	452
Figura G.12 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	453
Figura G.13 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	453
Figura G.14 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	454
Figura G.15 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	454

Figura G.16 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	455
Figura G.17 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	455
Figura G.18 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase II), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	456
Figura G.19 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	456
Figura G.20 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	457
Figura G.21 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	457
Figura G.22 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.....	458
Figura G.23 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	458
Figura G.24 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	459
Figura G.25 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building, (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	459
Figura G.26 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	460
Figura G.27 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	460
Figura G.28 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.....	461
Figura G.29 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	461

Figura G.30 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 462

Figura G.31 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 462

Figura G.32 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x. 463

Figura G.33 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.. 463

Figura G.34 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker. 464

Figura G.35 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem. 464

Figura G.36 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s. 465

Figura G.37 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 465

Figura G.38 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 466

Figura G.39 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x. 466

Figura G.40 – Gráfico de tendência do da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s. 467

Figura G.41 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker. 467

Figura G.42 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem. 468

Figura G.43 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s. 468

Figura G.44 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 469

Figura G.45 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 469

Figura G.46 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x..... 470

Figura G.47 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s. 470

Figura G.48 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker..... 471

Figura G.49 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem. 471

Figura G.50 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s. 472

Figura G.51 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 472

Figura G.52 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 473

Figura G.53 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x..... 473

Figura G.54 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s... 474

Figura G.55 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	474
Figura G.56 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	475
Figura G.57 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	475
Figura G.58 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	476
Figura G.59 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	476
Figura G.60 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	477
Figura G.61 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s...	477
Figura G.62 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	478
Figura G.63 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	478
Figura G.64 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	479
Figura G.65 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	479
Figura G.66 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	480

Figura G.67 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	480
Figura G.68 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	481
Figura G.69 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	481
Figura G.70 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	482
Figura G.71 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	482
Figura G.72 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	483
Figura G.73 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.....	483
Figura G.74 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	484
Figura G.75 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	484
Figura G.76 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	485
Figura G.77 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	485
Figura G.78 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	486
Figura G.79 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	486
Figura G.80 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	487

Figura G.81 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	487
Figura G.82 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	488
Figura G.83 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	488
Figura G.84 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	489
Figura G.85 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	489
Figura G.86 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	490
Figura G.87 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	490
Figura G.88 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	491
Figura G.89 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	491
Figura G.90 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	492
Figura G.91 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	492
Figura G.92 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	493
Figura G.93 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	493
Figura G.94 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	494

Figura G.95 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	494
Figura G.96 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	495
Figura G.97 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	495
Figura G.98 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	496
Figura G.99 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	496
Figura G.100 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	497
Figura G.101 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	497
Figura G.102 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	498
Figura G.103 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	498
Figura G.104 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	499
Figura G.105 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.	499
Figura G.106 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	500
Figura G.107 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	500

Figura G.108 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	501
Figura G.109 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	501
Figura G.110 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s...	502
Figura G.111 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	502
Figura G.112 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.	503
Figura G.113 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	503
Figura G.114 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	504
Figura G.115 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	504
Figura G.116 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	505
Figura G.117 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	505
Figura G.118 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	506
Figura G.119 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	506
Figura G.120 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	507
Figura G.121 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	507

Figura G.122 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	508
Figura G.123 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	508
Figura G.124 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	509
Figura G.125 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	509
Figura G.126 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	510
Figura G.127 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.....	510
Figura G.128 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).....	511
Figura G.129 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.....	511
Figura G.130 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	512
Figura G.131 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	512
Figura G.132 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	513
Figura G.133 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.....	513
Figura G.134 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	514
Figura G.135 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	514

Figura G.136 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 515

Figura G.137 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x..... 515

Figura G.138 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s. 516

Figura G.139 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker..... 516

Figura G.140 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem. 517

Figura G.141 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s. 517

Figura G.142 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 518

Figura G.143 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 518

Figura G.144 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x..... 519

Figura G.145 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s... 519

Figura G.146 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker. 520

Figura G.147 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem. 520

Figura G.148 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	521
Figura G.149 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	521
Figura G.150 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	522
Figura G.151 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	522
Figura G.152 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	523
Figura G.153 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	523
Figura G.154 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	524
Figura G.155 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	524
Figura G.156 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	525
Figura G.157 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	525
Figura G.158 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	526
Figura G.159 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	526
Figura G.160 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	527
Figura G.161 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	527

Figura G.162 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	528
Figura G.163 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	528
Figura G.164 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	529
Figura G.165 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	529
Figura G.166 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	530
Figura G.167 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	530
Figura G.168 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	531
Figura G.169 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.....	531
Figura G.170 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	532
Figura G.171 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	532
Figura G.172 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	533
Figura G.173 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	533

Figura G.174 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	534
Figura G.175 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.....	534
Figura G.176 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.....	535
Figura G.177 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	535
Figura G.178 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	536
Figura G.179 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	536
Figura G.180 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	537
Figura G.181 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	537
Figura G.182 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.....	538
Figura G.183 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	538
Figura G.184 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	539

Figura G.185 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	539
Figura G.186 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	540
Figura G.187 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	540
Figura G.188 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	541
Figura G.189 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	541
Figura G.190 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	542
Figura G.191 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	542
Figura G.192 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.....	543
Figura G.193 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.	543
Figura G.194 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	544
Figura G.195 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	544
Figura G.196 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	545
Figura G.197 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	545

Figura G.198 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 546

Figura G.199 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 546

Figura G.200 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x. 547

Figura G.201 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.. 547

Figura G.202 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker. 548

Figura G.203 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem. 548

Figura G.204 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s. 549

Figura G.205 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco). 549

Figura G.206 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s. 550

Figura G.207 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x. 550

Figura G.208 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s... 551

Figura G.209 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.	551
Figura G.210 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	552
Figura G.211 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.	552
Figura G.212 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).	553
Figura G.213 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.	553
Figura G.214 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.....	554
Figura G.215 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.	554
Figura G.216 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.....	555
Figura G.217 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.	555

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Exemplo de falhas em pontes e suas causas.	1
Tabela 2.1 – Propriedades extraídas dos sinais do sensor piezoelétrico.	15
Tabela 2.2 – Resumo das pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica por tipo de abordagem.	51
Tabela 3.1 – Parâmetros de posição utilizados na metodologia do presente trabalho....	94
Tabela 3.2 – Parâmetros de dispersão utilizados na metodologia do presente trabalho. 95	
Tabela 3.3 – Parâmetros de forma utilizados na metodologia do presente trabalho.	95
Tabela 3.4 – Parâmetros separatrizes utilizados na metodologia do presente trabalho.. 96	
Tabela 3.5 – Parâmetros para dados agrupados por classe utilizados na metodologia do presente trabalho.....	96
Tabela 3.6 – Tabela de Análise de Variância (ANOVA).	100
Tabela 3.7 – Distribuição de <i>Fisher-Snedecor</i> – Valores de $F_{critico}$ tais que $p(F \geq F_{critico}) = 0,05$, com $F_{V1,V2}$	104
Tabela 3.8 – Dados considerados no exemplo do agrupamento por <i>Scott-Knott</i>	105
Tabela 3.9 – Métricas de similaridade.	111
Tabela 3.10 – Matriz de similaridade da primeira iteração do exemplo do <i>k-means</i>	113
Tabela 3.11 – Matriz de similaridade da segunda iteração do exemplo do <i>k-means</i>	114
Tabela 4.1 – Dados dos dispositivos de excitação e medição usados na fase I do <i>Shear Building</i>	122
Tabela 4.2 – Identificação dos arquivos dados do ensaio da fase I do <i>Shear Building</i> . 124	
Tabela 4.3 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural do <i>Shear Building</i> – Fase I.....	126
Tabela 4.4 – Dados dos dispositivos de medição usados na fase II do <i>Shear Building</i> , excitado através do <i>shaker</i>	132
Tabela 4.5 – Identificação dos dados do ensaio de impacto da fase II do <i>Shear Building</i>	134
Tabela 4.6 – Identificação dos dados do ensaio de <i>shaker</i> da fase II do <i>Shear Building</i>	135

Tabela 4.7 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural do <i>Shear Building</i> – Fase II.	137
Tabela 4.8 – Modos, frequências e taxas de amortecimento do <i>Shear Building</i> na Fase I.	139
Tabela 4.9 – Modos, frequências e taxas de amortecimento do <i>Shear Building</i> Fase II.	141
Tabela 4.10 – Dados dos acelerômetros usados no ensaio da pá eólica.	150
Tabela 4.11 – Identificação dos dados do ensaio da pá eólica no dia 14/03/2025.	153
Tabela 4.12 – Identificação dos dados do ensaio da pá eólica no dia 15/03/2025.	154
Tabela 4.13 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural da Pá Eólica. ...	155
Tabela 4.14 – Coordenadas e pontos de impacto para a análise modal da pá ($z=0$). ...	156
Tabela 4.15 – Modos, frequências e taxas de amortecimento obtidos para a pá eólica.	157
Tabela 4.16 – Matriz MAC.	159
Tabela 4.17 – Características da viga de aço e das aquisições de dados.	160
Tabela 4.18 – Tipos de danos provocados na estrutura.	161
Tabela 4.19 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural da Viga Biapoiada.	163
Tabela 4.20 – Identificação dos dados de análise quanto aos estados estruturais do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE.	169
Tabela 4.21 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE.	171
Tabela 4.22 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural da Ponte Ferroviária KW51.	178
Tabela 5.1 – Características das análises principais.	180
Tabela 5.2 – Tempo de processamento do algoritmo de cálculo dos parâmetros.	181
Tabela 5.3 – Valores mínimos, máximos e a amplitude registrada nas acelerações das estruturas.	193
Tabela 5.4 – Características das análises secundárias.	194

Tabela 5.5 – Comparativo da efetividade dos parâmetros no domínio do tempo na identificação dos estados de dano, por estrutura analisada.	196
Tabela 5.6 - Comparativo da efetividade dos parâmetros no domínio da frequência na identificação dos estados de dano, por estrutura analisada.	197
Tabela 5.7 – Parâmetros, por estrutura, que obtiveram 100% de acerto na classificação dos estados de dano.	198
Tabela 5.8 – Descrição da análise comparativa entre diferentes janelas de dados do <i>Benchmark</i> IASC-ASCE.	204
Tabela 5.9 – Características das análises comparativas considerando dois estados estruturais.....	209
Tabela 5.10 – Parâmetros com desempenho consistente nas análises com variações leves em danos leves, falhando em apenas uma estrutura.	210
Tabela 5.11 – Parâmetros com desempenho consistente nas análises com variações leves em danos severos, falhando em apenas uma estrutura.	212
Tabela 5.12 – Parâmetros com identificação quase completa para variações acentuadas.	213
Tabela 5.13 – Características das análises para identificação de falsos positivos.....	214
Tabela 5.14 – Percentual de incidência de FP por estrutura.....	215
Tabela 5.16 – Percentual de incidência de FP por quantidade de ensaios utilizados... ..	215
Tabela 5.17 – Percentual de incidência de FP por severidade de dano.	215
Tabela 5.18 – Resumo das médias de identificação no domínio do tempo.....	217
Tabela 5.19 – Resumo das médias de identificação, no domínio da frequência.	218
Tabela 5.20 – Relação de Parâmetros com melhor desempenho da identificação entre dois estados de dano.....	220
Tabela 5.21 – Propostas de conjuntos de parâmetros para uso em classificação estrutural.	221
Tabela 5.22 – Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para o <i>Benchmark</i> (acelerômetro 16).....	223
Tabela 5.23 - Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para o <i>Benchmark</i> IASC-ASCE (acelerômetro 1).	224

Tabela 5.24 - Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para o <i>Shear Building</i> – Fase I, sob impacto a cada 10s.	224
Tabela 5.25 - Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para a Ponte Ferroviária KW51.....	224
Tabela 5.26 – Resumo dos parâmetros analisados.	226
Tabela 5.27 – Resumo do desempenho de diversos parâmetros propostos.....	226
Tabela A.1 – Identificação dos dados particionados do <i>Shear Building</i> Fase I.	248
Tabela A.2 – Identificação dos dados particionados do <i>Shear Building</i> Fase II.....	249
Tabela A.3 - Identificação dos dados particionados da Pá Eólica.....	250
Tabela A.4 - Identificação dos dados particionados da Viga Biapoiada.	251
Tabela A.5 – Identificação dos dados particionados do <i>Benchmark</i>	251
Tabela A.6 – Identificação dos dados da Ponte.....	252
Tabela C.1 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo da Viga Biapoiada, sob excitação por impacto.	294
Tabela C.2 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência da Viga Biapoiada, sob excitação por impacto.....	295
Tabela C.3 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo da Viga Biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> (ruído branco).....	296
Tabela C.4 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência da Viga Biapoiada, sob excitação por <i>shaker</i> (ruído branco).....	297
Tabela C.5 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo do <i>Shear Building</i> – Fase I, sob excitação por impacto.....	298
Tabela C.6 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência do <i>Shear Building</i> – Fase I, sob excitação por impacto.....	299
Tabela C.7 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo do <i>Shear Building</i> – Fase II.....	300
Tabela C.8 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência do <i>Shear Building</i> – Fase II.	301
Tabela C.9 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo da Pá Eólica, sob excitação por impacto.	302

Tabela C.10 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência da Pá Eólica, sob excitação por impacto.	303
Tabela C.11 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo e da frequência do Benchmark, sob excitação por <i>shaker</i> (ruído branco).....	304
Tabela C.12 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo e da frequência da Ponte Ferroviária KW51, sob excitação pela passagem de trem. ..	305
Tabela C.13 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo, nas principais análises de estruturas excitadas por impacto.	306
Tabela C.14 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência, nas principais análises de estruturas excitadas por impacto.	307
Tabela C.15 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo, nas principais análises de estruturas excitadas por <i>shaker</i>	308
Tabela C.16 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência, nas principais análises de estruturas excitadas por <i>shaker</i>	309
Tabela C.17 – Comparativo dos resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo, quanto ao tempo entre impactos.	310
Tabela C.18 – Comparativo dos resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência, quanto ao tempo entre impactos.	311
Tabela C.19 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo, considerando estados de dano associados à variação da posição das massas.	312
Tabela C.20 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência, considerando estados de dano associados à variação da posição das massas.	313
Tabela C.21 – Comparativo dos resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo, quanto as janelas de recortes dos dados do <i>Benchmark</i>	314
Tabela C.22 – Comparativo dos resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência, quanto as janelas de recortes dos dados do <i>Benchmark</i>	315
Tabela C.23 – Comparativo entre resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo, das fases I e II do <i>Shear Building</i>	316
Tabela C.24 – Comparativo entre resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio da frequência, das fases I e II do <i>Shear Building</i>	317

Tabela C.25 – Comparativo dos resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para os parâmetros no domínio do tempo e da frequência, da Pá Eólica com e sem as menores massas.	318
Tabela C.26 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para identificação de pequenas variações em estados com danos leves, considerando parâmetros no domínio do tempo.....	319
Tabela C.27 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para identificação de pequenas variações em estados com danos leves, considerando parâmetros no domínio da frequência.	320
Tabela C.28 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para identificação de pequenas variações em estados com danos severos, considerando parâmetros no domínio do tempo.	321
Tabela C.29 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para identificação de pequenas variações em estados com danos severos, considerando parâmetros no domínio da frequência.	322
Tabela C.30 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para identificação de grandes variações entre estados danos, considerando parâmetros no domínio do tempo.....	323
Tabela C.31 – Resultados do teste <i>Scott-Knott</i> para identificação de grandes variações entre estados danos, considerando parâmetros no domínio da frequência.	324
Tabela C.32 – Avaliação da taxa de falsos positivos do teste <i>Scott-Knott</i> , considerando parâmetros no domínio do tempo.	325
Tabela C.33 – Avaliação da taxa de falsos positivos do teste <i>Scott-Knott</i> , considerando parâmetros no domínio da frequência.	326
Tabela D.1 – Resultados dos grupos de parâmetros por <i>k-means</i> – parte 1.....	328
Tabela D.2 - Resultados dos grupos de parâmetros por <i>k-means</i> – parte 2.....	329

LISTA DE ABREVIACÕES

acc	Acelerômetro;
gdl	Grau de Liberdade;
gs	Grau de similaridade;
mín.	Mínimo;
máx.	Máximo;
ADIC.	Adicionada;
Cat.	Categoria, ou intervalo de frequência de dados;
FREQ.	Frequência;
Id	Identificador da análise;
PAR.	Parâmetro;
QUANT.	Quantidade;
Trat	Tratamento;
Tot	Total.

LISTA DE SIGLAS

ACE	<i>American Society of Civil Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Civis);
ADS	Análise de Dados Simbólicos;
AED	Análise Exploratória de Dados;
ANN	<i>Artificial Neural Network</i> (Rede Neural Artificial);
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância);
BDC	Classificador baseado na Distribuição Binomial;
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador);
CB	<i>Confidence Boundary</i> (Limite de Confiança);
CET	<i>Central European Time</i> (Horário da Europa Central);
CI	Cerca Inferior;
CMIF	<i>Complex Mode Indicator Function</i> (Funções Complexas Indicadoras de Modo);
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i> (Rede Neural Convolucional);
COMAC	<i>Co-ordinate Modal Assurance Criterion</i> (Critério de garantia modal coordenada);
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia;
CS	Cerca Superior;
CV	Coefficiente de variação de Pearson;
DAQ	Sistema Modular de Aquisição de Dados;
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> (Transformada Discreta de Fourier);
DI	Índice de Dano;
DIM-MSE	<i>Damage Indicator Method – Modal Strain Energy</i> (Método Indicador de Dano – Energia de Deformação Modal);
DM	Desvio médio;
DRAM	<i>Delayed Rejection Adaptive Metropolis</i> (Método Metropolis Adaptativo com Rejeição Retardada);

DT	Árvore de Decisão;
EUA	Estados Unidos da América;
ENC	Escola de Engenharia Civil e Ambiental;
END	Ensaio não destrutivo;
ENM	Departamento de Engenharia Mecânica;
F	Parâmetros provenientes de acelerações no domínio da frequência;
FACENG	Faculdade de Engenharia;
FCTE	Faculdade de Ciências e Tecnologia em Engenharia;
FDD	<i>Frequency Domain Decomposition</i> (Decomposição no Domínio da Frequência);
FDI	<i>First Outlier Detection Index</i> (Primeiro índice de detecção de valores discrepantes);
FDP	Função de Densidade de Probabilidade;
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise por Elementos Finitos);
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier);
FP	Falso Positivo;
FRFs	Funções de Resposta em Frequência;
F-SD	Desvio Padrão no domínio da Frequência;
FT	Faculdade de Tecnologia;
FV	Fonte de Variação;
G	Variações leves em danos severos;
GDS	Grupo de Dinâmica de Vibração ou <i>Geotechnical Digital Systems</i> (Sistemas Digitais Geotécnicos);
GL	Grau de Liberdade;
GRU	Gated Recurrent Unit (Unidade Recorrente com Portão);
I	Variações acentuadas;
IASC	<i>International Association for Structural Control and Monitoring</i> (Associação Internacional de Controle e Monitoramento Estrutural);

IQR	<i>Interquartile Range</i> (Intervalo Interquartil);
IQRM	<i>Interquartile Range and Median</i> (Intervalo Interquartil e Mediana);
LANL	Laboratório Nacional de Los Alamos;
LV	Laboratório de Vibração;
LVQ	<i>Learning Vector Quantization</i> (Quantização Vetorial Supervisionada);
LSTM	<i>Long Short-Term Memory</i> (Memória de Curto e Longo Prazo);
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i> (Critério de Garantia Modal);
MCMC	Monte Carlo em Cadeias de Markov;
MEF	Método dos Elementos Finitos;
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i> (Neurônios de multicamadas);
NI	<i>Novelty Index</i> (Índice de Novidade);
NMS	Número Mínimo Significativo;
P	Estados de dano leve com variações leves;
PAR	Parâmetros estatísticos;
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análise de componentes principais);
PFA	Probabilidade efetiva de Falso Alarme;
POD	Probabilidade efetiva de Detecção;
PRFC	Polímero reforçado com fibra de carbono;
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro;
QM	Quadrado Médio;
ReTiA-SHM	<i>Real-Time Automated Structural Health Monitoring</i> (Monitoramento Automatizado da Saúde Estrutural em Tempo Real);
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raiz Quadrada da Média);
RNA	Redes Neurais Artificiais;
SDI	<i>Second Outlier Detection Index</i> (Segundo índice de detecção de valores discrepantes);
SDO	<i>Symbolic Data Object</i> (Objeto de Dados Simbólicos);

SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> (Monitoramento da Saúde Estrutural);
SID-G	Sistema de Identificação de Danos não-linear <i>Goal Programming</i> ;
SOM	<i>Self-Organizing Maps</i> (Mapas auto-organizáveis);
SQ	Soma dos Quadrados;
SVM	<i>Support Vector Machine</i> (Máquina de Vetor Suporte);
T	Parâmetros proveniente de acelerações no domínio do tempo;
TF-IQRM	<i>Time-Frequency Interquartile Range and Median</i> (Intervalo Interquartil e Mediana no domínio do Tempo e da Frequência);
TMCMC	<i>Transitional Markov Chain Monte Carlo</i> (Monte Carlo em Cadeias de Markov Trasicional);
UBC	University of British Columbia (Universidade de British Columbia);
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora;
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro;
UNB	Universidade de Brasília;
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> (Tempo Universal Coordenado).

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Valor no qual os momentos são centrados ou grupos de tratamentos estatisticamente diferentes identificados com base no teste de comparação múltipla <i>Scott-Knott</i> .
d_q	Amplitude interquartil ou Distância interquartil;
f	Frequência em Hz;
f_i	Frequência de valores em um intervalo de classe i ;
h	Amplitude constante entre os intervalos de classe da distribuição de frequências ou ADS, ou largura da classe;
i	Índice dos valores do conjunto de dados;
k	Número de tratamentos ou <i>clusters</i> (grupos de ensaios por estado de dano) ou Número de classes da distribuição de frequências (ADS) ou número de <i>Sturges</i> ;
m_d	Mediana ou Segundo quartil;
m_r	Momentos de distribuição de ordem r ;
n	Número total de acelerações registradas no ensaio ou Número de parâmetros analisados por ensaio no <i>k-means</i> ;
n_a	Número de acelerômetros;
n_A, n_B	Número de elementos no subconjunto A e B;
n_d	Número de estados estruturais considerados;
n_{e_i}	Número total de ensaios do grupo i ;
p	Proporção p qualquer ou o parâmetro de <i>Minkowski</i> que assume valores inteiros;
q_i	Quartil inferior;
q_s	Quartil superior;
r	Ordem do momento de distribuição ou a média harmônica do número de repetições por tratamento;
x_i	Observação i em um conjunto de dados (aceleração);

x_{ij}	J-ésimo valor extraído de um conjunto de acelerações do tratamento i , sendo que j varia até o número de ensaios analisados;
x_o	Conjunto com valores em ordem crescente;
$x_{o(n)}$	Enésimo elemento de um conjunto de dados ordenados de forma crescente;
$x_{l_mín}$	Menor valor entre os dados da classe considerada;
$x_{l_máx}$	Maior valor entre os dados da classe considerada;
w_i	Peso atribuído aos valores;
A_Q	Coefficiente quartílico de assimetria ou Coeficiente de Bowley;
AS_1	Primeiro coeficiente de Pearson;
AS_2	Segundo coeficiente de Person;
C^i	i -ésimo subconjunto da partição em grupos realizada por um algoritmo de <i>cluster</i> ou do método <i>Scott-Knott</i> ;
E_i, E_j	Ensaio dinâmicos;
\bar{E}_i, \bar{E}_j	Média dos ensaios dinâmicos;
F	Vetor de forças;
$F_{(V1,V2)}$	Distribuição F (<i>Fisher-Snedecor</i>);
F_c	Valor da estatística F calculado com os dados da amostra;
$F_{crítico}$	Valor crítico de F, valor da distribuição F correspondente ao nível de significância escolhido;
F_{CR}	Fator de crista;
F_i	Frequência acumulada da classe i ;
F_k	Fator K;
$F_{V1,V2}$	Estatística F calculada (<i>Fisher-Snedecor</i>), com $k-1$ e $N-k$;
H_0	Hipótese nula;
H_1	Hipótese alternativa;
L_i	Limite inferior da classe de distribuição de frequência;
$L_{mín}$	Limite inferior de um conjunto de dados;

$L_{\text{máx}}$	Limite superior de um conjunto de dados;
L_s	Limite superior da classe de distribuição de frequência;
M_o	Moda;
N	Somatório total de observações (ensaios) entre os tratamentos analisados;
P_a, P_b	Percentil de proporção a ou b;
P_e	Coefficiente percentílico de curtose;
Q_1	Primeiro quartil;
Q_2	Segundo quartil ou Mediana;
Q_3	Terceiro quartil;
Q_{AB}	Função objetivo a ser maximizada pelo método <i>Scott-Knott</i> ;
$Q_{(p)}$	Quantil de ordem p;
V_1	Grau de liberdade entre grupos ou tratamentos;
V_2	Grau de liberdade dentro dos grupos ou erro;
$X_{\text{máx}}$	Amplitude total ou Intervalo total dos dados;
X_{pico}	Amplitude de pico;
\bar{X}	Média aritmética simples;
\bar{X}_A, \bar{X}_B	Média aritmética do subconjunto dos valores do subconjunto A e do subconjunto B;
\bar{X}_i	Média aritmética simples dos dados do grupo i;
\bar{X}_g	Média geométrica;
\bar{X}_h	Média harmônica;
\bar{X}_I	Média do intervalo ou Ponto médio;
\bar{X}_p	Média aritmética ponderada;
\bar{X}_Q	Intervalo semi quartílico ou <i>Midhinge</i> ;
\bar{X}_{rms}	Raiz quadrada da média;
\bar{X}_{sq}	Média dos quadrados dos valores;
\tilde{X}	Mediana ou Segundo quartil;

α	Nível de significância (%);
δ	Número de repetições por estado de dano;
γ_3	Coefficiente de momento de Assimetria;
γ_4	Coefficiente de momento de Curtose;
γ_6	Coefficiente do momento central de 6ª ordem;
μ_k	Média populacional do tratamento k;
σ	Desvio padrão;
σ^2	Variância;
ω	Frequência angular (rad/s);
Δ_i	Amplitude de um intervalo de classe;
Δ_p	Amplitude de percentis;
Π	Produto de uma sequência de termos;
Σ	Somatório de uma sequência de termos;
Ω	Conjunto de dados simbólicos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3	JUSTIFICATIVA	5
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	HISTÓRICO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS BASEADOS EM DADOS DINÂMICOS.....	7
2.2	ORGANIZAÇÃO DAS PESQUISAS POR TIPOS DE ABORDAGEM.....	51
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	59
3.1	INDICADORES ESTATÍSTICOS DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADOS EM SINAIS DE ACELERAÇÃO.....	61
3.1.1	Distribuição de Frequências por Intervalos.....	63
3.1.2	Medidas Estatísticas Descritivas	66
3.1.2.1	Medidas de Localização ou de Tendência Central	67
3.1.2.2	Medidas Separatrizes ou Quantis	70
3.1.2.3	Medidas de Variação ou Dispersão	73
3.1.2.4	Medidas de Forma	76
3.1.2.5	Medidas para Dados Agrupados em Classes.....	81
3.1.3	Transformações dos Dados.....	85
3.1.3.1	Transformada de Fourier	86
3.1.4	Análise Exploratória dos Dados	88
3.1.4.1	Resumo de Cinco Números	88
3.1.4.2	Diagrama em Caixas (<i>Boxplots</i>).....	88
3.1.5	Resumo dos Indicadores de Danos Implementados	91
3.2	TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO DE DADOS.....	97

3.2.1	<i>Scott-Knott</i>	98
3.2.1.1	ANOVA.....	100
3.2.1.2	Teste F	103
3.2.1.3	Exemplo Numérico de Agrupamento com <i>Scott-Knott</i>	105
3.2.2	<i>K-means</i>	110
3.2.2.1	CrITÉRIOS de Inicialização de Centroides.....	111
3.2.2.2	Medidas de Dissimilaridade	111
3.2.2.3	Exemplo Numérico de Agrupamento com <i>K-means</i>	112
4	ESTRUTURAS ANALISADAS.....	115
4.1	SHEAR BUILDING.....	115
4.1.1	Ensaio Dinâmico.....	118
4.1.1.1	Fase I.....	119
4.1.1.2	Fase II	126
4.1.2	Ensaio Modal.....	137
4.1.2.1	Fase I.....	138
4.1.2.2	Fase II	141
4.2	PÁ EÓLICA	144
4.2.1	Ensaio Dinâmico.....	147
4.2.2	Ensaio Modal.....	156
4.3	VIGA BIAPOIADA	160
4.4	BENCHMARK IASC-ASCE.....	164
4.5	PONTE FERROVIÁRIA KW51	172
5	RESULTADOS	179
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS BRUTOS	185
5.2	AGRUPAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO <i>SCOTT-KNOTT</i>	193
5.2.1	Comparação por Estrutura Analisada.....	194
5.2.2	Comparação por Tipo de Excitação.....	198

5.2.3	Comparação por Intervalo entre Impactos.....	200
5.2.4	Comparação por Número de Repetições	201
5.2.5	Comparação por Posição da Massa	203
5.2.6	Comparação por Tamanho das Janelas de Dados.....	204
5.2.7	Comparação com Remoção das Menores Massas.....	207
5.2.8	Comparação entre Dois Estados Estruturais.....	208
5.2.8.1	Variações Leves com Danos Leves	209
5.2.8.2	Variações Leves com Danos Severos	211
5.2.8.3	Variações Acentuadas.....	212
5.2.9	Análise de Falsos Positivos	214
5.3	ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS.....	216
5.4	SELEÇÃO DE PARÂMETROS PROPOSTA.....	217
5.5	AGRUPAMENTO PELO MÉTODO <i>K-MEANS</i>	222
5.5.1	COMPARATIVO ENTRE GRUPOS DE PARÂMETROS PROPOSTOS 223	
5.5.2	COMPARATIVO COM PARÂMETROS PROPOSTOS POR OUTROS AUTORES.....	225
6	CONCLUSÕES	229
6.1	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	231
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	231
7	REFERÊNCIAS	233
APÊNDICE A	IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS PARTICIONADOS	247
APÊNDICE B	BOXPLOTS DAS ACELERAÇÕES DAS ESTRUTURAS	253
B.1.	SHEAR BUILDING – FASE I.....	253
B.1.1.	Impacto (20 s) – Variando quantidade de massa (10º andar)	253
B.1.2.	Impacto (10s) – Variando quantidade de massa (10º andar)	255
B.1.3.	Impacto (20 s) – Variando local da massa (5 kg)	257

B.2.	SHEAR BUILDING – FASE II	259
B.2.1.	Impacto (10 s) – Variando quantidade de massa (9º andar)	259
B.2.2.	<i>Shaker</i> em X – Variando quantidade de massa (9º andar).....	262
B.2.3.	<i>Shaker</i> Diagonal – Variando quantidade de massa (9º andar).....	265
B.3.	PÁ EÓLICA	268
B.3.1.	Impacto (10 s) – Variando quantidade de massa (F)	268
B.3.2.	Impacto (10 s) – Variando local da massa (30 g)	270
B.3.3.	Impacto (10 s) – Variando local da massa (220 g)	273
B.3.4.	Impacto (20 s) – Variando quantidade de massa (F)	274
B.4.	VIGA BIAPOIADA	277
B.4.1.	Impacto – Variando massa e furos	277
B.4.2.	<i>Shaker</i> – Variando massa e furos	283
B.5.	BENCHMARK.....	289
B.6.	PONTE FERROVIÁRIA KW51	292
APÊNDICE C	ANÁLISES REALIZADAS COM O <i>SCOTT-KNOTT</i>	293
APÊNDICE D	ANÁLISES REALIZADAS COM O <i>K-MEANS</i>	327
APÊNDICE E	MASSAS ADICIONADAS ÀS ESTRUTURAS NOS ENSAIOS..	330
APÊNDICE F	ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS NO DOMÍNIO DO TEMPO	337
F.1.	PARÂMETROS SEPARATRIZES	337
F.1.1.	Extremo Mínimo.....	337
F.1.2.	Extremo Máximo.....	341
F.1.3.	Primeiro Quartil.....	344
F.1.4.	Terceiro Quartil	348
F.2.	PARÂMETROS DE POSIÇÕES OU TENDÊNCIA CENTRAL	351
F.2.1.	Média Aritmética.....	351
F.2.2.	Média Harmônica	355

F.2.3.	Média Geométrica	358
F.2.4.	Média dos Quadrados dos Valores	362
F.2.5.	Raiz Quadrada da Média	365
F.2.6.	Mediana ou Segundo Quartil.....	369
F.2.7.	Moda.....	372
F.2.8.	Ponto Médio	376
F.3.	PARÂMETROS DE DISPERSÃO	379
F.3.1.	Amplitude de Pico	379
F.3.2.	Amplitude Total.....	383
F.3.3.	Amplitude Interquartil	386
F.3.4.	Amplitude de Percentis.....	390
F.3.5.	Intervalo Semi Quartílico ou Midhinge.....	394
F.3.6.	Desvio Médio	397
F.3.7.	Variância.....	401
F.3.8.	Desvio Padrão.....	404
F.3.9.	Coefficiente de Variação.....	408
F.4.	PARÂMETROS DE FORMA.....	411
F.4.1.	Assimetria.....	411
F.4.2.	Curtose.....	415
F.4.3.	Coefficiente do Momento de Sexta Ordem	418
F.4.4.	Coefficiente Quartílico de Assimetria	422
F.4.5.	Coefficiente Percentílico de Curtose	425
F.4.6.	Fator de Crista	429
F.4.7.	Fator K.....	432
F.4.8.	Primeiro Coeficiente de Pearson	436
F.4.9.	Segundo Coeficiente de Pearson	439
F.5.	ADS	442

APÊNDICE G	análise de tendência dos parâmetros no DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	447
G.1.	PARÂMETROS SEPARATRIZES	447
G.1.1.	Extremo Mínimo.....	447
G.1.2.	Extremo Máximo.....	451
G.1.3.	Primeiro Quartil.....	454
G.1.4.	Terceiro Quartil	458
G.2.	PARÂMETROS DE POSIÇÕES OU TENDÊNCIA CENTRAL	461
G.2.1.	Média Aritmética.....	461
G.2.2.	Média Harmônica	465
G.2.3.	Média Geométrica	468
G.2.4.	Média dos Quadrados dos Valores	472
G.2.5.	Raiz Quadrada da Média	475
G.2.6.	Mediana ou Segundo Quartil.....	479
G.2.7.	Moda.....	482
G.2.8.	Ponto Médio	486
G.3.	PARÂMETROS DE DISPERSÃO	489
G.3.1.	Amplitude de Pico	489
G.3.2.	Amplitude Total.....	493
G.3.3.	Amplitude Interquartil	496
G.3.4.	Amplitude de Percentis.....	500
G.3.5.	Intervalo Semi Quartílico ou Midhinge.....	503
G.3.6.	Desvio Médio	507
G.3.7.	Variância.....	510
G.3.8.	Desvio Padrão.....	514
G.3.9.	Coeficiente de Variação.....	517
G.4.	PARÂMETROS DE FORMA.....	521

G.4.1.	Assimetria.....	521
G.4.2.	Curtose.....	524
G.4.3.	Coeficiente do Momento de Sexta Ordem	528
G.4.4.	Coeficiente Quartílico de Assimetria	531
G.4.5.	Coeficiente Percentílico de Curtose	535
G.4.6.	Fator de Crista	538
G.4.7.	Fator K.....	542
G.4.8.	Primeiro Coeficiente de Pearson	545
G.4.9.	Segundo Coeficiente de Pearson	549
G.5.	ADS	552

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de engenharia civil são projetadas com uma vida útil definida, mas muitas permanecem em operação mesmo após esse período, especialmente em áreas urbanas envelhecidas. O alto custo de substituição de grandes obras de infraestrutura leva à continuidade de seu uso, muitas vezes sem a devida manutenção preventiva. Essa negligência pode resultar em falhas estruturais graves, como demonstrado por Soares (2022), cujos exemplos estão ilustrados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Exemplo de falhas em pontes e suas causas.

Ponte	Localização	Ano	Causa
Ponte do rio Mianus	EUA	1983	Corrosão do metal e fadiga
Viaduto da rua Cypress	EUA	1989	Terremoto
Ponte Seongsu	Coréia do Norte	1994	Falha estrutural: defeito na solda
Ponte Tarcoles	Costa Rica	2009	Sobrecarga devido a caminhões pesados
Myllysilta	Finlândia	2010	Inclinação devido à falha nos pilares
Ponte Gongguan	China	2011	Sobrecarga
Ponte Skjeggstad	Noruega	2015	Deslocamento de pilar
Viaduto Vivekananda	Índia	2016	Ligação seção e pilar
Viaduto no Eixão Sul	Brasília (Brasil)	2018	Deterioração da estrutura/falta de manutenção

Fonte: Soares, 2022.

A exposição ambiental, as solicitações de uso contínuo (normais ou de sobrecarga) e eventos extremos contribuem inevitavelmente para a deterioração das estruturas (FARRAR; WORDEN, 1975; NOZARI et al., 2017). Essa degradação pode assumir diversas formas — como corrosão, fadiga, fluência, retração e erosão — e é agravada quando não se identifica precocemente os danos (SANAYEI et al., 2015). Nesse cenário, torna-se fundamental adotar estratégias de manutenção preditiva, com monitoramento contínuo do desempenho estrutural, a fim de prolongar a vida útil das construções, evitar colapsos, preservar vidas humanas e reduzir os custos de intervenções corretivas (REN; PENG, 2005; DACKERMANN et al., 2014, 2018; ABDELJABER et al., 2017).

Nas últimas décadas, governos e instituições de pesquisa vêm priorizando a conservação de infraestruturas existentes, reconhecendo sua importância estratégica para o desenvolvimento socioeconômico e o impacto orçamentário de sua substituição (SOBRINHO, 2021). Métodos tradicionais de inspeção visual e ensaios localizados — como testes ultrassônicos, magnéticos e térmicos —, apesar de economicamente viáveis, apresentam limitações importantes: não quantificam diretamente o desempenho estrutural

e dependem do acesso à vizinhança do dano. Casos como o colapso da ponte Hintze Ribeiro, em Portugal (Figura 1.1), ilustram as falhas desses métodos, uma vez que a estrutura passou por inspeções regulares sem que fossem detectadas alterações significativas (BRANCO, 2013).

Figura 1.1 – Ponte Hintze Ribeiro após o colapso.



Fonte: Branco, 2013.

Para superar essas limitações, o Monitoramento da Integridade Estrutural (Structural Health Monitoring – SHM) tem sido desenvolvido como uma solução mais robusta, utilizando ensaios não destrutivos (END) e sensores capazes de medir grandezas relacionadas ao comportamento mecânico da estrutura. O SHM permite o diagnóstico contínuo do estado estrutural por meio da aquisição, processamento e análise de dados como aceleração, deslocamento e deformações (AMARAL, 2022; KULLAA, 2024).

Dentre as abordagens em SHM, destacam-se os métodos baseados em respostas dinâmicas, que se fundamentam na premissa de que danos estruturais alteram a rigidez da estrutura, afetando, conseqüentemente, suas propriedades vibracionais (PANDEY; BISWAS, 1994). Tais métodos analisam frequências naturais, taxas de amortecimento e modos de vibração para detectar variações associadas à presença de danos (SANCHEZ et al., 2020). Embora o uso de modelos de elementos finitos (MEF) possa ser eficaz para esse fim, sua aplicação exige alta capacidade computacional, modelagem precisa e profissionais especializados, além de envolver custos operacionais elevados (CURY, 2010).

Como alternativa promissora, diversos estudos passaram a explorar diretamente os sinais brutos de aceleração, evitando a necessidade de identificação modal prévia. Essa

abordagem tem potencial para permitir a implementação de sistemas automatizados de detecção de danos em tempo real (FARRAR; WORDEN, 2012; SOARES, 2022). Entretanto, a análise direta de sinais de aceleração apresenta desafios significativos, sobretudo relacionados ao grande volume de dados gerados por múltiplos sensores e à presença de ruídos. Torna-se, portanto, essencial adotar técnicas que compactem os dados sem comprometer informações relevantes para a análise estrutural.

Uma dessas técnicas é a Análise de Dados Simbólicos (ADS), que permite representar grandes bases de dados de forma compacta e interpretável, por meio da categorização dos sinais (CURY et al., 2010, 2012; CRÉMONA et al., 2011; CURY e CRÉMONA, 2012; CARDOSO et al., 2019). No entanto, a definição de parâmetros representativos (indicadores de dano) que preservem a informação estrutural relevante ainda é um ponto crítico. A escolha das janelas de análise, das métricas estatísticas e dos critérios de agrupamento afeta diretamente a eficácia da detecção de danos (CURY, 2010).

Embora autores como Cury (2010), Alves (2016) e Cardoso (2018) tenham proposto conjuntos de indicadores para representar dados dinâmicos, são escassos os estudos que investigam o desempenho de cada parâmetro de forma individualizada. As abordagens geralmente combinam diferentes métricas empiricamente, sem avaliar sistematicamente a contribuição de cada uma delas nos resultados obtidos.

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe uma abordagem inovadora baseada na análise direta de sinais de aceleração nos domínios do tempo e da frequência, combinada à avaliação individual de trinta parâmetros estatísticos e dos valores obtidos por ADS. Esses indicadores são aplicados a dados experimentais e simulados de diferentes estruturas, e sua eficácia é avaliada por meio de técnicas de agrupamento não supervisionado, como *Scott-Knott* e *k-means*, com o objetivo de propor um método de identificação automática de danos estruturais de baixo custo computacional, sem necessidade de pré-processamento complexo.

Nesse contexto, as principais contribuições desta pesquisa incluem: a realização de ensaios inéditos em laboratório com duas estruturas experimentais (Shear Building e Pá Eólica), ampliando a base de dados disponível para a comunidade científica; a análise detalhada do desempenho individual de trinta parâmetros estatísticos, além de parâmetros derivados da Análise de Dados Simbólicos (ADS), extraídos de sinais de aceleração nos domínios do tempo e da frequência; a aplicação inovadora do método de agrupamento de médias Scott-Knott na identificação de estados estruturais; e a proposição de novos indicadores robustos e eficazes para a detecção de danos, notadamente o conjunto PAR

12 e o parâmetro F-SD. Tais avanços permitiram o desenvolvimento e a validação de um método de identificação automática de danos estruturais, com base exclusivamente em dados dinâmicos de aceleração, capaz de operar com baixo custo computacional, dispensar etapas complexas de pré-processamento e demonstrar desempenho consistente em diferentes tipos de estrutura e condições operacionais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar um método de identificação de danos estruturais baseado em parâmetros estatísticos e simbólicos extraídos de sinais de aceleração nos domínios do tempo e da frequência, empregando técnicas de agrupamento não supervisionado, de modo a dispensar etapas complexas de pré-processamento e avaliar sua aplicabilidade em diferentes tipos de estruturas e condições operacionais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Analisar comparativamente a sensibilidade de parâmetros estatísticos e simbólicos extraídos de registros de aceleração no tempo e na frequência, considerando variáveis como: tipo de excitação, características estruturais, proporção de dano, número de observações e duração dos ensaios;
- ◆ Propor novos conjuntos de indicadores e avaliar seu desempenho na detecção de diferentes estados estruturais, em comparação a conjuntos consolidados na literatura;
- ◆ Aplicar métodos de agrupamento não supervisionado, como Scott-Knott e k-means, para validar a capacidade discriminativa dos parâmetros em relação às alterações estruturais;
- ◆ Realizar ensaios experimentais em laboratório com diferentes modelos físicos, simulando danos estruturais, a fim de gerar dados inéditos e subsidiar as análises desenvolvidas na pesquisa;
- ◆ Avaliar a eficácia do método proposto em diferentes conjuntos de dados estruturais, incluindo modelos numéricos, estruturas experimentais e estruturas reais de grande porte.

1.3 JUSTIFICATIVA

A detecção precoce de danos em estruturas civis é um desafio recorrente na área de Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM), especialmente quando se busca conciliar precisão, baixo custo computacional e aplicabilidade em diferentes cenários operacionais. O uso direto de sinais brutos de aceleração, sem a necessidade de pré-processamentos complexos, apresenta-se como uma abordagem promissora para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento automáticos, mais ágeis e acessíveis. No entanto, a análise desses sinais impõe obstáculos técnicos relevantes, como o elevado volume de dados gerados por múltiplos sensores e a presença de ruídos, exigindo métodos de compactação que preservem informações significativas para a caracterização do comportamento estrutural.

Diante dessa realidade, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias que permitam extrair, de forma direta e eficiente, indicadores representativos do estado estrutural a partir das respostas dinâmicas da estrutura. Embora a literatura apresente propostas de utilização de parâmetros estatísticos e simbólicos como forma de reduzir a dimensionalidade dos dados, ainda há uma lacuna importante quanto à avaliação individualizada do desempenho desses indicadores. A maioria dos trabalhos existentes baseia-se na combinação empírica de múltiplos parâmetros, sem investigar, de maneira sistemática, a sensibilidade e a capacidade discriminativa de cada métrica frente às variações estruturais.

Além disso, métodos como a Análise de Dados Simbólicos (ADS) têm sido sugeridos como ferramentas eficazes para representar grandes volumes de dados dinâmicos de forma compacta e informativa. Ainda assim, faltam estudos que integrem os parâmetros estatísticos tradicionais com os parâmetros derivados da ADS em uma análise comparativa robusta, aplicada a diferentes tipos de estruturas — desde modelos experimentais até estruturas reais de grande porte.

Outra lacuna observada refere-se ao uso de técnicas de agrupamento como ferramentas de identificação estrutural. Embora o algoritmo k-means seja amplamente empregado em contextos de agrupamento multivariado, métodos como o Scott-Knott, tradicionalmente utilizados na análise de médias em experimentos agrônômicos, ainda não haviam sido explorados com esse fim. A introdução dessa técnica no contexto do SHM permite uma avaliação estatística criteriosa dos indicadores de dano, contribuindo para a seleção objetiva dos parâmetros mais eficazes.

Dessa forma, esta pesquisa justifica-se pela proposta de uma abordagem inovadora, baseada na análise direta de sinais de aceleração nos domínios do tempo e da frequência, com foco na avaliação individual de trinta parâmetros estatísticos e dos parâmetros derivados da Análise de Dados Simbólicos (ADS). A originalidade do estudo reside, portanto, não apenas na proposição de novos conjuntos de indicadores e na aplicação inédita do método de Scott-Knott ao problema de identificação de danos estruturais, mas também na consolidação de um método automatizado, eficiente e com baixo custo computacional, com potencial para aplicação em diferentes contextos operacionais — desde o laboratório até estruturas reais.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos.

O Capítulo 1 corresponde à introdução, na qual são apresentados o tema da pesquisa, sua relevância e os objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, incluindo um histórico e um resumo das pesquisas relacionadas aos indicadores de dano obtidos a partir das respostas dinâmicas de estruturas.

No Capítulo 3, é desenvolvida a fundamentação teórica que sustenta esta pesquisa. São abordados os conceitos relacionados aos indicadores de danos extraídos de respostas vibracionais, seus embasamentos estatísticos, formulações matemáticas e as técnicas de classificação de dados utilizadas na identificação dos diferentes estados estruturais.

O Capítulo 4 descreve as estruturas analisadas, as características dos dados utilizados e as variáveis envolvidas em sua obtenção.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da pesquisa, iniciando com a caracterização dos dados por meio da observação dos *boxplots*, seguida pelas análises comparativas realizadas com base nos resultados do agrupamento de *Scott-Knott* para as cinco estruturas analisadas. Por fim, são selecionados grupos de parâmetros com os melhores desempenhos de identificação estrutural, os quais são aplicados ao agrupamento multivariado com o algoritmo *k-means*, cujos resultados também são apresentados.

Por fim, o Capítulo 6 reúne as principais conclusões da pesquisa, destacando suas contribuições e possíveis desdobramentos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Várias pesquisas têm sido realizadas na busca por métodos que indiquem danos em estruturas de Engenharia Civil e sejam efetivos e confiáveis. A seguir, serão destacadas algumas dessas pesquisas que ao longo da história, contribuíram para o conhecimento existente, acerca da identificação de danos em estruturas, com enfoque em métodos baseados em respostas e características dinâmicas.

2.1 HISTÓRICO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS BASEADOS EM DADOS DINÂMICOS

Lifshitz e Rotem (1969) apresentam o que pode ser o primeiro *paper* a propor a detecção de danos através de medições de vibração. Neste trabalho, foi desenvolvida uma técnica experimental para determinação das condições de início do desprendimento das armaduras em materiais compósitos, baseada na medição contínua de módulos dinâmicos (inclinações das curvas tensão-deformação extensionais e rotacionais sob carregamento dinâmico) e amortecimento, de corpos de prova em epóxi ou poliéster (aglutinante) e com partículas de quartzo (enchimento), sujeitas a oscilações longitudinais e torcionais de baixa amplitude sobreposta à carga de tração.

O módulo dinâmico foi calculado a partir do valor da frequência natural usando a relação elástica simples para um sistema de um grau de liberdade, uma vez que o amortecimento foi suficientemente pequeno, e considerando as mudanças nas dimensões da amostra devido à deformação. A técnica provou ser um método sensível, que pôde detectar mudanças estruturais, mesmo que pequenas, induzidas por tensões em compósitos, que não seriam detectadas por outros métodos.

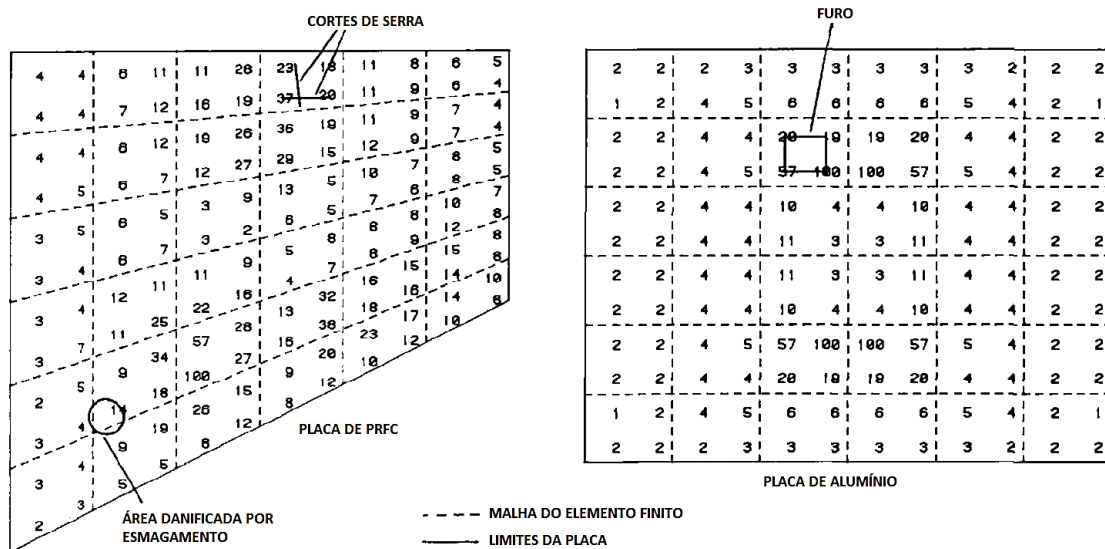
Dyer e Stewart (1978) apresentaram um método simples e de baixo custo para detecção de falhas em mancais de elementos rolantes, baseado na curtose de sinais de vibração. O parâmetro mostrou-se insensível a carga e velocidade em mancais intactos, mas variou com a presença e propagação de danos, permitindo avaliar seu estado sem necessidade de dados históricos. Apesar de limitações em situações específicas, testes laboratoriais e em campo confirmaram a aplicabilidade da técnica como ferramenta prática de monitoramento preventivo.

Cawley e Adams (1979) analisaram uma placa de alumínio e uma placa de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), com camadas cruzadas, utilizando métodos dos

elementos finitos para detectar, localizar e quantificar danos, através das frequências naturais. O método calcula a mudança na rigidez devido a danos em um ponto da estrutura comparando pelo menos um par de modos que, através de uma análise das sensibilidades, produz um ponto de possíveis locais de dano, ou seja, pontos onde a razão entre as frequências em dois estados de dano da estrutura, determinadas experimentalmente, muda igual à razão teórica. Os pontos para vários pares de modos podem ser sobrepostos, melhorando a acurácia do local real do dano, sendo dado pela intersecção das curvas.

As medições foram feitas em um único ponto da estrutura e em estado estacionário. As estruturas foram suspensas por fios de náilon passados por pequenos orifícios em suas extremidades e excitadas por um alto-falante de alta estabilidade e frequência variável, com um amplificador de potência. A placa de alumínio possuía dimensões de 450x350x6mm e foi danificada com um furo retangular (Figura 2.1). Já a placa de PFRC, 250x250x2,8mm, foi submetida à três testes consecutivos que foram agravando o estado de dano da estrutura. Primeiramente, foi realizado um corte de serra de 2,5cm, posteriormente, outro corte de serra sobre o primeiro, de dimensões próximas, porém, aproximadamente perpendicular ao primeiro, e por fim, um esmagamento em outra extremidade da placa foi realizado por uma bola de 25mm.

Figura 2.1 – Placas analisadas por Cawley e Adams (1979).



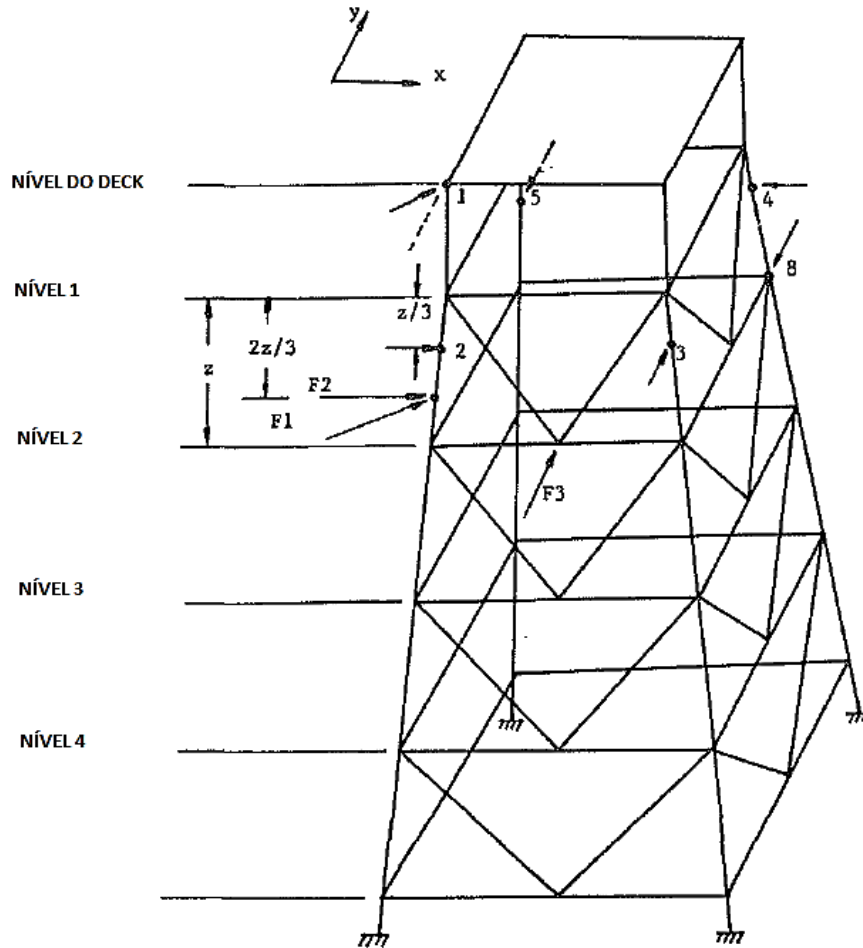
Fonte: Adaptado de Cawley e Adams, 1979.

No caso do furo, a rigidez local da estrutura é reduzida na mesma proporção em todas as direções, porém, no caso de trincas, a rachadura terá efeito insignificante na frequência de modos perpendiculares a ela, o que fez com que a seção analisada que contém a trinca, fornecesse informações errôneas para estes pares de modos. O esquema de localização

dos danos foi então melhorado dando grande peso aos modos em que as direções dos vetores de tensão no ponto de interesse são semelhantes e baixo peso para modos onde há baixa similaridade.

Os resultados apresentaram excelente concordância entre os locais de dano reais e previstos, porém, a técnica é efetiva, quando os danos estão localizados em apenas um local da estrutura, sendo de difícil adaptação para localização de danos em mais de um local, o que leva a produzir resultados errados. Uma indicação da magnitude do defeito é obtida, entretanto, apresenta áreas previstas para o dano maiores que as reais. Os autores afirmaram que o método pode ser aplicado a qualquer estrutura e podem ser combinadas outras técnicas matemáticas.

Yang et al. (1984), participaram juntamente com outros dois grupos de pesquisadores, de um programa de testes patrocinado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos e pelo Escritório de Pesquisa Naval com o objetivo de avaliar técnicas de END que merecessem mais desenvolvimento. A avaliação baseou-se na capacidade das técnicas para: discriminar entre falha e não falha; determinar o tipo e grau de dano; e identificar a localização do dano. Quatro cenários de danos foram simulados, em um modelo em escala 1:13,8, de uma plataforma *offshore* de petróleo (Figura 2.2), localizada no Golfo do México. O modelo era uma estrutura tubular de aço, soldada a uma estrutura de deck, reforçada em formato de sanduíche de favos de mel. O convés foi reforçado para modelar melhor a rigidez de uma estrutura real e evitar acoplamento de vibração entre o deck e a jaqueta.

Figura 2.2 – Plataforma *offshore* e o posicionamento dos excitadores e acelerômetros.

Fonte: Adaptado de Yang et al., 1984.

Cada grupo instruiu os técnicos do centro responsável pelos testes, sobre como realizar os testes e coletar os dados necessários para cada técnica. A série inicial de testes foi realizada para levantar os dados de base (estrutura intacta) para cada método de END. O monitoramento subsequente foi realizado com uma série de testes em modo cego. Os quatro cenários de danos simulados na plataforma modelo eram desconhecidos dos pesquisadores e podiam variar de rachaduras a vigas transversais completamente cortadas, condições de fundação alteradas, vigas diagonais dobradas, mudança de massa do convés, aumento no nível do mar, instalação de tubos de *riser*, nenhum dano etc.

O grupo de Yang et al. (1984), utilizou técnicas de decremento aleatório na inspeção destas plataformas *offshore*. A principal vantagem da técnica é que ela não exige medições da excitação de entrada, apenas medições da resposta dinâmica da estrutura. As forças de entrada são então aleatórias, podendo ser o vento, ondas e correntes. Eles solicitaram que fossem aplicadas três diferentes excitações de entrada aleatórias no modelo da plataforma. Uma excitação aleatória horizontal (F1), foi aplicada a uma das

pernas de apoio e orientada ao longo do plano diagonal da plataforma. Na mesma localização, outra excitação aleatória horizontal (F2), foi aplicada em uma direção normal à viga transversal horizontal. A terceira excitação aleatória (F3), foi aplicada no meio de uma viga transversal em um plano horizontal e em uma direção ortogonal para o feixe (Figura 2.2).

A técnica usa as respostas de decaimento livre de um sistema sob carregamento aleatório para identificar seus parâmetros de vibração; nomeadamente, frequências e amortecimento. A detecção é realizada passando o sinal aleatório através de um filtro passa-banda configurado para filtrar altas frequências. Se uma falha se desenvolve, a assinatura será afetada drasticamente porque está fortemente acoplada aos modos estruturais dentro dessas frequências passa-banda.

A técnica mostrou-se promissora sendo capaz de identificar todas as situações de dano e não-dano com uso de apenas quatro acelerômetros (2, 3, 4 e 5) montados em cada uma das pernas da estrutura, acima do nível da água. Porém, na determinação do local do dano a técnica não foi tão precisa. Os autores disseram estar desenvolvendo à época a técnica de cruz de decremento aleatório, que analisa a resposta das medições em duas posições diferentes ao mesmo tempo buscando uma melhor localização do dano.

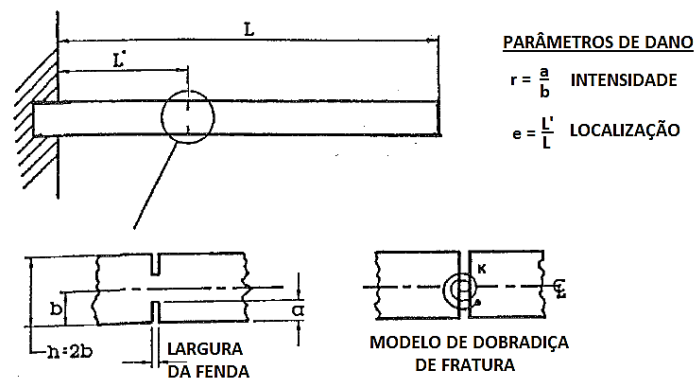
Stephens e Yao (1987), utilizaram as respostas de acelerações de estruturas durante terremotos para estimar a resposta força-deformação da estrutura, aplicando estas em duas funções de dano para obter grandezas quantitativas e classificá-las qualitativamente quanto a condição da estrutura. Sendo uma função de dano, de deformação plástica cumulativa e uma função de dano, de deformação máxima/energia dissipada cumulativa. Essas funções foram usadas para avaliar os danos sofridos por duas pequenas estruturas em concreto armado, sujeitas a movimentos de base que se assemelham a terremotos, onde as funções de dano produziram resultados úteis e razoáveis sobre as condições quantitativas de dano nas estruturas, porém, os dados foram considerados insuficientes para uma correlação qualitativa.

O método foi ainda aplicado a um edifício de seis andares em concreto, amplamente instrumentado, que foi danificado durante um terremoto. Os dados do primeiro andar do edifício foram analisados utilizando as duas funções de danos associadas a dois indicadores de dano investigados por Toussi e Yao (1982), a razão de deriva e a razão de inclinação, os índices indicaram que a estrutura foi levemente danificada após o terremoto, o que era compatível com os danos físicos observados na estrutura.

Chang e Allen (1987) desenvolveram um algoritmo para analisar as respostas dinâmicas de vigas mistas com danos ao longo do tempo utilizando método dos elementos finitos (MEF). O algoritmo exige que todo o histórico de carga seja considerado para avaliar o estado de dano, realizando uma análise numérica ao longo de várias centenas de milhares de ciclos de carga. Duas situações de apoio são analisadas. Uma viga em balanço com a carga aplicada na extremidade livre e uma viga biapoiada com carga aplicada no centro. Os resultados de ambos os casos indicaram que embora as frequências fundamentais da estrutura fossem significativamente afetadas pelos danos, as formas modais não foram. Em comparativo, a pesquisa de Kalyanasundaram et al. (1986), que analisou estruturas treliçadas, onde os carregamentos são principalmente de tração e compressão uniaxial, as formas modais são significativamente alteradas por danos dependentes do tempo. Levando a crer que quando a flexão causa danos de variações de espessura, o efeito nas formas modais diminui significativamente.

Ju e Mimovich (1988), utilizaram o método de frequência modal para diagnosticar experimentalmente o dano de fratura em estruturas simples e localizar o dano em vigas em balanço (Figura 2.3). Foram verificadas experimentalmente vinte amostras de vigas em alumínio, de seção retangular, em balanço, engastadas em uma estrutura de concreto. Todas possuíam uma única seção fissurada, variando entre quatro tipos de geometria de fissura em cinco diferentes locais. Com um modelo analítico preciso para as amostras experimentais, as localizações dos danos puderam ser previstas com uma precisão de um por cento do comprimento. Já a intensidade do dano com cerca de quatro por cento do comprimento.

Figura 2.3 – Viga danificada e seus parâmetros.



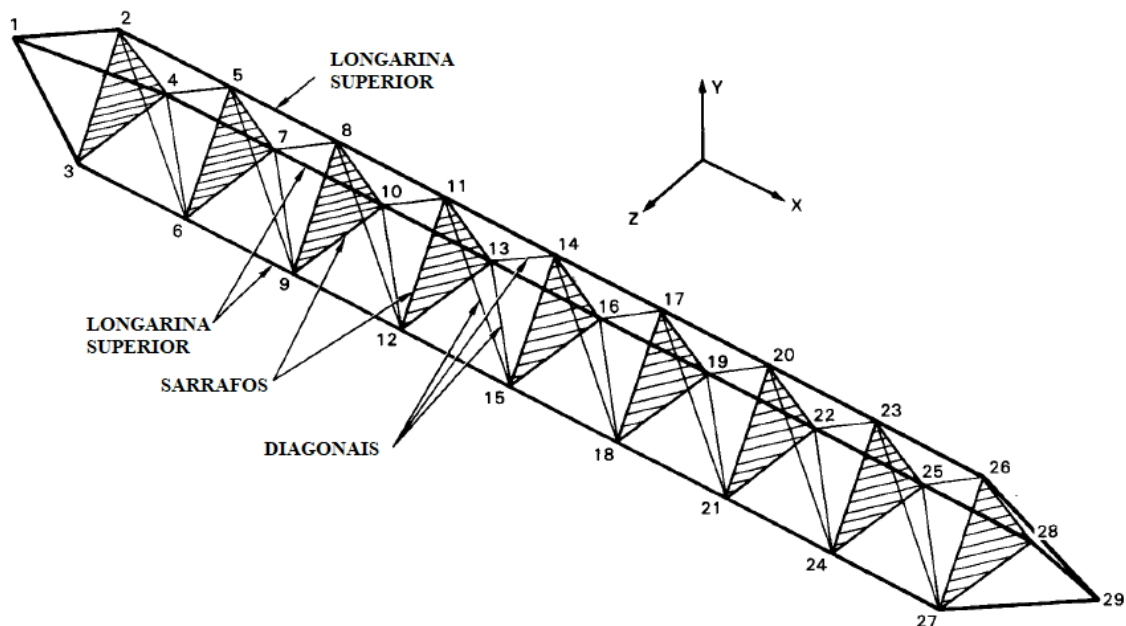
Fonte: Adaptado de Ju e Mimovich, 1988.

Chen e Garba (1988), propuseram uma teoria para avaliar a ocorrência, localização e extensão de danos, usando medições de respostas dinâmicas de estruturas em órbita. Devido à exposição a eventos adversos, como atracação, impacto por objetos estranhos e

outros elementos hostis, bem como, os impactos ambientais resultantes da exposição prolongada ao espaço, como calor, vácuo, radiação e luz ultravioleta, as grandes estruturas espaciais na órbita da Terra ou em órbitas interplanetárias estão sujeitas a danos estruturais durante seu período de serviço. Como a detecção de danos por meio de inspeções visuais é difícil, devido à complexidade das estruturas e à probabilidade de que a superfície aparente permaneça inalterada, o estudo propõe o desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento remoto da integridade estrutural, visando detectar rapidamente a ocorrência de danos e identificar sua localização, possibilitando ações corretivas ou ajustes nos procedimentos operacionais para evitar danos maiores e/ou a perda da estrutura.

O enfoque se dá no comparativo entre os dados dinâmicos obtidos experimentalmente e o modelo matemático desenvolvido para essa finalidade, a fim identificar danos na estrutura em termos de sua localização e extensão. Esses danos são investigados por meio de reduções de rigidez ou alteração na capacidade de suporte de carga. A viabilidade do método é demonstrada, teoricamente, usando um sistema estrutural simples (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Esquema da viga espacial usada por Chen e Garba (1988), com os números dos nós para a análise de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de Chen e Garba, 1988.

Minnetyan et al. (1990), apresentam um método computacional para simulação de dano e propagação de fissuras em compósitos laminados. O programa calcula a quantidade de dano interno e a taxa de liberação de energia de deformação, permitindo uma avaliação mais completa da degradação da estrutura, da propagação de danos e da estabilidade de

fraturas. Também é capaz, de calcular as relações entre degradação composta e mudanças nas propriedades estruturais, como frequências naturais, formas de modo de vibração e cargas de flambagem durante a fratura progressiva, prevendo a resistência global da estrutura mista à fratura em todos os estágios de degradação estrutural induzida por carga. Danos como degradação estrutural, delaminação, fratura e propagação de fissuras estão incluídas na simulação. Uma estrutura de placa composta com dobras angulares submetida a carga de tração no plano é usada como exemplo para demonstrar algumas das características do método computacional.

DiPasquale e Cakmak (1990), estudaram o comportamento de alguns índices de danos propostos em literatura e propõem dois índices globais de danos para estruturas complexas, ao desenvolverem um programa para a identificação de estruturas lineares, baseado em registros de movimentos fortes, para a avaliação de danos por terremotos em estruturas. As simulações são realizadas considerando diferentes magnitudes de terremotos e diferentes tipos de solo.

DiPasquale et al. (1990), mostram que índices de danos globais baseados em parâmetros podem ser relacionados a variáveis de danos locais através de operações de cálculo da média sobre o volume corporal. A relação obtida é aplicada ao caso de simulações numéricas de eventos de dano, bem como ao caso de estruturas reais testadas em mesas vibratórias, realizados por DiPasquale e Cakmak (1988). Os experimentos analisados provêm de uma população de sete estruturas de 10 andares em escala 1/10, que representam uma ampla variedade de técnicas de projeto de concreto armado. As execuções dos testes incluíram repetições de sequências de ensaios de vibração livre para determinação de frequências naturais de baixa amplitude; simulação de terremoto; e registros de qualquer observação de sinais de danos. Alguns resultados também são apresentados, relacionando índices de danos globais baseados em parâmetros, com médias no espaço e no tempo de deformação plástica local. Afirmam ainda que para o caso de danos em estruturas de concreto armado, a degradação da rigidez pode estar relacionada à microfissuração do concreto, e a deformação plástica, relacionada ao escoamento das barras da armadura. Os autores também informam, que a relação entre índices de danos globais baseados em parâmetros e a degradação da rigidez local, podem ser usados na análise de estruturas envelhecidas.

Hickman et al. (1991) desenvolveram um programa de processamento de sinais de sensores, integrados a um avançado sistema de monitoramento de saúde estrutural, buscando assim aumentar a segurança de antigas aeronaves. O sistema monitora a

assinatura vibracional de partes da estrutura, determinando anormalidades estruturais usando uma rede de conjuntos de sensores e processadores distribuídos. São usadas técnicas de reconhecimento de padrões com a medida de similaridade euclidiana, para classificar os sinais dos sensores e determinar o tipo do defeito. A memória do sistema é formada através de um processo de aprendizagem no qual uma série sistemática de experimentos é apresentada ao sistema.

Foram realizadas modelagens com o MEF para adquirir características a serem utilizadas no aprendizado do sistema. Em testes de falha, na linha de rebite, apresentou-se o relaxamento da restrição de limite que causou uma redistribuição da energia modal. Para placas ou cascas metálicas finas, a estrutura perdeu a rigidez e aumentou o amortecimento, levando a crer que houve também mudanças nas frequências. Já os danos por rachaduras tendem a reduzir o módulo de *Young* das estruturas, o que causa uma redistribuição das tensões, bem como, da energia modal.

Os testes foram realizados em uma série de experimentos que demonstram a viabilidade de detectar danos estruturais, bem como, o acúmulo de gelo nas asas. Nestes experimentos, quinze características para classificação foram identificadas, sendo elas discriminadas na Tabela 2.1. a seguir.

Tabela 2.1 – Propriedades extraídas dos sinais do sensor piezoelétrico.

PROPRIEDADE	DESCRIÇÃO
1	Coeficientes de amortecimento local
2	Metade do período do sinal
3	Desvio padrão do sinal
4	Curtose do sinal
5	Assimetria do sinal
6	Número de vezes com decaimento de 90%
7	Relação da amplitude dos dois maiores valores de pico
8	Frequência do maior valor de pico
9	Diferença de frequência dos dois maiores picos
10	Segundo maior valor de pico
11	Potência parcial em bandas de frequência relevantes entre 1-10kHz
12	Relação entre menor e maior potência parcial
13	Número de picos excedendo um determinado limite
14	Frequência na qual foi observada 25%, 50% e 75% da potência acumulada
15	Taxa de transferência de potência parcial em bandas de frequência entre 1-10kHz

Fonte: Adaptado de Hickman et al., 1991.

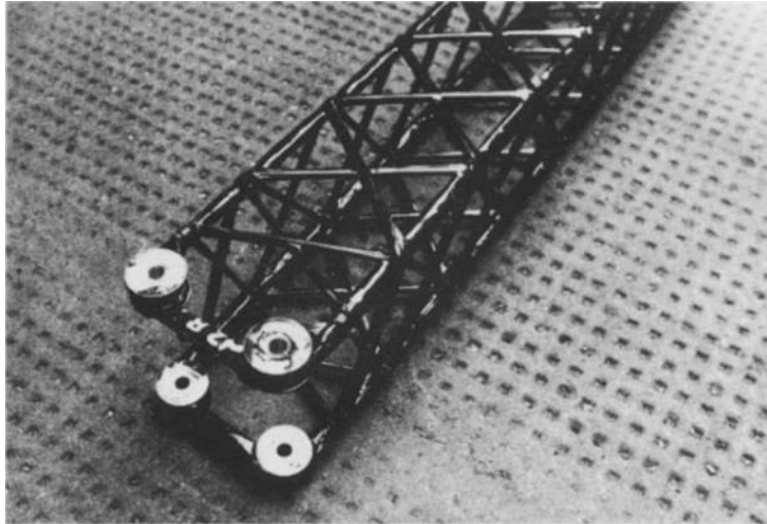
Resultados de testes de laboratório, túnel de vento e voo são apresentados, demonstrando a capacidade do sistema de identificar com precisão diferentes tipos de sinais correspondentes a mudanças nos parâmetros físicos da estrutura. Foram avaliadas técnicas de detecção ativa, com fonte de excitação eletromagnética, e, passiva, através do motor natural de voo e o ruído aerodinâmico.

A finalidade, seria a aplicação desta tecnologia para detectar defeitos estruturais durante verificações em solo, bem como alertar sobre formação de gelo em voo, reduzindo ainda o custo das manutenções, que seriam efetuadas por justa causa, ao invés de horas trabalhadas, prolongando assim a vida útil das aeronaves.

Adams et al. (1991) investigaram a detecção de danos em estruturas de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) por meio da análise de variações nas frequências naturais e da identificação de formas modais anômalas. Foram conduzidos ensaios em estruturas treliçadas espaciais de PRFV (Figura 2.5), nas quais técnicas convencionais de ensaio não destrutivo (END) se mostravam ineficazes. Essas treliças são comumente utilizadas como elementos estruturais em molduras de portal, como aquelas destinadas ao suporte de linhas aéreas de energia em ferrovias eletrificadas, embora possam ser aplicadas em diversas outras configurações.

A análise considerou treze modos de vibração para doze amostras de treliças, submetidas a três diferentes temperaturas (10 °C, 20 °C e 30 °C). Os resultados demonstraram que os métodos empregados foram capazes de identificar uma variedade de danos, incluindo membros cortados, delaminações e regiões com esmagamento. Em um dos casos, danos acidentais só foram identificados por meio da análise modal. De modo geral, cortes totais ou parciais em membros estruturais causaram as alterações mais expressivas nas propriedades dinâmicas. Já rupturas superficiais, como rachaduras, embora difíceis de detectar visualmente, comprometeram significativamente a integridade da estrutura. Com base nos resultados, os autores concluíram que a combinação de inspeção visual com análise modal representa uma estratégia eficaz para a identificação de falhas em estruturas de PRFV.

Figura 2.5 – Amostra nº 12 das estruturas de plástico reforçado com fibra vidro (PRFV) ensaiadas.



Fonte: Adams et al., 1991.

Pandey et al. (1991) investigam o uso de parâmetros de formato da curvatura modal na identificação e localização de danos em estruturas, usando um modelo de viga em balanço e um modelo de viga simplesmente apoiada. A correlação entre os formatos modais, para cada ponto da estrutura, foi obtida através de dois diferentes critérios: o MAC (*Modal Assurance Criterion*), proposto inicialmente por Allemang e Brown (1982), que indica a correlação entre dois conjuntos de formas modais, de modo geral, e o COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*), que compara formas modais de maneira pontual.

O modelo de elementos finitos para cada viga consistia em 20 elementos de viga bidimensionais de igual comprimento. As mudanças nas formas modais da curvatura são localizadas na região do dano, porém, mudanças nas formas modais do deslocamento não foram localizados e, portanto, não dão qualquer indicação da localização do dano. Comprovando que o MAC e o COMAC não são suficientemente sensíveis para detectar danos nas suas fases iniciais. Sugerem ainda, o uso dos modos de curvatura em conjunto com as frequências naturais.

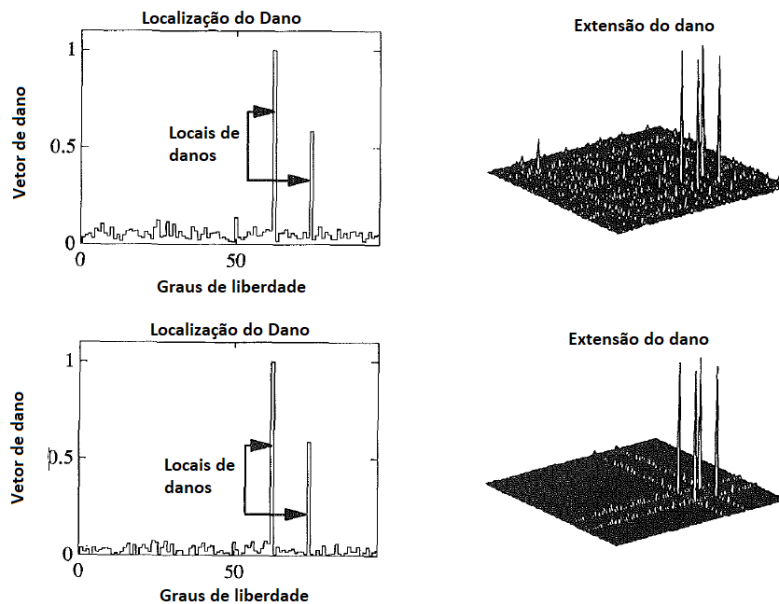
Em Vieiro (1991) foi realizado um estudo de detecção de dano com um modelo reduzido de uma plataforma da Petrobrás, localizada na Bacia de Campos. Destacou-se que para sistemas bem controlados, com pouca influência de fatores ambientais, a detecção de danos com base em mudanças nas frequências naturais se mostrou eficaz, constatando a viabilidade do monitoramento de frequências naturais para identificar danos na estrutura da plataforma.

Zimmerman e Kaouk (1994) desenvolveram um algoritmo desacoplado de localização e extensão de danos, que utiliza um modelo de elementos finitos da estrutura original e um

subconjunto de autovalores e autovetores medidos da estrutura “danificada”. O algoritmo de localização é semelhante aos critérios de Erro de Força Modal, onde uma entrada diferente de zero no vetor de dano é interpretada como uma indicação da localização do dano. Já o algoritmo que quantifica a extensão do dano, faz uso do conhecimento de localização juntamente com a aplicação de uma restrição de perturbação de classificação mínima. O algoritmo é aplicado a três estudos de caso, sendo os dois primeiros numéricos (massa elástica e treliça bidimensional) e o terceiro experimental (treliça de 8 baias da NASA). O uso do algoritmo resultou na localização e extensão correta dos danos nas estruturas.

A Figura 2.6 traz a esquerda, os gráficos de localização de dano apresentando os valores normalizados do vetor de danos *versus* o grau de liberdade, e a direita, os gráficos de malha que apresentam a extensão do dano, referentes a treliça de 8 baias da NASA, sendo que o dano foi provocado pela remoção de uma longarina conectada aos graus de liberdade 62 e 74. As figuras superiores foram obtidas usando todos os 6 modos medidos, já as inferiores apenas os dados do modo 6.

Figura 2.6 – Localização e extensão de dano da treliça de 8 baias da NASA.



Fonte: Adaptado de Zimmerman e Kaouk (1994).

Embora existam alterações em toda a matriz de rigidez, os cálculos da localização e extensão de danos concentrou as principais alterações nos elementos do vetor de danos e da matriz de rigidez que são diretamente definidos pela barra removida. Os pequenos elementos numéricos em todos os outros graus de liberdade podem ser atribuídos a erros de medição. A utilização dos dados experimentais de apenas um modo de vibração apresentou uma visão mais clara do estado de dano da estrutura.

Martin e Honarvar (1995) propuseram o uso de momentos estatísticos de sinais de vibração, incluindo dados retificados, para a detecção precoce de falhas em mancais de elementos rolantes. A técnica demonstrou ser eficiente, independente de variações de carga e velocidade, além de simples e de baixo custo, podendo utilizar tanto momentos ímpares (assimetria) quanto pares (curtose) para maior flexibilidade. Os resultados indicaram potencial para aplicações em manutenção, controle de qualidade e até na caracterização de superfícies, com perspectivas de expansão para outros tipos de danos em engrenagens e tubulações.

Mayes (1995) utilizou a flexibilidade medida para localizar danos a partir dos resultados do experimento modal em uma ponte. Um algoritmo originalmente utilizado para localizar erros de modelos em elementos finitos, chamado STRECH (*Structural Translation and Rotation Error Checking*), foi aplicado a um experimento de detecção de danos de uma ponte em escala real, com vigas de aço e três vãos de aproximadamente 130 metros de comprimento. Foi proposto um método para utilizar a flexibilidade medida como entrada do STRECH, que avalia mudanças na relação força-deslocamento de um modelo massa-mola da estrutura. O autor explicou que o método requer dados experimentais da FRF medidos em locais discretos ao longo dos principais caminhos de carga de ponte, e concluiu que na aplicação de dano da ponte, o algoritmo foi mais eficaz quando aplicado a formas de flexibilidade estática estimadas com um conjunto truncado de seis formas modais em vez de formas modais individuais. O algoritmo compara dados “antes de danos” e “após danos” para localizar áreas onde ocorreram mudanças significativas de rigidez. Um indicador de danos mostra se o dano é detectável. O dano foi corretamente localizado nos dois casos mais significativos usando as estimativas de flexibilidade estática.

Doebeling (1996), utilizou um método de atualização ótima para a correlação de modelos de elementos finitos estruturais dinâmicos a partir de dados modais, ao utilizar uma solução de classificação de perturbações mínimas dos parâmetros de rigidez elementar, restringindo a conectividade com a matriz de rigidez global. O método foi aplicado a um sistema massa-mola e aos dados experimentais da treliça de 8 vãos da NASA, onde os resultados se mostraram promissores para detecção de danos e refinamento de modelos.

Em Salawu (1997) é apresentada uma revisão bibliográfica dos métodos de detecção de dano baseados em alterações nas frequências naturais. Em seu levantamento, o autor concluiu que seria necessário que uma frequência natural mudasse cerca de 5% para que os danos fossem detectados com confiança, e que mesmo mudanças significativas de

frequência, quando sozinhas, não implicam automaticamente a existência de danos devido a mudanças em parâmetros ambientais medidos em um único dia, por exemplo.

Doebbling et al. (1998) traz um resumo de revisão de literatura acerca dos métodos de identificação de danos baseados em vibração, para a detecção, localização e caracterização de danos em sistemas estruturais e mecânicos. São abordados os métodos que utilizam mudanças nas propriedades modais (frequências, taxas de amortecimento e formatos modais), apresentados de acordo com critérios como: o nível de detecção de danos (detecção [1], localização [2], quantificação [3] e previsão da vida útil restante [4]), métodos baseados em modelos ou exclusivamente em dados medidos e método lineares ou não lineares, descrevendo-os em termos gerais, incluindo dificuldades associadas à sua implementação e a sua fidelidade.

Em Sampaio et al. (1999), os autores fazem um estudo comparativo dos resultados obtidos em dois estudos de caso; um sistema massa-mola acoplado com dez graus de liberdade, com dados obtidos numericamente, e uma ponte real, com dados experimentais, entre o método baseado na curvatura da FRF e outros métodos. Para o primeiro exemplo, faz-se um comparativo entre o método proposto, o método baseado na curvatura da forma modal e o método do índice de dano, sendo necessária para estes dois últimos, uma identificação modal para determinação das amplitudes antes e após o dano. Para o segundo exemplo, além dos métodos citados anteriormente, também são analisados os métodos baseados em alterações na flexibilidade, em alterações uniformes na curvatura de flexibilidade e em mudanças na rigidez, para os quais é também necessário determinar as frequências naturais antes e depois do dano. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que o método da curvatura da FRF apresentou melhor desempenho na detecção, localização e quantificação de dano, entretanto, uma ressalva sobre a necessidade de melhoria é feita em relação ao último nível do método, a quantificação do dano. Sua simplicidade e a inexigibilidade de uma análise modal para determinação dos modos e frequências naturais são destacadas como vantagens do método.

Peeters e Roeck (2001) propõem um método para diferenciar variações naturais (como as causadas pela temperatura) das que indicam danos estruturais em pontes monitoradas por vibrações. Usando modelos ARX ajustados com dados da ponte Z24 (Suíça), foi possível prever variações normais nas frequências naturais com base na temperatura.

Quando novas medições ultrapassam os limites esperados pelos modelos, há indícios de dano. O modelo dinâmico ARX mostrou-se mais eficaz que modelos estáticos, mesmo

usando apenas um sensor de temperatura. A abordagem provou ser eficaz para detecção de danos e deve ser testada em outras estruturas.

Kaouk *et al.* (2000), expandiram a teoria proposta por Zimmerman e Kaouk (1994), ao incluir na teoria de classificação de perturbação mínima, a análise do dano afetando simultaneamente as propriedades de massa, amortecimento e rigidez, compondo efeitos cumulativos dos danos individuais em cada propriedade analisada. O algoritmo proposto separa corretamente as mudanças de massa e rigidez e determina a localização correta para ambas.

Ko *et al.* (2002) propuseram um procedimento em múltiplos estágios para a detecção de danos estruturais na ponte estaiada Kap Shui Mun, localizada em Hong Kong. A abordagem combina dados modais obtidos por um sistema contínuo de monitoramento, modelagem tridimensional em elementos finitos e um diagnóstico progressivo voltado à identificação da existência, localização e extensão do dano. Na primeira etapa, utiliza-se uma rede neural autoassociativa para detectar a presença de danos com base apenas nas frequências naturais medidas nos estados intacto e danificado da estrutura. Segundo os autores, essa técnica é tolerante a ruídos de medição e às incertezas associadas a variações ambientais, sendo capaz de indicar a ocorrência de dano mesmo quando as alterações nas frequências são inferiores ao nível de ruído.

Na segunda etapa do procedimento, busca-se localizar o segmento danificado do tabuleiro da ponte, previamente subdividido em 149 elementos. Para isso, são empregados vetores de índice normalizado de curvatura e de flexibilidade modal como ferramentas para avaliação da localização dos danos. Já na terceira etapa, a identificação do membro estrutural danificado e da extensão do dano é realizada por meio de uma rede neural do tipo MLP (Multi-Layer Perceptron), aplicada à região previamente determinada como danificada.

Os resultados indicaram que a técnica empregada é eficaz mesmo em ambientes operacionais ruidosos, permitindo a detecção de danos com boa sensibilidade. Observou-se que o índice de flexibilidade modal teve melhor desempenho na localização de danos ocorridos nas vinculações do sistema estrutural, enquanto o índice de curvatura modal foi mais sensível aos danos localizados nas seções do tabuleiro próximas aos mastros da ponte. Os autores destacam que o uso combinado dos dois índices oferece uma avaliação mais confiável da localização dos danos. Além disso, o método proposto foi capaz de identificar o membro danificado utilizando apenas componentes modais obtidos na região afetada ou em suas proximidades. No entanto, os autores reconhecem uma limitação do

procedimento: devido à baixa sensibilidade modal da estrutura a danos localizados, a extensão do dano só pôde ser estimada com precisão em casos de comprometimento severo do membro estrutural.

Gadéa (2002) apresenta o SID-G, um sistema de identificação de danos estruturais baseado em um método indireto e iterativo de correlação, utilizando a técnica de programação não-linear Goal Programming. O método combina funções de resposta em frequência (FRF) de aceleração e de esforços de flexão para localizar e quantificar danos. Sua eficácia foi testada por meio de simulações em estruturas simples e em uma plataforma fixa de petróleo, demonstrando bons resultados, desde que os danos estejam entre as variáveis consideradas no processo de otimização.

Apesar das limitações, como a sensibilidade a valores iniciais e a possibilidade de mínimos locais, o método mostrou-se útil tanto para identificação de danos quanto para o ajuste de modelos numéricos. O uso de FRFs de esforço foi considerado confiável, e o critério MAC revelou-se essencial na distinção de modos. Entre as melhorias sugeridas estão o desenvolvimento de uma função erro mais clara, mecanismos que representem fissuras com maior precisão e a validação com dados experimentais, considerando que o desempenho do método pode ser reduzido em aplicações reais com maiores incertezas.

Sohn et al. (2003) apresenta uma revisão da literatura sobre monitoramento da integridade estrutural (SHM) no período de 1996 a 2001, seguindo o paradigma do reconhecimento estatístico de padrões do Laboratório Nacional de Los Alamos (LANL), que contempla quatro etapas: avaliação operacional, aquisição e limpeza de dados, extração de características e modelagem estatística. Embora o número de publicações na área tenha aumentado, muitas ainda carecem do rigor estatístico necessário para aplicações fora de ambientes laboratoriais.

Entre os avanços, destaca-se o uso de técnicas baseadas em sinais, como análise de outliers e controle estatístico de processos, que se mostram eficazes na detecção de danos sem depender de modelos analíticos. Já abordagens com redes neurais enfrentam o problema da escassez de dados reais para treinamento. Ainda assim, a sensibilidade das técnicas às variações ambientais e operacionais continua sendo um obstáculo. A modelagem estatística, especialmente com uso de estatísticas de valores extremos, surge como uma área promissora para aprimorar os critérios de decisão sobre danos.

Em Teughels e De Roeck (2004) é apresentado um procedimento de identificação de dano para a ponte Z24, localizada na Suíça, através da atualização do modelo em elementos

finitos, mais especificamente dos módulos de elasticidade e de cisalhamento, cuja distribuição sobre o modelo é aproximada por funções lineares, por setores. É apresentado um método de atualização do modelo em elementos finitos baseado em sensibilidade iterativa, em que as discrepâncias nas frequências naturais e nas formas modais não padronizadas obtidas a partir de ensaios ambientais são minimizadas. Além disso, o artigo propõe o uso de funções de dano para aproximar a distribuição de rigidez, como uma abordagem eficiente para reduzir o número de incógnitas. O trabalho também propõe a utilização de uma estratégia de região de confiança na implementação do método de Gauss-Newton, o que, segundo os autores, torna o processo de otimização mais robusto. Os autores ainda afirmam que o método geral de atualização do modelo baseado em sensibilidade é melhorado pelo uso de funções de dano e da abordagem da região de confiança. A primeira medida destina-se a melhorar a condição do problema, a última, adicionalmente, estabiliza o método de otimização. O padrão de dano foi identificado utilizando as frequências naturais e modos não padronizados de vibrações ambientais e o próprio dano, representado por uma redução da rigidez à flexão e à torção do tabuleiro da ponte. O trabalho obteve, para ambas as propriedades, um padrão de dano realista e uma boa correspondência com os resultados do método de cálculo por rigidez direta. Para a ponte íntegra, bem como para a ponte danificada, os dados modais numéricos atualizados corresponderam bem aos dados experimentais. Adicionalmente, foi também realizada uma atualização da rigidez do solo no primeiro processo de atualização, resultando numa melhoria na correlação para o modo transversal.

Bezerra (2004) realizou um estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração, aplicadas tanto a modelos matemáticos quanto a rolamentos com falhas induzidas e em ensaio de longa duração. Foram avaliados métodos no domínio do tempo, da frequência e do cepstrum, além de parâmetros estatísticos como RMS, amplitude de pico, fator de crista, fator K, média, variância, coeficientes de assimetria, de curtose e do momento de sexta ordem. Os resultados mostraram que a maioria das técnicas qualitativas é capaz de indicar a presença de falhas, mas sem localizar sua origem, enquanto o cepstrum e, principalmente, a técnica de envelope com filtro adaptativo se destacaram na identificação detalhada, sendo esta última a mais eficaz, inclusive para detectar falhas na gaiola e pequenos amassamentos.

Choi et al. (2005) adotam mudanças na distribuição de conformidade modal como índices de danos em placas. A metodologia proposta pôde identificar e localizar danos únicos e

múltiplos, com um melhor desempenho para as aplicações numéricas se comparadas aos dados experimentais.

Em Yeung e Smith (2005) é apresentado um procedimento de detecção de danos, utilizando reconhecimento de padrões de vibração. Foi utilizado um modelo em elementos finitos de uma estrutura real, uma ponte suspensa com mais de 100 anos de idade. Cenários realistas de dano foram simulados e a resposta sob cargas de tráfego foi avaliada. Vetores característicos gerados a partir dos espectros de resposta foram introduzidos a duas redes neurais não supervisionadas para análise. Os autores concluíram que a sensibilidade das redes neurais pode ser ajustada de modo que se possa obter taxas satisfatórias de detecção de danos, mesmo na presença de ruídos.

Lee e Yun (2006) desenvolveram um método para estimativa de danos em pontes com vigas de aço, utilizando dados de vibração ambiental e redes neurais artificiais. Os parâmetros modais foram extraídos com o método FDD (*Frequency Domain Decomposition*) e empregados como vetores de entrada em redes neurais treinadas pelo algoritmo Backpropagation, com o objetivo de identificar a localização e a gravidade dos danos. Além disso, foi utilizado o método DIM-MSE (Damage Indicator Method – Modal Strain Energy), baseado na comparação das formas modais de deformação antes e depois do dano, o que resultou em alta sensibilidade tanto à presença de danos quanto ao ruído nos dados.

A abordagem proposta também incorporou dados experimentais ao modelo numérico da estrutura, o que permitiu melhorar a precisão na estimativa da gravidade dos danos, além de sua localização. A eficácia do método foi validada por meio de simulações numéricas e de um ensaio de campo realizado na ponte Hannam Grand, localizada em Seul, Coreia do Sul, composta por múltiplas vigas. Os resultados demonstraram que a combinação de técnicas modais, redes neurais e indicadores baseados em energia modal pode ser eficaz na detecção e quantificação de danos estruturais em ambientes reais.

Abozeid et al. (2006) propõem uma técnica de detecção de danos estruturais baseada nas variações das curvaturas modais. O método foi testado em uma viga simples e em uma ponte estaiada sobre o Canal de Suez, considerando tanto cenários com dano único quanto com múltiplos danos. Os resultados foram comparados a outras duas abordagens: uma baseada em deslocamentos e outra no índice COMAC. Os principais achados foram:

- i. A modelagem da estrutura e dos danos influencia significativamente os resultados. Para vigas simples, o uso de elementos de casca e representação do dano como trinca foi mais eficaz que modelagens com elementos de barra e redução de rigidez.
- ii. Formas modais são mais sensíveis à presença de danos que as frequências naturais, sendo estas últimas úteis apenas para detectar a existência geral de danos, não sua localização.
- iii. A localização de danos em pontes estaiadas é mais precisa quando se utilizam formas modais normalizadas por massas e frequências, com seleção criteriosa dos modos, especialmente os de maior fator de participação modal.
- iv. O índice MAC apenas indica a presença de danos, enquanto o COMAC pode apontar sua localização, embora tenha fornecido resultados incorretos nos testes e seja mais adequado como ferramenta auxiliar.
- v. A abordagem baseada em deslocamentos apresentou bons resultados para danos únicos, mas foi limitada em cenários mais complexos, sendo também recomendada como método secundário.
- vi. A técnica baseada nas curvaturas modais demonstrou maior precisão e confiabilidade para localização de danos em ambos os estudos de caso, sendo a mais adequada entre as avaliadas.

Em Catbas *et al.* (2006) a flexibilidade modal é utilizada para obter as deformadas da estrutura. É mostrado que os ensaios dinâmicos, que não requerem locais de medição de referência estacionária, também podem ser usados para gerar dados para o cálculo da flexibilidade modal, sendo esta, obtida no trabalho, a partir das medidas das FRFs das estruturas. Além disso, são discutidas possíveis abordagens para atenuar problemas como efeitos ambientais sobre dados medidos e limitações tais como medições dinâmicas incompletas, efeitos de truncamento espacial e temporal, normalmente presentes na detecção de danos e na avaliação da condição de estruturas reais. O nível de variação e incerteza que podem ser esperados quando os coeficientes de deslocamento são extraídos de sistemas de obras civis reais também são apresentados. São apresentados dois estudos de caso, com duas pontes, onde os métodos são demonstrados e os resultados são validados por resultados experimentais.

Worden e Manson (2007) discutem duas abordagens principais para a identificação de danos em estruturas: a baseada em modelos físicos (*model-driven*) e a baseada em dados (*data-driven*). A primeira utiliza modelos físicos detalhados, geralmente obtidos por meio

de análise por elementos finitos, para representar a condição não danificada da estrutura. A comparação entre as respostas do modelo e os dados medidos permite inferir a presença de danos. Já a abordagem baseada em dados constrói modelos estatísticos ou de aprendizado de máquina a partir de medições em condição normal, detectando danos por meio de desvios significativos em relação ao comportamento esperado. Ambas as abordagens enfrentam desafios similares, como a necessidade de dados representativos e a sensibilidade a variações ambientais.

Os autores enfatizam que a eficácia dos métodos baseados em aprendizado de máquina depende criticamente da disponibilidade e qualidade dos dados de treinamento, especialmente para níveis mais avançados de diagnóstico, como localização e severidade dos danos. Dificuldades na obtenção de dados danificados, variações ambientais que mascaram os efeitos dos danos e a escassez de dados são barreiras relevantes à aplicação prática desses métodos. Técnicas como regularização, seleção criteriosa de características e simulações experimentais são estratégias adotadas para mitigar essas limitações. Por fim, os autores ressaltam que, embora promissores, os métodos de aprendizado de máquina ainda enfrentam grandes desafios na tarefa de prognose estrutural, que requer extrapolação e compreensão aprofundada dos mecanismos físicos de evolução do dano.

Aragão Filho (2008) propõe uma metodologia de identificação estrutural em regime operacional, com foco na estimação das frequências naturais amortecidas, taxas de amortecimento e seus respectivos intervalos de confiança, utilizando exclusivamente os sinais de resposta dinâmica da estrutura. Para alcançar resultados robustos e consistentes, são combinadas diversas técnicas de análise modal output-only baseadas em diferentes fundamentos estatísticos. A metodologia envolve o uso de reamostragem bootstrap, estimadores recursivos e fusão de informações para fornecer estimativas híbridas confiáveis. A abordagem foi validada por meio de simulações numéricas e aplicada experimentalmente em uma passarela de pedestres, demonstrando sua eficácia e robustez frente à variabilidade inerente das estimativas modais.

Mehrjoo et al. (2008) utilizaram uma RNA do tipo *multi-layered feed-forward*, com algoritmo *back-propagation* para treinamento, para estimar as intensidades de danos das articulações em estruturas de pontes treliçadas. A técnica empregada para superar os problemas associados a muitos parâmetros desconhecidos em um grande sistema estrutural é a identificação subestrutural. As frequências e modos de vibração naturais foram usadas como parâmetros de entrada na RNA para identificação de danos, principalmente para o caso com medições incompletas das formas modais. O trabalho

apresenta exemplos de análises numéricas de pontes treliçadas para demonstrar a precisão e a eficiência do procedimento proposto.

Em González-Pérez e Valdés-González (2010) é apresentada a aplicação de RNAs para a detecção de danos estruturais nas vigas de uma ponte. Um modelo analítico da estrutura foi desenvolvido para gerar 12800 cenários de danos, nos quais a rigidez à flexão dos elementos estruturais foi modificada para simular os danos. As rigidezes foram utilizadas como dados de saída da RNA e as diferenças de energia de deformação modal foram usadas como dados de entrada. Adicionalmente, para verificar a capacidade de generalização RNA na presença de ruído nas medições, foram analisados quatro níveis de ruído (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%). Observou-se que o modelo de RNA desenvolvido foi capaz de obter com precisão a localização e a gravidade dos danos na ponte estudada.

Choi e Sweetmans (2010) propuseram duas metodologias eficientes para o cálculo de momentos estatísticos (média, desvio padrão, assimetria e curtose) aplicáveis ao monitoramento da integridade estrutural com redes de sensores inteligentes. A primeira baseia-se no uso de histogramas para obter momentos de forma rápida e ajustável à precisão dos sensores, permitindo economia significativa de CPU e memória em séries temporais longas. A segunda introduz um método analítico novo para combinar momentos de diferentes segmentos de dados, possibilitando processamento paralelo ou sequencial. Testes em uma plataforma offshore mostraram que as abordagens podem reduzir em até 75% o custo computacional e até 99% o uso de memória, sem perda relevante de precisão, tornando-as promissoras para aplicações práticas em monitoramento estrutural em tempo real.

Cury (2010) empregou diferentes técnicas acopladas a Análise de Dados Simbólicos (ADS) na detecção de danos estruturais, através de medidas dinâmicas (acelerações) adquiridas *in situ* e parâmetros modais identificados (frequências naturais). Foram aplicados procedimentos de classificação não supervisionados (divisões hierárquicas, aglomerações hierárquicas e nuvens dinâmicas) e supervisionados (árvores de decisão Bayesianas, redes neurais e máquinas de vetores de suporte), na discriminação dos diferentes estados de saúde da estrutura. Foi avaliado ainda o impacto de efeitos ambientais (variações térmicas) nos parâmetros modais, através de duas técnicas de regressão dos dados (regressão linear múltipla e não linear baseada em redes neurais).

O programa desenvolvido foi validado com um modelo numérico de uma viga duplamente apoiada discretizada por elementos finitos. Em seguida, foi aplicado as campanhas de medição realizadas no viaduto ferroviário de concreto armado PK075+317,

que liga Paris a Lyon. E por fim, aplicado as medições da ponte PI-57, em concreto protendido que liga Paris a Lille.

A união da ADS com métodos de classificação de dados, aplicados a estudos de casos numéricos e ensaios experimentais, possibilitou a discriminação de estados estruturais, que podem estar ligados à existência de danos, com elevado índice de acerto. Foram apresentados resultados relevantes quanto a análise das frequências naturais, que utilizando a representação simbólica de dados, baseadas em histogramas, puderam classificar melhor as variações de frequência. Destacou-se ainda, a importância da aplicação de técnicas de correção das propriedades modais identificadas para campanhas de medições em períodos diferentes do ano, devido aos efeitos térmicos.

Cury et al. (2010) utilizaram a análise de dados simbólicos (ADS) aplicada na classificação de diferentes comportamentos estruturais e na classificação de novos dados em comportamentos estruturais anteriormente destacados. Para tanto, informações brutas (medidas de aceleração) e informações processadas (dados modais) são utilizadas para extração de características. Os dados são descritos na ADS por dois tipos de histogramas (20 classes e intervalos interquartis), algumas técnicas de clustering são aplicadas para classificação dos dados (métodos de divisão hierárquica, agrupamento dinâmico e esquemas aglomerativos hierárquicos), utilizando como medida de dissimilaridade da distância de *Hausdorff* e três índices de determinação do número ideal de clusters (CH, C* e Γ [MILLIGAN e COOPER, 1985]) foram investigados quanto a capacidade de detectar o número correto de clusters.

Os métodos são aplicados aos dados de testes experimentais realizados no viaduto ferroviário da França que liga Paris e Lyon. As medições foram registradas para três condições estruturais diferentes (antes, durante e depois de um processo de reforço). Os resultados mostram que os métodos ADS são eficientes para classificar e discriminar modificações estruturais tanto considerando os dados de vibração quanto os parâmetros modais. Em geral, tanto os métodos de divisão de hierarquia quanto os de nuvem dinâmica produzem resultados melhores se comparados àqueles obtidos usando o método aglomerativo de hierarquia. Resultados mais robustos são fornecidos por dados modais do que por dados de medição.

Crémona et al. (2011) utilizaram a Análise de dados simbólicos (ADS) associada a métodos de aprendizagem não supervisionados (nuvens dinâmicas e divisão hierárquica) e supervisionados (redes neurais e máquinas de vetores de suporte) na classificação de diferentes comportamentos estruturais através de informações brutas (acelerações) e

processadas (frequências naturais e modos) da estrutura, com a utilização da distância de Hausdorff como medida de dissimilaridade. Os métodos foram aplicados aos dados de monitoramento de um viaduto ferroviário localizado na França, que passou por um reforço para evitar efeitos de ressonância na travessia de comboios de alta velocidade.

Primeiramente, os métodos foram utilizados na discriminação de duas condições (antes e depois do reforço) para comparar as alterações estruturais induzidas pelo reparo realizado em 2003. Os métodos foram eficientes na classificação tanto dos dados de vibração quanto dos parâmetros modais. Em seguida, foram acrescentadas novas medições realizadas durante os anos 2004 a 2006 para atestar a eficiência das obras de reforço ao longo do tempo. Análises preliminares considerando frequências naturais ou formas modais demonstraram ser insuficientes na classificação de novos testes. Ao serem introduzidos métodos de ADS e reconhecimento de padrões na atribuição de clusters previamente identificados, ou eventualmente a um comportamento estrutural totalmente diferente, os resultados na maioria das vezes não obtiveram a classificação correta. Os autores afirmam que no geral, as frequências naturais parecem ser mais sensíveis a mudanças estruturais que os sinais ou formatos modais.

Em continuidade ao trabalho de Crémona et al. (2011), Cury e Crémona (2012) abordaram os resultados obtidos pelos métodos de agrupamento não supervisionado, considerando ADS com histogramas de 20 categorias e intervalos interquartis, dando ênfase a análise da evolução do comportamento dinâmico do viaduto ao longo do tempo, que demonstrou que após poucos anos não é mais observada eficiência no reforço.

Cury et al. (2012) apresenta uma análise da influência dos efeitos da temperatura nas frequências modais durante monitoramentos de longo prazo, aplicados a uma ponte caixão em concreto protendido localizada na autoestrada A1, na França. Durante o monitoramento experimental de seis meses, as frequências modais dos primeiros sete modos e temperaturas foram medidas em intervalos de três horas. Foram propostos modelos de regressão baseados em redes neurais para quantificar o efeito da temperatura nos parâmetros modais (frequências e formatos modais). A análise dos parâmetros modais revelou uma elevada sensibilidade às alterações de temperatura.

Os autores ainda utilizaram da ADS combinada a três técnicas de agrupamento (divisão hierárquica, agrupamento dinâmico e aglomeração hierárquica), para manipular os dados de vibração e modais, com o objetivo de discriminar diferentes estados estruturais na avaliação do efeito do reforço (realizado posteriormente ao primeiro monitoramento) nas características vibratórias da ponte. Dois índices de determinação do número ideal de

clusters (CH e Γ) foram investigados quanto a capacidade de detectar o número correto de clusters.

Os resultados indicaram que alterações de 4% na rigidez, correspondentes a uma alteração de 2% na primeira frequência, puderam ser detectados com um nível de confiança de 90%. Os métodos de divisão hierárquica e nuvens dinâmicas apresentaram os melhores resultados. Todos os métodos de agrupamento fornecem dados mais robustos quando aplicados a dados modais (comparados aos dados brutos). Técnicas de agrupamento aplicadas em conjunto com a ADS obtém maior precisão na classificação dos estados estruturais se comparados a análise clássica dos dados. A correção de temperatura através da normalização dos dados e da aplicação do método de regressão melhorou consideravelmente os resultados na detecção de novos estados.

O livro de Farrar e Worden (2012) apresenta uma análise abrangente do monitoramento de saúde estrutural (SHM), com ênfase na aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões. Os processos inerentes ao SHM são detalhados, acompanhados de diversas aplicações numéricas e experimentais. Através da revisão de pesquisas de diversos autores, mostra-se que o paradigma do aprendizado de máquina oferece uma estrutura robusta para o desenvolvimento de soluções para SHM.

Alves (2012) associou a Análise de Dados Simbólicos a diferentes métodos de classificação na detecção de diferentes estados estruturais através de medições dinâmicas realizadas *in loco* (acelerações) e seus parâmetros modais identificados. Foram utilizadas diversas técnicas de particionamento de dados (aglomerações hierárquicas, nuvens dinâmicas e clustering fuzzy), com diferentes métodos de classificação (aglomeração hierárquica, k-means e c-means), variando a medida de dissimilaridade (minkowski, cityblock, euclidiana, chebychev, cosine, correlation e spearman), o critério de agregação (single, complete, average, weighted, centroid, median e ward) e o método de inicialização (amostral, uniforme e cluster).

O estudo foi aplicado ao modelo numérico de uma viga bi-apoiada e ao viaduto ferroviário PK075+317. Os melhores resultados foram obtidos com o método de classificação k-means, com a medida de dissimilaridade correlation, o critério de agregação ward e o método de inicialização uniforme.

Em Xu et al. (2012) é proposta uma abordagem de identificação de parâmetros estruturais e de detecção de danos utilizando séries temporais de medições de deslocamentos, e o desempenho da abordagem é validado experimentalmente com um modelo de estrutura

de pórtico em condições intacta e com danos em conexões. Os deslocamentos da estrutura do pórtico sob excitação da base foram medidos por sensores de deslocamento a laser sem contato. A abordagem proposta é realizada usando duas redes neurais: uma é chamada emulador de rede neural baseado em deslocamento e a outra é chamada rede neural de avaliação paramétrica. Primeiro, a base teórica e a seleção da entrada e saída das redes são explicadas, e, na sequência, um índice de identificação chamado raiz quadrada média do vetor de diferença de deslocamento de previsão é definido. O desempenho da metodologia proposta para detecção de danos do modelo de estrutura de pórtico com diferentes cenários de danos de conexões, introduzidos pelo afrouxamento dos parafusos que conectam vigas e colunas é investigado com o uso direto da medição de deslocamento sob excitações de base. Os resultados da abordagem proposta de identificação baseada em deslocamento no domínio do tempo foram comparados com os mesmos, com base nas frequências extraídas, e mostram que a metodologia de domínio do tempo proposta pode identificar a variação da rigidez entre andares devido ao dano de conexões com precisão aceitável, sem quaisquer formas modais e frequências extraídas de um ensaio dinâmico. A abordagem proposta fornece uma maneira alternativa para detecção de danos em estruturas de engenharia a partir do uso direto de medições de deslocamentos a excitações dinâmicas.

Em Menache *et al.* (2012) é apresentado um procedimento de detecção de dano, com utilização de um modelo controlado em escala de ponte metálica, baseado na resposta dinâmica experimental e na atualização do seu modelo numérico, com um cenário de dano induzido na transversina central. Foram realizados ensaios dinâmicos na estrutura nos dois estados, íntegro e danificado. Os autores constataram uma pequena variação nos parâmetros modais, em especial nos modos 2 e 3, e concluem que os modos mais suscetíveis à detecção de danos são aqueles em que o dano induzido encontra-se nos pontos onde a amplitude do modo é maior, e que, no entanto, como o dano foi feito nos membros transversais, não há variação significativa devido ao dano no primeiro modo porque sua rigidez é mais influenciada pelos elementos longitudinais, ao contrário do segundo e terceiro modos, em que os elementos transversais estão mais envolvidos no comportamento de cada um destes modos.

Em Qunfeng *et al.* (2013) é apresentada a aplicação do método de energia de deformação modal para detecção de danos na estrutura de uma ponte em viga contínua. São adotados danos em diferentes locais da estrutura, com diferentes níveis de gravidade. Para definição dos primeiros cinco modos de vibração natural foi utilizado o *software* ANSYS,

com modelo em elementos finitos, e um algoritmo implementado no MATLAB para cálculo do índice de danos com base na energia de deformação modal. Os autores afirmam que, para o caso estudo, a metodologia foi capaz de detectar, localizar e quantificar o nível do dano com precisão.

Shu *et al.* (2013) implementaram um algoritmo de detecção de danos baseado em RNAs utilizando as propriedades estatísticas das respostas dinâmicas estruturais como dados de entrada. O estudo de viabilidade da utilização das mudanças nas variâncias e covariâncias, como entrada da rede, é feito através de uma análise de sensibilidade. Um modelo em elementos finitos de uma ponte ferroviária foi desenvolvido no *software* ABAQUS, considerando casos com dano único e múltiplos danos. Uma RNA *Backpropagation* foi desenvolvida e treinada para realizar a detecção dos danos. Foram realizados testes numéricos com diferentes propriedades de veículos atuantes para comprovar a validade e eficiência da abordagem proposta. Segundo os autores, os resultados revelam que a RNA, juntamente com os dados estatísticos, pode estimar corretamente a localização e severidade do dano e que o procedimento se mostrou confiável e eficaz, valendo salientar que a identificação do local foi mais difícil que a determinação da gravidade do dano.

Goh *et al.* (2013) apresentam uma abordagem que combina um modelo de RNA e um método estatístico de vários estágios para detectar danos com base no número limitado de sensores, considerando as incertezas, visto que dois dos principais problemas no campo de detecção de danos baseado em vibração é o número limitado de sensores e a existência de incertezas. A primeira etapa do processo, utilizando uma RNA, tem como objetivo prever os modos de vibração natural não identificados experimentalmente, visto a limitação dos dados medidos. A segunda etapa do processo, também utilizando uma RNA, é dedicada a prever o local e a gravidade de danos usando os dados modais completos obtidos com a RNA da primeira etapa. Para incorporar as incertezas nos dados modais, o ruído gaussiano é aplicado às variáveis de entrada e a probabilidade de existência de danos é calculada usando o método de estimativa pontual de Rosenblueth. A viabilidade do método proposto é demonstrada usando um modelo analítico de uma laje de concreto armado. A aplicação de uma RNA de vários estágios mostrou resultados com potencial para superar o uso de um número limitado de sensores no monitoramento da saúde estrutural.

Em Hakim e Razak (2013), a aplicabilidade das RNAs como uma ferramenta para prever a gravidade dos danos de uma ponte mista de aço e concreto é investigada. Os dados de treinamento das RNAs, especificamente frequências naturais, foram obtidos a partir da

análise modal numérica. Ao incorporar os dados de treinamento, as RNAs foram capazes de produzir saídas em termos de gravidade de danos usando as cinco primeiras frequências naturais. O trabalho concluiu que uma RNA treinada apenas com dados de frequência natural pode determinar a gravidade dos danos que, nesse caso, apresentou um erro máximo de 6,8%.

Dackermann et al. (2014) apresentam uma técnica para identificação de danos, baseada somente em dados coletados da resposta da estrutura, utilizando análise Cepstrum e RNAs. O método começa aplicando análise modal operacional baseada em Cepstrum, que separa os efeitos da fonte de excitação e da resposta da estrutura para determinar as funções de resposta em frequência da estrutura, quando utilizadas somente medições de resposta no processo de identificação. A análise de componentes principais é aplicada às funções de resposta em frequência obtidas para reduzir o tamanho dos dados, e o dano estrutural é então detectado utilizando um conjunto de dois estágios de RNAs. O método proposto é verificado experimentalmente e numericamente usando uma estrutura de dois andares de laboratório e um modelo em elementos finitos, ambos submetidos a uma única excitação. A estrutura de laboratório é testada em uma mesa vibratória de grande escala gerando vibrações ambientais de distribuição gaussiana. Na investigação numérica, a mesma entrada é aplicada ao modelo numérico, mas as respostas obtidas são poluídas com diferentes níveis de ruído gaussiano branco para replicar melhor as condições reais. O dano é simulado nas investigações experimentais e numéricas alterando a condição de vinculação de elementos selecionados. No total, quatro alterações de conexão são investigadas. Os resultados mostraram que o método proposto é eficaz na identificação de danos nas conexões da estrutura investigada. Como a técnica não requer um conhecimento preciso da excitação, ela tem potencial para uso no monitoramento de saúde estrutural. Como apenas uma excitação foi utilizada, os autores também fazem recomendações sobre como a técnica poderia ser aplicada no caso mais geral de múltiplas entradas.

Em Jin *et al.* (2016) é desenvolvido um método utilizando uma RNA baseada no filtro de Kalman estendido para eliminar os efeitos da temperatura e detectar danos em estruturas com sistemas de monitoramento contínuo. Foram obtidos dados de aceleração e de temperatura de uma ponte rodoviária localizada em Connecticut, nos Estados Unidos. As correlações entre frequências naturais identificadas e as temperaturas foram analisadas para selecionar as variáveis de entrada, consideradas pelos autores como apropriadas, para o modelo da RNA. Os pesos da rede foram estimados pelo filtro de Kalman

estendido, que também foi utilizado para derivar os intervalos de confiança das frequências naturais para detectar os danos. Um ano de dados de monitoramento foram introduzidos na RNA para fins de treinamento. Para avaliar as mudanças nas frequências naturais no caso de danos estruturais reais, foram simulados cenários de danos utilizando um modelo em elementos finitos. Segundo os autores, os resultados dos testes numéricos mostram que os danos simulados foram capturados com sucesso e a abordagem proposta possui grande potencial de detecção de danos em tempo real para estruturas civis que são instrumentadas continuamente, destacando a sua forma objetiva de redução da incerteza do processo.

Strackiewicz e Barszcz (2016) utilizaram RNAs, com observação adicional de parâmetros de regressão linear calculados no erro de estimativa entre condições saudáveis e desconhecidas, para detectar o desenvolvimento de falhas caixas de engrenagem planetárias de turbinas eólicas. A abordagem proposta foi aplicada com sucesso em um exemplo real de falha da engrenagem anelar na caixa de engrenagens da turbina. A literatura alerta sobre os problemas recorrentes em engrenagens de turbinas eólicas, bem como sobre a dificuldade de identificação de falhas, e destacam que são os elementos mais suscetíveis a problemas no sistema mecânico e também os mais caros para substituição. Em máquinas que trabalham em condições operacionais altamente variáveis, como turbinas eólicas, os estimadores são fortemente flutuantes, e essa flutuação não é linearmente correlacionada aos parâmetros de operação. Assim, o aumento repentino de algum indicador específico não precisa necessariamente indicar o desenvolvimento de falha. Sendo assim, os resultados obtidos pelos autores se mostraram bastante relevantes.

Em Alves (2016), foram avaliados diversos indicadores aplicáveis à identificação de alterações estruturais, incluindo técnicas como Análise de Dados Simbólicos, Análise de Componentes Principais, Função de Resposta em Frequência, Transformadas de Fourier, Densidade Espectral, Wavelets e parâmetros estatísticos de ordem superior. A análise considerou tanto abordagens fundamentadas exclusivamente em dados de aceleração — utilizando algoritmos de classificação supervisionada (como redes neurais artificiais e máquinas de vetores de suporte) e não supervisionada (como agrupamentos hierárquicos, k-means e c-means) — quanto abordagens baseadas em modelos físicos, nas quais são empregados métodos de otimização, como algoritmos genéticos.

As metodologias propostas foram aplicadas a diferentes casos de estudo, abrangendo modelos numéricos (como uma ponte ferroviária hipotética e a Ponte de São Lourenço) e experimentais (como uma viga biapoiada e o Viaduto PK 075+317). Em algumas dessas

aplicações, parâmetros modais — como frequências naturais, modos de vibração e suas derivadas — foram utilizados para localizar e quantificar danos. Observou-se que os métodos orientados por dados, embora eficazes na detecção de anomalias, apresentam limitações quanto à localização e quantificação dos danos; sua principal vantagem reside na agilidade, o que favorece aplicações em campo e em monitoramento em tempo real. Em contrapartida, os métodos baseados em modelos oferecem diagnósticos mais completos, porém exigem a construção de modelos numéricos detalhados, o que implica maior complexidade, tempo de implementação e custo computacional.

Ortiz Morales (2016) avaliou a influência da temperatura sobre os parâmetros modais de uma estrutura através de ensaios dinâmicos realizados em uma viga de aço bi apoiada submetida à diferentes temperaturas, fixas com intervalos de $\pm 2^\circ\text{C}$, variando de 18°C a 56°C , e alguns cenários de dano estrutural, obtidos através de cortes transversais progressivos na seção transversal da viga. O trabalho objetivou buscar métodos onde o efeito térmico não ocultasse as variações causadas pelo dano. As frequências naturais, os modos de flexão e as taxas de amortecimento foram analisadas através de métodos de análise de estatística básica (gráficos de dispersões, médias e intervalos de confiança e comparações gráficas), análises de regressões lineares robustas, critério de garantia modal (MAC), diagramas de controle e teste de hipótese de Kolmogorov – Smirnov.

Ao final do trabalho, não foi possível estabelecer uma relação matemática entre as variações de temperatura, parâmetros modais e danos, devido à natureza complexa deste fenômeno. A variação dos parâmetros modais devida ao efeito térmico não seguiu uma distribuição normal, o que levou a pequena efetividade na identificação dos danos pela maioria das técnicas baseadas na normalidade dos dados. Os parâmetros modais se mostraram pouco sensíveis aos danos estruturais. Já os testes de hipótese de Kolmogorov – Smirnov conseguiram identificar os danos estruturais desde o primeiro cenário de danos, tanto para as frequências naturais quanto para as taxas de amortecimento, se mostrando pouco sensíveis às temperaturas, apresentando os melhores resultados entre as técnicas abordadas.

Santos et al. (2016), aplicaram Transformadas Discretas de Wavelet nos modos de vibração obtidos numericamente a partir de um modelo de viga metálica tipo I devidamente calibrado com o intuito de detectar danos na estrutura.

Marcy et al. (2016) aplicaram Redes Neurais Artificiais (RNAs), especificamente os mapas auto-organizáveis (*Self-Organizing Maps* – SOM), combinados com técnicas de atualização de modelos numéricos, para a identificação de danos em vigas de aço sob

condições de apoio livre-livre. A partir de registros de aceleração, foram estimadas as propriedades dinâmicas das estruturas, e os resultados indicaram boa precisão das RNAs na localização dos danos.

Em continuidade, Marcy (2017) ampliou essa abordagem ao investigar o desempenho de três tipos de redes neurais — *Backpropagation*, *Learning Vector Quantization* (LVQ) e SOM — aplicadas tanto a uma viga experimental quanto à Ponte Infante Dom Henrique, em Portugal. Foram realizados ajustes nos parâmetros dos algoritmos com o objetivo de avaliar a robustez dos modelos frente a diferentes condições operacionais. Os resultados obtidos foram promissores, demonstrando o potencial das RNAs para aplicação em sistemas de monitoramento de estruturas de pequena e grande escala.

Neves *et al.* (2017) apresentam uma abordagem de detecção de danos que não necessita de simulações através de modelos, baseada em RNAs. O método propõe o uso de acelerações do tabuleiro registradas no passado como uma entrada para uma RNA que, depois de ser devidamente treinada, segundo os autores, é capaz de prever as acelerações futuras. A diferença entre o valor medido e o valor previsto pela rede funciona como um indicador primário de que podem existir danos. O método é aplicado a dados coletados a partir da resposta dinâmica de uma ponte ferroviária fictícia, submetida à passagem de um trem, considerando a ponte em ambientes saudáveis e dois cenários danificados.

No primeiro estágio do método proposto, as RNAs foram treinadas com uma abordagem de aprendizado não supervisionada, com dados de entrada compostos pelas acelerações obtidas na ponte sem danos. Com base nos valores de aceleração em momentos anteriores, as redes são capazes de prever acelerações futuras. No segundo estágio, os erros de previsão de cada rede foram caracterizados estatisticamente por um processo gaussiano que seleciona um limiar para indicação da existência do dano. Segundo os autores, comparando os índices de dano com o referido limiar, é possível discriminar entre uma estrutura com danos ou sem danos. O estudo também compreende, com base nesse limiar, a determinação do custo total esperado associado à estratégia de detecção de danos adotada, bem como aquela que produz o menor valor.

Nozari *et al.* (2017) utilizaram a atualização de um modelo numérico em elementos finitos para identificar danos em um edifício de concreto armado de dez andares. Danos reais foram aplicados no edifício através da remoção de seis paredes de concreto. A resposta a vibrações ambientais da estrutura foi registrada antes e após os danos induzidos. Um método de Análise Operacional Modal foi utilizado para identificar as frequências naturais, coeficientes de amortecimento e modos de vibração naturais da estrutura. O

modelo numérico inicial da estrutura foi criado com base em medições de campo e em ensaios de amostras de materiais retiradas da estrutura. O modelo inicial, sem danos, foi atualizado com base nas propriedades dinâmicas identificadas experimentalmente. Os parâmetros do modelo atualizado revelaram uma variação considerável, apesar de os parâmetros modais identificados terem exibido um nível de variabilidade muito mais baixo. Um subconjunto dos modelos de referência atualizado foi subsequentemente empregado para detectar a localização e a extensão dos danos induzidos, atualizando a rigidez equivalente de 12 subestruturas de parede usando os dados medidos no estado danificado. Embora o dano identificado tenha sido geralmente de acordo com os danos estruturais induzidos, os resultados foram sensíveis à variação dos parâmetros modais identificados.

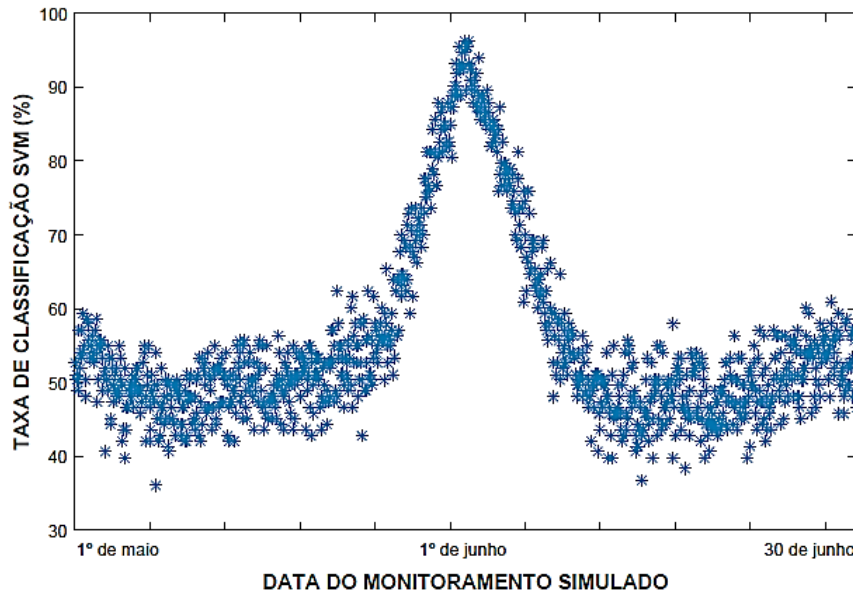
Hossain et al. (2017) analisam algumas pesquisas anteriores onde RNAs foram aplicadas para resolver diferentes problemas de identificação paramétrica inversa baseados em vibração. A adoção de diferentes algoritmos de RNA, esquemas de entrada-saída e processamento de sinal necessário foram explanados em detalhes consideráveis. Além disso, uma série de problemas foram relatados, incluindo os fatores que afetam a previsão de RNAs, bem como as vantagens e desvantagens das abordagens de RNA com relação aos métodos inversos gerais. Com base na análise crítica, sugestões para pesquisadores em potencial também foram fornecidas para trabalhos futuros.

Amaral (2017) avaliou o uso das Redes Neurais Artificiais (ANN) e Máquinas de Vetor Suporte (SVM) na detecção de alterações estruturais baseadas na análise da evolução das respostas dinâmicas, utilizando características modais e indicadores estatísticos extraídos diretamente dos sinais temporais, aplicados a um modelo de viga, um protótipo de laje e o ensaio experimental de um viaduto ferroviário. As características modais alcançaram melhores resultados que os indicadores estatísticos, principalmente em casos de respostas dinâmicas curtas, onde os indicadores estatísticos tiveram uma média de acerto em torno de 50%, contra a média de 97% dos dados modais. Os algoritmos SVM tiveram um desempenho ligeiramente melhor que os ANN.

O trabalho apresentou ainda um classificador baseado em SVM capaz de detectar mudanças no comportamento estrutural e o momento que elas ocorrem através do histórico de variação das frequências naturais e temperatura, aplicado ao modelo numérico de uma viga bi apoiada e a dados oriundos do monitoramento contínuo da Torre de Gabbia na Itália. No qual, se o algoritmo não distinguir ambas as classes (percentual de classificação menor que 70%), não há alteração estrutural, mas, se o algoritmo detectar

com êxito as duas classes (acima de 70%), indica que houve alteração estrutural. A Figura 2.7 traz um gráfico contendo os percentuais de acerto na classificação dos dois estados em função do tempo de monitoramento da estrutura da viga, no qual pode-se identificar um possível aparecimento de dano na estrutura por volta do dia 1º de junho.

Figura 2.7 – Detecção do dano estrutural utilizando a 1ª frequência natural do modelo da viga.



Fonte: Amaral (2017).

Santos et al. (2017) combinaram a Análise de Componentes Principais (PCA), com base na regra do *broke-stick*, a métodos de agrupamento aplicados a Objetos de Dados Simbólicos (SDO), utilizando distâncias simbólicas. O objetivo foi desenvolver uma estratégia original capaz de remover os efeitos de ações regulares impostas às estruturas, sem a necessidade de medi-las, além de comprimir conjuntos inteiros de dados de SHM, com dimensões arbitrárias, em um único índice de dano sensível. Aplicada a níveis de ruídos medidos no local, a técnica proposta demonstrou ser capaz de detectar automaticamente danos correspondentes a apenas 1% de redução de rigidez em um único cabo estaiado, utilizando poucos sensores estáticos de baixo custo e considerando uma taxa de falsa de detecção de apenas 0,1%.

Em Asadollahi et al. (2018) foi proposto um método de inferência bayesiana robusto que marginaliza as precisões de erro de predição e aplica o algoritmo Transitional Markov Chain Monte Carlo (TMCMC) ao processo. A precisão do erro de marginalização proposta é comparada com outros dois tratamentos de precisões de erro de previsão, incluindo as precisões de erro constante e as precisões de erro de atualização por meio de análise teórica e investigação numérica, a qual utilizou modelagem em elementos finitos da ponte estudada. O TMCMC foi utilizado para extrair amostras da Função de Densidade

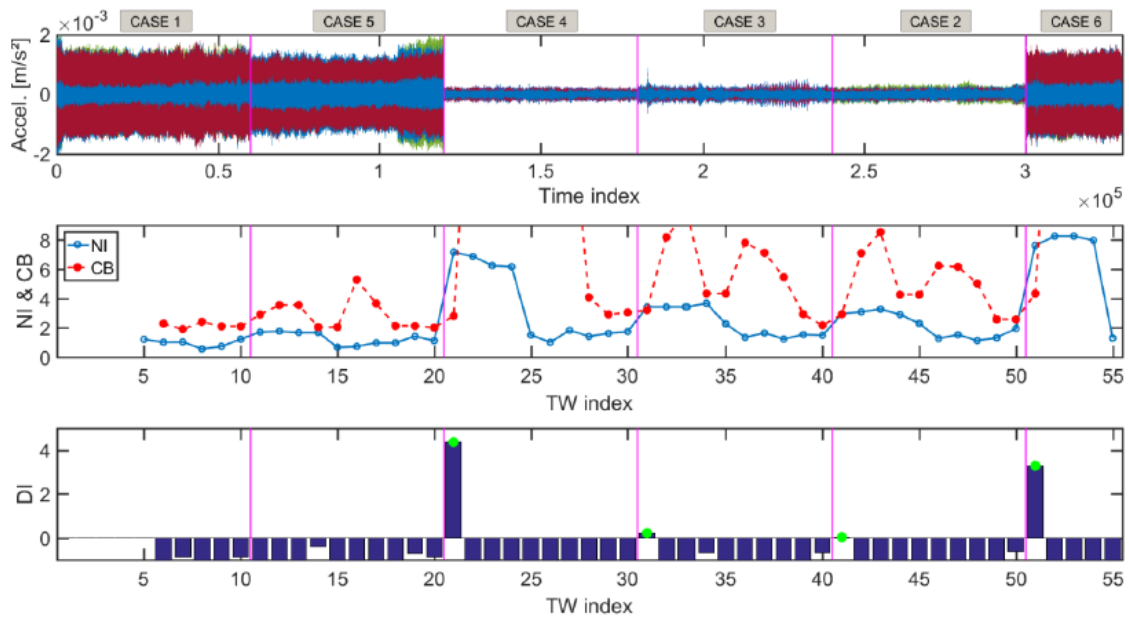
de Probabilidade (FDP) posterior dos parâmetros do modelo estrutural e dos parâmetros de precisão de erro de predição incertos. Foi descoberto que o método de inferência bayesiana proposto com precisões de erro de predição marginalizadas como parâmetros "incômodos" produziu um modelo em elementos finitos com quantificação de incerteza posterior mais precisa e predição de propriedade modal robusta. Ao aplicar os parâmetros modais identificados em ensaios dinâmicos da ponte, foram escolhidas duas classes de modelos candidatos utilizando diferentes agrupamentos de parâmetros com base nos resultados de agrupamento de uma análise de sensibilidade e aplicado o Teorema de Bayes no nível da classe do modelo. Ao implementar o amostrador TMCMC, tanto as distribuições posteriores dos parâmetros do modelo estrutural quanto a plausibilidade das duas classes de modelo foram caracterizadas, visto os dados reais. O cálculo das probabilidades posteriores sobre as classes dos modelos candidatos forneceu um procedimento para avaliação das classes dos modelos bayesianos, onde o cálculo implementa automaticamente a corte bayesiano de Ockham, que faz um *trade-off* entre ajuste de dados e complexidade do modelo, penalizando as classes de modelos que "superajustaram" os dados. Os resultados da atualização e avaliação do modelo em elementos finitos, com base nos dados reais usando o método proposto, mostraram que o modelo numérico atualizado pode prever as propriedades modais do sistema estrutural com alta precisão, servindo de referência para análise de danos.

Cardoso (2018) apresenta técnicas automatizadas de identificação modal baseadas em clusters e duas técnicas para detecção de danos baseadas em medições de dados brutos (acelerações). No primeiro momento, os danos puderam ser detectados em tempo real através de um método não supervisionado e automático, baseado em uma representação simbólica dos dados brutos no domínio do tempo (1º Quartil, Mediana e 3º Quartil – IRQM), com o método de classificação *k-medoids* (e métrica euclidiana), com a escolha automática do número de *clusters* através de quatro diferentes índices de validação de agrupamento (Calinski-Harabasz [CALINSKI e HARABASZ, 1974], Davies-Bouldin [DAVIES e BOULDIN, 1979], *Gap Statistic* [TIBSHIRANI et al., 2001] e *Silhouette* [ROUSEEUW, 1987]) e dois índices escalares de detecção de valores discrepantes (sensíveis a danos), sendo um para monitoramento de curto prazo (FDI – *First Outlier Detection Index*) e um para monitoramento de longo prazo (SDI – *Second Outlier Detection Index*). Essa parte da pesquisa também está publicada em Cardoso et al. (2019b).

O autor propõe também, em Cardoso et al. (2019a), o uso de um novo tipo de representação simbólica dos dados (TF-IRQM – *Time-Frequency Interquartile Range and Median*), onde dois tripletos de quartis (1º quartil, mediana e 3º quartil) dos dados brutos, sendo um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência (através da Transformada Rápida de Fourier - FFT), são utilizados na representação das acelerações. A aplicação no monitoramento contínuo de estruturas reais atestou o notável poder de fusão de dados e representatividade fornecido pelo TF-IQRM. Com a calibragem correta do tamanho do objeto e da janela de tempo móvel, foram alcançados altos índices de acerto de danos e uma baixa taxa de alarmes falsos. O método ainda apresentou as vantagens de não necessitar de excitações medidas ou controladas (apenas medições de vibrações ambientes) e não ser afetado pelos efeitos ambientais/operacionais (temperatura, vento, trânsito etc.).

Utilizando a nova representação de SDO proposta por Cardoso et al. (2019a), a Figura 2.8 apresenta a detecção de danos em um pórtico contraventado onde o caso 1 indica a estrutura intacta, os casos 5, 4, 3 e 2 apresentam danos progressivos no sistema de contraventamento e o caso 6 representa à reparação de vários elementos e danos em alguns outros. As leituras são colocadas em ordem cronológica, de forma a criar um monitoramento contínuo. As linhas em magenta representam as divisões conhecidas de estados da estrutura onde devem ser acusadas alterações na estrutura. Quando o índice NI (Índice de Novidade) supera o valor de CB (Limite de Confiança), o índice de dano acusa a presença de dano (ponto verde) a partir daquele momento. Nota-se que para essa estrutura apenas o caso 5 não teve seu dano notado, por ser uma alteração pequena, entretanto nesse caso não houve alarmes falsos.

Figura 2.8 – Detecção de danos em estrutura contraventada.



Fonte: Cardoso (2018).

Chaim et al. (2018) e Chaim (2019) com o objetivo de detectar deterioração em uma estrutura, através de alterações das frequências naturais, adotaram uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo Fuzzy ARTMAP, por apresentar aprendizado rápido e estabilidade frente a vetores de entrada altamente mutáveis, como mecanismo central de um método de monitoramento de saúde estrutural para identificar e categorizar falhas em dados experimentais provenientes de um sistema mecânico similar a um pequeno prédio de dois andares. Ao serem encontrados comportamentos anômalos, determinou-se em qual(is) andar(es) se dava(m). A acurácia da rede foi avaliada através de um estudo de quantidade de dados necessários para o desempenho satisfatório da rede.

Teng et. al (2019) utilizou uma rede neural convolucional (CNN) para extrair as características de parâmetros modais de uma estrutura de aço e, um algoritmo de classificação para julgar o estado de dano da estrutura. A CNN foi eficaz na detecção da estrutura intacta, dano único e dano múltiplo com uma precisão de 100%. As amostras foram ainda aplicadas à rede neural de retropropagação (BP), que não conseguiu detectar os estados estruturais.

Em Sharifi et al. (2019), um modelo de RNA foi desenvolvido como uma ferramenta para simular e prever as capacidades de forças máximas de vigas de aço. Uma fórmula baseada na RNA foi proposta para prever as cargas de falha de vigas celulares de aço submetidas à flambagem lateral por torção. A tentativa foi feita para avaliar uma fórmula prática considerando todos os parâmetros que podem afetar a resistência à flambagem lateral por

torção. Em seguida, foi feita uma comparação entre a fórmula proposta e as previsões obtidas do Australian Standard (AS4100). Os resultados forneceram algumas evidências de que a fórmula proposta obteve previsões mais precisas do que os guias de projeto AS4100. Finalmente, uma análise de sensibilidade foi desenvolvida usando o algoritmo de Garson para determinar a importância de cada parâmetro de entrada.

Em Gulgec et al. (2019) é apresentada uma Rede Neural Convolutiva (CNN) para o problema de detecção e localização de danos. A técnica CNN tem a capacidade encontrar características abstratas e limites complexos de classificadores que são capazes de distinguir diversos padrões dos problemas. Os autores projetaram uma CNN para classificar casos simulados de dano e intactos, e localizar o dano quando da sua existência. O desempenho da técnica proposta foi avaliado por meio de simulações em elementos finitos de conexões estruturais danificadas e intactas. As amostras foram treinadas utilizando distribuições de deformação como consequência de várias cargas com vários cenários de diferentes trincas. Configurações de danos completamente novas foram introduzidas no modelo durante os testes. Segundo os autores, com base nos resultados, a identificação e localização dos danos foram obtidas com alta precisão, robustez e eficiência computacional.

Azam et al. (2019) apresentam uma estratégia para detectar, localizar e determinar a intensidade dos danos em estruturas utilizando RNAs e a Decomposição Ortogonal Própria. O aprendizado supervisionado foi adotado para ajudar a discriminar variações nos modos ortogonais próprios devido a danos causados por variações de carga aplicadas. Um classificador neural foi treinado para categorizar a resposta a diferentes padrões de carga, e uma RNA de regressão foi subsequentemente treinada usando um conjunto de cargas aplicadas para detectar possíveis danos com base nos modos categorizados. Para demonstrar a eficácia da abordagem proposta, experimentos simulados foram realizados com a intenção de identificar índices de danos para uma ponte de treliça ferroviária. Um modelo tridimensional em elementos finitos, já validado de uma ponte existente, foi utilizado para gerar históricos de tempo de deformação sob cargas de trem medidas a partir de estações de pesagem em movimento próximas à ponte. A eficácia do método proposto foi demonstrada por meio desses experimentos.

Souza et al. (2019) apresenta uma abordagem bayesiana para identificação de danos estruturais, com foco na análise do impacto de diferentes modelos de amortecimento sobre os resultados do diagnóstico. A metodologia utiliza dados modais experimentais obtidos de uma viga de alumínio com acelerômetros, onde a presença de anomalias é

simulada pela inserção de massas concentradas em diferentes posições e magnitudes. A estimação dos parâmetros desconhecidos é feita por meio do método de Monte Carlo em Cadeias de Markov (MCMC), empregando o algoritmo DRAM (Delayed Rejection Adaptive Metropolis).

Os resultados mostram que a abordagem proposta foi eficaz em identificar tanto a localização quanto a magnitude das massas inseridas, mesmo com diferentes hipóteses de amortecimento. No entanto, observou-se que, para taxas de amortecimento inferiores a 1%, os modelos de amortecimento não contribuíram significativamente para reduzir a incerteza de certos parâmetros estimados. Além disso, a posição das massas foi identificada com menor incerteza em comparação à sua magnitude, indicando maior confiabilidade na estimativa de localização do dano.

Finotti et. al (2019) comparou dois algoritmos de aprendizado de máquina para identificar mudanças estruturais usando estatísticas obtidas a partir de dados dinâmicos brutos. Os algoritmos são baseados em Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Vetor de Suporte, avaliados por meio de simulações numéricas usando um modelo de viga simplesmente apoiado, testes experimentais em uma estrutura de viga e, uma ponte ferroviária, na França. Para todos os casos foram considerados diferentes cenários de danos, e os resultados obtidos incentivam o desenvolvimento de ferramentas computacionais utilizando indicadores estatísticos de medidas de aceleração para avaliação de alterações estruturais.

Alves et al. (2020) avaliam o desempenho de uma abordagem baseada em algoritmo genético, com cinco diferentes indicadores de danos (frequências naturais, modos de vibração, frequências naturais e modos de vibração combinados, curvas modais e funções de resposta em frequência) obtidos através de modelos em elementos finitos, aplicada a dois estudos de caso (ponte ferroviária hipotética e real).

Todos os cinco indicadores permitiram detectar, localizar e quantificar múltiplos danos na ponte hipotética com precisão, no entanto, o indicador de frequências naturais foi o mais sensível a menores danos, e o indicador de frequências naturais e modos de vibração foi o que obteve os melhores resultados. Para a ponte real apenas o indicador de frequências naturais e modos de vibração foi avaliado. Obteve sucesso na detecção e localização dos danos, com exceção de uma anomalia na ligação tabuleiro-arco que a localização foi informada em posição simétrica a real, possivelmente pelo fato de danos em posições simétricas da estrutura causarem o mesmo efeito na alteração das frequências de vibração simétrica.

Souza (2020) avaliou diversos tipos de algoritmos de treinamento de Redes Neurais Artificiais do tipo MLP, adaptativos e não adaptativos, e elaborou metodologias para o monitoramento contínuo de estruturas reais em serviço através de casos numéricos de três diferentes estruturas civis. Os parâmetros modais utilizados foram obtidos, exclusivamente, das respostas dinâmicas da estrutura através de vibrações ambientais. Os resultados foram promissores.

Nunes (2020) acoplou o método supervisionado (Redes Neurais Artificiais - RNA) e um não supervisionado (*k-means*) para construir um classificador híbrido capaz de detectar modificações estruturais. Foram utilizadas acelerações na forma de dados simbólicos, baseados nos 10 parâmetros estatísticos propostos por Farrar e Worden (2012), uma camada oculta na RNA, com o algoritmo de aprendizado de Levenberg-Marquardt e o erro médio quadrático como função de custo. Foram testados diversos números de neurônios, métricas de dissimilaridade (*squeuclidean*, *cityblock* e *cosine*), métodos de inicialização dos centroides (*plus*, *sample*, *uniform* e *cluster*) e duas formas de organização dos dados (por sensor e por ensaio). O método foi aplicado a um modelo numérico de viga, uma estrutura de médio porte testada em laboratório e um viaduto ferroviário.

Na maioria dos casos obteve-se taxas de classificação corretas superiores a 80%, em alguns casos chegando a 100%. Nas simulações numéricas, os melhores resultados foram obtidos quando os dados de entrada são organizados por sensores, e nas experimentais por ensaios. Não houve diferenças significativas entre as métricas de similaridade e os métodos de inicialização dos centroides, porém a autora recomendou o uso da métrica *cityblock* e a inicialização *plus*. Houve uma influência negativa na classificação a depender do número de neurônios testados, os melhores resultados foram encontrados com 25 neurônios na camada oculta, entretanto, destaca-se que esse valor depende do número de parâmetros de entrada da rede, quantidade de ruído nos dados, entre outros. Não foram consideradas variações de temperatura na pesquisa.

Nunes et al. (2020) aborda uma combinação de indicadores estatísticos, para caracterizar medidas de aceleração no domínio do tempo, e técnicas de inteligência computacional para detectar danos, combinando classificação de aprendizado supervisionado (redes neurais artificiais) e não supervisionado (agrupamento de *k-means*), na construção de um classificador híbrido, objetivando identificar estados estruturais em tempo real de monitoramento a integridade estrutural. A proposta é aplicada a simulações numéricas e,

testes experimentais realizados em laboratório e *in situ*. O classificador híbrido apresentou um desempenho promissor.

Jesus et. al (2020) utilizou um sistema de monitoramento de vibração e detecção de trincas em pontes através de rede neural convolucional (CNN), onde são classificados os sinais de vibração em quatro categorias (sem vibração, normal, em alerta e crítico) através de uma árvore de decisão (DT), e a detecção de trincas através de simulação, para classificar a estrutura em relação à presença ou ausência de trincas.

Avcı et. al (2021) traz uma revisão abrangente das aplicações mais recentes dos algoritmos *Machine Learning* e *Deep Learning* utilizados para detecção de danos estruturais baseados em vibração em estruturas civis.

Em Rocha (2021), diferentes algoritmos de aprendizado de máquina foram comparados com o objetivo de construir modelos preditivos baseados em dados de monitoramento de saúde estrutural da igreja de Vila Nova de Foz Côa, localizada em Portugal. A avaliação dos modelos considerou as métricas de desempenho obtidas tanto no conjunto de treinamento quanto, principalmente, nos dados de teste, que serviram como critério de validação dos resultados.

Dentre os algoritmos analisados, destacaram-se as redes neurais recorrentes, especialmente as arquiteturas Gated Recurrent Unit (GRU) e Long Short-Term Memory (LSTM), que superaram em desempenho os métodos tradicionais como Floresta Aleatória e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM).

Cong et al. (2021) apresentaram uma pesquisa interessante sobre a utilização de processos de atualização de modelos numéricos na prática da engenharia. Eles buscaram entender a motivação para a atual baixa captação da indústria de monitoramento, modelagem e atualização de modelos para a operação e manutenção de pontes, apesar de mais de duas décadas de pesquisa nesses campos. O estudo analisou as conclusões de uma série de entrevistas do setor com profissionais de ponte especializados no Reino Unido e de uma extensa pesquisa de literatura de estudos de atualização de modelos de pontes para examinar as desconexões entre pesquisa e prática e as questões práticas de implementação de atualização desses modelos. Em particular, o estudo constatou que os danos localizados que resultam em redução local na rigidez estrutural, uma abordagem utilizada na maioria das pesquisas, está sujeita a questões pelos profissionais, pois muitos tipos comuns de dano à ponte podem não induzir mudanças perceptíveis na rigidez estrutural que atuais técnicas de atualização do modelo identificariam. Os autores fazem

recomendações para pesquisas futuras no sentido de impulsionar a adoção do monitoramento de pontes, modelagem e atualização de seus modelos e, assim, mostrar seu valor industrial.

Kamariotis et. al (2021) buscaram quantificar o valor das informações extraídas de um SHM, comparando o custo do ciclo de vida de uma estrutura com e sem sistema SHM, auxiliando na tomada de decisão quanto a implementação ou não do sistema. Para tanto, foi utilizada a simulação de um sistema de monitoração contínua, realizando medições anuais de acelerações durante 50 anos de vida útil da estrutura, extraíndo dados modais que foram utilizados na atualização do modelo bayesiano de elementos finitos, através de dois métodos para a solução do problema de atualização (aproximação assintótica de Laplace e algoritmo adaptativo de Markov Chain Monte Carlo), aplicados a um Benchmark numérico constituído por um sistema de ponte de dois vãos, sujeito a dois tipos de deterioração analisadas separadamente, desgaste (erosão com identificação global de danos) e corrosão (com detecção e localização de danos), em pontos críticos específicos ao longo de sua vida útil.

O comparativo leva em consideração o custo total de reparo e do risco de falha ao longo da vida útil da ponte e o investimento máximo que deve ser feito em sistemas SHM para a obtenção de uma informação perfeita sobre o estado da estrutura que leve a uma decisão ótima do momento do reparo. Como o custo computacional de atualização do modelo bayesiano é alto, os estudos de caso foram constituídos por danos simples e pequenos que, levaram a indicação de um único e pequeno reparo ao longo da vida útil da estrutura, para ambos os casos de deterioração, afetando assim o valor da informação, que torna o custo de obtenção das informações (instalação e manutenção do SHM) alto em comparação ao risco de falha da estrutura.

Os autores sugerem então, que o método de quantificação do valor da informação, seja usado na análise de decisão dos diferentes parâmetros de projeto do SHM. Entre eles, são analisados o número e a posição dos sensores usados na estrutura da ponte sujeita à corrosão, considerando 12 e 24 acelerômetros distribuídos uniformemente ao longo da estrutura. No caso em que a estrutura estava sujeita a deterioração em dois locais de danos, o número de sensores e, conseqüentemente, a qualidade do deslocamento da forma modal ou as informações de curvatura obtidas afetaram notoriamente os resultados de atualização do modelo bayesiano, levando a uma notória diferença na otimização do ciclo de vida baseada em heurística e no resultado do valor da informação obtido.

Sobrinho (2021) realizou diversas aplicações do Método de Otimização de Evolução Diferencial utilizando deslocamentos estáticos, modos de vibração e frequências naturais de vigas sob diferentes condições de carregamentos (massa móvel), buscando a detecção, localização e quantificação de danos da estrutura através de dados numéricos (MEF) e experimentais. O método apresentou bom potencial para solução de problemas de identificação de danos, ao convergir para o diagnóstico correto em praticamente todos os casos analisados.

Alves e Cury (2021), propuseram uma metodologia eficiente de extração de características para localização de danos estruturais com base em sinais brutos de vibração. A abordagem consiste em extrair características sensíveis dos domínios de tempo e frequência, nos quais são definidos intervalos percentuais para cada característica em relação ao estado de saúde das estruturas e estimado um índice de dano com base no número de características discrepantes do estado danificado da estrutura, onde o sensor com maior número de características discrepantes indica a localização do dano. A metodologia é aplicada em quatro estruturas, sendo um pórtico numérico bidimensional, uma viga simplesmente apoiada e um pórtico tridimensional testados em laboratório e, a ponte Tianjin Yonghe na China. Os resultados mostraram que a metodologia além de indicar corretamente os locais dos danos, também fornecem informações de suas magnitudes.

Soares (2022) apresenta uma metodologia para a realização de SHM, utilizando o conceito de Objeto de Dados Simbólicos (SDO) e um método não supervisionado automatizado. A metodologia é a mesma adotada por Cardoso et al. (2019a), com a implementação de um software (ReTiA-SHM – *Real-Time Automated Structural Health Monitoring*) com interface amigável para o usuário e o uso de 11 comprimentos diferentes de janelas ao mesmo tempo, para solucionar o problema apontado anteriormente, de escolha de comprimentos adequados. O método foi aplicado aos dados brutos de quatro monitoramentos dinâmicos experimentais de estruturas que sofreram algum tipo de alteração ou ação excepcional, sendo eles, um Pórtico metálico no Canadá, uma torre de alvenaria na Itália, uma ponte rodoviária na França e um viaduto ferroviário também na França.

Os resultados obtidos mostraram que as alterações estruturais foram identificadas com sucesso, com exceção de alguns danos progressivos menores no pórtico metálico. Em alguns casos ocorreram falso alarmes, sendo necessário um período de adaptação para

que o software configurasse automaticamente os parâmetros de forma a soar alarme apenas em situações que alguma alteração de maior intensidade fosse encontrada no sinal.

Kauss (2022) utiliza quatro modelos autorregressivos (AR, ARMA, ARX e ARMAX) baseados em séries temporais para o processamento de sinais dinâmicos, extraíndo deles parâmetros sensíveis ao dano estrutural em cenários danificados e não danificados das quatro estruturas analisadas, sendo duas ensaiadas em laboratório (pórtico de pequeno porte com 3 andares, pórtico de médio porte com 4 andares) e duas estruturas reais de grande porte (um viaduto de 17,5m de extensão e uma ponte com vão principal de 260 m). Os níveis de danos são calculados a partir de um indicador obtido através da distância de *Mahalanobis*.

Os quatro modelos se mostraram eficientes para detectar danos estruturais, entretanto, a autora destaca que o modelo AR alcançou bons resultados com um tempo relativamente curto de execução, recomendando assim o uso do modelo AR em casos de poucos registros e o modelo ARX em casos em que houver um número maior de registros.

Amaral (2022) avalia o uso do algoritmo de aprendizado profundo Autocodificador Esparsos, na extração de parâmetros de dados dinâmicos, em conjunto com o algoritmo de Máquina de Vetor Suporte como classificador dos dados quanto a presença ou não de danos, aplicados a um modelo numérico de viga, uma ponte monitorada em João Pessoa (PB), a ponte Z24 monitorada em laboratório e uma torre instrumentada na Itália. Para as duas últimas estruturas foi avaliada também a influência da temperatura. Em todos os casos estudados, com método supervisionado ou não, obtiveram-se resultados satisfatórios, mesmo sob influência de variações de temperatura.

Nunes et al. (2024) investigaram a condição estrutural de uma passarela estaiada utilizando, como uma das ferramentas da análise, um modelo numérico atualizado. A atualização se baseou em dados coletados em ensaios dinâmicos. As frequências e modos de vibração naturais foram obtidos utilizando métodos de identificação modal baseados somente na resposta do sistema. Quatro modos de vibração foram identificados na análise modal operacional. Um modelo tridimensional em elementos finitos da passarela foi calibrado ajustando suas propriedades dinâmicas às propriedades identificadas experimentalmente. O procedimento mostrou, além de uma aproximação do comportamento dinâmico, uma aproximação do comportamento estático da estrutura, que foi confrontado com o projeto estrutural. A análise encontrou uma discrepância entre a armadura necessária com base nas tensões do modelo atualizado e a armadura existente fornecida pelo projeto.

Skowronek et al. (2024) destaca que muitos métodos tradicionais de detecção de danos estruturais assumem, incorretamente, que o ruído nos sinais medidos segue uma distribuição Gaussiana com variância finita. No entanto, ruídos reais podem ter distribuições não-Gaussianas, com caudas pesadas e variância infinita, o que compromete a eficácia de indicadores clássicos como RMS, curtose e densidade espectral.

Os autores propõem um teste visual baseado na Função Característica Empírica Modificada (ECFM) para verificar se o ruído possui variância finita. Essa verificação é essencial antes de aplicar técnicas de análise, especialmente após transformações tempo-frequência, que podem amplificar o caráter não-Gaussiano do ruído. A abordagem ajuda a identificar quando métodos clássicos podem ou não ser confiáveis.

Kamali et al. (2024) propõem uma abordagem de detecção de danos ou anomalias em estruturas por meio de sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM), utilizando um classificador baseado na Distribuição Binomial (BDC). A estratégia opera em dois níveis de monitoramento: estado de alerta e estado de alarme. A transição entre esses estados depende do valor de um índice de dano (DI), calculado a partir das frequências naturais monitoradas por meio da distância de Mahalanobis. Ao ultrapassar um limite pré-definido, o sistema entra em estado de alerta e passa a contar quantas vezes o DI excede o limiar dentro de uma janela de observação, aplicando então a distribuição binomial para calcular a probabilidade desse evento. Se essa probabilidade for inferior a um valor desejado, o sistema aciona o estado de alarme.

A metodologia foi testada com dados simulados e experimentais e demonstrou desempenho superior em relação a algoritmos tradicionais baseados apenas em limiares fixos, especialmente na redução de falsos alarmes. Foram ainda introduzidas fórmulas analíticas para o cálculo da "probabilidade efetiva de falso alarme" (PFA) e da "probabilidade efetiva de detecção" (POD), além da discussão sobre critérios de seleção dos parâmetros do algoritmo de acordo com as exigências do gestor estrutural. Os resultados reforçam o potencial da abordagem BDC para aprimorar a confiabilidade de sistemas de SHM.

Vasconcelos et al. (2024) investiga a classificação de danos em estruturas com base em dados vibracionais, utilizando duas técnicas de redução de dados: Análise de Dados Simbólicos (ADS) e Análise de Componentes Principais (PCA). Enquanto a maioria dos métodos tradicionais baseia-se na variação de parâmetros modais, este trabalho destaca as vantagens do uso direto dos dados de aceleração, eliminando a necessidade de etapas intermediárias de identificação. No entanto, o grande volume de dados dinâmicos

representa um desafio, o que motiva a aplicação de ADS e PCA para reduzir os dados sem perder suas características essenciais. O estudo analisa como o número de categorias na ADS e o número de componentes principais na PCA afetam o desempenho da classificação, utilizando dados experimentais de uma viga biapoiada e dados numéricos do Benchmark da IASC-ASCE (pórtico tridimensional de quatro andares).

Os resultados demonstram que os dados obtidos por excitação do tipo impacto são mais eficazes para classificação com ADS e PCA do que os obtidos por vibração aleatória, devido à maior amplitude e à melhor representação simbólica. Entre as abordagens testadas para determinar o número de categorias na ADS, a Regra de Sturges apresentou o melhor desempenho, considerando tanto a acurácia da classificação quanto o tempo de processamento, sendo eficaz para diferentes durações e tipos de sinal. Por outro lado, a variação no número de componentes principais não resultou em melhorias significativas nas classificações com PCA, indicando que a adoção de um número médio fixo de componentes é prática e eficiente, dispensando análises preliminares específicas para cada tipo de estrutura.

Souza et al. (2024, 2025) propõem uma estratégia de identificação de danos estruturais baseada em Computação Bayesiana Aproximada (ABC), na qual o problema clássico de detecção é reformulado como identificação de anomalias. A abordagem foi aplicada a vigas instrumentadas com acelerômetros, em que o dano foi simulado por massas concentradas, permitindo estimar posição e magnitude sem conhecimento prévio do modelo de amortecimento. O método utiliza o algoritmo ABC-SMC aliado a um ajuste adaptativo da tolerância no critério de aceitação, o que possibilitou identificar com precisão os parâmetros de interesse a partir de um único conjunto experimental, além de reduzir incertezas e gerar distribuições posteriores unimodais, mesmo em cenários com informação espacial limitada. Os autores ressaltam que a combinação de métricas, como frequência natural, amortecimento e Modal Assurance Criterion (MAC), aumenta a acurácia dos diagnósticos, com previsões da FRF dentro do intervalo de credibilidade, ainda que os picos de ressonância demandem aprimoramentos.

2.2 ORGANIZAÇÃO DAS PESQUISAS POR TIPOS DE ABORDAGEM

Com o objetivo de proporcionar maior clareza e facilitar a leitura comparativa, a Tabela 2.2 apresenta um resumo das pesquisas discutidas na seção anterior, organizadas de acordo com o tipo de método adotado.

Tabela 2.2 – Resumo das pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica por tipo de abordagem.

AUTORES E ANO	RESUMO DA PESQUISA
Métodos Baseados em Medições de Vibração e Propriedades Dinâmicas	
Lifshitz e Rotem (1969)	Pioneira técnica experimental para detecção de danos em compósitos, baseada na medição contínua de módulos dinâmicos e amortecimento sob carregamento dinâmico, sensível a pequenas mudanças estruturais induzidas por tensões.
Dyer e Stewart (1978)	Proposta simples e eficaz para detecção de falhas em mancais utilizando a curtose de sinais de vibração.
Cawley e Adams (1979)	Utilizaram o método de elementos finitos para detectar, localizar e quantificar danos em placas de alumínio e PRFC através das frequências naturais, calculando a mudança na rigidez local.
Yang et al. (1984)	Empregaram técnicas de decremento aleatório para inspeção de plataformas offshore, que não exigem medições da excitação de entrada, apenas da resposta dinâmica da estrutura, identificando situações de dano e não-dano.
Stephens e Yao (1987)	Usaram respostas de acelerações de estruturas durante terremotos para estimar a resposta força-deformação, aplicando funções de dano para quantificar e classificar a condição estrutural.
Chang e Allen (1987)	Desenvolveram um algoritmo de elementos finitos para analisar respostas dinâmicas de vigas mistas com danos ao longo do tempo, observando que as frequências fundamentais foram significativamente afetadas.
Ju e Mimovich (1988)	Aplicaram o método de frequência modal para diagnosticar experimentalmente danos de fratura em vigas em balanço, prevendo a localização e intensidade do dano com boa precisão.
Chen e Garba (1988)	Propuseram uma teoria para avaliar ocorrência, localização e extensão de danos em estruturas em órbita, comparando dados dinâmicos experimentais com modelos matemáticos para identificar reduções de rigidez.
Pandey et al. (1991)	Investigaram o uso da curvatura modal como indicador de danos, mostrando que alterações nessa propriedade permitem identificar e localizar danos estruturais.
Vieiro (1991)	Realizou um estudo de detecção de dano com um modelo reduzido de uma plataforma da Petrobrás, constatando a viabilidade do monitoramento de frequências naturais para identificar danos em sistemas bem controlados.
Martin e Honarvar (1995)	Utilizaram medições vibracionais e ultrassônicas para detectar falhas internas e delaminações em materiais, observando alterações nas frequências naturais.
Kaouk et al. (2000)	Expandiram a teoria de Zimmerman e Kaouk (1994) para incluir danos que afetam simultaneamente massa, amortecimento e rigidez, separando corretamente as mudanças de massa e rigidez.
Peeters e De Roeck (2001)	Propuseram um método para diferenciar variações naturais (como temperatura) de danos estruturais em pontes usando modelos ARX para prever variações normais nas frequências naturais.

Ko et al. (2002)	Propuseram um procedimento em múltiplos estágios para detecção de danos em pontes estaiadas, combinando dados modais, MEF e redes neurais (autoassociativas e MLP) para identificar existência, localização e extensão do dano.
Bezerra (2004)	Comparou diferentes técnicas no domínio do tempo, frequência e cepstrum para detecção de falhas em rolamentos com base em vibrações.
Choi et al. (2005)	Usaram alterações na conformidade modal para identificar e localizar danos em placas estruturais.
Abozeid et al. (2006)	Avaliaram a evolução de frequências naturais em uma ponte ferroviária para identificar degradação estrutural progressiva com base em séries temporais.
Catbas et al. (2006)	Utilizaram a flexibilidade modal para obter as deformadas da estrutura a partir de medidas das FRFs, discutindo abordagens para atenuar problemas como efeitos ambientais e limitações de medições.
Aragão Filho (2008)	Propôs uma metodologia de identificação estrutural em regime operacional, focada na estimação de frequências naturais amortecidas e taxas de amortecimento, usando sinais de resposta dinâmica da estrutura e combinando diversas técnicas de análise modal.
Hakim e Razak (2013)	Aplicaram energia de deformação modal e comparação de modos para detectar a presença e a severidade de danos em pilares.
Qunfeng et al. (2013)	Utilizaram o método da energia de deformação modal aliado a modelo numérico em elementos finitos para detectar, localizar e quantificar o nível do dano.
Alves e Cury (2021)	Propuseram uma metodologia eficiente de extração de características para localização de danos estruturais baseada em sinais brutos de vibração.
Kauss (2022)	Utilizou quatro modelos autorregressivos (AR, ARMA, ARX e ARMAX) baseados em séries temporais para processamento de sinais dinâmicos, extraindo parâmetros sensíveis ao dano estrutural.
Nunes et al. (2024)	Investigaram a condição estrutural de uma passarela estaiada utilizando um modelo numérico atualizado baseado em dados de ensaios dinâmicos, identificando frequências e modos de vibração naturais.
Métodos Baseados em Elementos Finitos e Atualização de Modelos	
Cawley e Adams (1979)	(Mencionado anteriormente em Parâmetros Modais) Combinaram MEF com medições experimentais para detectar, localizar e quantificar danos.
Chang e Allen (1987)	Desenvolveram um algoritmo de elementos finitos para analisar as respostas dinâmicas de vigas mistas com danos ao longo do tempo, observando que as frequências fundamentais eram afetadas.
Kalyanasundaram et al. (1986)	Analisaram estruturas treliçadas sob tração e compressão uniaxial, observando que as formas modais são significativamente alteradas por danos dependentes do tempo.
Minnetyan et al. (1990)	Apresentaram um método computacional para simulação de dano e propagação de fissuras em compósitos laminados, calculando a degradação estrutural e a resistência global à fratura.

Zimmerman e Kaouk (1994)	Desenvolveram um algoritmo desacoplado de localização e extensão de danos, utilizando um modelo de elementos finitos e autovalores/autovetores medidos, com sucesso na localização e quantificação dos danos.
Doebling (1996)	Utilizou um método de atualização ótima para a correlação de modelos de elementos finitos estruturais dinâmicos a partir de dados modais, com resultados promissores para detecção de danos e refinamento de modelos.
Ko et al. (2002)	(Mencionado anteriormente em Parâmetros Modais) Utilizaram modelagem tridimensional em elementos finitos como parte de um procedimento em múltiplos estágios para a detecção de danos estruturais.
Teughels e De Roeck (2004)	Propuseram um procedimento de identificação de dano para a ponte Z24 através da atualização do modelo de elementos finitos, minimizando discrepâncias em frequências naturais e formas modais.
Menache et al. (2012)	Realizaram ensaios dinâmicos em uma ponte metálica em escala reduzida e aplicaram a atualização do modelo numérico para detectar o dano induzido.
Nozari et al. (2017)	Utilizaram a atualização de um modelo numérico em elementos finitos para identificar danos em um edifício de concreto armado, baseando-se em respostas a vibrações ambientais.
Asadollahi et al. (2018)	Propuseram um método de inferência bayesiana robusto utilizando o algoritmo TMCMC e modelagem em elementos finitos da ponte estudada para um modelo com quantificação de incerteza posterior mais precisa.
Souza et al. (2019)	Utilizaram inferência Bayesiana com MCMC e dados modais experimentais para estimar posição e magnitude de massas concentradas como simulação de dano.
Cong et al. (2021)	Analisaram a baixa adoção de monitoramento e atualização de modelos na indústria de pontes, destacando que danos localizados podem não induzir mudanças perceptíveis na rigidez.
Kamariotis et al. (2021)	Buscaram quantificar o valor das informações extraídas de um SHM, comparando o custo do ciclo de vida de uma estrutura com e sem sistema SHM, utilizando a atualização do modelo bayesiano de elementos finitos.
Sobrinho (2021)	Aplicou o Método de Otimização de Evolução Diferencial utilizando deslocamentos estáticos, modos de vibração e frequências naturais para detecção, localização e quantificação de danos.
Nunes et al. (2024)	(Mencionado anteriormente em Parâmetros Modais) Calibraram um modelo tridimensional em elementos finitos da passarela para ajustar suas propriedades dinâmicas às identificadas experimentalmente.
Kamali et al. (2024)	Aplicaram um classificador binomial baseado em distância de Mahalanobis para detecção de danos estruturais usando abordagem estatística bayesiana.
Métodos Baseados em Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina	
Hickman et al. (1991)	Desenvolveram um sistema de processamento de sinais de sensores com técnicas de reconhecimento de padrões (medida de similaridade euclidiana) para classificar sinais e determinar o tipo de defeito em aeronaves.

Adams et al. (1991)	Realizaram estudo experimental sobre trincas em pás de hélice de aeronaves, detectadas por medições modais.
Samanta e Al-Blauchi (2003)	Aplicaram redes neurais artificiais para prever falhas em rolamentos com base em parâmetros extraídos de sinais de vibração.
Yeung e Smith (2005)	Utilizaram redes neurais não supervisionadas para classificar padrões de dano simulados em uma ponte.
Lee e Yun (2006)	Aplicaram RNAs e energia de deformação modal para estimar danos em pontes.
Worden e Manson (2007)	Discutiram abordagens baseadas em modelos físicos e baseadas em dados (aprendizado de máquina), enfatizando que a eficácia dos métodos de aprendizado de máquina depende criticamente da disponibilidade e qualidade dos dados de treinamento.
Mehrjoo et al. (2008)	Utilizaram uma RNA do tipo multi-layered feed-forward com algoritmo back-propagation para estimar as intensidades de danos nas articulações em estruturas de pontes treliçadas.
González-Pérez e Valdés-González (2010)	Apresentaram a aplicação de RNAs para a detecção de danos estruturais nas vigas de uma ponte, usando diferenças de energia de deformação modal como entrada.
Choi e Sweetmans (2010)	Usaram PCA e RNAs para extrair características e classificar estados estruturais com base em dados modais.
Cury (2010)	Empregou diferentes técnicas acopladas à Análise de Dados Simbólicos (ADS) na detecção de danos estruturais, incluindo classificação não supervisionada e supervisionada (árvores de decisão Bayesianas, redes neurais e máquinas de vetores de suporte).
Xu et al. (2012)	Utilizaram diretamente medições de deslocamento com redes neurais, evitando a extração de frequências ou modos de vibração.
Shu et al. (2013)	Desenvolveram uma RNA com variância e covariância como entradas para estimar localização e severidade de danos.
Goh et al. (2013)	Aplicaram RNAs treinadas com espectros para detectar e localizar múltiplos danos em estruturas.
Dackermann et al. (2014)	Apresentaram uma técnica para identificação de danos baseada em análise Cepstrum e RNAs, separando efeitos da fonte de excitação e resposta da estrutura para determinar funções de resposta em frequência.
Santos et al. (2016)	Utilizaram transformada wavelet contínua em simulações de vibrações para detectar alterações estruturais.
Jin et al. (2016)	Desenvolveram um método utilizando uma RNA baseada no filtro de Kalman estendido para eliminar efeitos da temperatura e detectar danos em estruturas com monitoramento contínuo.
Strackiewicz e Barszcz (2016)	Utilizaram RNAs, com observação adicional de parâmetros de regressão linear, para detectar o desenvolvimento de falhas em caixas de engrenagem planetárias de turbinas eólicas.
Marcy et al. (2016)	Aplicaram redes neurais do tipo SOM em conjunto com atualização de modelo numérico para localizar danos.

Amaral (2017)	Investigou a aplicação de RNAs e SVM na detecção de alterações estruturais a partir da evolução das respostas dinâmicas.
Marcy (2017)	Comparou redes SOM, BP e LVQ em estudos com viga e ponte real, avaliando robustez frente a diferentes condições operacionais.
Neves et al. (2017)	Desenvolveram método baseado em RNA que compara respostas dinâmicas com e sem dano, sem depender de simulações.
Hossain et al. (2017)	Treinar uma RNA com sinais de resposta estrutural sob excitação aleatória para identificar a presença de dano.
Chaim et al. (2018)	Aplicaram redes Fuzzy ARTMAP para detectar deterioração estrutural com base em frequências naturais.
Chaim (2019)	Complementou o trabalho anterior, avaliando níveis de dano e quantidade mínima de dados para boa performance.
Teng et al. (2019)	Aplicaram CNNs para extrair características modais e detectar estados estruturais com alta acurácia.
Finotti et al. (2019)	Compararam RNA e SMA em simulações e ensaios com dados estatísticos derivados de aceleração
Sharifi et al. (2019)	Desenvolveram um modelo de RNA para simular e prever as capacidades de forças máximas de vigas de aço, fornecendo previsões mais precisas do que guias de projeto existentes.
Gulgec et al. (2019)	Apresentaram uma Rede Neural Convolutiva (CNN) para o problema de detecção e localização de danos, com alta precisão, robustez e eficiência computacional em simulações de elementos finitos.
Azam et al. (2019)	Apresentaram uma estratégia para detectar, localizar e determinar a intensidade dos danos em estruturas utilizando RNAs e a Decomposição Ortogonal Própria.
Alves et al. (2020)	Avaliaram o desempenho de uma abordagem baseada em algoritmo genético com cinco indicadores de danos (frequências naturais, modos de vibração, combinações, curvas modais e FRFs).
Souza (2020)	Avaliou o desempenho de diferentes arquiteturas de RNA do tipo MLP para análise de dados de monitoramento estrutural.
Jesus et al. (2020)	Aplicaram CNNs combinadas com árvores de decisão para classificar sinais de vibração e detectar trincas em materiais.
Rocha (2021)	Comparou diferentes algoritmos de aprendizado de máquina em dados reais, destacando o desempenho superior das arquiteturas LSTM e GRU.
Avci et al. (2021)	Apresentaram uma revisão sobre o uso de técnicas de aprendizado de máquina e deep learning para SHM.
Amaral (2022)	Empregou autocodificador esparso e SVM para extração e classificação automática de dados vibratórios em estruturas reais.
Métodos Baseados em Análise de Dados Simbólicos (ADS)	
Cury (2010)	(Mencionado anteriormente em Inteligência Artificial) Aplicaram a ADS em diversas técnicas de classificação para discriminar estados de saúde de estruturas, avaliando também o impacto de efeitos ambientais.
Cury et al. (2010)	Complemento ao trabalho de Cury (2010) aplicando ADS para detecção de danos.

Crémona et al. (2011)	Utilizaram ADS para detecção de danos em estruturas.
Cury e Crémona (2012)	Apresentaram uma síntese dos fundamentos teóricos da ADS e dos objetos de dados simbólicos, demonstrando sua aplicabilidade na detecção de danos.
Cury et al. (2012)	Aplicaram ADS e técnicas de agrupamento para discriminar estados estruturais, avaliando o efeito da temperatura sobre os dados modais.
Alves (2012, 2016)	(Mencionado anteriormente em Híbridos) Utilizaram a ADS com dados simbólicos para a detecção de danos em vigas de concreto armado.
Santos et al. (2017)	Combinaram Análise de Componentes Principais (PCA) com métodos de agrupamento aplicados a Objetos de Dados Simbólicos (SDO) para remover efeitos de ações regulares e comprimir dados em um único índice de dano.
Cardoso (2018)	Utilizaram SVM com representação TF-IRQM e detecção simbólica.
Cardoso et al. (2019a, 2019b)	Introduziram as representações IRQ, IRQM, TF-IRQM e novos índices de detecção, mostrando a eficácia da ADS na detecção de danos.
Nunes (2020)	Desenvolveram um classificador híbrido que combina RNA e k-means sobre dados simbólicos, alcançando altos índices de acurácia.
Soares (2022)	Apresentou uma metodologia para SHM utilizando o conceito de SDO e um método não supervisionado automatizado, que identificou com sucesso alterações estruturais.
Vasconcelos et al. (2024)	Aplicaram ADS em dados brutos de aceleração e PCA para classificação de danos.
Métodos Híbridos e Outros Avanços	
DiPasquale e Cakmak (1990), DiPasquale et al. (1990)	Propuseram dois índices globais de danos para estruturas complexas baseados em registros de movimentos fortes para avaliação de danos por terremotos.
Mayes (1995)	Utilizou a flexibilidade medida em um experimento modal para localizar danos em uma ponte, aplicando um algoritmo que avalia mudanças na relação força-deslocamento.
Sampaio et al. (1999)	Concluíram que o método da curvatura da FRF apresentou melhor desempenho na detecção, localização e quantificação de danos.
Gadéa (2002)	Apresentou o SID-G, um sistema de identificação de danos estruturais baseado em um método indireto e iterativo de correlação, utilizando programação não-linear Goal Programming.
Ortiz Morales (2016)	Avaliou os efeitos da temperatura nos parâmetros modais de uma viga de concreto protendido em três condições de dano, buscando mitigar a influência da temperatura na detecção de danos.
Souza et al. (2024, 2025)	Propõem uma estratégia de identificação de danos via ABC-SMC com tolerância adaptativa; aplicada a vigas com massas concentradas; dispensa modelo de amortecimento; usa discrepâncias em frequência natural e MAC; gera estimativas precisas com menor incerteza.
Abordagens Conceituais e Metodológicas	

Salawu (1997)	Revisou métodos de detecção de danos baseados em alterações nas frequências naturais, concluindo que uma mudança de cerca de 5% é necessária para detecção confiável e que mudanças isoladas podem não indicar dano.
Doebeling et al. (1998)	Resumiram métodos de identificação de danos baseados em vibração, abordando mudanças em propriedades modais (frequências, amortecimento, formas modais) e classificando-os por nível de detecção de danos.
Sohn et al. (2003)	Apresentaram uma revisão de métodos de SHM, classificando-os por nível de complexidade e destacando os desafios práticos da implementação em campo.
Farrar e Worden (2012)	Apresentaram uma estrutura teórica abrangente para SHM com foco em aprendizado de máquina, reconhecimento de padrões e modelagem estatística.
Skowronek et al. (2024)	Destacaram que muitos métodos tradicionais de detecção de danos assumem incorretamente ruído Gaussiano, propondo um teste visual baseado na Função Característica Empírica Modificada (ECFM).

Fonte: Autor.

Os avanços nos métodos de identificação de danos baseados em dados dinâmicos refletem uma evolução contínua em direção a soluções mais robustas, sensíveis e aplicáveis a estruturas reais. Métodos clássicos baseados em propriedades modais ainda desempenham papel fundamental, sobretudo pela simplicidade e baixo custo, mas enfrentam limitações frente a efeitos ambientais e danos localizados. A atualização de modelos numéricos, especialmente via inferência bayesiana, tem se mostrado promissora para quantificação de danos e avaliação probabilística, embora com alto custo computacional. Já as técnicas baseadas em aprendizado de máquina e ADS se destacam pela capacidade de lidar com grandes volumes de dados e pela viabilidade de aplicações em tempo real, porém requerem dados bem representativos e, muitas vezes, conhecimento prévio do sistema. Observa-se, ainda, um movimento crescente em direção à integração de diferentes métodos, na forma de abordagens híbridas, visando contornar as limitações individuais. Para o futuro, recomenda-se a realização de estudos que considerem condições reais de operação, efeitos ambientais e viabilidade computacional, além da avaliação do valor das informações para subsidiar decisões sobre a implementação de sistemas SHM em larga escala.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As medições das respostas dinâmicas de uma estrutura em duas ou mais fases de sua vida, oferecem a possibilidade de localizar e determinar a gravidade do dano, ao comparar-se as características dinâmicas da estrutura nos dois estados (CAWLEY; ADAMS, 1979).

Rytter (1993) propôs uma classificação hierárquica para as etapas de identificação de danos estruturais dividida em quatro níveis que é muito difundida na literatura:

- ◆ Nível 1: Detecção de dano;
- ◆ Nível 2: Localização do dano;
- ◆ Nível 3: Quantificação do dano;
- ◆ Nível 4: Previsão da vida residual da estrutura.

Quanto maior o nível, maior o conhecimento do dano e, conseqüentemente, maior a complexibilidade do método.

Segundo Doebling et al. (1998), métodos de identificação de dano estrutural podem ser separados em dois grandes grupos:

- ◆ Métodos baseados em dados vibracionais (*vibration data based methods*): São métodos que exibem o benefício de não necessitarem da confecção de um modelo numérico da estrutura a ser monitorada. Dentro desse tipo de abordagem, destacam-se os métodos de classificação ditos não supervisionados, nos quais não é necessária a realização de uma pré-identificação dos sinais registrados; e os ditos supervisionados, sendo necessário o fornecimento de algumas informações sobre os dados a serem utilizados. Normalmente os métodos não supervisionados alcançam os níveis 1 e 2, já os supervisionados podem chegar até o nível 3.
- ◆ Métodos baseado em modelos (*model based methods*): Lidam com técnicas de atualizações de modelo que possibilitam alcançar o nível 3 da escala Rytter. E possuem a desvantagem da dificuldade em se obter modelos numéricos confiáveis de estruturas complexas. De tal forma, que pequenas alterações causadas pelo dano podem ser ocultadas por erros referentes ao modelo (Friswell, 2007).

A previsão de nível 4 da escala Rytter, está geralmente associada aos campos da mecânica da fratura, análise da vida útil em fadiga ou avaliação de projeto estrutural. (DOEBLING et al., 1998).

No geral, as primeiras abordagens dos métodos de identificação de dano baseadas em dados vibracionais, utilizaram as frequências naturais da estrutura para avaliar a existência de dano. A vantagem de se utilizar indicadores de dano baseados nas variações das frequências naturais está na sua fácil implementação e ao seu relativo baixo custo computacional. Entretanto, por alguns motivos, a confiabilidade da identificação de dano utilizando esses parâmetros modais é limitada (ALVES, 2016).

É de grande relevância o desenvolvimento de indicadores de danos obtidos diretamente das respostas vibracionais, evitando a necessidade de processos de identificação modal ou a utilização de modelos em elementos finitos, que requerem maior tempo de processamento computacional e/ou pré-processamentos mais complexos dos dados.

Entretanto, os arquivos de aquisição de dados em estruturas de Engenharia reúnem milhares de valores de acelerações registrados por diversos sensores, o que torna a análise direta desses dados, complexa e computacionalmente onerosa. Por esse motivo, é recomendada a adoção de métodos de compactação ou de transformação dos dados em coeficientes representativos, facilitando a manipulação e permitindo assim a mineração dos dados.

A mineração de dados (*Data Mining*) refere-se ao processo de descoberta de padrões, relações, tendências ou informações relevantes em grandes volumes de dados, por meio do uso de técnicas de estatística, de aprendizado de máquina e de inteligência artificial (HAN et al., 2011).

Nesse contexto, a utilização de representações simbólicas, de parâmetros estatísticos descritivos e de métodos de transformações dos dados, associados a técnicas de mineração dos dados, tem se mostrado uma abordagem promissora para viabilizar a manipulação e a análise eficiente dessas informações em aplicações de engenharia estrutural.

Na sequência, serão apresentados diversos indicadores estatísticos de dano, com foco na análise de sinais de aceleração de estruturas, incluindo indicadores previamente propostos e avaliados por outros autores, bem como indicadores inéditos nesse uso, a serem aplicados na presente pesquisa.

Posteriormente, serão abordados dois métodos de classificação de dados, que serão empregados neste trabalho tanto para a avaliação de desempenho dos indicadores, quanto para a determinação de diferentes estados estruturais.

3.1 INDICADORES ESTATÍSTICOS DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADOS EM SINAIS DE ACELERAÇÃO

Indicadores de danos em estruturas de engenharia civil são medidas ou características observáveis que fornecem informações sobre a integridade de uma infraestrutura. Esses indicadores podem incluir tanto sinais visíveis de deterioração, como fissuras, deformações excessivas e corrosão, quanto medidas quantitativas, como deslocamentos, vibrações ou perda de resistência. Seu principal objetivo é permitir uma compreensão mais precisa da condição estrutural, auxiliando na identificação precoce de problemas potenciais e na implementação de ações corretivas adequadas, visando à segurança e à durabilidade das estruturas. (CURY et al., 2014).

No caso da análise de sinais dinâmicos de aceleração – caracterizados por seu grande volume de dados – os indicadores, além de destacarem características relevantes acerca da integridade estrutural, possuem também o intuito de reduzir a quantidade de dados a serem processados, sem comprometer suas propriedades essenciais.

No contexto da análise de dados, a estatística descritiva se destaca como uma ferramenta fundamental tanto no meio científico quanto na prática profissional da engenharia. Por meio de suas técnicas, torna-se possível coletar, organizar, descrever, analisar e interpretar dados oriundos de experimentos ou estudos observacionais, contribuindo significativamente para a tomada de decisões, a resolução de problemas e a geração de conhecimento (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

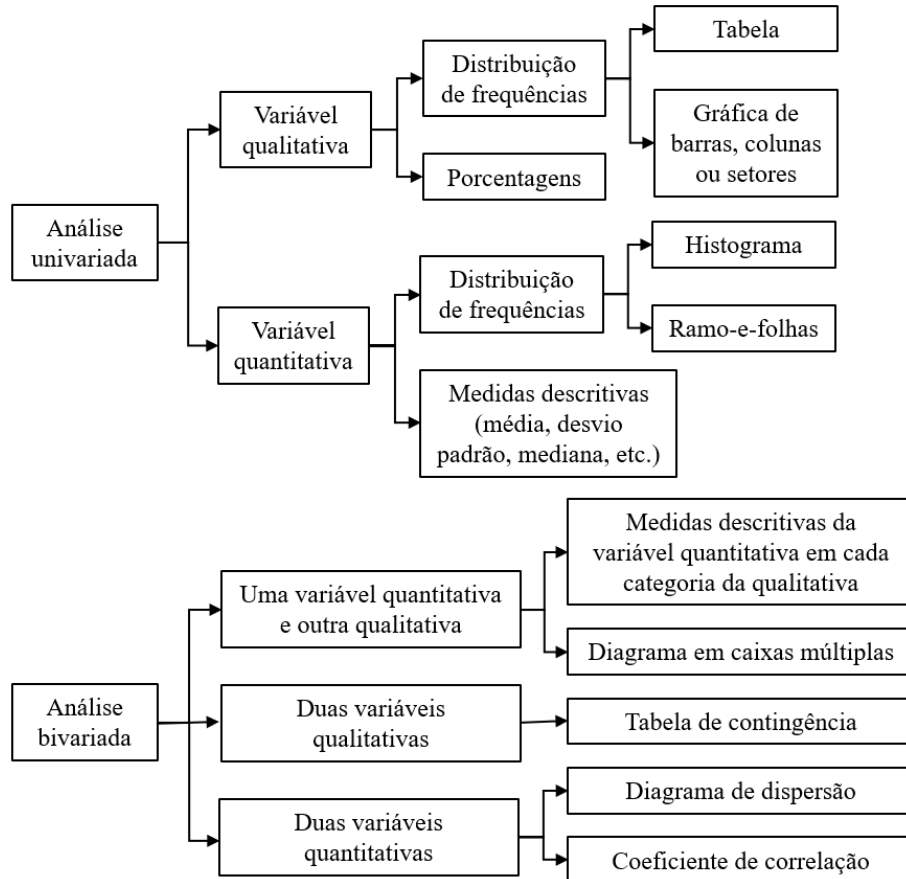
Com recursos da estatística descritiva, podemos entender melhor um conjunto de dados através de suas características como, a forma de distribuição dos dados, seus valores representativos, e medidas de dispersão (TRIOLA, 1999).

Adicionalmente, Bezerra (2004) afirma que determinados parâmetros estatísticos, dependendo do nível de falha e do tipo da excitação, podem ser utilizados para indicar a presença de danos em estruturas.

Segundo Barbetta et al. (2004), a escolha dos procedimentos estatísticos a serem aplicados na análise de dados está diretamente relacionada à natureza da variável em

estudo. Para orientar a aplicação prática dessa análise, os autores propõem o modelo geral apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Modelo geral para a análise exploratória de dados.



Fonte: Adaptado de Barbetta et al. (2004).

Os dados analisados nesta pesquisa, obtidos a partir dos sinais de aceleração das estruturas, configuram uma análise univariada com variáveis quantitativas referentes a um sinal contínuo, amostrado em instantes discretos no tempo. De acordo com o modelo proposto por Barbetta et al. (2004), recomenda-se, para esse tipo de dado, a utilização de distribuições de frequência e/ou de medidas estatísticas descritivas como ferramentas adequadas para a análise.

Em decorrência disso, são descritos a seguir índices baseados em métodos estatísticos, como a distribuição de frequências e diversas medidas estatísticas descritivas, aplicáveis tanto aos valores brutos quanto aos dados organizados em classes. Em seguida, apresentam-se técnicas de transformação dos dados, incluindo a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e métodos de análise exploratória dos dados. Por fim, apresenta-se um resumo dos indicadores que fundamentam a metodologia adotada neste trabalho.

3.1.1 Distribuição de Frequências por Intervalos

“A distribuição de frequências consiste na organização dos dados de acordo com as ocorrências dos diferentes resultados observados” (BARBETTA et al., 2004, p.53).

Trata-se de uma técnica estatística fundamental utilizada para agrupar dados em classes ou categorias convenientemente estabelecidas e ordenadas, permitindo visualizar as ocorrências dos diferentes resultados observados (TRIOLA, 1999; LEVINE et al., 2011).

Essa abordagem, permite condensar grandes volumes de dados brutos em tabelas ou gráficos, contribuindo para a identificação de padrões, variações e tendências (SAMPAIO et al., 2018). Dessa forma, favorece a análise da variabilidade interna, da incerteza e da heterogeneidade da amostra – aspectos essenciais em estudos que demandam síntese sem perda de informação significativa.

Para isso, os dados são organizados em classes de frequência, que consistem em agrupamentos convenientes dos dados observados, definidos para facilitar o estudo do fenômeno. Cada classe pode ser identificada por seus extremos ou pela ordem que se apresenta na distribuição.

O número de classes (k) corresponde à quantidade de classe existentes na distribuição. Para distribuições com amplitude de intervalo constante (h), o número de classes pode ser calculado pela relação:

$$k = \frac{X_{m\acute{a}x}}{h} \quad (3.1)$$

em que $X_{m\acute{a}x}$ representa a amplitude total dos dados.

Os limites de classe (L_i e L_s) correspondem, respectivamente, ao limite inferior e superior de cada classe, estabelecendo os extremos do intervalo que delimitam os dados pertencentes a essa categoria:

$$L_i = x_{I_m\acute{i}n} \quad e \quad L_s = x_{I_m\acute{a}x} \quad (3.2)$$

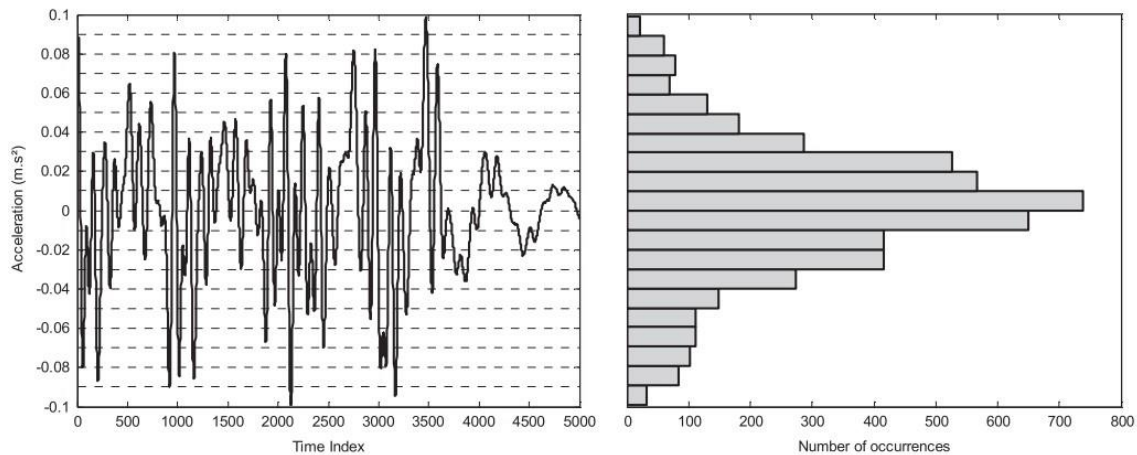
onde $x_{I_m\acute{i}n}$ e $x_{I_m\acute{a}x}$ representam, respectivamente, o menor e o maior valor entre os dados da classe considerada.

Entre as formas gráficas utilizadas para representar distribuições de frequência, o histograma destaca-se como a mais empregada no caso de variáveis contínuas, conforme apontado por Barbetta et al. (2004). Esse gráfico é composto por barras verticais construídas nos limites de cada classe, sendo a área de cada barra proporcional à frequência observada. O eixo horizontal geralmente representa os intervalos de classe da

variável de interesse, enquanto o eixo vertical indica valores de frequência absoluta, proporção ou percentual, originando, respectivamente, um histograma de frequência, de frequência relativa ou de percentagem.

A Figura 3.2 exemplifica a transformação de um sinal de aceleração, captado por um sensor (à esquerda), em um histograma de frequência (à direita), evidenciando o processo de conversão dos dados clássicos em simbólicos.

Figura 3.2 – Exemplo da transformação das acelerações (dados clássicos) em dados simbólicos.



Fonte: Alves et al., 2015a.

Essa forma de representação permite identificar faixas de maior concentração (valores típicos), detectar a presença de valores discrepantes (*outliers*) e compreender a forma da distribuição dos dados – informações essenciais para a aplicação de modelos probabilísticos e outras técnicas analíticas.

Além da representação gráfica, os dados podem ser descritos por meio de dados simbólicos, que expressam unidades de informação complexas de forma estruturada, usando intervalos, distribuições de probabilidade ou múltiplas categorias simultâneas. Essa uma característica é particularmente útil em contextos com grande volume de dados e necessidade de compactação informacional.

A equação (3.3) apresenta um conjunto de dados simbólicos representando quatro ensaios dinâmicos, denotados por $\Omega = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$.

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \{[0 - 20](0,20); [20 - 40](0,25); [40 - 60](0,25); [60 - 80](0,30)\} \\
 E_2 &= \{[0 - 20](0,05); [20 - 40](0,30); [40 - 60](0,40); [60 - 80](0,25)\} \\
 E_3 &= \{[0 - 20](0,10); [20 - 40](0,15); [40 - 60](0,60); [60 - 80](0,15)\} \\
 E_4 &= \{[0 - 20](0,15); [20 - 40](0,50); [40 - 60](0,05); [60 - 80](0,30)\}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Cada ensaio é composto por quatro intervalos de classe com amplitude constante $h=20$ unidades. Os limites de cada classe estão entre colchetes, e os valores entre parênteses representam o percentual de incidência correspondente. Essa estrutura evidencia como os dados estão distribuídos entre as faixas definidas.

A análise dos dados por meio da distribuição de frequências em intervalos é denominada por Cury (2010) como Análise de Dados Simbólicos (ADS). No entanto, considerando que este trabalho emprega também outros tipos de dados simbólicos — os quais podem se enquadrar como diferentes formas de representação simbólica ou como parâmetros estatísticos derivados — optou-se por adotar uma nomenclatura mais específica. Assim, para evitar ambiguidade, os dados simbólicos construídos a partir de distribuições de frequências em intervalos serão referidos, ao longo deste trabalho, por essa designação explícita. Ainda assim, sempre que o termo ADS for utilizado de forma isolada, se referirá exclusivamente a esse tipo específico de representação.

Segundo Alves (2016), a ADS permite representar informações de forma mais compacta, sem perda significativa de informação. Os dados são considerados “simbólicos” pois expressam a variação interna de cada variável, respeitando as especificidades da base de dados.

Entretanto, a construção de uma tabela de frequências ou a transformação dos dados em simbólicos exige atenção especial ao número de classes adotado. A escolha inadequada da quantidade de classes ou da amplitude pode distorcer a análise (LEVINE et al., 2011). Cury (2010) aponta como desvantagem a dependência dessa escolha, que deve ser ajustada conforme a natureza da aplicação, ficando a critério do usuário selecionar a representação simbólica mais adequada.

Triola (1999) recomenda entre 5 e 20 grupos de classe; Levine et al. (2011) sugerem de 5 a 15. Sampaio et al. (2018) propõem, na ausência de conhecimento prévio sobre o fenômeno estudado, a adoção da fórmula empírica proposta por Sturges (1926), dada por:

$$k = 1 + 3,3 \log_{10}(n) \quad \text{ou} \quad k = 1 + \log_2(n) \quad (3.4)$$

onde k representa o número de classes (arredondado para inteiro superior mais próximo) e n é o número total de observações.

Essa equação fornece uma estimativa eficiente para o número de classes, considerando que à medida que o número de observações em um conjunto de dados aumenta, a influência dos limites de classe sobre a concentração de dados tende a diminuir, em comportamento análogo a uma função logarítmica.

Por fim, Alves (2016) ressalta cuidados importantes, como a preservação das propriedades estatísticas dos dados originais e evitar classe com muitos valores nulos, que podem comprometer a eficácia das análises e classificações.

Contudo, não há consenso na literatura sobre valores ideais para garantir essa preservação. Diante dessa lacuna, foi desenvolvido e publicado, durante a elaboração desta tese, um estudo específico (VASCONCELOS et al., 2024), baseado em dados experimentais e numéricos, que comprova o impacto direto da escolha do número de intervalos de classe na eficácia dos classificadores de estados estruturais. Nesse estudo, o método de Sturges (1926) apresentou os melhores resultados, justificando sua adoção nas análises subsequentes desta tese.

3.1.2 Medidas Estatísticas Descritivas

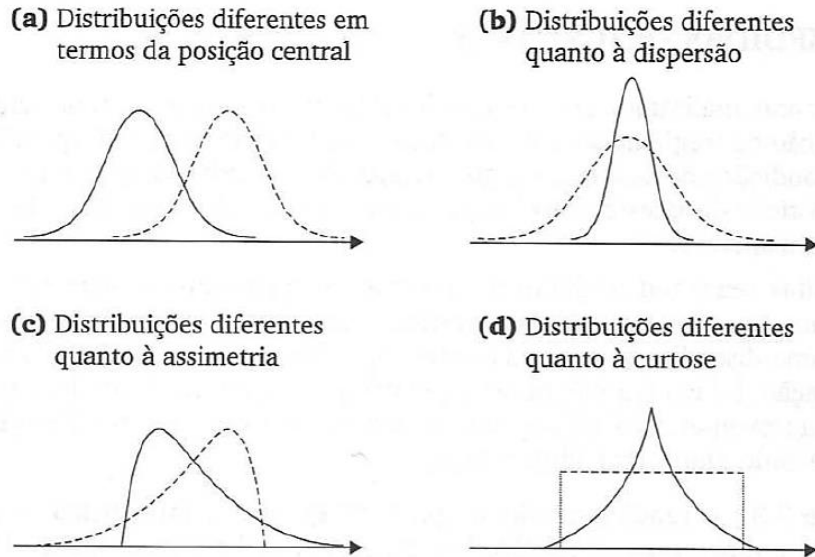
As medidas estatísticas descritivas, quando adequadamente selecionadas de acordo com o tipo de dado analisado, permitem identificar diferenças sutis entre sinais estruturais que muitas vezes não são perceptíveis nos dados brutos, devido à sua elevada sensibilidade a variações nas características dos registros (TRIOLA, 1999). No contexto da detecção de danos estruturais, a identificação dessas variações representa o cerne dos métodos propostos.

Segundo Barbetta et al. (2004), ao confrontar a distribuição observada com diferentes modelos teóricos, torna-se possível inferir qual modelo melhor explica o comportamento da variável estudada. Para essa análise, diversas características da distribuição devem ser observadas, destacando-se:

- i. a **posição central**, que informa onde se localiza o centro da distribuição;
- ii. a **dispersão**, que se refere à variabilidade dos dados;
- iii. a **assimetria**, que representa a concentração dos valores em um dos extremos da distribuição;
- iv. a **curtose**, que é o grau de achatamento da distribuição.

A Figura 3.3 ilustra diferentes formas de distribuição de frequências, com base nessas características.

Figura 3.3 – Diferentes formas de distribuição de frequências.



Fonte: Barbetta et al., 2004.

Diversos autores propuseram classificações distintas para as medidas descritivas, entre eles Barbetta et al. (2004), Levine et al. (2011), Morettin e Bussab (2010), Piana et al. (2013), Prates (2017), Sampaio et al. (2018) e Triola (1999). Nesta tese, adota-se a classificação proposta por Piana et al. (2013), por apresentar a maior diversidade entre os tipos de medidas descritivas e organizá-las de forma mais didática. As medidas são descritas em cinco categorias principais:

- i. Medidas de localização ou de tendência central;
- ii. Medidas separatrizes ou quartis;
- iii. Medidas de variação ou de dispersão;
- iv. Medidas de formato;
- v. Medidas para dados agrupados em classe.

3.1.2.1 Medidas de Localização ou de Tendência Central

Triola (1999, p.18) afirma que “as medidas de tendência central são tentativas de determinação de valores que representam conjuntos de dados”.

Sampaio et al. (2018, p.43) as define, como sendo “a tendência de dados quantitativos de se agruparem ao redor de um valor central”.

De modo análogo, Levine et al. (2011) ressalta que a maioria dos conjuntos de dados apresenta tendências distintas de se agrupar ou concentrar em torno de um ponto central.

Assim, é possível selecionar um valor típico ou médio que descreva o conjunto como um todo. Tal valor descritivo é uma medida de localização ou tendência central.

Piana et al., (2013) afirma que as medidas de localização ou tendência central têm o objetivo de representar o ponto de equilíbrio ou o centro de uma distribuição. Em muitos casos, podem ser considerados valores típicos ou representativos do conjunto.

As medidas de tendência central mais comuns são a média aritmética, a mediana e a moda. Estas e outras são descritas a seguir:

- a. **Média Aritmética Simples (\bar{X}):** É calculada pela soma de todas as observações de um conjunto de dados (x_i), dividida pelo número total de elementos (n), sendo a medida de tendência central mais utilizada, dada por:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.5)$$

Ex: Média aritmética simples dos números 4 e 8 $\rightarrow \bar{X}(4,8) = \frac{4+8}{2} = 6$.

- b. **Média Aritmética Ponderada (\bar{X}_p):** É calculada pela soma dos produtos de cada observação (x_i) pelo seu respectivo peso (w_i), dividida pela soma total dos pesos. Essa medida é usada quando as observações possuem importância ou frequência diferentes, sendo expressa por:

$$\bar{X}_p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3.6)$$

Ex: Média aritmética ponderada dos números 4 e 8, com pesos 0,5 e 1,1 respectivamente $\rightarrow \bar{X}_p(4,8) = \frac{0,5 \cdot 4 + 1,1 \cdot 8}{0,5 + 1,1} = \frac{10,8}{1,6} = 6,75$.

- c. **Média Harmônica (\bar{X}_h):** É calculada como o inverso da média aritmética dos inversos das variáveis, sendo especialmente útil quando se deseja obter uma média adequada para razões ou taxas e, dada por:

$$\bar{X}_h = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} \quad (3.7)$$

Ex: Média harmônica dos números 4 e 8 $\rightarrow \bar{X}_h(4,8) = \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{8}} = \frac{2}{\frac{2+1}{8}} = 5,33$.

- d. **Média Geométrica (\bar{X}_g):** É calculada como a raiz n -ésima do produto das observações, sendo indicada para conjuntos de dados que envolvem taxas de crescimento, com crescimento multiplicativo ou variações proporcionais. A fórmula é dada por:

$$\bar{X}_g = (\prod_{i=1}^n x_i)^{1/n} \quad (3.8)$$

Ex: Média geométrica dos números 2,4 e 8 $\rightarrow \bar{X}_g(2,4,8) = \sqrt[3]{2 \cdot 4 \cdot 8} = \sqrt[3]{64} = 4$.

- e. **Média dos Quadrados dos Valores (\bar{X}_{sq}):** É a média aritmética dos quadrados de um conjunto de observações. Essa medida é utilizada para quantificar a magnitude média de uma variável, atribuindo maior peso aos valores mais altos, já que o quadrado de números maiores cresce mais rapidamente:

$$\bar{X}_{sq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2 \quad (3.9)$$

Ex: Média dos quadrados dos números 2,4, e 8 $\rightarrow \bar{X}_{sq}(2,4,8) = \frac{2^2+4^2+8^2}{3} = 28$.

- f. **Raiz Quadrada da Média (\bar{X}_{rms}):** É uma medida obtida pela aplicação da raiz quadrada à média aritmética de um conjunto de dados:

$$\bar{X}_{rms} = \sqrt{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (3.10)$$

Embora não seja uma medida estatística padrão, pode ser usada em contextos específicos, como transformações de escala ou normalizações de dados.

- g. **Mediana (\tilde{X}):** É o valor que ocupa a posição central em um conjunto de dados ordenados (x_o), dividindo o conjunto em duas partes iguais. Sua determinação depende da quantidade de observações (n), onde se n for ímpar, a mediana é o valor da posição central e, se n for par, é a média aritmética simples dos dois valores centrais:

$$\tilde{X} = \begin{cases} x_o\left(\frac{n+1}{2}\right), & \text{se } n \text{ ímpar;} \\ \frac{x_o\left(\frac{n}{2}\right) + x_o\left(\frac{n+1}{2}\right)}{2}, & \text{se } n \text{ par.} \end{cases} \quad (3.11)$$

Onde x_o são os valores do conjunto de dados organizados em ordem crescente.

Ex: Mediana dos números 10,7,4,1 e 87 $\rightarrow \tilde{X}(1,4,7,10,87) = 7$;

Mediana dos números 10,7,2,4,1 e 87 $\rightarrow \tilde{X}(1,2,4,7,10,87) = \frac{4+7}{2} = 7,5$

Segundo Sampaio et al. (2018), enquanto a média é sensível a cada valor de um conjunto, inclusive os extremos, a mediana é relativamente insensível aos valores extremos. Tendo seu valor afetado, segundo Levine et al. (2011) pelo número de observações, e não pela magnitude de quaisquer valores extremos.

h. **Moda (Mo):** É o valor que ocorre com maior frequência em um conjunto de dados. Ao contrário da mediana, a moda não exige ordenação dos valores e é útil para identificar padrões de concentração em distribuições discretas. Pode haver nenhuma, uma ou mais modas, dependendo da frequência dos valores.

- ◆ Unimodal: apenas um valor com maior frequência;
- ◆ Bimodal: dois valores com a mesma frequência máxima;
- ◆ Multimodal: mais de dois valores com a mesma frequência máxima;
- ◆ Amodal: nenhum valor se repete.

Ex: Moda dos números 1,3,2,5,2,3,1,3,2,7 $\rightarrow Mo(1,1,2,2,2,3,3,3,5,7) = 2;3$.

Diante do exposto, destaca-se que, nos casos com mais de um valor com maior frequência (bi ou multimodal), a função *mode* no MATLAB (MATHWORKS, 2019) retorna o menor entre eles, ou seja, o primeiro valor em uma lista ordenada de valores mais frequentes (no caso do exemplo, o número 2). Sendo esta, a função utilizada nas análises deste trabalho.

i. **Média de intervalo ou Ponto médio (\bar{X}_I):** É a média aritmética simples entre a menor e a maior observação em um conjunto de dados ou, entre a primeira ($x_{o(1)}$) e a última observação ($x_{o(n)}$) em um conjunto de dados ordenados (x_o). Descrita como:

$$\bar{X}_I = \frac{x_{o(1)} + x_{o(n)}}{2} \quad (3.12)$$

Ex: Média de intervalo dos números 0, -1, 8, 5 e -3

$$\rightarrow \bar{X}_I(-3, -1, 0, 5, 8) = \frac{-3+8}{2} = 2,5.$$

3.1.2.2 Medidas Separatrizes ou Quantis

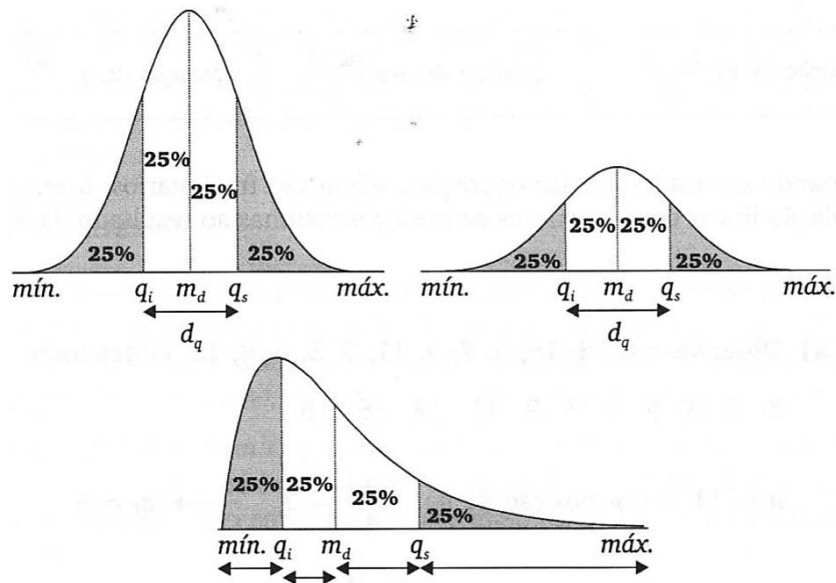
“As medidas separatrizes delimitam proporções de observações de uma variável ordinal” (PIANA et al., 2013, p. 42).

São estatísticas descritivas utilizadas para dividir um conjunto de dados ordenados em partes iguais, possibilitando uma análise mais detalhada da distribuição dos valores. Elas são particularmente úteis quando se deseja compreender a dispersão dos dados em segmentos, e não apenas sua média ou variabilidade global.

A principal característica dessas medidas é que todas exigem a ordenação prévia dos dados. Entre elas, as principais são a mediana, os quartis e extremos. Através delas pode-

se ter informações sobre a posição central, dispersão e assimetria da distribuição de frequências, como ilustra a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Posição dos quartis e extremos em distribuições diferentes quanto à dispersão e assimetria.



Fonte: Barbetta et al., 2004.

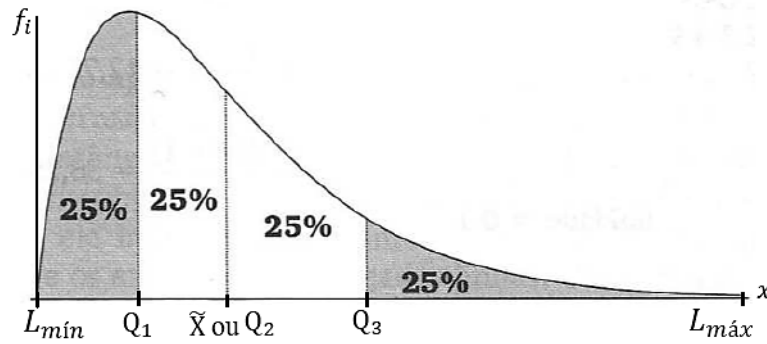
- a. **Extremos:** Extremos são os limites superior ($L_{máx}$) e inferior ($L_{mín}$) do conjunto de dados, obtidos por:

$$\begin{cases} L_{mín} = \text{mín}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ L_{máx} = \text{máx}(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (3.13)$$

- b. **Quantis:** São medidas de posição, obtidas a partir do conjunto de dados disposto em ordem crescente, que subdividem a distribuição em partes iguais. De modo geral, podemos definir uma medida, chamada quantil de ordem p ou p -quantil, indicada por $Q_{(p)}$, onde p é uma proporção qualquer, $0 < p < 1$, tal que $100p\%$ das observações sejam menores do que $Q_{(p)}$.

Entre os principais, destacam-se os quartis, decis e percentis, sendo os mais usuais, os quartis, que dividem a distribuição de dados ordenados em quatro partes iguais, cada um com 25% das observações, conforme ilustra a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Representação da distribuição de densidade dos dados com divisão em quartis.



Fonte: Adaptado de Barbetta et al., (2004).

Sendo f_i a frequência observada dos valores.

- ◆ Primeiro Quartil ou Quartil Inferior (Q_1): É o valor que separa os 25% menores dados dos 75% restantes em um conjunto de dados ordenado;
- ◆ Segundo Quartil ou mediana (Q_2 ou \tilde{X}): Valor que separa o conjunto de dados ordenados ao meio. Ou seja, 50% dos dados são menores ou iguais a ele, e 50% são maiores ou iguais;
- ◆ Terceiro Quartil ou Quartil Superior (Q_3): É o valor que separa os 75% menores dados dos 25% maiores em um conjunto de dados ordenado.

São obtidos, respectivamente, por:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_{(0,25)} = x_{o\left(\frac{n+1}{4}\right)} \\ Q_2 = Q_{(0,50)} = x_{o\left(\frac{n+1}{2}\right)} \\ Q_3 = Q_{(0,75)} = x_{o\left(\frac{3 \cdot (n+1)}{4}\right)} \end{cases} \quad (3.14)$$

Quando os resultados das operações acima são fracionários, faz-se uma interpolação linear com os valores de posições vizinhas ao resultado da fração.

Além dos quartis, outros mais comuns, são os decis ($Q_{(0,40)} = 4^\circ$ decil) e os percentis ($Q_{(0,95)} = 95^\circ$ percentil).

Ex: Observações: 15, 18, 5, 7, 9, 11, 3, 5, 6, 8, 12.

Ordenando: 3 5 5 6 7 8 9 11 12 15 18 $n=11$

$L_{\min} = x_1 = 3$

Posição de Q_1 : $\frac{n+1}{4} = 3 \rightarrow Q_1 = 5$

Posição de Q_2 : $\frac{n+1}{2} = 6 \rightarrow Q_2 = 8$

$$\text{Posição de } Q_3: \frac{3 \cdot (n+1)}{4} = 9 \rightarrow Q_3 = 12$$

$$L_{\text{máx}} = x_n = 18$$

3.1.2.3 Medidas de Variação ou Dispersão

As medidas de dispersão, também conhecidas como de variabilidade ou espalhamento, indicam o grau em que os dados de uma distribuição estão concentrados ou dispersos em torno de uma medida de posição central. Elas revelam o quão alongada ou compacta é a distribuição, sendo fundamentais para avaliar a representatividade das medidas de posição (SAMPAIO et al., 2018).

Como destacam Morettin e Bussab (2010), um resumo estatístico baseado apenas em medidas de tendência central pode ocultar informações importantes sobre a distribuição dos dados, uma vez que diferentes conjuntos podem apresentar medidas centrais idênticas, mas comportamentos distintos em relação à dispersão dos valores.

Para ilustrar esse conceito, observe os seguintes conjuntos de dados:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Grupo A} \rightarrow 3, 4, 5, 6, 7 \\ \text{Grupo B} \rightarrow 1, 3, 5, 7, 9 \\ \text{Grupo C} \rightarrow 5, 5, 5, 5, 5 \\ \text{Grupo D} \rightarrow 3, 5, 5, 7 \\ \text{Grupo E} \rightarrow 3, 5, 5, 6, 6 \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Embora todos os grupos acima apresentem a mesma média e mediana, a distribuição dos dados em torno desses valores centrais varia significativamente. Essa diferença é capturada pelas medidas de dispersão, que quantificam o grau de afastamento entre os valores. Conjuntos com valores mais próximos entre si apresentam baixa variabilidade, enquanto aqueles com valores mais distantes indicam maior dispersão (TRIOLA, 1999).

De acordo com Levine et al. (2011), as cinco principais medidas de variação são: amplitude, amplitude interquartil, variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

As medidas de dispersão mencionadas, assim como outras relevantes, serão detalhadas a seguir:

- a. **Amplitude de Pico** (X_{pico}): Representa a maior amplitude de oscilação do sinal, sendo a distância entre o valor de referência (normalmente zero) e o valor máximo (positivo ou negativo) atingido por um sinal ou conjunto de dados. Na análise de sinais, essa medida é utilizada para avaliar a intensidade ou a severidade de vibrações,

ruídos, forças ou tensões, pois expressa a máxima oscilação individual do sinal em relação ao seu ponto de equilíbrio. Dada por:

$$X_{pico} = \max |x_i| \quad (3.16)$$

- b. **Amplitude Total ou Intervalo Total ($X_{máx}$):** É a diferença entre o extremo superior e o extremo inferior dos dados, dada por:

$$X_{máx} = L_{máx} - L_{mín} \quad (3.17)$$

- c. **Amplitude Interquartil ou Distância Interquartil (d_q):** É uma medida de dispersão que representa a variação dos dados concentrados no intervalo central de uma distribuição. Ela é definida como a diferença entre o terceiro quartil (Q_3) e o primeiro quartil (Q_1):

$$d_q = Q_3 - Q_1 \quad (3.18)$$

Essa medida captura a dispersão nos dados que estão entre as 50% observações centrais, sendo, portanto, menos sensível a valores extremos ou *outliers*. Quanto maior seu valor, maior a dispersão dos dados nessa faixa central.

- d. **Amplitude de percentis (Δ_p):** Representa a diferença entre dois percentis específicos de um conjunto de dados ordenado, denotados por P_a e P_b , com $a < b$. Essa medida permite avaliar a variabilidade dos dados em uma faixa central definida, excluindo valores extremos, o que a torna menos sensível a *outliers* do que a amplitude total. Sua forma geral é dada por:

$$\Delta_p = P_b - P_a \quad (3.19)$$

A aplicação mais comum é a amplitude interquartilica (d_q), apresentada pela Equação (3.18), que considera os percentis 25 (Q_1) e 75 (Q_3). A amplitude de percentis é particularmente útil em análises estatísticas robustas, como aquelas realizadas entre os percentis 10 e 90 ou 5 e 95, justamente por reduzir a influência de valores atípicos.

Outliers (ou valores atípicos) são valores que se distanciam significativamente do restante dos dados em um conjunto. Eles não seguem o padrão geral da distribuição e, por isso, podem indicar algo incomum — como erros de medição, entrada de dados incorreta ou eventos extremos reais.

- e. **Intervalo Semi Quartílico ou *Midhinge* (\bar{X}_Q):** É a média entre o primeiro e o terceiro quartil em um conjunto de dados.

$$\bar{X}_Q = \frac{Q_1 + Q_3}{2} \quad (3.20)$$

Essa é uma medida resumida utilizada para superar potenciais problemas introduzidos por valores extremos de dados.

- f. **Desvio Médio (DM):** É a média das distâncias absolutas entre os valores de um conjunto de dados e a sua média aritmética. Calculado por:

$$DM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}| \quad (3.21)$$

Essa é uma das medidas que quantifica o grau de dispersão dos dados em torno da média, refletindo quão distribuídos estão os valores. A utilização do valor absoluto impede o cancelamento entre desvios positivos e negativos, como ocorreria na simples soma algébrica dos desvios.

- g. **Variância (σ^2):** É definida como a média aritmética dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média do conjunto:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (3.22)$$

Sempre resulta em um valor não negativo, já que os desvios são elevados ao quadrado. Valores maiores indicam maior dispersão em relação à média.

- h. **Desvio Padrão (σ):** Definido como a raiz quadrada positiva da variância e é expressa por:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (3.23)$$

Como a variância é calculada com base nos desvios quadráticos em relação à média, sua unidade de medida é o quadrado da unidade dos dados originais. Por esse motivo, é mais comum utilizar o desvio padrão, já que ele retorna à mesma unidade dos dados, facilitando a interpretação da dispersão em contextos práticos.

- i. **Coefficiente de Variação de Pearson (CV):** É uma medida de dispersão relativa, definida como a razão entre o desvio-padrão (σ) e a média aritmética (\bar{X}), expressa em porcentagem por:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (3.24)$$

Por expressar a variabilidade em termos relativos, permite comparar a dispersão entre conjuntos de dados com unidade ou magnitudes diferentes. Valores menores indicam maior homogeneidade, ou seja, menos dispersão em torno da média.

De acordo com Sampaio et al. (2018), a interpretação do coeficiente de variação pode ser feita da seguinte forma:

- ◆ $CV \leq 15\%$ → baixa dispersão: dados homogêneos;
- ◆ $15 < CV \leq 30\%$ → média dispersão;
- ◆ $CV > 30\%$ → alta dispersão: dados heterogêneos.

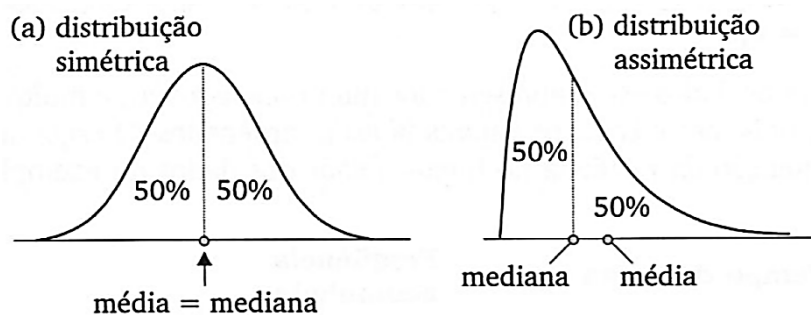
3.1.2.4 Medidas de Forma

Descrevem o formato da distribuição dos dados, especialmente no que diz respeito à simetria (distribuições simétricas ou assimétricas) e ao grau de achatamento (curtose). Essas medidas ajudam a identificar desvios do padrão normal de distribuição, fornecendo informações relevantes sobre o comportamento dos dados além da centralidade e dispersão.

De acordo com Piana et al. (2013), o formato é um aspecto importante de uma distribuição de dados, pois, embora mudanças em uma medida de variação também provoquem alterações no aspecto visual, o formato de uma distribuição se relaciona com ideias de simetria e curtose.

Vale ressaltar, que em distribuições simétricas, a média e a mediana são iguais. Em distribuições assimétricas, a média tende a deslocar-se para o lado da cauda mais longa (Figura 3.6).

Figura 3.6 – Posições da média e mediana, segundo a forma (simétrica ou assimétrica) da distribuição.



Fonte: Barbetta et al., 2004.

Várias medidas têm o objetivo de informar sobre o formato de uma distribuição. Entre as mais precisas estão os coeficientes de assimetria e de curtose, que são calculados a partir dos momentos da distribuição.

- a. **Momentos de distribuição** (m_r): São medidas calculadas com o propósito de estudar a distribuição. De um modo geral, tanto mais conhecemos uma distribuição quanto

mais conhecemos sobre os seus momentos. O momento de ordem r centrado num valor a , é dado por:

$$m_r = \frac{\sum(x_i - a)^r}{n} \quad (3.25)$$

Dois valores de a geram momentos importantes em um conjunto de dados:

- i. Se $a = 0$, temos os momentos centrados na origem, denominados momentos ordinários de ordem r e representados por m'_r . Assim temos:

$$m'_r = \frac{\sum x_i^r}{n} \quad (3.26)$$

Exemplos:

- ◆ Para $r=1$, temos: $m'_1 = \frac{\sum x_i}{n}$ (Média Aritmética - \bar{X});
- ◆ Para $r=2$, temos: $m'_2 = \frac{\sum x_i^2}{n}$ (Média dos Quadrados dos valores - \bar{X}_{sq});
- ◆ Para $r=3$, temos: $m'_3 = \frac{\sum x_i^3}{n}$;
- ◆ Para $r=4$, temos: $m'_4 = \frac{\sum x_i^4}{n}$.

- ii. Se $a = \bar{X}$, temos os momentos de ordem r centrados na média e representados por m_r . Assim, temos:

$$m_r = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^r}{n} \quad (3.27)$$

Exemplos:

- ◆ Para $r=1$, temos: $m_1 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})}{n}$ (Desvio médio - DM);
- ◆ Para $r=2$, temos: $m_2 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n}$ (Variância - σ^2);
- ◆ Para $r=3$, temos: $m_3 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^3}{n}$ (Assimetria);
- ◆ Para $r=4$, temos: $m_4 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^4}{n}$ (Curtose).

No geral, os momentos ímpares referem-se a informações sobre a posição do pico da distribuição em relação ao valor médio, enquanto os momentos pares indicam as características da dispersão da distribuição. Para uma distribuição normal teoricamente perfeita, todos os momentos ímpares serão zero e os momentos pares assumirão valores finitos (MARTIN; HONARVAR, 1995).

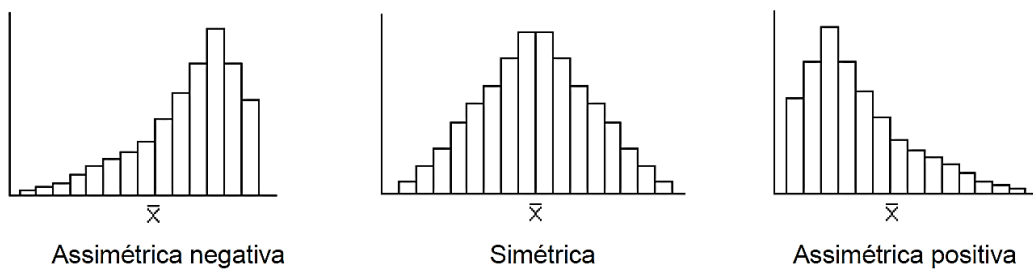
- b. **Coefficiente de Momento de Assimetria (γ_3)**: É uma padronização do momento de terceira ordem, que indica o grau e o sentido do afastamento da simetria. Pode ser obtida utilizando o segundo e o terceiro momentos centrados na média, ou o momento central de terceira ordem (m_3) dividido pelo desvio padrão elevado ao cubo:

$$\gamma_3 = \frac{m_3}{m_2\sqrt{m_2}} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\sigma^3} \quad (3.28)$$

A classificação da distribuição quanto à simetria, está representada graficamente na Figura 3.7 e, é feita de acordo com o valor de γ_3 :

- ◆ Se $\gamma_3 < 0$, a distribuição é classificada como assimétrica negativa, indicando que a maioria dos valores são maiores ou se localizam à direita da média aritmética;
- ◆ Se $\gamma_3 = 0$, a distribuição é classificada como simétrica, indicando que os valores estão uniformemente distribuídos em torno da média aritmética;
- ◆ Se $\gamma_3 > 0$, a distribuição é classificada como assimétrica positiva, indicando que a maioria dos valores são menores ou se localizam à esquerda da média aritmética.

Figura 3.7 – Classificação quanto a simetria da distribuição.



Fonte: Piana et al., 2013.

- c. **Coefficiente de Momento de Curtose (γ_4)**: É uma padronização do momento de quarta ordem que descreve a forma da distribuição de uma variável aleatória, especialmente a “altura” e a “largura” dos picos na distribuição dos dados, indicando o grau de achatamento da distribuição. Calculada a partir do segundo e do quarto momentos centrados na média, ou do momento central de quarta ordem (m_4) dividido pelo desvio padrão elevado a quarta:

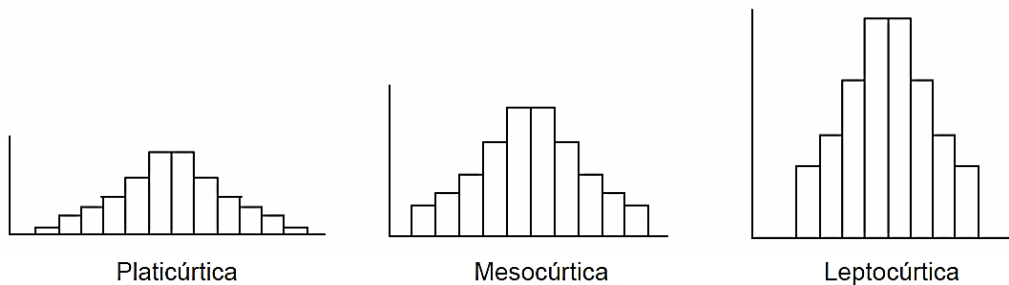
$$\gamma_4 = \frac{m_4}{m_2^2} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{\sigma^4} \quad (3.29)$$

A curtose está relacionada com o grau de concentração de observações no centro e nas caudas da distribuição e não tem interpretação intuitiva quanto a simetria. A

classificação da distribuição quanto à curtose, está representada graficamente na Figura 3.8 e é feita de acordo com o valor de γ_4 , tendo por base a curtose que ocorre na distribuição normal, que é classificada como mesocúrtica.

- ◆ Se $\gamma_4 < 3$, a distribuição é classificada como platicúrtica, sendo mais achatada que a normal, com um pico mais baixo e caudas mais leves, indicando menor concentração de dados próximos à média e menor presença de valores extremos;
- ◆ Se $\gamma_4 = 3$, a distribuição é classificada como mesocúrtica, e apresenta um grau de concentração semelhante ao da distribuição normal, com caudas moderadas e um pico de altura média;
- ◆ Se $\gamma_4 > 3$, a distribuição é classificada como leptocúrtica, sendo mais afilada que a normal, com um pico mais alto e caudas mais pesadas, indicando maior concentração de dados próximos à média e maior presença de valores extremos.

Figura 3.8 – Classificação quanto a curtose da distribuição.



Fonte: Piana et al., 2013.

- d. Coeficiente do Momento Central de 6ª ordem (γ_6):** É uma padronização do momento central de sexta ordem que descreve o comportamento de uma variável aleatória em relação à sua média, capturando características mais sutis da forma da distribuição, como acentuações extremas de simetria e dispersão, definido por:

$$\gamma_6 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^6}{\sigma^6} \quad (3.30)$$

- e. Coeficiente Quartílico de Assimetria ou Coeficiente de Bowley (A_Q):** é a medida que indica o grau de assimetria de uma distribuição de dados utilizando os quartis. Esse coeficiente é uma alternativa às equações de assimetria que utilizam a média e a moda, que podem ser distorcidas por valores extremos:

$$A_Q = \frac{(Q_3 - Q_2) - (Q_2 - Q_1)}{(Q_3 - Q_1)} \quad (3.31)$$

Sendo, para:

- ◆ $A_Q = 0$: a distribuição é simétrica;
- ◆ $A_Q > 0$: a distribuição é assimétrica à direita (positiva), ou seja, tem uma cauda mais longa para a direita;
- ◆ $A_Q < 0$: a distribuição é assimétrica à esquerda (negativa), ou seja, tem uma cauda mais longa para a esquerda.

Em distribuições simétricas, a distância entre o quartil inferior (Q_1) e a mediana (Q_2) é igual à distância entre a mediana e o quartil superior (Q_3). Já em distribuições assimétricas, essas distâncias diferem, refletindo o grau de assimetria presente.

- f. **Coefficiente Percentílico de Curtose (P_e)**: É uma variação do cálculo tradicional de curtose que combina a amplitude de percentis com a amplitude semi-interquartilica para medir a concentração dos dados. Sendo uma medida estatística que descreve a forma de uma distribuição em relação à distribuição normal, dada por:

$$P_e = \frac{(Q_3 - Q_1)}{2(P_{90} - P_{10})} \quad (3.32)$$

Onde, para:

- ◆ $P_e \cong 0,263$ → Distribuição Mesocúrtica: Mesma forma (curtose) de uma distribuição normal;
- ◆ $P_e < 0,263$ → Distribuição Leptocúrtica: Possui caudas mais pesadas e um pico mais agudo (mais alta) em relação à distribuição normal;
- ◆ $P_e > 0,263$ → Distribuição Platicúrtica: Possui caudas mais leves e um pico mais achatado em relação à distribuição normal.

Essa abordagem é menos sensível a *outliers* extremos e fornece uma perspectiva mais robusta da distribuição dos dados.

- g. **Fator de Crista (F_{CR})**: Expressa a relação entre o valor de pico de um sinal (X_{pico}) e seu valor eficaz (\bar{X}_{rms}), sendo amplamente utilizado na análise de vibrações e no monitoramento de condição de máquinas rotativas. É particularmente sensível à presença de impulsos e picos anormais em sinais periódicos ou quase periódicos, sendo dado por:

$$F_{Cr} = \frac{X_{pico}}{\bar{X}_{rms}} \quad (3.33)$$

- h. **Fator K (F_k):** Proposto por Mitchell (1993), o Fator K foi desenvolvido com o objetivo de contornar o comportamento indesejado do fator de crista em ensaios com rolamentos, especialmente em situações em que a velocidade de rotação aumenta. O autor observou que, nessas condições, o fator de crista tende a perder sensibilidade na detecção de falhas, motivando a criação de uma métrica alternativa mais robusta às variações de velocidade, dada por:

$$F_k = X_{pico} \cdot \bar{X}_{rms} \quad (3.34)$$

- i. **Primeiro Coeficiente de Pearson (AS_1):** É uma medida de assimetria de uma distribuição, baseada na relação entre a média e a moda, definida por:

$$AS_1 = \frac{(\bar{X} - Mo)}{\sigma} \quad (3.35)$$

Onde, para:

- ◆ $AS_1 > 0$, indica assimetria à direita;
- ◆ $AS_1 < 0$, indica assimetria à esquerda;
- ◆ $AS_1 \cong 0$, indica uma distribuição aproximadamente simétrica.

- j. **Segundo Coeficiente de Pearson (AS_2):** Também conhecido como coeficiente de assimetria baseado na mediana, é definido como:

$$AS_2 = \frac{3(\bar{X} - \tilde{X})}{\sigma} \quad (3.36)$$

Onde, para:

- ◆ $AS_2 > 0$, indica assimetria à direita;
- ◆ $AS_2 < 0$, indica assimetria à esquerda;
- ◆ $AS_2 \cong 0$, indica uma distribuição aproximadamente simétrica.

3.1.2.5 Medidas para Dados Agrupados em Classes

As medidas descritivas também podem ser estimadas a partir de dados organizados em classes. No entanto, quando são obtidas a partir de tabelas de distribuição de frequências de variáveis contínuas, geralmente representam aproximações dos valores que seriam calculados com os dados em sua forma original e não agrupada (PIANA et al., 2013).

I. Medidas de localização ou tendência central:

- a. **Média aritmética de intervalos de classe (\bar{X}):** é média ponderada pelas frequências absolutas dos centros de classe (f_i), calculada pela soma dos produtos entre a frequência e o ponto médio do intervalo de classe (\bar{X}_I), dividida pelo somatório das frequências:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \cdot \bar{X}_I)}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (3.37)$$

O cálculo da média de uma distribuição é obtido com um erro decorrente do agrupamento dos dados. Quanto maior for a simetria dos valores de cada classe em relação ao seu centro ou ponto médio, menor será o erro.

Ex: Média aritmética simples de dados agrupados em intervalos de classe:

Intervalo	Frequência (f_i)
1-3	6
4-6	2
7-9	5

$$\bar{X} = \frac{6 \cdot 2 + 2 \cdot 5 + 5 \cdot 8}{6 + 2 + 5} = 4,77.$$

- b. **Mediana de intervalos de classe (\tilde{X}):** É o valor que ocupa a posição central em um conjunto de dados ordenados, dividindo o conjunto em duas partes iguais. Para dados dispostos em intervalos de classe, a mediana é dada por:

$$\tilde{X} = Li + \left[\frac{\left(\frac{n}{2}\right) - F_{[i-1]}}{f_i} \right] \cdot h, \quad \text{se } \frac{\sum f_i}{2} = F_i \rightarrow \tilde{X} = Ls \quad (3.38)$$

Onde:

- ◆ f_i : frequência da classe da mediana;
- ◆ F_i : frequência acumulada da classe;
- ◆ $F_{[i-1]}$: frequência acumulada da classe anterior à classe que contém a mediana;
- ◆ h : amplitude do intervalo de classe (largura da classe);
- ◆ Li : limite inferior da classe que contém a mediana;
- ◆ Ls : limite superior da classe que contém a mediana.

Ex₁: Mediana de dados agrupados em intervalos de classe:

i	Intervalo	Frequência (f_i)	Frequência Acumulada (F_i)
---	-----------	----------------------	--------------------------------

1	1-3	6	6
2	4-6	2	8
3	7-9	5	13
4	10-12	7	20
	Total ($\sum f_i$)	20	

$$\frac{\sum f_i}{2} = \frac{20}{2} = 10, \text{ logo classe mediana é } i = 3$$

$$\tilde{X} = 7 + \left[\frac{\left(\frac{20}{2}\right) - 8}{5} \right] \cdot 2 = 7,5$$

Ex₂: Mediana de dados agrupados em intervalos de classe:

i	Intervalo	Frequência (f_i)	Frequência Acumulada (F_i)
1	1-3	6	6
2	4-6	4	10
3	7-9	3	13
4	10-12	7	20
	Total ($\sum f_i$)	20	

$$\frac{\sum f_i}{2} = \frac{20}{2} = 10 = F_2, \text{ logo } \tilde{X} = Ls_2 = 6$$

- c. **Moda de intervalos de classe** (M_o): É o valor que ocorre com maior frequência em um conjunto de dados. Para valores com intervalo de classe é dada pela fórmula de Czuber:

$$M_o = Li + \left(\frac{f_i - f_{i-1}}{2f_i - f_{i-1} - f_{i+1}} \right) \cdot h \quad (3.39)$$

Onde:

- ◆ Li : limite inferior da classe modal;
- ◆ f_i : frequência da classe modal;
- ◆ f_{i-1} : frequência da classe inferior à modal;
- ◆ f_{i+1} : frequência da classe superior à modal;
- ◆ h : amplitude da classe modal (largura da classe).

Ex: Moda de dados agrupados em intervalos de classe:

i	Intervalo	Frequência (f_i)
1	1-3	6

2	4-6	4
3	7-9	3
4	10-12	7

$$> f_i = 7 \rightarrow i = 4 \rightarrow Mo = 10 + \frac{7 - 3}{(2 \cdot 7) - 3 - 0} \cdot 2 = 10,73$$

II. Medidas de variação ou dispersão:

- a. **Amplitude de um intervalo de classe (Δ_i):** É a medida do intervalo que define a classe, o tamanho ou largura da classe, ou seja, o intervalo entre seu limite superior (L_s) e inferior (L_i):

$$\Delta_i = L_s - L_i \quad (3.40)$$

No caso de intervalos constantes $\Delta_{i,..,k} = h$.

- b. **Variância de intervalos de classe (σ^2):** É calculada pela média aritmética dos quadrados dos desvios do ponto médio do intervalo de classe (\bar{X}_I) em relação à média do conjunto (\bar{X}). Dada por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \cdot (\bar{X}_I - \bar{X})^2 \quad (3.41)$$

Ex: Variância de dados agrupados em intervalos de classe:

i	Intervalo	Frequência (f_i)	Ponto médio do Intervalo (\bar{X}_I)
1	1-3	6	2
2	4-6	4	5
3	7-9	3	8
4	10-12	7	11
	Total ($n = \sum f_i$)	20	

A média dos intervalos de classe (\bar{X}_I), foram calculadas através da Equação (3.12) e estão apresentadas na quarta coluna da tabela. A média dos dados agrupados (\bar{X}) pode ser calculada pela Equação (3.37), sendo $\bar{X} = \frac{6 \cdot 2 + 4 \cdot 5 + 3 \cdot 8 + 7 \cdot 11}{6 + 4 + 3 + 7} = 6,65$. Por fim, a variância dos dados:

$$\sigma^2 = \frac{(2 - 6,65)^2 + (5 - 6,65)^2 + (8 - 6,65)^2 + (11 - 6,65)^2}{20} = 2,25$$

III. Medidas de Forma

- a. **Momentos centrados na média (m_r):**

$$m_r = \frac{\sum f_i \cdot (\bar{X}_I - \bar{X})^r}{n} \quad (3.42)$$

Exemplos:

- ◆ Para $r=1$, temos: $m_1 = \frac{\sum f_i \cdot (\bar{X}_I - \bar{X})}{n}$ (Desvio médio - DM);
- ◆ Para $r=2$, temos: $m_2 = \frac{\sum f_i \cdot (\bar{X}_I - \bar{X})^2}{n}$ (Variância - σ^2);
- ◆ Para $r=3$, temos: $m_3 = \frac{\sum f_i \cdot (\bar{X}_I - \bar{X})^3}{n}$;
- ◆ Para $r=4$, temos: $m_4 = \frac{\sum f_i \cdot (\bar{X}_I - \bar{X})^4}{n}$.

3.1.3 Transformações dos Dados

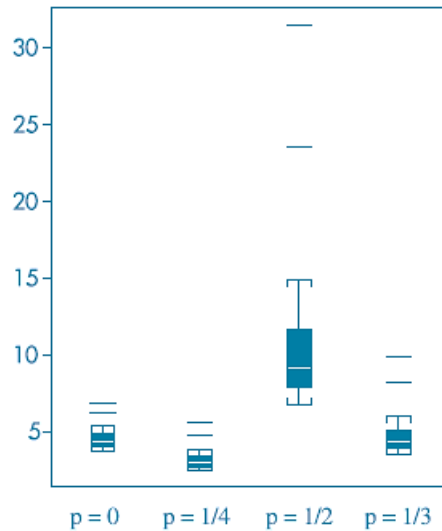
Diversos procedimentos estatísticos clássicos baseiam-se na suposição de que os dados seguem uma distribuição normal (em forma de sino) ou, ao menos, apresentam simetria razoável. Contudo, na prática, é comum que os dados tenham distribuição assimétrica e contenham valores atípicos (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

Para estes casos, Morettin e Bussad (2010) sugerem a aplicação de transformações nas observações, com o objetivo de aproximar sua distribuição da normal ou de evidenciar características relevantes à análise. Uma das famílias de transformações frequentemente utilizadas é:

$$x^{(p)} = \begin{cases} x^p, & \text{se } p > 0 \\ \ln(x), & \text{se } p = 0 \\ -x^p, & \text{se } p < 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

Para a escolha do valor do p , recomenda-se testar diferentes valores e selecionar o mais adequado através da inspeção de gráficos gerados para os dados originais e transformados, como apresentado a seguir:

Figura 3.9 – Boxplots de dados transformados.



Fonte: Adaptado de Morettin e Bussab, 2010.

No caso de dados como acelerações estruturais, que consistem em sinais contínuos representados por sequências discretas de valores ao longo de um intervalo de tempo finito, uma das transformações mais aplicadas é a transformada de Fourier, apresentada a seguir.

3.1.3.1 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é uma ferramenta matemática que permite converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência, decompondo-os em um conjunto de ondas senoidais e cossenoidais complexas de diferentes frequências (CLOUGH; PENZIEN, 1995). Essa representação é extremamente útil para análises de sons, ruídos e vibrações, pois facilita a compreensão e manipulação dos sinais com base em suas componentes espectrais.

Segundo Stewart (2013), a transformada de Fourier é de extrema importância para a tecnologia atual, por ser uma ferramenta que decompõe um sinal em suas frequências componentes, permitindo a análise de padrões, a extração de características relevantes, a organização de informações e a remoção de ruídos aleatórios.

A transformada de Fourier de um sinal no domínio do tempo $x(t)$ é definida por:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.44)$$

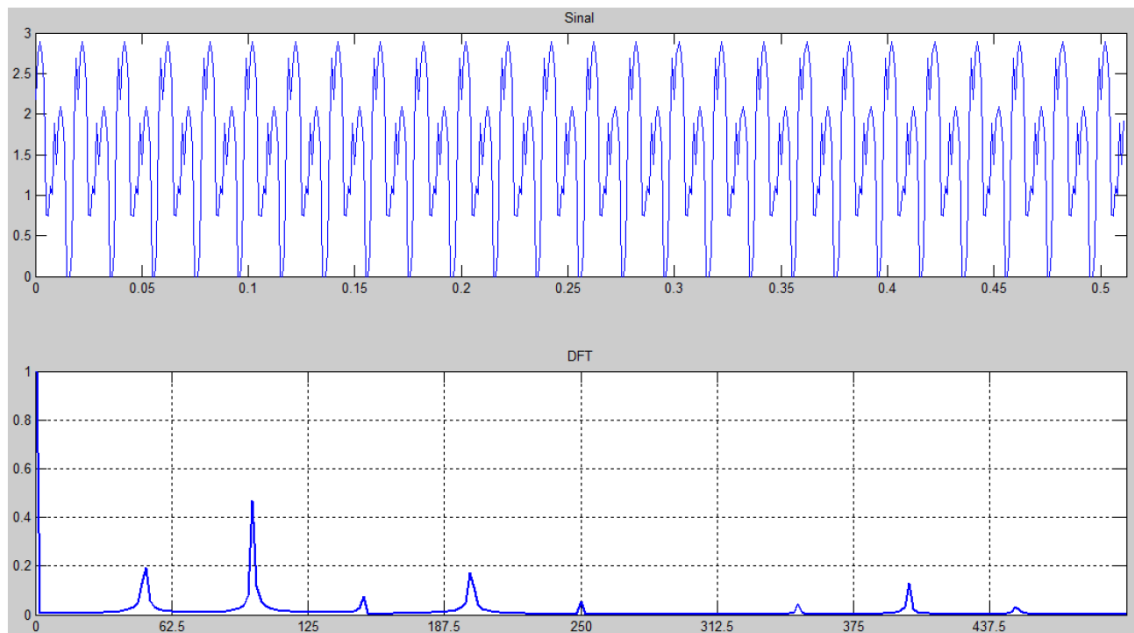
Essa equação decompõe um sinal temporal em um conjunto de funções de base senoidais complexas $\{e^{i\omega t}, -\infty < f < \infty\}$, em que i é a unidade imaginária ($i = \sqrt{-1}$), $\omega = 2\pi f$, f é a frequência e t representa a variável de tempo.

Em sua forma discreta, a transformada de Fourier (*Discrete Fourier Transform – DFT*) apresenta a limitação de exigir elevado tempo de processamento. Para um conjunto de dados com n observações, são necessárias n^2 operações, o que implicam um crescimento exponencial do tempo computacional de processamento à medida que o número de observações aumenta.

Para superar essa limitação, Cooley e Tukey (1965) propuseram o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*), que possibilita o cálculo mais eficiente e preciso da transformada discreta. Diferentemente da DFT, a FFT divide o conjunto de dados em subconjuntos menores, calcula as DFTs dessas partes e, em seguida, combina os resultados de maneira eficiente. Com essa abordagem, o número de operações é reduzido para $n \log_2 n$, diminuindo significativamente o tempo computacional necessário para a realização da transformada (COOLEY; TUKEY, 1965).

A Figura 3.10 ilustra um sinal no domínio do tempo seguido por sua representação no domínio da frequência, obtida por meio da aplicação da FFT.

Figura 3.10 – Sinal no domínio do tempo e resultado da FFT no domínio da frequência.



Fonte: Ferreira, 2016.

3.1.4 Análise Exploratória dos Dados

A Análise Exploratória de Dados (AED) constitui um importante complemento às técnicas estatísticas clássicas, oferecendo uma abordagem eficaz para descrever conjuntos dados que não seguem o modelo unimodal, simétrico e mesocúrtico (PIANA et al., 2013).

Seu principal objetivo é entender a estrutura, as características e os padrões principais de um conjunto de dados antes da aplicação de modelos estatísticos. As técnicas de AED auxiliam na verificação das condições para aplicação de testes de hipóteses, na identificação de erros ou valores discrepantes, e na escolha de transformações adequadas, contribuindo para uma análise estatística mais robusta (PIANA et al., 2013).

3.1.4.1 Resumo de Cinco Números

O resumo de cinco números descreve o conjunto de dados por meio de cinco valores fundamentais: o valor mínimo (L_{\min}), o primeiro quartil (Q_1), a mediana (Q_2 ou \tilde{X}), o terceiro quartil (Q_3) e o valor máximo (L_{\max}). Com base nesses elementos é possível calcular a amplitude interquartílica (d_q).

Esses valores permitem uma compreensão da assimetria de distribuição, uma vez que 25% das observações estão contidas em cada intervalo delimitado pelos quantis.

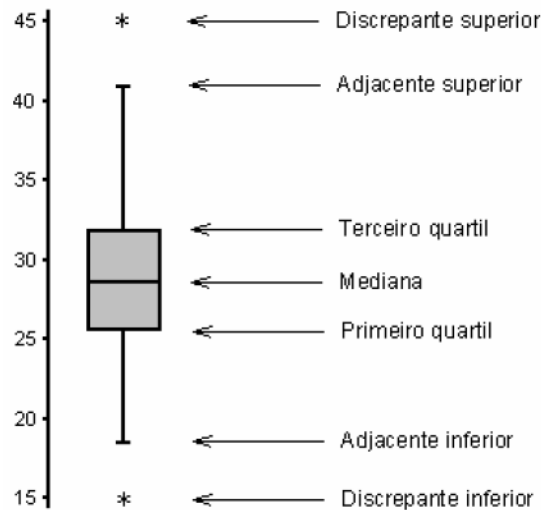
3.1.4.2 Diagrama em Caixas (*Boxplots*)

A informação fornecida pelo resumo de cinco números pode ser representada graficamente por meio do diagrama de caixas (*boxplot*), que agrega várias informações sobre a distribuição dos dados, tais como localização, dispersão, assimetria, caudas e valores discrepantes (PIANA et al., 2013).

Segundo Triola (1999), o *boxplot* é composto por uma reta (bigodes) que se estende do menor ao maior valor não discrepante, e um retângulo cujas extremidades correspondem ao primeiro quartil (Q_1) e ao terceiro quartil (Q_3). No interior da caixa é traçada uma linha correspondente à mediana.

De acordo com Han et al. (2011), este tipo de gráfico é uma ferramenta visual eficaz para representar diferentes aspectos de uma distribuição, como pode ser observado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Um diagrama de caixas com suas partes componentes destacadas.



Fonte: Piana et al., 2013.

A identificação de valores discrepantes (*outliers*) pode ser feita utilizando-se duas medidas: cerca inferior (CI) e cerca superior (CS), calculadas da seguinte forma:

$$\begin{cases} CI = Q_1 - 1,5d_q \\ CS = Q_3 + 1,5d_q \end{cases} \quad (3.45)$$

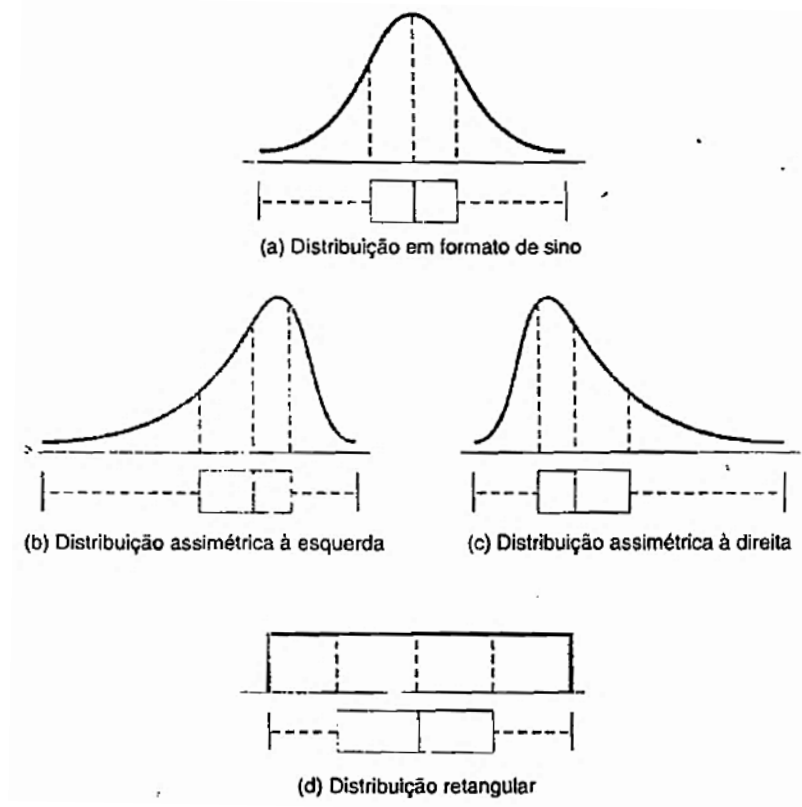
São considerados discrepantes os valores se situam fora desses limites. Valores inferiores à CI são denominados discrepantes inferiores; superiores à CS, discrepantes superiores. Tais valores são usualmente representados por pontos ou asteriscos nos gráficos.

Piana et al. (2013) destacam que, ao se deparar com valores discrepantes, é importante investigar sua origem. Esses valores podem refletir erros de medição ou registro, mas também podem ser parte legítima dos dados, evidenciando a assimetria da distribuição. Distribuições com caudas longas tem mais propensão a apresentar *outliers*.

Os valores adjacentes correspondem ao menor e ao maior valor não discrepantes, ou seja, que não ultrapassam as cercas. Caso não haja valores discrepantes, os valores adjacentes coincidem com os valores extremos do conjunto.

A posição central dos dados é representada pela mediana, enquanto a dispersão é expressa pela amplitude interquartílica (d_q). A relação entre a posição da mediana, os quartis e o comprimento dos bigodes permite inferir a simetria e o formato das caudas da distribuição.

Na Figura 3.12, apresentada por Levine et al. (2011), ilustra quatro distribuições hipotéticas com diferentes características de simetria.

Figura 3.12 – Quatro distribuições hipotéticas examinadas através de seus *boxplots*.

Fonte: Levine et al., 2011.

Quando os dados são aproximadamente simétricos, como nos casos (a) e (d) da Figura 3.12, a média aritmética, a mediana, a média de intervalo e *midhinge* tendem a coincidir. Além disso, os bigodes apresentam comprimentos semelhantes e a mediana divide a caixa ao meio.

Em distribuições assimétricas à esquerda (Figura 3.12 b), observa-se que os poucos valores extremos menores, distorcem a média do intervalo e a média aritmética para a esquerda. A ordem relativa das medidas, nesse caso, tende a ser:

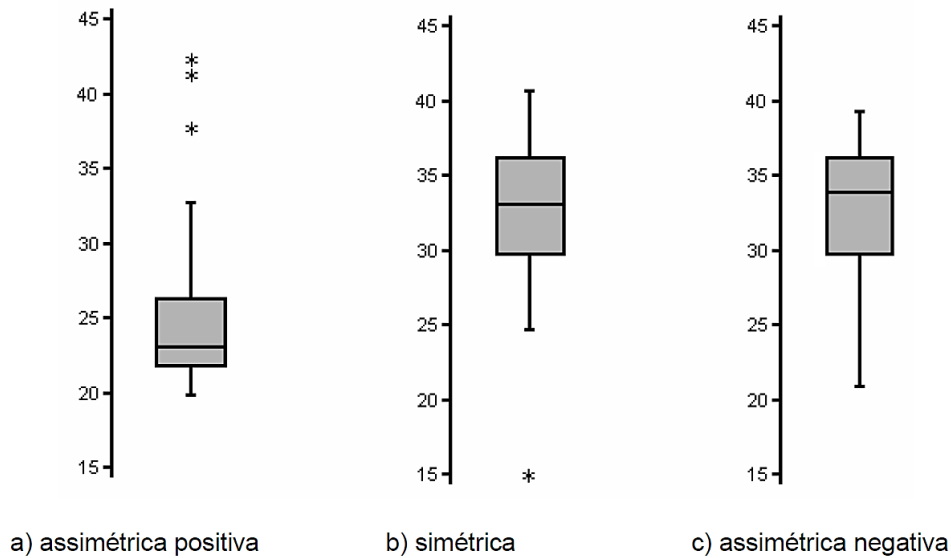
$$\text{média do intervalo} < \text{média aritmética} < \text{midhinge} < \text{mediana} < \text{moda}$$

No caso da assimetria à direita (Figura 3.12 c), ocorre o oposto:

$$\text{moda} < \text{mediana} < \text{midhinge} < \text{média aritmética} < \text{média do intervalo}$$

A Figura 3.13 apresenta diagramas de caixa para três tipos distintos de distribuição:

Figura 3.13 – Diagrama em caixas de diferentes tipos de distribuição.



Fonte: Piana et al., 2013.

- Distribuição assimétrica positiva, com três valores discrepantes superiores;
- Distribuição simétrica, com um valor discrepante inferior;
- Distribuição assimétrica negativa, sem valores discrepantes.

Essas representações visuais são fundamentais para uma compreensão inicial do comportamento dos dados e para embasar a escolha dos procedimentos estatísticos adequados nas análises subsequentes.

3.1.5 Resumo dos Indicadores de Danos Implementados

No contexto da detecção de danos estruturais, indicadores estatísticos têm se mostrado ferramentas eficazes para identificar alterações sutis nos sinais dinâmicos das estruturas. Devido à sua alta sensibilidade às variações nas características dos dados, alguns desses indicadores permitem detectar a ocorrência de danos mesmo quando suas manifestações são discretas (ALVES, 2016).

Diversos estudos têm investigado o uso de parâmetros estatísticos na identificação de falhas, tanto em componentes mecânicos quanto em estruturas civis. A seguir, são destacados alguns trabalhos relevantes.

I. Detecção de danos em rolamentos:

- ◆ Dyer e Stewart (1978) utilizaram a **curtose** para detecção de falhas em rolamentos de rolos e afirmaram que os seis primeiros momentos centrais podem ser utilizados neste contexto.

- ◆ Mitchell (1993) destacou o uso da **raiz quadrada da média (RMS)** e do **fator de crista** para a identificar de falhas incipientes, além de propor o **fator K** como novo parâmetro diagnóstico.
- ◆ Martin e Honarvar (1995) aplicaram a **curtose** e a **assimetria** na análise de falhas em rolamentos, observando sua eficácia na identificação de anomalias.
- ◆ Bezerra (2004) avaliou a sensibilidade de nove parâmetros estatísticos (**RMS, amplitude de pico, fator de crista, fator K, média, variância, coeficientes de assimetria, de curtose e do momento de sexta ordem**) para a detecção de falhas em rolamentos.
- ◆ Samanta e Al-Blauchi (2003) utilizam cinco parâmetros estatístico (**RMS, assimetria, variância, coeficiente de curtose e coeficiente do momento central de sexta ordem**), como entrada para uma rede neural artificial voltada à detecção automatizada de danos em rolamentos.

II. Aplicações em estruturas civis:

- ◆ Cury (2010) propôs o uso de Análise de Dados Simbólicos (**ADS**) com 20 categorias.
- ◆ Choi e Sweetmans (2010) propuseram o uso de quatro parâmetros estatísticos como indicadores de dano em plataformas offshore: **média aritmética, desvio padrão, curtose e assimetria**.
- ◆ Farrar e Worden (2012) ampliaram esse conjunto, propondo dez indicadores estatísticos aplicáveis a pontes, estruturas de concreto, sistemas dinâmicos simulados e aeronaves. Além dos quatro indicadores de Choi e Sweetman (2010), incluíram: **amplitude de pico, média dos quadrados dos valores, RMS, variância, fator de crista e fator K**.
- ◆ Alves (2012) analisou a **ADS** com **12 categorias**.
- ◆ Alves (2016) propôs o uso de **ADS** com **10 categorias**, além de comparar resultados com os parâmetros sugeridos por Choi e Sweetmans (2010) e Farrar e Worden (2012) e outras técnicas de resumos de dados.
- ◆ Santos et al. (2017) propõe o uso de um objeto de dados simbólicos (SDO) baseado em uma medida de dispersão, a **amplitude interquartil (IRQ)**.
- ◆ Cardoso (2019b) baseado no estudo de Santos et al. (2017), propõe o uso de medidas separatrizes, agregando às medidas que compõem a amplitude

interquartil (**1º e 3º quartil**), uma medida que é também de tendência central, a **mediana** (2º quartil), denominando esse SDO como IRQM.

- ◆ Cardoso (2019a) acrescentou ao conjunto de indicadores baseados em medidas separatrizes IRQM, um segundo conjunto, com as mesmas medidas (**1º, 2º e 3º quartil**), agora no domínio da frequência. Totalizando seis indicadores, sendo os três quartis no domínio do tempo e os três quartis no domínio da frequência, denominados pelo autor como TF-IRQM.

Com exceção dos quatro primeiros estudos (Dyer e Stewart, Mitchell, Martin e Honarvar, e Bezerra), os demais autores utilizaram conjuntos de parâmetros estatísticos combinados, associando seus efeitos para melhorar a capacidade de classificação dos estados estruturais. Apenas Bezerra (2004) investigou individualmente o comportamento de cada indicador proposto, com a aplicação específica a rolamentos.

As medidas estatísticas discutidas neste capítulo, resumidas nas Tabelas 3.1 a 3.4, serão avaliadas neste trabalho tanto no domínio do tempo quanto no da frequência (obtido por meio da Transformada Rápida de Fourier – FFT). Serão analisadas quanto à sensibilidade às alterações nas características dos dados provocadas por modificações estruturais, bem como quanto à efetividade individual na classificação dos diferentes estados estruturais.

Os indicadores utilizados incluem:

- ◆ 8 medidas de posição (Tabela 3.1);
- ◆ 9 medidas de dispersão (Tabela 3.2);
- ◆ 9 medidas de forma (Tabela 3.3);
- ◆ 4 medidas separatrizes (Tabela 3.4).

As quatro medidas separatrizes em conjunto com a mediana, serão utilizadas para a construção de *boxplots*, utilizadas na análise do comportamento dos sinais para cada estado estrutural.

Também será realizada a Análise dos Dados Simbólicos (ADS), descrita neste trabalho como a distribuição de frequência dos dados, com número de classes determinado pela regra de Sturges (Equação 3.4). Para essa análise, podem ser empregadas as medidas para dados agrupados em classe, resumidas na Tabela 3.5.

Tabela 3.1 – Parâmetros de posição utilizados na metodologia do presente trabalho.

TIPO	INDICADOR	EQUAÇÃO
Posição ou Tendência Central	Média Aritmética Simples	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
	Média Harmônica	$\bar{X}_h = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$
	Média Geométrica	$\bar{X}_g = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n}$
	Média dos Quadrados dos Valores	$\bar{X}_{sq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2$
	Raiz Quadrada da Média	$\bar{X}_{rms} = \sqrt{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2}$
	Mediana	$\tilde{X} = \begin{cases} x_{o(\frac{n+1}{2})}, & \text{se } n \text{ ímpar;} \\ \frac{x_{o(\frac{n}{2})} + x_{o(\frac{n+1}{2})}}{2}, & \text{se } n \text{ par.} \end{cases}$
	Moda	$Mo = \text{dado(s) que ocorre(m) com maior(es) frequência(s)}$
	Média de intervalo ou Ponto Médio	$\bar{X}_I = \frac{x_{o(1)} + x_{o(n)}}{2}$

Fonte: Autor.

Tabela 3.2 – Parâmetros de dispersão utilizados na metodologia do presente trabalho.

TIPO	INDICADOR	EQUAÇÃO
Variação ou Dispersão	Amplitude de Pico	$X_{\text{pico}} = \max x_i $
	Amplitude Total	$X_{\text{máx}} = L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}}$
	Amplitude Interquartil	$d_q = Q_3 - Q_1$
	Amplitude de percentis	$\Delta_p = P_b - P_a$
	Intervalo Semi Quartílico ou <i>Midhinge</i>	$\bar{X}_Q = \frac{Q_1 + Q_3}{2}$
	Desvio Médio	$DM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{X} $
	Variância	$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$
	Desvio Padrão	$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$
	Coeficiente de Variação de Pearson	$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100\%$

Fonte: Autor.

Tabela 3.3 – Parâmetros de forma utilizados na metodologia do presente trabalho.

TIPO	INDICADOR	EQUAÇÃO
Forma	Coeficiente de Momento de Assimetria	$\gamma_3 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\sigma^3}$
	Coeficiente de Momento de Curtose	$\gamma_4 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{\sigma^4}$
	Coeficiente de Momento Central de 6ª ordem	$\gamma_6 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^6}{\sigma^6}$
	Coeficiente Quartílico de Assimetria ou Coeficiente de Bowley	$A_Q = \frac{(Q_3 - Q_2) - (Q_2 - Q_1)}{(Q_3 - Q_1)}$
	Coeficiente Percentílico de Curtose	$P_e = \frac{(Q_3 - Q_1)}{2(P_{90} - P_{10})}$
	Fator de Crista	$F_{cr} = \frac{X_{\text{pico}}}{\bar{X}_{rms}}$
	Fator K	$F_k = X_{\text{pico}} \cdot \bar{X}_{rms}$
	1º Coeficiente de Assimetria de Pearson	$AS_1 = \frac{(\bar{X} - Mo)}{\sigma}$
	2º Coeficiente de Assimetria de Pearson	$AS_2 = \frac{3(\bar{X} - \tilde{X})}{\sigma}$

Fonte: Autor.

Tabela 3.4 – Parâmetros separatrizes utilizados na metodologia do presente trabalho.

TIPO	INDICADOR	EQUAÇÃO
Separatriz	Extremos	$\begin{cases} L_{\min} = \min(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ L_{\max} = \max(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases}$
	Quantis	$\begin{cases} Q_1 = Q_{(0,25)} = x_{O\left(\frac{n+1}{4}\right)} \\ Q_2 = Q_{(0,50)} = x_{O\left(\frac{n+1}{2}\right)} \\ Q_3 = Q_{(0,75)} = x_{O\left(\frac{3 \cdot (n+1)}{4}\right)} \end{cases}$

Fonte: Autor.

Tabela 3.5 – Parâmetros para dados agrupados por classe utilizados na metodologia do presente trabalho.

TIPO	INDICADOR	EQUAÇÃO	
Agrupados em Intervalos de Classe	Média Aritmética	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \cdot \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n f_i}$	
	Posição	Mediana	$\tilde{X} = L_i + \left[\frac{\left(\frac{n}{2}\right) - F_{[i-1]}}{f_i} \right] \cdot h, \quad \text{se } \frac{\sum f_i}{2} = F_i \rightarrow \tilde{X} = L_s$
		Moda	$M_o = L_i + \left(\frac{f_i - f_{i-1}}{2f_i - f_{i-1} - f_{i+1}} \right) \cdot h$
		Amplitude de Classe	$\Delta_i = L_s - L_i$
	Dispersão	Variância	$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \cdot (\bar{X}_i - \bar{X})^2$
		Momentos Centrados na Média	$m_r = \frac{\sum f_i \cdot (\bar{X}_i - \bar{X})^r}{n}$

Fonte: Autor.

3.2 TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO DE DADOS

As técnicas de classificação de dados constituem um conjunto de ferramentas estatísticas e computacionais poderosas que permitem organizar e interpretar grandes volumes de informações. Por meio de algoritmos capazes de identificar padrões e relações implícitas nos dados, essas técnicas facilitam o agrupamento de dados complexos em categorias significativas, promovendo uma análise mais eficiente e fundamentada para a tomada de decisões (HASTIE et al., 2009).

De acordo com tipo de aprendizado, as técnicas de classificação podem ser categorizadas em dois grandes grupos:

- ◆ **Aprendizado supervisionado:** caracteriza-se pela utilização de um conjunto de dados rotulados, no qual as entradas estão associadas a saídas previamente conhecidas. O modelo é treinado a mapear as relações entre as variáveis explicativas e os rótulos, a fim de realizar previsões ou classificações futuras com base nesse aprendizado.
- ◆ **Aprendizado não supervisionado:** não utiliza rótulos nos dados. O algoritmo busca identificar padrões e estruturas ocultas com base na similaridade entre os elementos, agrupando-os em subconjuntos denominados *clusters*.

Nos métodos não supervisionados a associação das informações aos clusters é feita indiretamente, com base em cálculos de grau de similaridade, que variam conforme o algoritmo e os critérios de agregação utilizados (ALVES, 2012). Esses métodos podem ser subdivididos em duas categorias principais, segundo a forma como realizam o particionamento dos dados:

- ◆ **Métodos hierárquicos:** constroem uma estrutura de agrupamento em forma de árvore (dendrograma), sem a necessidade de definir previamente o número de grupos. Essa abordagem pode ser:
 - ◆ **Aglomerativos (*bottom-up*):** cada elemento começa em um grupo isolado, e os grupos são fundidos iterativamente com base nos critérios de similaridade.
 - ◆ **Divisivos (*top-down*):** inicia-se com um único grupo contendo todos os elementos, que é sucessivamente dividido até que se atinja uma estrutura hierárquica desejada.

- ◆ Métodos não hierárquico: realizam o particionamento direto dos dados em k grupos, definidos previamente. Utilizam, geralmente, métricas de distância para associar cada elemento do grupo mais próximo.

O uso de técnicas de classificação de dados na análise de sinais dinâmicos, tem como principal finalidade, agrupar os dados conforme os diferentes estados estruturais. Isso possibilita a identificação de condições específicas da estrutura monitorada, como variações operacionais ou a presença de danos.

Neste trabalho, serão utilizados dois métodos de classificação não supervisionada: o *Scott-Knott*, um método hierárquico divisivo baseado em análise de variância (ANOVA), e o *K-means*, um método de particionamento não hierárquico.

3.2.1 *Scott-Knott*

O método de agrupamento proposto por Scott e Knott (1974) é uma técnica hierárquica divisiva utilizada para identificar subconjuntos homogêneos dentro de um conjunto de médias provenientes de diferentes condições experimentais. Amplamente empregado nas áreas de ciências agrárias, engenharia e avaliação de desempenho de algoritmos, seu principal objetivo é particionar os dados em grupos internamente homogêneos e externamente distintos, com base em critérios estatísticos (BARBETTA et al., 2004).

A aplicação do método pressupõe, inicialmente, a realização de uma análise de variância (ANOVA), por meio da estatística F , a fim de verificar a existência de diferenças significativas entre as médias dos tratamentos. Quando se constata heterogeneidade significativa, os dados são divididos recursivamente em subconjuntos, de modo a maximizar a variância entre os grupos. Esse processo de particionamento é repetido de forma recursiva até que nenhuma divisão adicional seja estatisticamente significativa, assegurando, assim, a robustez da separação dos grupos.

O método de agrupamento *Scott-Knott* apresenta uma vantagem substancial em relação a outros procedimentos de comparação múltipla baseados na análise de variância (ANOVA), como o teste de *Tukey*, o teste t de *Student* ou o teste de *Dunnnett*. Enquanto esses métodos realizam comparações par a par entre médias, frequentemente resultando em sobreposição entre grupos, ou seja, uma mesma média pode pertencer a mais de um grupo estatisticamente indistinto, o *Scott-Knott* adota uma abordagem hierárquica divisiva que garante a alocação exclusiva de cada média a um único grupo.

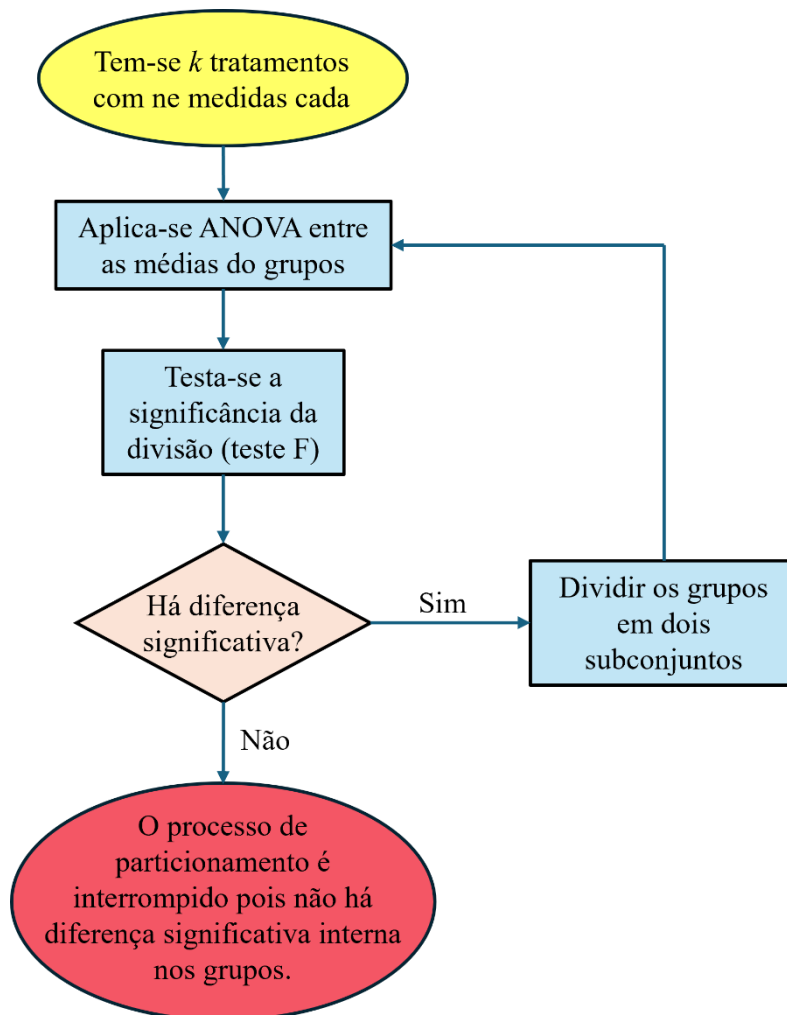
Essa característica decorre do critério de maximização da soma dos quadrados entre grupos, o qual orienta o processo de particionamento. Dessa forma, o método evita a ambiguidade típica de agrupamentos por sobreposição e fornece uma classificação mais clara e objetiva das médias em subconjuntos homogêneos.

Por se tratar de um método univariado, a comparação entre ensaios (repetições) e estados de dano (tratamentos) deve ser feita individualmente para cada parâmetro analisado, como a média das acelerações, ou o desvio padrão, entre outros.

Neste trabalho, o método *Scott-Knott* foi aplicado por meio do *software* gratuito SISVAR (FERREIRA, 2021), originalmente desenvolvido para análise estatística de dados experimentais na área agrícola, mas que atualmente incorpora uma ampla gama de técnicas estatísticas adequadas a diversos contextos experimentais.

A Figura 3.14 apresenta um fluxograma esquemático das principais etapas envolvidas na aplicação do método *Scott-Knott*.

Figura 3.14 – Fluxograma do método *Scott-Knott*.



3.2.1.1 ANOVA

ANOVA (*Analysis of Variance* ou Análise de Variância) é um método estatístico utilizado para comparar as médias de dois ou mais grupos e verificar se ao menos uma delas difere significativamente das demais. A técnica baseia-se na decomposição da variabilidade total dos dados em componentes associados aos fatores de interesse (tratamentos) e ao erro aleatório, permitindo testar a hipótese nula de que todas as médias populacionais são iguais (MONTGOMERY, 2020).

Define-se:

- ◆ Hipótese nula (H_0): todas as médias populacionais são iguais ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$).
- ◆ Hipótese alternativa (H_1): pelo menos uma média difere.

Matematicamente, a ANOVA avalia a razão da variabilidade entre os grupos (efeito do tratamento) e a variabilidade dentro dos grupos (erro experimental), expressa pela estatística F:

$$F_c = \frac{QM_{Trat}}{QM_{Erro}} \quad (3.46)$$

onde, QM representa o quadrado médio, obtido pela divisão da soma dos quadrados (SQ) pelos respectivos graus de liberdade (GL).

A Tabela 3.6 apresenta a estrutura clássica da ANOVA unifatorial, amplamente utilizada para testar diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos independentes com relação a uma única variável dependente.

Tabela 3.6 – Tabela de Análise de Variância (ANOVA).

Fonte de Variação (FV)	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrado Médio (QM)	Estatística F
Tratamento (entre grupos)	$GL_{Trat} = k - 1$ (V1)	$SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^k ne_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$QM_{Trat} = \frac{SQ_{Trat}}{GL_{Trat}}$	$F_c = \frac{QM_{Trat}}{QM_{Erro}}$
Erro (dentro dos grupos)	$GL_{Erro} = N - k$ (V2)	$SQ_{Erro} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2$	$QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}}$	

Total	$GL_{Tot} = N - 1$	$SQ_{Tot} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{ne_i} (x_{ij} - \bar{X})^2$		
-------	--------------------	--	--	--

Fonte: Autor.

Onde:

- ◆ k representa o número de grupos (estados de dano ou tratamentos);
- ◆ ne_i é o número de observações (ensaios) no grupo i ;
- ◆ \bar{X} é a média geral dos dados;
- ◆ \bar{X}_i é a média dos dados do grupo i ;
- ◆ x_{ij} é a j -ésima observação (parâmetro extraído do conjunto de acelerações de um ensaio) do grupo i ;
- ◆ $N = \sum_{i=1}^k ne_i$ é o número total de observações (ensaios).

A Figura 3.15 apresenta um exemplo da saída do *software* SISVAR, contendo a tabela de análise de variância (ANOVA) e a classificação dos tratamentos com base no método de agrupamento de *Scott-Knott*.

Figura 3.15 – Exemplo de saída do método *Scott-Knott* utilizando o SISVAR.

```

-----
Variável analisada: T_2_QUARTI
Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )
-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

-----
FV          GL          SQ          QM          Fc  Pr>Fc
-----
TRATAMENTO    5          0.249390    0.049878    110.388 0.0000
erro         258         0.116576    0.000452
-----
Total corrigido 263         0.365965
-----
CV (%) =      494.56
Média geral:  0.0042981   Número de observações: 264
-----

-----
Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRATAMENTO
-----

NMS: 0,05
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 44
Erro padrão: 0,00320455480246439
-----

Tratamentos          Médias          Resultados do teste
-----
4                    -0.045788 a1
7                    -0.008343 a2
6                    -0.006000 a2
3                    0.006306 a3
0                    0.026249 a4
5                    0.053365 a5
-----

```

Fonte: Autor.

No exemplo apresentado, a variável analisada foi a mediana das acelerações no domínio do tempo (T_2_QUARTI), sem transformação, para cada um dos ensaios.

Nota-se que a tabela de variância emitida pelo programa é similar à da Tabela 3.6, acrescida do coeficiente de variação (CV), dado por:

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{QM_{Erro}}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3.47)$$

A última coluna da tabela é a avaliação de significância feita por meio do valor-p, que será abordado mais adiante.

Já na parte referente ao teste de Scott-Knott, o NMS (Número Mínimo Significativo) corresponde ao limite mínimo necessário para considerar duas médias estatisticamente

distintas, adotando-se nível de significância de 5%. O valor de r corresponde à média harmônica do número de repetições por tratamento. O erro padrão associado às comparações é dado por:

$$\text{Erro padrão} = \sqrt{\frac{QM_{\text{Erro}}}{r}} \quad (3.48)$$

Os tratamentos são então ordenados de forma crescente conforme suas médias, sendo atribuídos a grupos (a_1, a_2, \dots) quando há diferença estatisticamente significativa entre eles.

3.2.1.2 Teste F

O teste F é um procedimento estatístico utilizado para comparar duas variâncias ou, mais comumente, para verificar se há diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos, por meio da razão entre variâncias. Ele é amplamente empregado na ANOVA, com sua razão expressa por uma estatística denominada F calculado (F_c), que segue a distribuição F de *Fisher-Snedecor*, com dois graus de liberdade: um associado ao numerador, entre os grupos (GL_{Trat}) e outro ao denominador, dentro dos grupos (GL_{Erro}).

- ◆ Se $F_c \approx 1$: as variações entre os grupos e dentro dos grupos são semelhantes → não há evidências para rejeitar H_0 .
- ◆ Se $F_c \gg 1$: a variância entre os grupos é significativamente maior → rejeita-se H_0 , indicando que pelo menos uma média é diferente.

A significância do resultado é avaliada por meio do valor-p (*p-value*), comparado ao nível de significância α , comumente fixado em 5%. O valor-p é dado por:

$$\text{valor-p} = P(F_{V1, V2} \geq F_c \mid H_0) \quad (3.49)$$

Ou seja, a probabilidade de obter um valor de F_c maior ou igual ao observado, assumindo que H_0 (todas as médias iguais) é verdadeira. Ele é uma medida central em testes estatísticos, como o teste F da ANOVA, e serve para decidir se rejeitamos ou não H_0 . Seu valor pode ser calculado por *softwares* estatísticos como o SISVAR, onde:

- ◆ Se o valor-p $< \alpha$: rejeita-se H_0 → existe diferença significativa entre as médias.
- ◆ Se o valor-p $\geq \alpha$: não se rejeita H_0 → as médias podem ser consideradas estatisticamente iguais.

Para melhor visualização, como exemplo prático, considere $F_c = 4,5$, $GL_{\text{Trat}}(V1) = 3$ e $GL_{\text{Trat}}(V2) = 20$. O valor-p correspondente é calculado como:

$$\text{valor-p} = P(F_{3,20} > 4,5) \approx 0,013 \rightarrow \text{Como } 0,013 < 0,05, \text{ rejeita-se } H_0. \quad (3.50)$$

Outra maneira menos usual é obter o valor de $F_{\text{crítico}}$ através de uma tabela de distribuição F (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Distribuição de Fisher-Snedecor – Valores de $F_{\text{crítico}}$ tais que $p(F \geq F_{\text{crítico}}) = 0,05$, com

$$F_{V1, V2}.$$

GL	V1																			
V2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	40	60	120	240
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	244.7	245.4	245.9	248.0	251.1	252.2	253.3	253.8
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.446	19.471	19.479	19.487	19.492
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.660	8.594	8.572	8.549	8.538
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.803	5.717	5.688	5.658	5.643
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.558	4.464	4.431	4.398	4.382
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.874	3.774	3.740	3.705	3.687
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.445	3.340	3.304	3.267	3.249
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.150	3.043	3.005	2.967	2.947
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.936	2.826	2.787	2.748	2.727
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.774	2.661	2.621	2.580	2.559
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.646	2.531	2.490	2.448	2.426
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.544	2.426	2.384	2.341	2.319
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.459	2.339	2.297	2.252	2.230
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.388	2.266	2.223	2.178	2.155
15	4.543	3.682	3.287	3.055	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.328	2.204	2.160	2.114	2.090
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.276	2.151	2.106	2.059	2.035
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.230	2.104	2.058	2.011	1.986
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.191	2.063	2.017	1.968	1.943
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.155	2.026	1.980	1.930	1.905
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.124	1.994	1.946	1.896	1.870
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.096	1.965	1.916	1.866	1.839
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.071	1.938	1.889	1.838	1.811
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.048	1.914	1.865	1.813	1.785
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.620	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.027	1.892	1.842	1.790	1.762
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.007	1.872	1.822	1.768	1.740
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	1.990	1.853	1.803	1.749	1.720
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	1.974	1.836	1.785	1.731	1.702
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	1.959	1.820	1.769	1.714	1.685
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	1.945	1.806	1.754	1.698	1.669
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.932	1.792	1.740	1.683	1.654
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.839	1.693	1.637	1.577	1.544
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.784	1.634	1.576	1.511	1.476
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.748	1.594	1.534	1.467	1.430
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.703	1.545	1.482	1.411	1.370
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.676	1.515	1.450	1.376	1.333
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910	1.869	1.834	1.803	1.775	1.750	1.659	1.495	1.429	1.352	1.307
240	3.881	3.033	2.642	2.409	2.252	2.136	2.048	1.977	1.919	1.870	1.829	1.793	1.761	1.733	1.708	1.614	1.445	1.375	1.290	1.237

Fonte: Adaptado de Fisher, 1925.

Onde, rejeita-se a hipótese nula se:

$$F_c > F_{\text{crítico}} \quad (3.51)$$

Caso contrário, mantém-se a hipótese nula, e os grupos são considerados estatisticamente semelhantes.

A estatística F não mede a intensidade da correlação, mas apenas indica se há evidência de diferenças significativas entre grupos. Já o nível de significância $\alpha = 0,05$ corresponde a uma probabilidade de 5% de cometer um erro tipo I (rejeitar H_0 quando ela é verdadeira), o que corresponde a 95% de confiança de que a diferença observada não ocorreu ao acaso.

Níveis menores, como 1% ($\alpha = 0,01$), reduzem a chance de falso positivo (erro tipo I), mas aumentam a chance de falso negativo (erro tipo II). Por outro lado, níveis mais altos, como 10%, aumentam a sensibilidade à detecção de efeitos sutis, mas reduzem a confiabilidade dos resultados. Conforme argumentam Motulsky (2013) e Field (2013), a escolha de α deve considerar o contexto da pesquisa e o equilíbrio entre ambos os erros.

Embora a *American Statistical Association* (WASSERSTEIN; LAZAR, 2016) alerte para o uso excessivamente rígido do valor $\alpha = 0,05$, esse patamar permanece amplamente adotado por razões históricas e práticas. Proposto por Fisher (1925), o nível de significância de 5% consolidou-se como um padrão, por oferecer um equilíbrio entre rigor e sensibilidade, além de facilitar a interpretação dos resultados, a comparação entre estudos e a replicabilidade científica.

3.2.1.3 Exemplo Numérico de Agrupamento com *Scott-Knott*

Por ser um método univariado, o Scott-Knott será utilizado para analisar individualmente os diversos parâmetros sugeridos, podendo analisar categorias individuais de distribuições de frequências dos dados, ou parâmetros estatísticos diversos. Desde que sejam comparados um tipo de variável por análise.

Considere os dados apresentados na Tabela 3.8, onde os quatro tratamentos (k), A, B, C e D, podem se referir a diferentes estados de dano, ou grupos de ensaios realizados em diferentes datas. As observações podem ser valores de curtose (ou outro parâmetro qualquer) dos registros de aceleração de cada um dos três ensaios (ne) realizados (E1, E2 e E3) para aquele grupo (tratamento).

Tabela 3.8 – Dados considerados no exemplo do agrupamento por *Scott-Knott*.

Tratamentos	Observações		
	E1	E2	E3
A	11	9	10
B	7	6	8
C	15	14	16
D	16	15	17

Fonte: Autor.

São realizadas então as seguintes etapas de cálculo e análise dos dados:

I. Cálculo das médias

a. Calcula-se a média dos valores por grupo:

$$\bar{X}_A = 10; \bar{X}_B = 7; \bar{X}_C = 15; \bar{X}_D = 16 \quad (3.52)$$

b. Calcula-se a média geral dos valores:

$$\bar{X}_{geral} = \frac{(11+9+10+7+6+8+15+14+16+16+15+17)}{12} = 12 \quad (3.53)$$

II. Cálculo da ANOVA

a. Calcula-se a Soma dos Quadrados Total ($SQ_{Tot} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{ne_i} (x_{ij} - \bar{X})^2$)

$$\blacklozenge \text{ Grupo A: } (11 - 12)^2 = 1 \quad (9 - 12)^2 = 9 \quad (10 - 12)^2 = 4 \quad \sum SQ_{Tot,A} = 14$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo B: } (7 - 12)^2 = 25 \quad (6 - 12)^2 = 36 \quad (8 - 12)^2 = 16 \quad \sum SQ_{Tot,B} = 77$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo C: } (15 - 12)^2 = 9 \quad (14 - 12)^2 = 4 \quad (16 - 12)^2 = 16 \quad \sum SQ_{Tot,C} = 29$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo D: } (16 - 12)^2 = 16 \quad (15 - 12)^2 = 9 \quad (17 - 12)^2 = 25 \quad \sum SQ_{Tot,D} = 50$$

$$SQ_{Tot} = 14 + 77 + 29 + 50 = 170 \quad (3.54)$$

b. Calcula-se a Soma dos Quadrados do Erro (dentro dos grupos) ($SQ_{Erro} =$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo A: } (11 - 10)^2 = 1 \quad (9 - 10)^2 = 1 \quad (10 - 10)^2 = 0 \quad \sum SQ_{Erro,A} = 2$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo B: } (7 - 7)^2 = 0 \quad (6 - 7)^2 = 1 \quad (8 - 7)^2 = 1 \quad \sum SQ_{Erro,B} = 2$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo C: } (15 - 15)^2 = 0 \quad (14 - 15)^2 = 1 \quad (16 - 15)^2 = 1 \quad \sum SQ_{Erro,C} = 2$$

$$\blacklozenge \text{ Grupo D: } (16 - 16)^2 = 0 \quad (15 - 16)^2 = 1 \quad (17 - 16)^2 = 1 \quad \sum SQ_{Erro,D} = 2$$

$$SQ_{Erro} = 2 + 2 + 2 + 2 = 8 \quad (3.55)$$

c. Calcula-se a Soma dos Quadrados entre os Tratamentos ($SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^k ne_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$)

Outra forma de se obter o resultado de SQ_{Trat} , pode ser expressa por:

$$SQ_{Trat} = SQ_{Tot} - SQ_{Erro} = 170 - 8 = 162 \quad (3.56)$$

d. Realiza-se o Teste F da ANOVA

Onde primeiro calculam-se os graus de liberdade:

$$GL_{Trat}(V1) = k - 1 = 4 - 1 = 3 \quad (3.57)$$

$$N = \sum_{i=1}^k ne_i = 4 \cdot 3 = 12 \quad (3.58)$$

$$GL_{Erro} = N - k = 12 - 4 = 8 \quad (3.59)$$

Em seguida, calculam-se os quadrados médios (QM):

$$QM_{Trat} = \frac{SQ_{Trat}}{GL_{Trat}} = \frac{162}{3} = 54 \quad (3.60)$$

$$QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}} = \frac{8}{8} = 1 \quad (3.61)$$

Determina-se o F calculado:

$$F_C = \frac{QM_{Trat}}{QM_{Erro}} = \frac{54}{1} = 54 \quad (3.62)$$

E, o F crítico através da Tabela 3.7:

$$F_{critico_{3,8}} = 4,066 \quad (3.63)$$

Como, $54 > 4,066 \rightarrow F_C > F_{critico}$, logo rejeita-se a hipótese H_0 , ou seja, existe diferença significativa entre as médias.

III. Scott-Knott

a. Ordena-se as médias:

B(7); A(10); C(15); D(16)

b. Realiza-se a primeira divisão: Tentar separar os 4 grupos em 2: (B,A)|(C,D)

Repete-se o processo de cálculo da ANOVA para a divisão:

- ◆ Número de grupos: $k = 2$
- ◆ Média do subgrupo 1: B,A $\rightarrow \bar{X}_{B,A} = \frac{\bar{X}_B + \bar{X}_A}{2} = \frac{7+10}{2} = 8,5$
- ◆ Média do subgrupo 2: C,D $\rightarrow \bar{X}_{C,D} = \frac{\bar{X}_C + \bar{X}_D}{2} = \frac{15+16}{2} = 15,5$
- ◆ Média geral: $\bar{X}_{geral} = 12$
- ◆ Número de observações por grupo: $ne_1 = ne_2 = 6$
- ◆ Soma dos quadrados entre grupos: $SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^k ne_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 = 6(8,5 - 12)^2 + 6(15,5 - 12)^2 = 147$
- ◆ Soma dos quadrados dentro dos grupos: $SQ_{Erro} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 = 2 + 2 + 2 + 2 = 8$
- ◆ Grau de liberdade entre grupos: $GL_{Trat}(V1) = k - 1 = 2 - 1 = 1$
- ◆ Grau de liberdade dentro dos grupos: $GL_{Erro}(V2) = N - k = 12 - 2 = 10$
- ◆ Quadrado médio entre grupos: $QM_{Trat} = \frac{SQ_{Trat}}{GL_{Trat}} = \frac{147}{1} = 147$

- ◆ Quadrado médio dentro dos grupos: $QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}} = \frac{8}{10} = 0,8$
- ◆ F calculado: $F_C = \frac{QM_{Trat}}{QM_{Erro}} = \frac{147}{0,8} = 183,75$
- ◆ F crítico: $F_{crítico_{1,10}} = 4,965$
- ◆ $183,75 > 4,965 \rightarrow F_C > F_{crítico} \rightarrow$ Divisão aceita

c. Subdividir B|A:

Repete-se o processo de cálculo da ANOVA para a nova divisão:

- ◆ Número de grupos: $k = 2$
- ◆ Média do subgrupo 1: $\bar{X}_B = 7$
- ◆ Média do subgrupo 2: $\bar{X}_A = 10$
- ◆ Média geral: $\bar{X}_{geral} = \frac{7+10}{2} = 8,5$
- ◆ Número de observações por grupo: $ne_1 = ne_2 = 3$
- ◆ Soma dos quadrados entre grupos: $SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^k ne_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 = 3(7 - 8,5)^2 + 3(10 - 8,5)^2 = 13,5$
- ◆ Soma dos quadrados dentro dos grupos: $SQ_{Erro} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 = 2 + 2 = 4$
- ◆ Grau de liberdade entre grupos: $GL_{Trat}(V1) = k - 1 = 2 - 1 = 1$
- ◆ Grau de liberdade dentro dos grupos: $GL_{Erro}(V2) = N - k = 6 - 2 = 4$
- ◆ Quadrado médio entre grupos: $QM_{Trat} = \frac{SQ_{Trat}}{GL_{Trat}} = \frac{13,5}{1} = 13,5$
- ◆ Quadrado médio dentro dos grupos: $QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}} = \frac{4}{4} = 1$
- ◆ F calculado: $F_C = \frac{QM_{Trat}}{QM_{Erro}} = \frac{13,5}{1} = 13,5$
- ◆ F crítico: $F_{crítico_{1,4}} = 7,709$
- ◆ $13,5 > 7,709 \rightarrow F_C > F_{crítico} \rightarrow$ Divisão aceita

d. Subdividir C|D:

Repete-se o processo de cálculo da ANOVA para a nova divisão:

- ◆ Número de grupos: $k = 2$
- ◆ Média do subgrupo 1: $\bar{X}_C = 15$
- ◆ Média do subgrupo 2: $\bar{X}_D = 16$

- ◆ Média geral: $\bar{X}_{geral} = \frac{15+16}{2} = 15,5$
- ◆ Número de observações por grupo: $ne_1 = ne_2 = 3$
- ◆ Soma dos quadrados entre grupos: $SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^k ne_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 = 3(15 - 15,5)^2 + 3(16 - 15,5)^2 = 1,5$
- ◆ Soma dos quadrados dentro dos grupos: $SQ_{Erro} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 = 2 + 2 = 4$
- ◆ Grau de liberdade entre grupos: $GL_{Trat}(V1) = k - 1 = 2 - 1 = 1$
- ◆ Grau de liberdade dentro dos grupos: $GL_{Erro}(V2) = N - k = 6 - 2 = 4$
- ◆ Quadrado médio entre grupos: $QM_{Trat} = \frac{SQ_{Trat}}{GL_{Trat}} = \frac{1,5}{1} = 1,5$
- ◆ Quadrado médio dentro dos grupos: $QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}} = \frac{4}{4} = 1$
- ◆ F calculado: $F_C = \frac{QM_{Trat}}{QM_{Erro}} = \frac{1,5}{1} = 1,5$
- ◆ F crítico: $F_{crítico_{1,4}} = 7,709$
- ◆ $1,5 < 7,709 \rightarrow F_C < F_{crítico} \rightarrow$ Diferença estatisticamente não significativa, não dividir.

e. Resultado do agrupamento:

Por fim, constata-se que os tratamentos podem ser divididos em três grupos: (A)|(B)|(C,D).

A Figura 3.16 apresenta os mesmos resultados da análise desse exemplo, obtidos através do SISVAR.

Figura 3.16 – Resultado do exemplo pelo SISVAR.

```

-----
Variável analisada: OBSERVACAO
Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )
-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

-----
FV                GL                SQ                QM                Ec    Pr>Ec
-----
TRATAMENTO        3                162.000000        54.000000        54.000  0.0000
erro              8                8.000000          1.000000
-----
Total corrigido   11                170.000000
-----
CV (%) =          8.33
Média geral:     12.0000000      Número de observações: 12
-----

-----
Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRATAMENTO
-----

NMS: 0,05
-----

Média harmônica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,577350269189626
-----

Tratamentos                Médias                Resultados do teste
-----
B                          7.000000 a1
A                          10.000000 a2
C                          15.000000 a3
D                          16.000000 a3
-----

```

Fonte: Autor.

3.2.2 *K-means*

O *K-means* é um método de particionamento não hierárquico amplamente utilizado na classificação de dados com base na similaridade entre elementos. Trata-se de uma técnica de aprendizado não supervisionado que divide um conjunto de dados em k grupos, buscando minimizar a variabilidade interna de cada grupo (MACQUEEN, 1967).

Diferente dos métodos hierárquicos, o número de *clusters* (k) deve ser fixo e previamente definido pelo usuário. O algoritmo opera de forma iterativa, sem impor uma estrutura hierárquica, utilizando como critério de agregação o conceito de centroide, que representa cada *cluster* e é calculado como a média dos objetos que compõem o grupo (FONTANA; NALDI, 2009). O objetivo do algoritmo é encontrar uma divisão de n objetos em k grupos ($C^i, i = 1, \dots, k$) minimizando a soma das distâncias entre cada objeto e o centroide do grupo ao qual pertence (PIMENTEL et al, 2003).

Segundo Fontana e Naldi (2009), o algoritmo *K-means* pode ser descrito pelas seguintes etapas:

- I. Definir o número k de agrupamentos (*clusters*).
- II. Inicializar k centroides segundo algum critério de inicialização.
- III. Atribuir cada objeto ao grupo cujo centroide possua maior similaridade.
- IV. Recalcular os centroides como a média dos objetos de cada grupo.
- V. Repetir os passos III e IV até que os centroides não se alterem significativamente.

3.2.2.1 Critérios de Inicialização de Centroides

A escolha inicial dos centroides influencia significativamente os resultados obtidos pelo *K-means*. Entre os critérios de inicialização mais comuns, destacam-se:

- ◆ **Amostrai:** seleciona k objetos da base de dados escolhidos aleatoriamente.
- ◆ **Uniforme:** gera k objetos aleatórios distribuídos uniformemente.
- ◆ **Clusters parciais:** gera k subgrupos utilizando 10% do banco de dados.
- ◆ **Aleatório:** atribui-se cada objeto aleatoriamente a um dos k clusters.

3.2.2.2 Medidas de Dissimilaridade

A similaridade entre os objetos é avaliada por funções de distância, cuja escolha é essencial para a formação dos *clusters* (ESPOSITO et al, 2000). A Tabela 3.9 apresenta as principais métricas discutidas por Alves (2012):

Tabela 3.9 – Métricas de similaridade.

MÉTRICA	EQUAÇÃO	COMENTÁRIOS
Minkowski	$gs(E_i, E_j) = \sqrt[p]{\sum_{k=1}^n E_{ik} - E_{jk} ^p}$	Forma geral da qual derivam diversas outras métricas.
Cityblock	$gs(E_i, E_j) = \sum_{k=1}^n E_{ik} - E_{jk} $	Minkowski com $p = 1$.
Euclidiana	$gs(E_i, E_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n E_{ik} - E_{jk} ^2}$	Minkowski com $p = 2$.
Chebychev	$gs(E_i, E_j) = \max_k \{ E_{ik} - E_{jk} \}$	Minkowski com $p = 1$ e $n \rightarrow \infty$.

Cosine	$gs(E_i, E_j) = \frac{\sum_{k=1}^n E_{ik} \times E_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (E_{ik})^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^n (E_{jk})^2}}$	Similaridade do cosseno.
Correlation	$gs(E_i, E_j) = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (E_{ik} - \bar{E}_i)(E_{jk} - \bar{E}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (E_{ik} - \bar{E}_i)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^n (E_{jk} - \bar{E}_j)^2}}$	Correlação de Pearson, não é uma métrica, mas é utilizada na análise de dados por possuir a distribuição normal.
Spearman	$gs(E_i, E_j) = \frac{\sum_{k=1}^n (E_{ik} - \bar{E}_i)(E_{jk} - \bar{E}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (E_{ik} - \bar{E}_i)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^n (E_{jk} - \bar{E}_j)^2}}$	Baseada no <i>rank</i> dos valores, é altamente utilizada como medida de correlação de dados não paramétricos.

Fonte: Autor.

Onde:

- ◆ gs é o grau de similaridade;
- ◆ E_i e E_j são dois ensaios hipotéticos;
- ◆ \bar{E}_i e \bar{E}_j são as médias dos ensaios hipotéticos;
- ◆ n é o número de parâmetros (valores extraídos das acelerações) contidos no grupo de informações analisadas por ensaio;
- ◆ p é o parâmetro de *Minkowski* que assume valores inteiros.

Essas distâncias são utilizadas para compor uma matriz de similaridade entre todos os pares de observações.

3.2.2.3 Exemplo Numérico de Agrupamento com *K-means*

Ao contrário do *Scott-Knott* (univariado), o algoritmo *k-means* (multivariado) permite uma análise simultânea de diversas variáveis. Sendo assim, neste método de agrupamento cada ensaio é classificado individualmente entre os *clusters* com número previamente determinado e, é representado por um objeto de dados simbólicos (SDO), composto por um conjunto de parâmetros estatísticos extraídos dos registros de aceleração, podendo estar nos domínios do tempo, da frequência ou em ambos.

Como exemplo, pode-se considerar os ensaios dinâmicos representados por suas distribuições de frequência em intervalos, conforme a Equação (3.3). Cada ensaio é descrito por quatro valores que indicam a proporção de acelerações que se enquadram em cada um dos quatro intervalos de mesma largura. Outra abordagem adotada nesta pesquisa representa os dados com base em medidas estatísticas descritivas, conforme discutido na Seção 3.1.2.

A fim de manter a comparabilidade entre as abordagens, serão utilizados os mesmos quatro valores de percentuais de incidência por intervalo exemplificados anteriormente, porém agora, interpretados como a média e o desvio padrão das acelerações, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência (FFT), para cada ensaio, conforme apresentado na Equação 3.48.

$$E_1 = \{0,20; 0,25; 0,25; 0,30\}$$

$$E_2 = \{0,05; 0,30; 0,40; 0,25\} \quad (3.64)$$

$$E_3 = \{0,10; 0,15; 0,60; 0,15\}$$

$$E_4 = \{0,15; 0,50; 0,05; 0,30\}$$

Suponha que os quatro ensaios foram realizados em duas datas distintas. O objetivo é verificar se o algoritmo *k-means*, com $k = 2$, é capaz de agrupá-los corretamente por data de realização, o que poderia indicar alterações estruturais entre os períodos.

Inicialmente, os ensaios são distribuídos aleatoriamente entre os dois grupos (inicialização aleatória). Suponha que os ensaios 1, 3 e 4 sejam atribuídos ao grupo A e o ensaio 2 ao grupo B. Os centroides iniciais (média dos valores do grupo) são:

$$CA_{1,3,4} = \{0,15; 0,30; 0,30; 0,25\} \quad (3.65)$$

$$CB_2 = \{0,05; 0,30; 0,40; 0,25\}$$

Veja que o centroide do grupo B são os próprios valores do ensaio 2 por ser este o único elemento do grupo. Calcula-se, então, o grau de similaridade entre cada ensaio e os centroides de cada grupo, conforme exemplo na Equação (3.50), utilizando a métrica *cityblock* para determinar o grau de similaridade entre o primeiro ensaio e o *cluster* A na primeira iteração.

$$gs(E_1, CA_{1,3,4}) = |0,20 - 0,15| + |0,25 - 0,30| + |0,25 - 0,30| + |0,30 - 0,25| = 0,20 \quad (3.66)$$

O processo é repetido para cada ensaio e grupo, formando uma matriz de similaridade entre os ensaios e os centroides, apresentada na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Matriz de similaridade da primeira iteração do exemplo do *k-means*.

Grau de Similaridade (gs) - 1ª iteração		
Ensaio/cluster	CA	CB
E1	0,20	0,40
E2	0,20	0

E3	0,60	0,50
E4	0,50	0,70

Fonte: Autor.

Os ensaios são realocados grupo com menor dissimilaridade. Sendo a segunda iteração composta pelos ensaios 1 e 4, atribuídos ao *cluster A* e, os ensaios 2 e 3 ao B. Novos centroides são então calculados:

$$CA_{1,4} = \{0,18; 0,38; 0,15; 0,30\} \quad (3.67)$$

$$CB_{2,3} = \{0,08; 0,23; 0,50; 0,20\}$$

A matriz de similaridade da segunda iteração é apresentada na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Matriz de similaridade da segunda iteração do exemplo do *k-means*.

Grau de Similaridade (gs) - 2ª iteração		
Ensaio/cluster	CA	CB
E1	0,25	0,50
E2	0,50	0,25
E3	0,90	0,25
E4	0,25	0,90

Fonte: Autor.

Como não houve mudanças na alocação dos ensaios entre os grupos, o algoritmo é considerado convergente e as iterações são encerradas. O resultado obtido indica que os ensaios E1 e E4 são distintos de E2 e E3. Caso essa divisão corresponda às datas de realização dos ensaios, pode-se inferir a existência de anomalias entre os períodos avaliados, sendo recomendável aprofundar as análises para investigar possíveis danos ou alterações significativas na estrutura.

4 ESTRUTURAS ANALISADAS

Nesta tese, foram analisados dados referentes a cinco estruturas distintas. Dentre elas, três correspondem a estruturas com dados experimentais obtidos por meio de ensaios realizados em laboratório: o modelo *Shear Building* de 10 pavimentos, a *Pá Eólica* e a *Viga Biapoiada*. Destaca-se que dois desses ensaios (*Shear Building* e *Pá Eólica*) foram conduzidos pela própria autora. A quarta estrutura refere-se a um modelo numérico do Benchmark da IASC-ASCE de um pórtico tridimensional de 4 andares, cujos dados foram gerados por um algoritmo previamente disponibilizado. Por fim, foram utilizados dados experimentais provenientes da Ponte Ferroviária KW51.

A escolha por um número elevado e diversificado de estruturas teve como objetivo ampliar a variabilidade em termos de tipologias estruturais, métodos de excitação e níveis de dano considerados. Essa diversidade visa enriquecer a base de dados utilizada nas análises e oferecer maior robustez à validação dos métodos propostos.

Os ensaios conduzidos pela autora buscaram, além de ampliar o volume e a diversidade dos dados, garantir maior controle sobre as condições de teste e sobre as informações envolvidas. Esse controle possibilitou a definição de diferentes estados estruturais, permitindo explorar de forma mais precisa os limites de aplicação do método proposto.

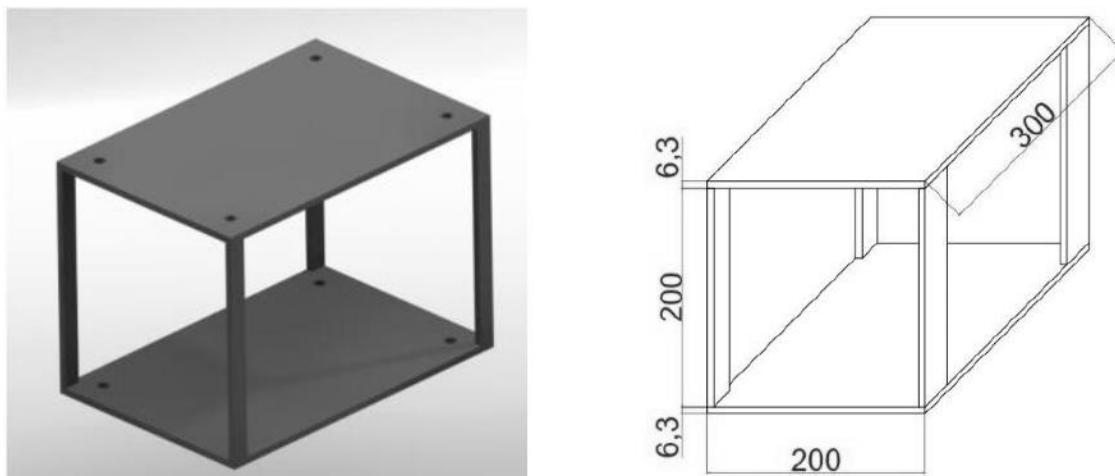
Na sequência, apresentam-se as principais características de cada uma das estruturas analisadas, assim como os dados utilizados e as metodologias adotadas tanto nos ensaios quanto na obtenção das informações empregadas nas análises. Também são apresentadas as três primeiras frequências naturais de cada estrutura, para cada estado estrutural (decorrente de dano, reparo ou adição de massa), obtidas a partir da análise dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT).

4.1 SHEAR BUILDING

Os ensaios experimentais em um modelo do tipo *Shear Building*, composto por dez pavimentos, foram conduzidos pela autora deste trabalho, no Laboratório de Vibração do Grupo de Dinâmica de Vibração do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB-FT/EnM/GDS/LV), Campus Darcy Ribeiro, Brasília, Brasil.

O modelo experimental foi desenvolvido por Bernardes Jr. (2018) com o objetivo de simular, em escala reduzida, o comportamento dinâmico de um edifício alto. A estrutura é composta pela união de dez módulos idênticos, conforme ilustrado na Figura 4.1, todos construídos em chapas de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm. Cada módulo é formado pela conexão, por solda, de duas placas de 200 x 300 mm, interligadas por quatro colunas de 20 x 200 mm. O material empregado apresenta módulo de elasticidade de 205 GPa, módulo de elasticidade transversal de 77,52 GPa, massa específica de 7870 kg/m³ e coeficiente de Poisson igual a 0,29.

Figura 4.1 – Módulo em aço e suas dimensões.



Fonte: Bernardes Jr., 2018.

Os módulos são interligados por meio de parafusos posicionados em furos localizados próximos às quatro extremidades de cada módulo. Durante a montagem, foram utilizadas duas arruelas em cada parafuso, nos pontos de contato com a estrutura, visando uma melhor distribuição dos esforços. A estrutura montada, apresentada na Figura 4.2, possui altura total aproximada de 2,12 m e massa aproximada de 67 kg.

Figura 4.2 – *Shear Building* com dez pavimentos.

Fonte: Autor.

A fixação da estrutura modular à placa de base foi realizada por meio de quatro parafusos de classe 8.8, com diâmetro de $\frac{1}{2}$ ". A placa de base foi projetada com roscas internas, eliminando a necessidade de porcas na extremidade oposta dos parafusos ou do uso de ancoragem química. Por sua vez, a fixação da placa de base à laje de reação foi feita por meio de oito chumbadores mecânicos com diâmetro de $\frac{5}{8}$ ", conforme ilustra a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Ancoragem do modelo à laje de reação.



Fonte: Autor.

Informações adicionais sobre esse modelo de *Shear Building* podem ser encontradas em Bernardes Jr. (2018), Pippi (2018) e Tavares (2024).

4.1.1 Ensaio Dinâmico

Os ensaios dinâmicos de vibração livre do *Shear Building* de 10 pavimentos foram conduzidos em duas etapas. Na primeira, realizaram-se apenas ensaios com excitação por impacto, cujos dados foram previamente analisados com o intuito de ver a viabilidade do método. Meses depois, foram realizados ensaios adicionais com o uso de um *shaker* como excitador. Entretanto, devido às limitações que serão detalhadas adiante, na segunda etapa o *shaker* precisou ser posicionado diretamente sobre a estrutura, o que modificou sua massa e seu amortecimento. Considerando que tais alterações, do ponto de vista dinâmico, caracterizam uma nova estrutura, os ensaios de impacto foram repetidos, desta vez com o *shaker* instalado, a fim de possibilitar a comparação dos resultados.

Para fins de simplificação, ao longo desta tese o *Shear Building* sem o *shaker* será referido como **Fase I**, enquanto o *Shear Building* com o *shaker* será denominado **Fase II**. A seguir, são apresentadas as informações relativas aos ensaios em cada uma das fases.

Para a aquisição dos dados vibracionais, utilizou-se o sistema modular de aquisição (DAQ) SIRIUS Modular da Dewesoft (DEWESoft, 2024), com seis canais de aquisição (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Sistema modular de aquisição SIRIUS Modular (Dewesoft).



Fonte: Autor.

Cada ensaio teve duração de 230 s e frequência de amostragem de 1000 Hz, totalizando 230.000 leituras para cada registro de aceleração.

4.1.1.1 Fase I

A primeira fase dos ensaios foi realizada nos dias 9 e 10 de janeiro de 2025, por meio de vibração livre, com excitação por impacto de martelo, variando-se a quantidade de massas, suas posições e o tempo entre impactos, conforme descrito no Apêndice A e detalhado na Tabela A.1.

Para a excitação da estrutura, foi utilizado o martelo de impacto da PCB Piezotronics, modelo 086C03 (Figura 4.5), com célula de carga na ponta e conectado ao canal 1 do sistema DAQ.

Figura 4.5 – Martelo de impacto.



Fonte: Autor.

A aquisição das respostas foi realizada com dois acelerômetros da PCB Piezotronics, modelo 352C33, posicionados no topo da estrutura (10º andar), nos eixos X e Y, conforme a Figura 4.7. A Tabela 4.1 apresenta os dados dos dispositivos de excitação e medição utilizados, bem como seus respectivos posicionamentos e conexões na DAQ (Figura 4.8). Outras informações acerca dos dispositivos utilizados podem ser encontradas em PCB Piezotronics (2025).

Figura 4.6 – Locação dos acelerômetros na fase 1.



Fonte: Autor.

Figura 4.7 – Identificação das entradas utilizadas no sistema modular de aquisição.



Fonte: Autor.

Tabela 4.1 – Dados dos dispositivos de excitação e medição usados na fase I do *Shear Building*.

Fabricante: PCB Piezotronics					
Modelo	ID	Número Serial	Sensibilidade	Local	Canal DAQ
086C03	Martelo	-	2,25 mV/N	-	1
352C33	Acelerômetro X 2	LW298203	10,28mV/m/s ²	10 ^o andar em X	2
	Acelerômetro Y 3	128108	10,25mV/m/s ²	10 ^o andar em Y	3

Fonte: Autor.

O martelo foi impactado no topo da estrutura, no pilar extremo oposto aos acelerômetros, na direção do eixo X, conforme ilustra a Figura 4.8.

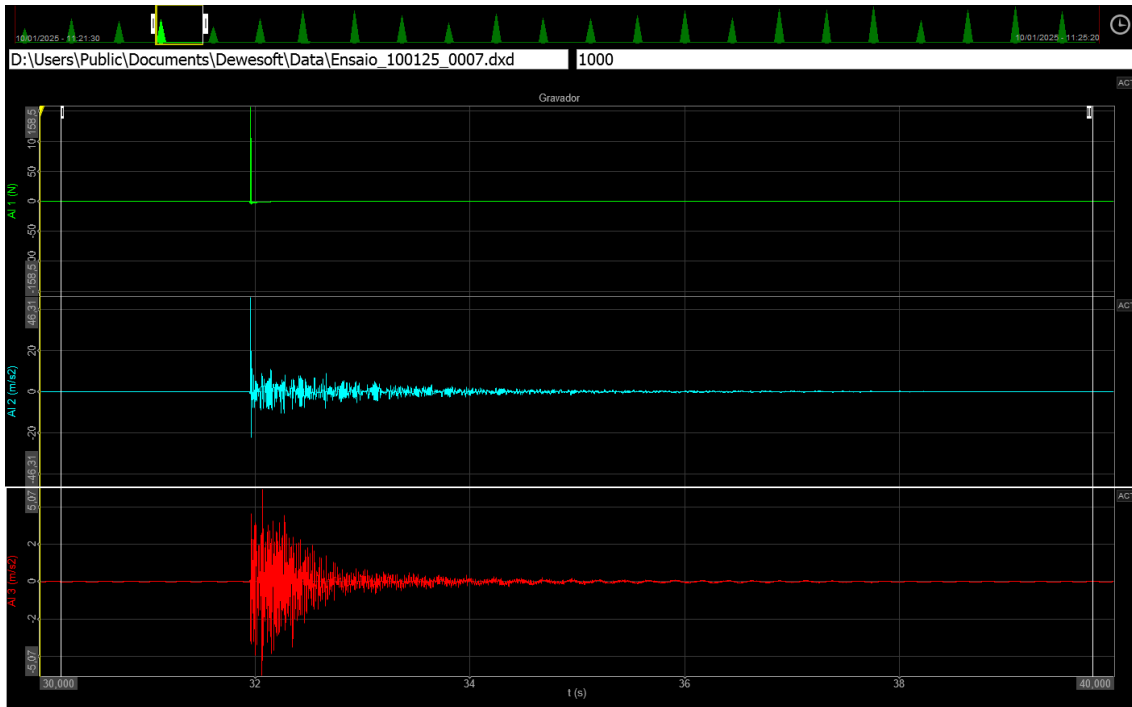
Figura 4.8 – Ponto de excitação do martelo de impacto.



Fonte: Autor.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam exemplos dos sinais registrados no domínio do tempo e do arquivo de dados contendo as forças de impacto (N) e as acelerações (m/s²), respectivamente.

Figura 4.9 – Exemplo dos registros de excitação por impacto dos três canais da DAQ em função do tempo.



Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Interface do arquivo de dados com excitação por impacto.

Ensaio_100125_0007.xlsx				
	A	B	C	D
Ensaio1001250007S2				
	Time	AI1	AI2	AI3
	Number	Number	Number	Number
1	Time	AI 1	AI 2	AI 3
2	s	N	m/s2	m/s2
3	0	-0.0074	0.0051	-0.0021
4	1.0000e-03	-0.0076	0.0052	-0.0027
5	0.0020	-0.0098	0.0067	-0.0029
6	0.0030	-0.0102	0.0064	-0.0023
7	0.0040	-0.0103	0.0059	-0.0020
8	0.0050	-0.0112	0.0068	-0.0027
9	0.0060	-0.0095	0.0059	-0.0032
10	0.0070	-0.0103	0.0067	-0.0030

Fonte: Autor.

Por se tratar de uma estrutura compartilhada com outros projetos de pesquisa, não foi possível induzir danos físicos permanentes na estrutura. Para simular diferentes estados

estruturais, foram adicionadas (simplesmente apoiadas) massas na estrutura, inicialmente no topo (10º pavimento), com os seguintes valores e percentuais em relação à massa da estrutura: 0,468 kg (0,7%), 0,998 kg (1,5%), 2,002 kg (3%), 4,992 kg (7,5%) e 5,99 kg (8,9%), sendo que esta última corresponde à combinação da massa de 5 kg com a de 1 kg. Imagens das massas adicionadas estão disponíveis no Apêndice E.

Os impactos foram realizados com intervalos de 10 ou 20 segundos. Arquivos com impactos a cada 20 segundos foram segmentados em 11 arquivos de 15 segundos (um impacto por arquivo), enquanto os de 10 segundos foram divididos em 22 arquivos de 8 segundos.

A Tabela 4.2 apresenta os arquivos adquiridos, com informações sobre a data do ensaio, nome do arquivo, tempo entre impactos, massa adicionada, localização da massa e descrição do objetivo da análise.

Tabela 4.2 – Identificação dos arquivos dados do ensaio da fase I do *Shear Building*.

DATA	NOME DO ARQUIVO	TEMPO ENTRE IMPACTOS	MASSA ADIC. ≈	LOCAL DA MASSA	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE
10/01/2025	Ensaio_100125_0000.xlsx	20 s	0 kg	-	Alterando a quantidade de massa em um mesmo ponto (10º andar) com impactos a cada 20s.
	Ensaio_100125_0002.xlsx		6 kg	10º andar	
	Ensaio_100125_0003.xlsx		5 kg		
	Ensaio_100125_0004.xlsx		2 kg		
	Ensaio_100125_0005.xlsx		1 kg		
	Ensaio_100125_0006.xlsx		0,5 kg		
	Ensaio_100125_0007.xlsx	10 s	0 kg	-	Alterando a quantidade de massa em um mesmo ponto (10º andar) com impactos a cada 10s.
	Ensaio_100125_0008.xlsx		6 kg	10º andar	
	Ensaio_100125_0009.xlsx		5 kg		
	Ensaio_100125_0010.xlsx		2 kg		
	Ensaio_100125_0011.xlsx		1 kg		
	Ensaio_100125_0012.xlsx		0,5 kg		
	Ensaio_100125_0014.xlsx	20 s	5 kg	8º andar	Alterando o local da massa de 5 kg com impactos a cada 20s.
	Ensaio_100125_0015.xlsx		5 kg	6º andar	
	Ensaio_100125_0016.xlsx		5 kg	4º andar	
	Ensaio_100125_0017.xlsx		5 kg	2º andar	

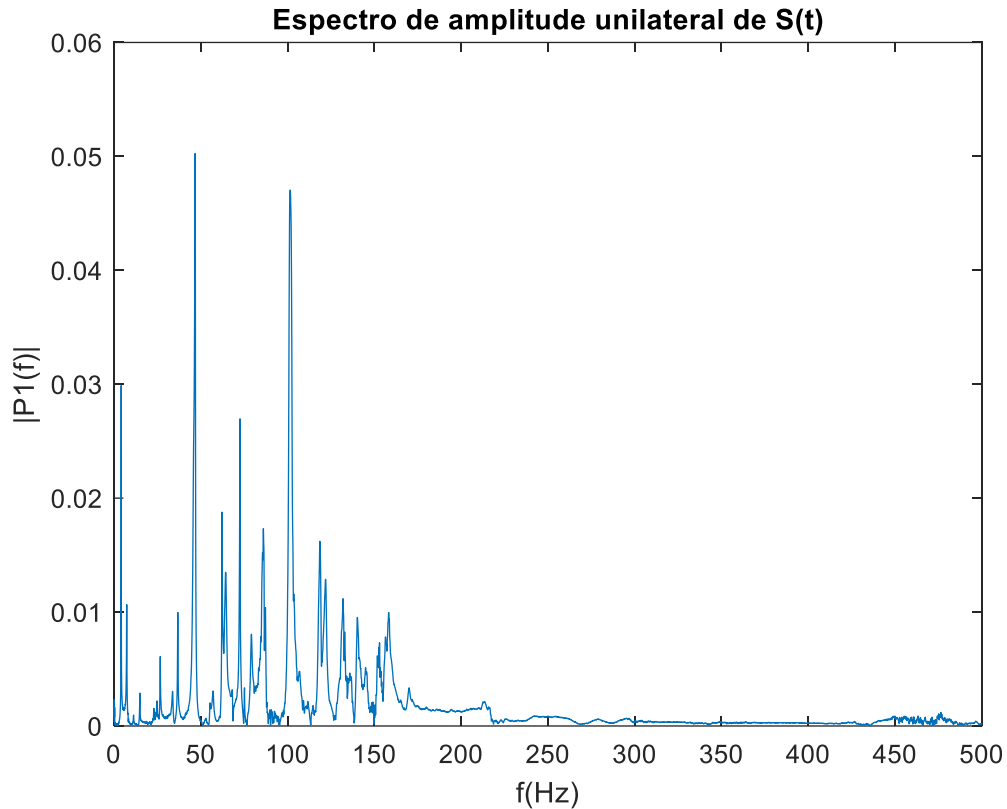
Fonte: Autor.

A Figura 4.11 ilustra a organização da estrutura de aquisição dos dados utilizada para os ensaios da fase I do *Shear Building*.

Figura 4.11 – Estrutura de aquisição de dados usada na fase I dos ensaios do *Shear Building*.

Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 4.12 apresenta o espectro da frequência da estrutura intacta e Tabela 4.3 as três primeiras frequências identificadas através dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT) para cada um dos estados estruturais.

Figura 4.12 – Espectro da Frequência do *Shear Building* – Fase I.

Fonte: Autor.

Tabela 4.3 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural do *Shear Building* – Fase I.

Frequências Naturais (Hz) – <i>Shear Building</i> - Fase I			
Massa add. / Freq.	1ª Frequência	2ª Frequência	3ª Frequência
Intacta (0kg)	4,13	7,33	11,33
0,5 kg no 10º andar	4,07	7,2	11,27
1 kg no 10º andar	4,07	7,2	11,2
2 kg no 10º andar	4,0	7,07	11,13
5 kg no 10º andar	3,73	6,67	11,0
6 kg no 10º andar	3,67	6,6	10,93
5 kg no 8º andar	3,87	6,73	11
5 kg no 6º andar	3,93	6,93	10,93
5 kg no 4º andar	4,07	7,07	11,07
5 kg no 2º andar	4,07	7,2	11,13

Fonte: Autor.

4.1.1.2 Fase II

A segunda fase dos ensaios foi realizada no dia 19 de março de 2025, a partir de uma análise preliminar dos dados obtidos na fase anterior. Algumas observações relevantes nortearam os ajustes nesta etapa:

- ◆ Verificou-se que o tempo entre impactos de 20 segundos não trouxe vantagens significativas em relação ao tempo de 10 segundos, visto que este já era suficiente para a estrutura retornar à sua posição de repouso, evitando registros excessivos de valores próximos de zero, os quais podem interferir no desempenho de alguns indicadores.
- ◆ O menor tempo entre impactos permitiu ainda, a obtenção de um maior número de amostras, o que se mostrou benéfico para a eficácia dos indicadores.
- ◆ A análise da variação da posição da massa não apresentou resultados de alta significância na fase anterior, não sendo repetidas essas análises.
- ◆ Foi identificado que o intervalo entre as massas de 2 kg e 5 kg era grande em relação as demais, o que poderia ter impactado na sensibilidade dos indicadores. Por isso, introduziu-se uma massa intermediária (3 kg).
- ◆ Os resultados para massas menores foram altamente promissores, sugerindo um aprofundamento nessa faixa em busca do limite de detecção dos métodos propostos (130 e 220 g).
- ◆ Surgiu a hipótese de que o posicionamento dos acelerômetros nos eixos X e Y da estrutura, poderia ter limitado a detecção de efeitos torcionais, levando a mudança na locação dos sensores para a extremidade esquerda mais próxima (Figura 4.13).
- ◆ Foram observados ruídos durante os ensaios, possivelmente decorrentes do afrouxamento dos parafusos de conexão dos módulos. Para resolver, todos os parafusos foram reapertados com torque entre 20 e 30 kgfm, o que eliminou os ruídos.

Figura 4.13 – Posicionamento dos acelerômetros em x e y na fase II dos ensaios.



Fonte: Autor.

Além desses ajustes, variou-se também o tipo de excitação da estrutura. Foram realizados ensaios tanto com impacto de martelo quanto com excitação por *shaker*.

Inicialmente, idealizava-se utilizar um *shaker* maior, conforme aplicado por Tavares (2024) (Figura 4.14), mas o equipamento estava inoperante.

Figura 4.14 – *Shaker* utilizado por Tavares (2024).

Fonte: Adaptado de Tavares, 2024.

Um *shaker* menor disponível foi testado para excitação externa (Figura 4.15), porém, devido à sua baixa massa inercial, o equipamento se movia juntamente com a estrutura, não gerando a excitação desejada. Tentativas de aumentar a massa do *shaker* ou fixá-lo a outros suportes, com os materiais disponíveis em laboratório, também foram infrutíferas.

Figura 4.15 – Tentativa de fixação do *Shaker* externamente a estrutura.



Fonte: Autor.

Diante dessas limitações, a solução adotada foi apoiar o *shaker* sobre o 10º pavimento da estrutura e fixá-lo com dois sargentos, de modo a incorporar sua massa ao sistema e promover a excitação transmitida pela sua base. Dessa forma, para manter a coerência dos dados, o *shaker* foi mantido no topo e as massas adicionais foram posicionadas no 9º pavimento para ambas as excitações (Figura 4.16).

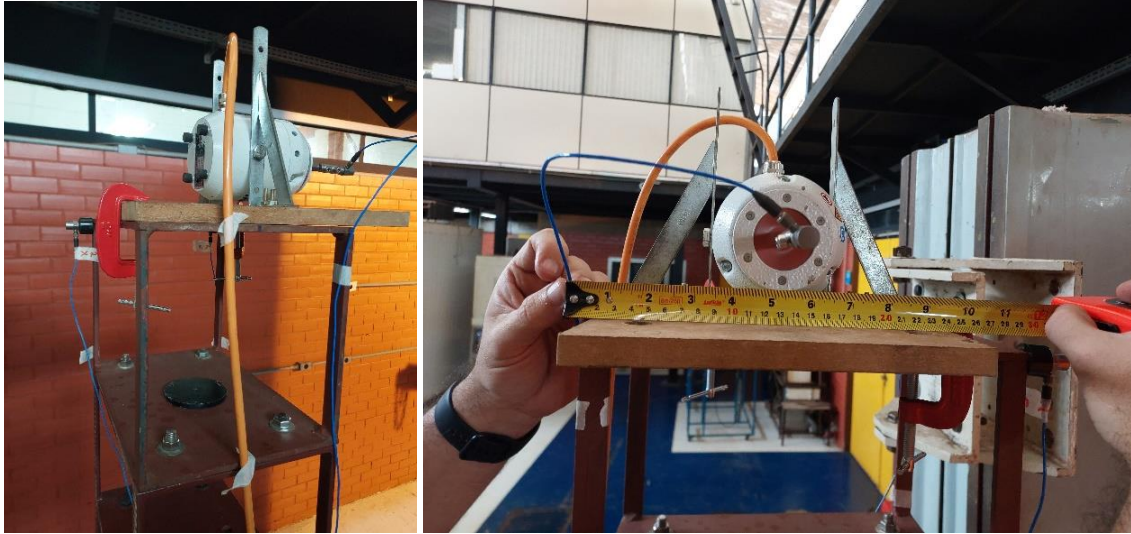
Figura 4.16 – Fixação do *Shaker* (45º) no topo da estrutura, com massa adicionada no 9º andar.



Fonte: Autor.

Foram testadas duas configurações para o *shaker*: uma com excitação a 45° (Figura 4.16) e outra na direção X, com excentricidade de aproximadamente 2 cm em relação ao eixo (Figura 4.17).

Figura 4.17 – *Shaker* em x com excentricidade aproximada de 2 cm.



Fonte: Autor.

O conjunto *shaker* mais sargentos apresentou massa total de 4,598 kg. Na ponta do *shaker* foi instalado um acelerômetro conectado ao canal 1 da DAQ, que registrou a aceleração de entrada (Figura 4.18).

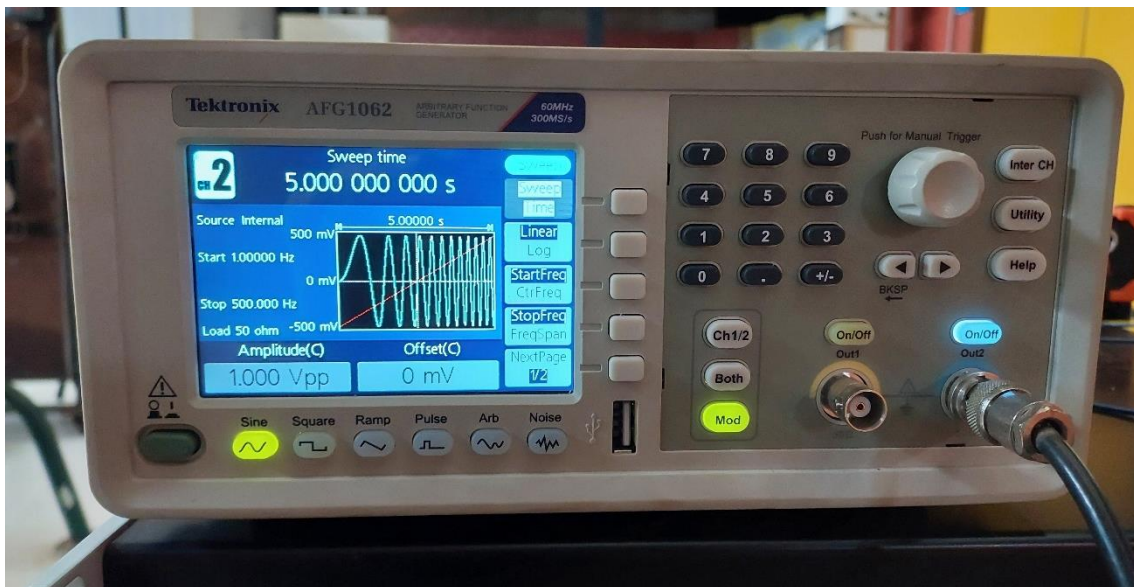
Figura 4.18 – Shaker posicionado no topo da estrutura com acelerômetro conectado.



Fonte: Autor.

A excitação foi gerada por um gerador de função arbitrária da Tektronix, modelo AFG1062 (Figura 4.19), configurado para emitir um sinal senoidal com varredura linear de frequência (CHIRP), com variação de 1 Hz a 500 Hz em 5 segundos. O sinal foi amplificado por um amplificador TIRA (Figura 4.20).

Figura 4.19 – Gerador de função arbitrária.



Fonte: Autor.

Figura 4.20 – Amplificador de sinal.



Fonte: Autor.

A Tabela 4.4 apresenta os dados dos dispositivos utilizados nessa fase, para excitação por *shaker*.

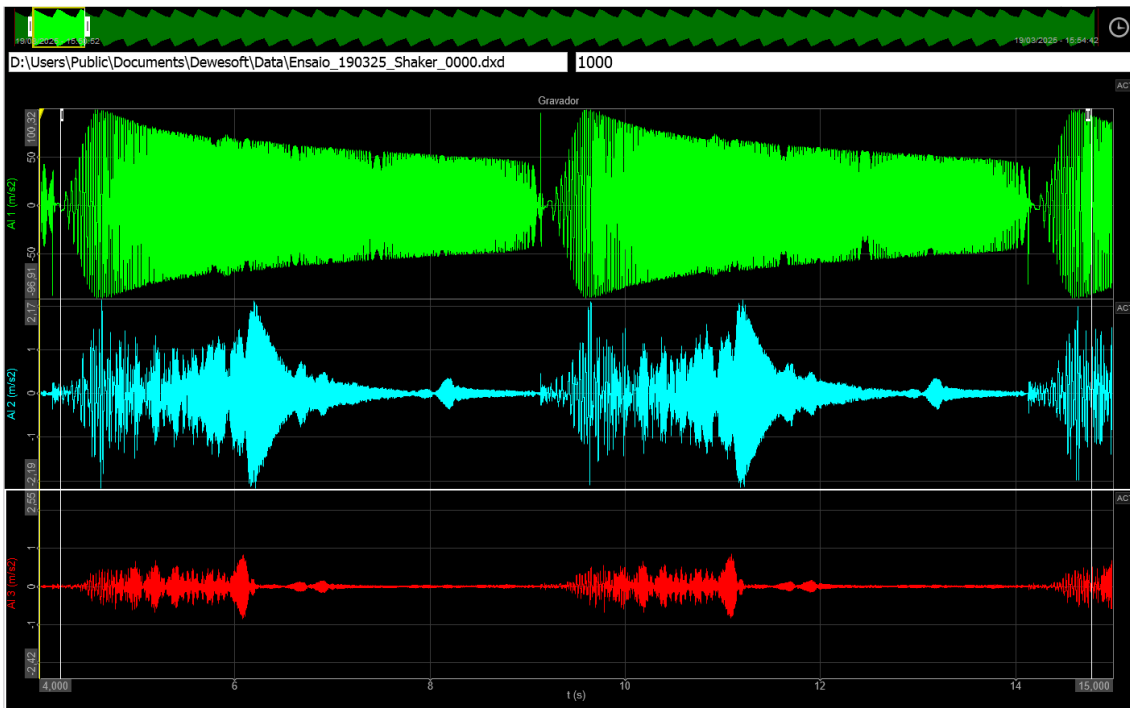
Tabela 4.4 – Dados dos dispositivos de medição usados na fase II do *Shear Building*, excitado através do *shaker*.

Fabricante: PCB Piezotronics					
Modelo	ID	Número Serial	Sensibilidade	Local	Canal DAQ
352C33	Acelerômetro <i>shaker</i>	LW306900	10,33mV/m/s ²	shaker	1
	Acelerômetro X 2	LW298203	10,28mV/m/s ²	10 ^o andar em X	2
	Acelerômetro Y 3	128108	10,25mV/m/s ²	10 ^o andar em Y	3

Fonte: Autor.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam exemplos dos sinais registrados no domínio do tempo e do arquivo de dados contendo a aceleração de entrada (AI1) e as acelerações de saída da estrutura (AI2 e AI3) em m/s², nas direções de X e Y, respectivamente.

Figura 4.21 – Exemplo dos registros de excitação pelo *shaker* dos três canais da DAQ em função do tempo. Aceleração de entrada, de saída em X e em Y, respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 4.22 – Interface do arquivo de dados com excitação pelo *shaker*.

Ensaio_190325_Shaker_0000.xlsx				
	A	B	C	D
Ensaio190325Shaker0000S2				
	Time	AI1	AI2	AI3
	Number	Number	Number	Number
1	Time	AI 1	AI 2	AI 3
2	s	m/s ²	m/s ²	m/s ²
3	0	-49.6145	-0.7199	-0.4001
4	1.0000e-03	-78.2273	-1.0350	-0.5199
5	0.0020	-83.9354	-1.1984	-0.4802
6	0.0030	-64.7900	-0.9235	-0.3023

Fonte: Autor.

As massas adicionadas variaram entre 130,74 g (0,18%), 220,12 g (0,3%), 0,468 kg (0,65%), 0,998 kg (1,4%), 2,002 kg (2,8%), 3 kg (4,2%), 4,992 kg (6,9%) e 5,99 kg (8,3%), com percentual em relação a massa total da estrutura somada à massa do *shaker* (cerca de 72 kg). As menores massas foram introduzidas nesta fase para explorar os limites de sensibilidade dos indicadores. A massa intermediária adicionada, corresponde à combinação da massa de 2 kg com a de 1 kg.

As Tabelas 4.5 e 4.6 descrevem, respectivamente, os arquivos de dados obtidos, nos ensaios com excitação por impacto e por *shaker*. Na fase II, para ambos os tipos de

excitação, as massas foram posicionadas (simplesmente apoiadas) no 9º pavimento, o *shaker* foi instalado no 10º pavimento e os acelerômetros de resposta foram alocados nas extremidades da estrutura. Nos ensaios com excitação por impacto, foi adotado um intervalo de 10 segundos entre cada impacto.

Tabela 4.5 – Identificação dos dados do ensaio de impacto da fase II do *Shear Building*.

DATA	NOME DO ARQUIVO	MASSA ADIC. ≈	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE
19/03/2025	Ensaio_190325_Martelo_0000.xlsx	0 g	Alterando a quantidade de massa em um mesmo ponto (9º andar), com impactos a cada 10s.
	Ensaio_190325_Martelo_0001.xlsx	0 g	
	Ensaio_190325_Martelo_0002.xlsx	130g	
	Ensaio_190325_Martelo_0003.xlsx	130g	
	Ensaio_190325_Martelo_0004.xlsx	220g	
	Ensaio_190325_Martelo_0005.xlsx	220g	
	Ensaio_190325_Martelo_0006.xlsx	500g	
	Ensaio_190325_Martelo_0007.xlsx	500g	
	Ensaio_190325_Martelo_0008.xlsx	1 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0009.xlsx	1 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0010.xlsx	2 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0011.xlsx	2 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0012.xlsx	3 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0013.xlsx	3 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0014.xlsx	5 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0015.xlsx	5 kg	
	Ensaio_190325_Martelo_0016.xlsx	6 kg	
Ensaio_190325_Martelo_0017.xlsx	6 kg		

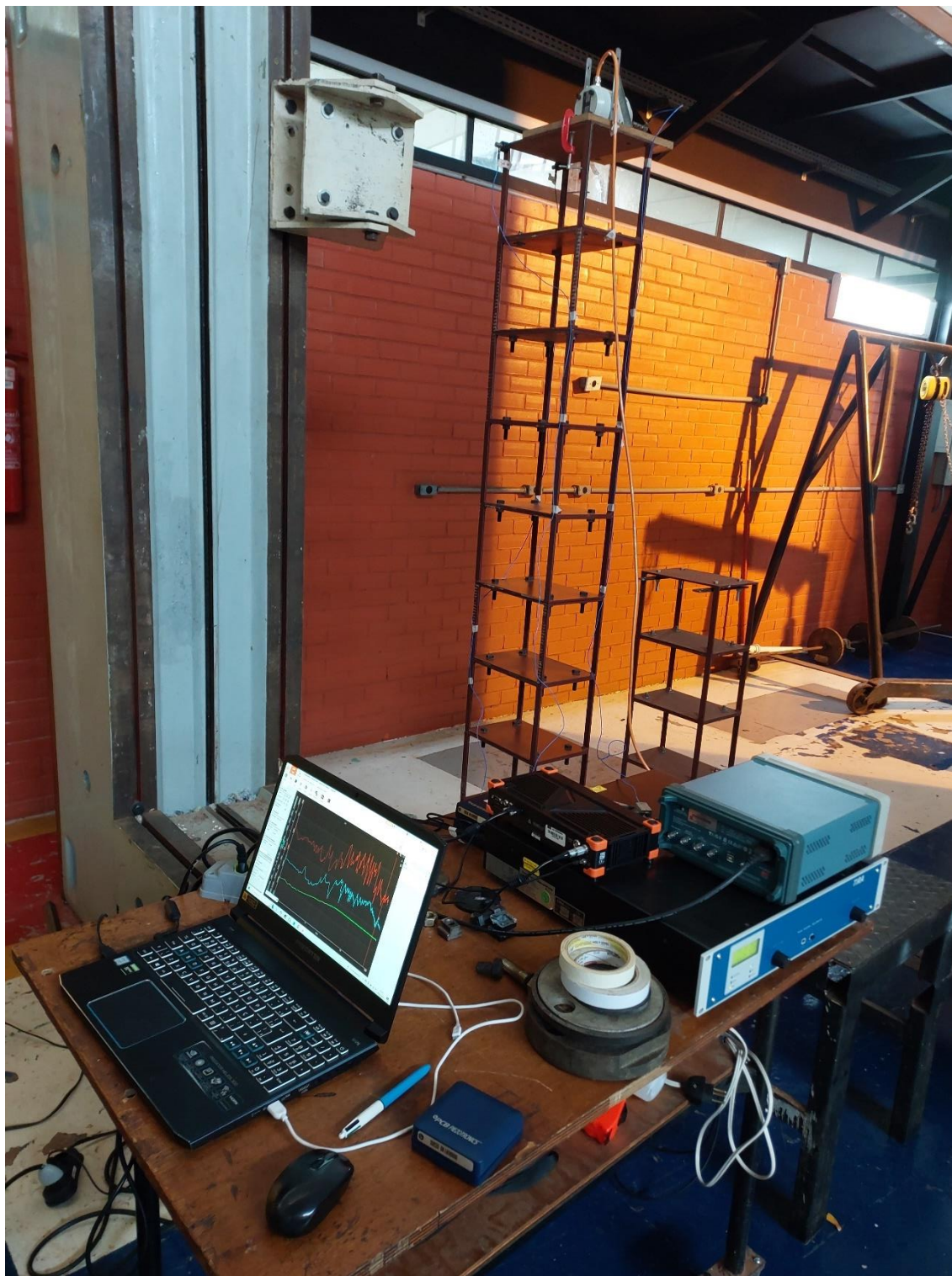
Fonte: Autor.

Tabela 4.6 – Identificação dos dados do ensaio de *shaker* da fase II do *Shear Building*.

DATA	NOME DO ARQUIVO	MASSA ADIC. ≈	DIREÇÃO SHAKER	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE
19/03/2025	Ensaio_190325_Shaker_0000.xlsx	0 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0001.xlsx	130 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0002.xlsx	220 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0003.xlsx	500 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0004.xlsx	1 kg	X	
	Ensaio_190325_Shaker_0005.xlsx	2 kg		
	Ensaio_190325_Shaker_0006.xlsx	3 kg		
	Ensaio_190325_Shaker_0007.xlsx	5 kg		
	Ensaio_190325_Shaker_0008.xlsx	6 kg		Alterando a quantidade de massa em um mesmo ponto (9º andar).
	Ensaio_190325_Shaker_0009.xlsx	0 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0010.xlsx	130 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0011.xlsx	220 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0012.xlsx	500 g		
	Ensaio_190325_Shaker_0013.xlsx	1 kg	45º	
	Ensaio_190325_Shaker_0014.xlsx	2 kg		
	Ensaio_190325_Shaker_0015.xlsx	3 kg		
	Ensaio_190325_Shaker_0016.xlsx	5 kg		
Ensaio_190325_Shaker_0017.xlsx	6 kg			

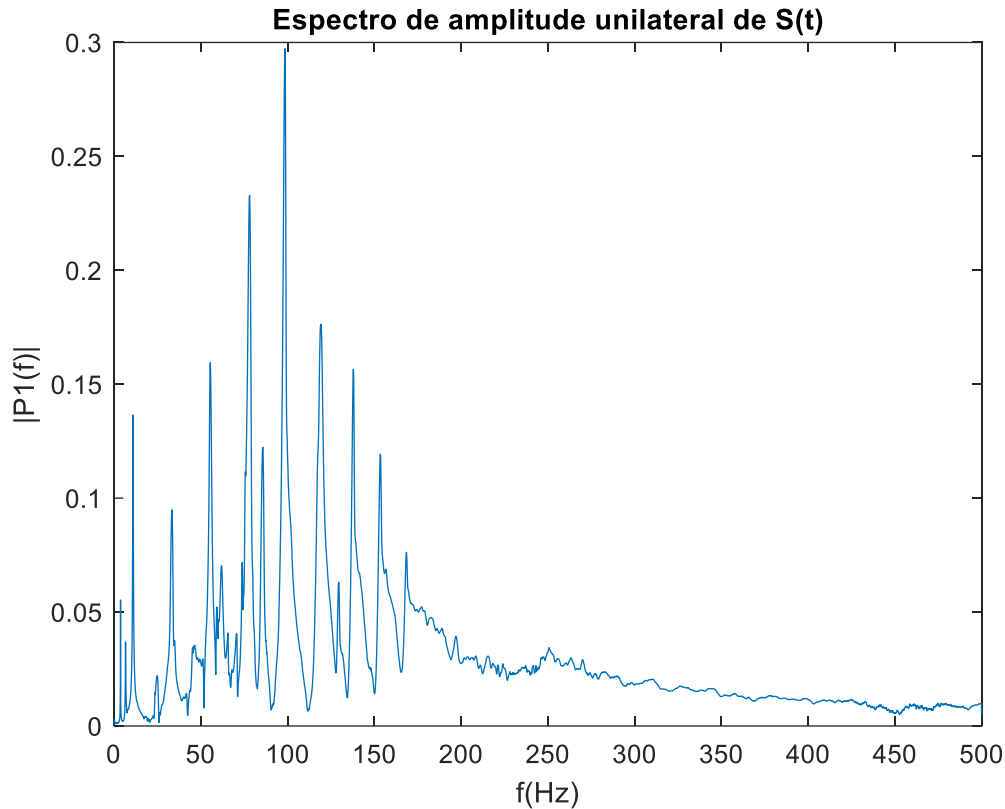
Fonte: Autor.

A Figura 4.23 ilustra a organização da estrutura de aquisição utilizada na fase II dos ensaios do *Shear Building*.

Figura 4.23 - Estrutura de aquisição de dados usada na fase II dos ensaios do *Shear Building*.

Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 4.24 apresenta o espectro da frequência da estrutura intacta e Tabela 4.7 as três primeiras frequências identificadas através dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT) para cada um dos estados estruturais.

Figura 4.24 – Espectro da Frequência do *Shear Building* – Fase II (Impacto).

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural do *Shear Building* – Fase II.

Frequências Naturais (Hz) – <i>Shear Building</i> - Fase II			
Massa add. / Freq.	1ª Frequência	2ª Frequência	3ª Frequência
Intacta (0kg)	3,75	6,63	10,88
130 g no 9º andar	3,75	6,63	11,0
220 g no 9º andar	3,75	6,63	11,0
500 g no 9º andar	3,75	6,63	11,0
1 kg no 9º andar	3,63	6,5	10,88
2 kg no 9º andar	3,63	6,5	10,88
3 kg no 8º andar	3,63	6,38	10,88
5 kg no 9º andar	3,5	6,25	10,75
6 kg no 9º andar	3,38	6,13	10,63

Fonte: Autor.

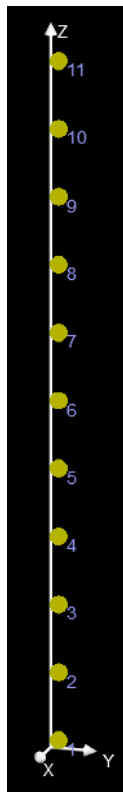
4.1.2 Ensaio Modal

Após os ensaios de vibração livre em cada uma das fases, foram conduzidos ensaios modais no *Shear Building* de 10 pavimentos, utilizando o software DewesoftX (DEWESoft, 2024), com o objetivo de identificar suas características dinâmicas —

frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento — e validar os resultados obtidos pela FFT, além de fornecer subsídios adicionais para estudos futuros.

Assim como nos ensaios dinâmicos, os ensaios modais foram realizados em duas fases, diferenciando-se pelo posicionamento dos acelerômetros de resposta e pelo apoio do *shaker* sobre a estrutura. A estrutura modelada no editor de geometria do DewesoftX, com 11 nós distribuídos ao longo do eixo do pilar submetido aos impactos, conforme ilustrado na Figura 4.25, juntamente com suas respectivas coordenadas.

Figura 4.25 – Nós e coordenadas do *Shear Building* inseridos no editor de geometria do software.



Node ID	X	Y	Z
Cartesian CS[...]	0,00	0,00	0,00
1	0,00 m	0,00 m	0,00 m
2	0,00 m	0,00 m	0,21 m
3	0,00 m	0,00 m	0,43 m
4	0,00 m	0,00 m	0,64 m
5	0,00 m	0,00 m	0,85 m
6	0,00 m	0,00 m	1,07 m
7	0,00 m	0,00 m	1,28 m
8	0,00 m	0,00 m	1,49 m
9	0,00 m	0,00 m	1,70 m
10	0,00 m	0,00 m	1,92 m
11	0,00 m	0,00 m	2,13 m

Fonte: Autor.

Durante o ensaio modal, cada um dos nós, numerados de 2 (1º pavimento) a 11 (10º pavimento), foi excitado com quatro impactos aplicados por meio do martelo instrumental. De acordo com Ewins (2000), recomenda-se a realização de três a cinco impactos por ponto para assegurar a consistência das medições e minimizar o ruído nas funções de resposta em frequência (FRFs).

4.1.2.1 Fase I

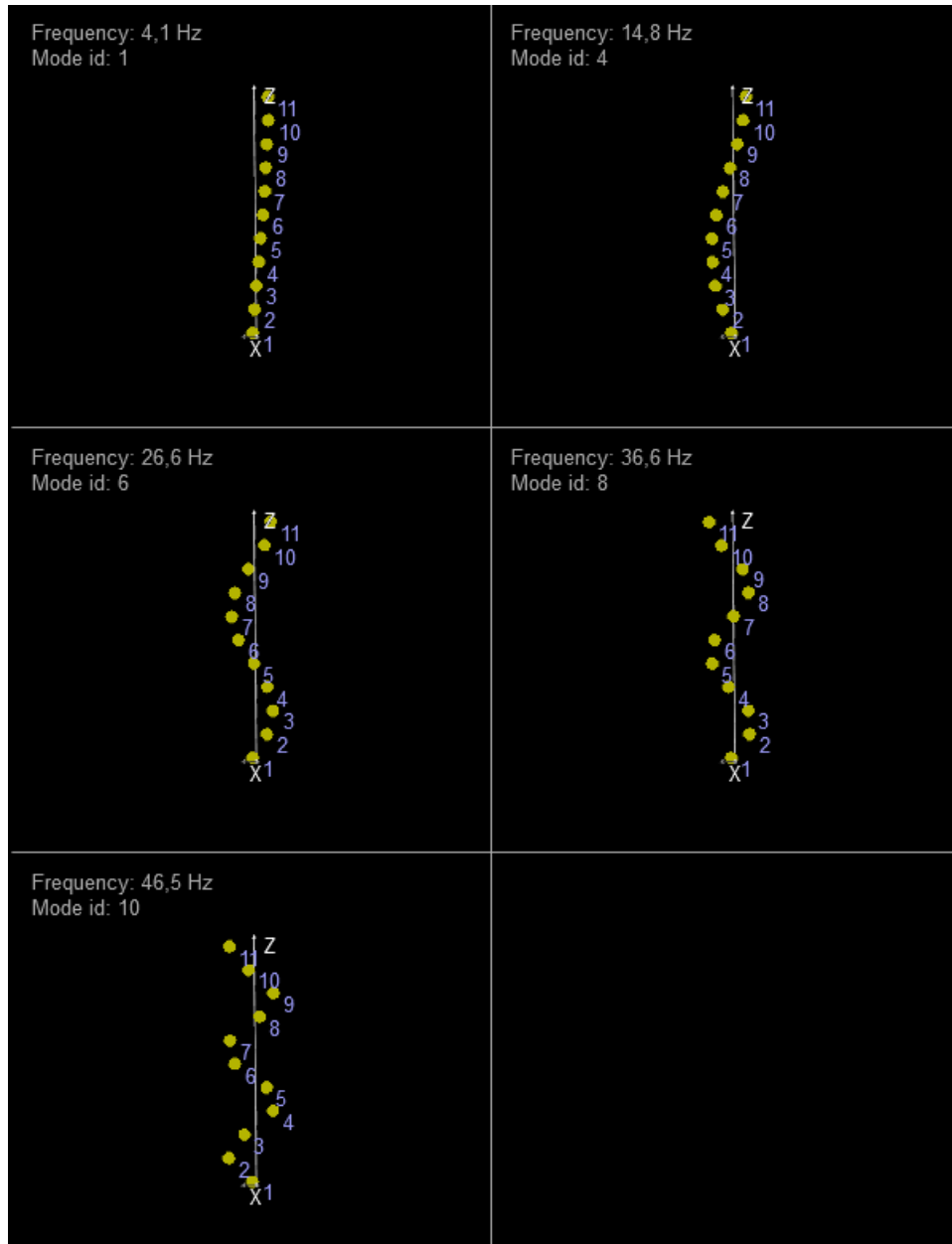
A Tabela 4.8 apresenta os modos, frequências e taxas de amortecimento obtidos no ensaio modal da fase I do *Shear Building*, comparando-os com os resultados obtidos por Tavares (2024) para a mesma estrutura.

Tabela 4.8 – Modos, frequências e taxas de amortecimento do Shear Building na Fase I.

Modo (Id)	Autor		Tavares (2024)		Diferença (%)
	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento (%)	Frequência (Hz)	Tipo de Modo	
1	4,08	0,414	4,06	Flexional X	0,49
2	7,24	1,317	6,88	Flexional Y	5,23
3	11,18	0,783	10,94	Torcional	2,19
4	14,79	0,494	14,38	Flexional X	2,85
5	24,24	0,651	23,13	Flexional Y	4,80
6	26,55	0,389	26,25	Flexional X	1,14
7	33,57	0,721	32,81	Torcional	2,32
8	36,62	0,349	36,25	Flexional X	1,02
9	45,44	1,165	43,75	Flexional Y	3,86
10	46,54	0,353	45,94	Flexional X	1,31

Fonte: Autor.

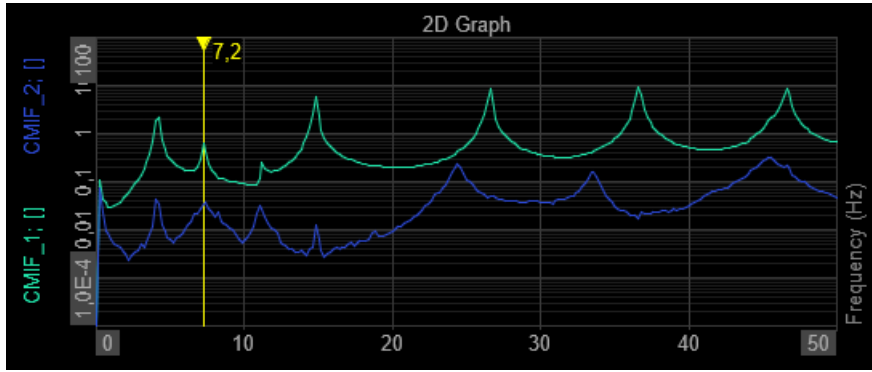
Os valores das frequências obtidos no ensaio modal foram ligeiramente superiores aos reportados por Tavares (2024). Considerando que, no presente ensaio, a estrutura foi discretizada com apenas 11 pontos ao longo de um único eixo, ainda que tenham sido identificados os 10 primeiros modos com valores próximos ao de Tavares (2024, foi possível caracterizar visualmente, quanto ao tipo, apenas os modos flexionais na direção de X (Figura 4.26).

Figura 4.26 – Modos de flexão na direção de X na Fase I do *Shear Building*.

Fonte: Autor.

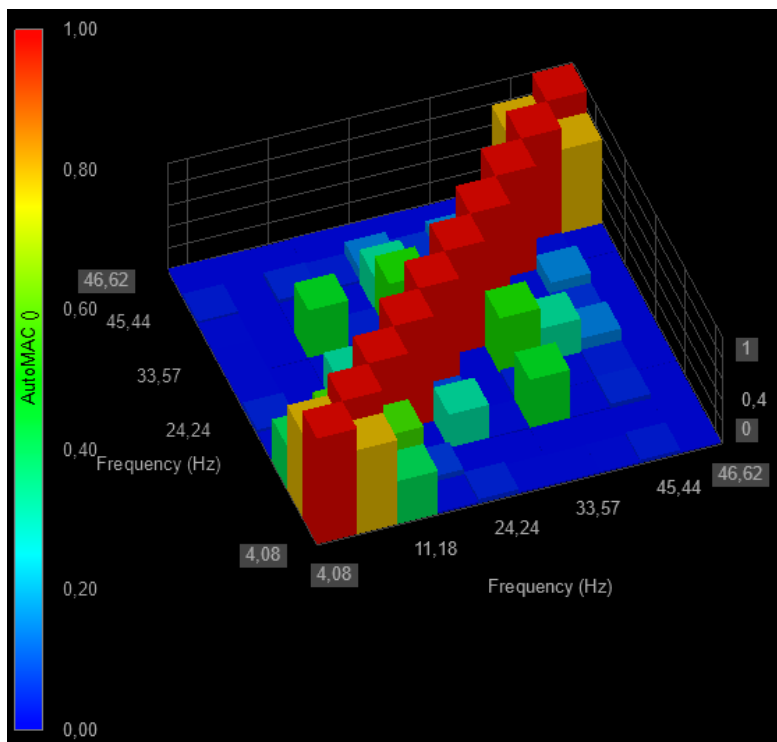
A Figura 4.27 apresenta as funções complexas indicadoras de modo (CMIF – *Complex Mode Indicator Function*) no domínio da frequência, enquanto a Figura 4.28 exibe a visualização por gradiente de cor do Critério de Garantia Modal (MAC - *Modal Assurance Criterion*), utilizado para avaliar a consistência dos modos extraídos.

Figura 4.27 – CMIF no domínio da frequência da Fase I do *Shear Building*.



Fonte: Autor.

Figura 4.28 – Critério de garantia modal (MAC) da Fase I do *Shear Building*.



Fonte: Autor.

4.1.2.2 Fase II

A Tabela 4.9 apresenta os modos, frequências e taxas de amortecimento obtidos no ensaio modal da fase II do *Shear Building*.

Tabela 4.9 – Modos, frequências e taxas de amortecimento do *Shear Building* Fase II.

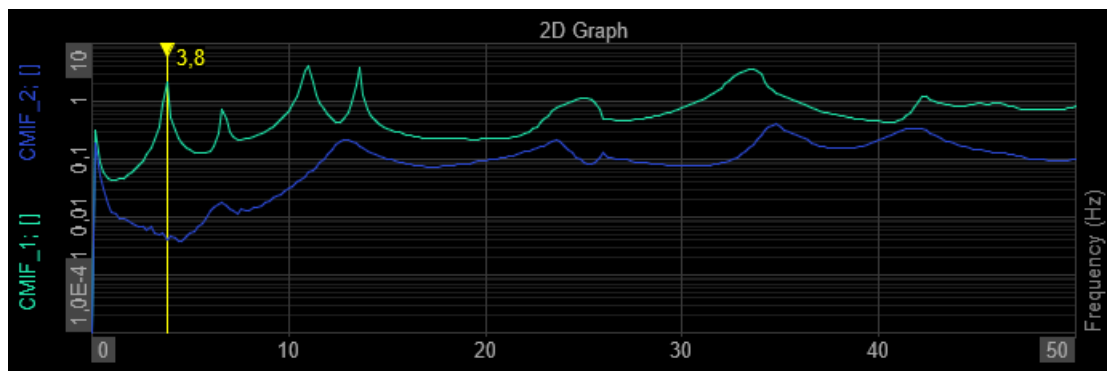
Modo (Id)	Autor	
	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento (%)
1	3,74	0,705

2	6,63	1,063
3	10,88	1,021
4	13,54	0,594
5	23,46	1,804
6	24,87	1,752
7	33,06	1,924
8	34,10	0,202
9	42,29	1,103
10	45,78	2,455
11	55,61	0,904

Fonte: Autor.

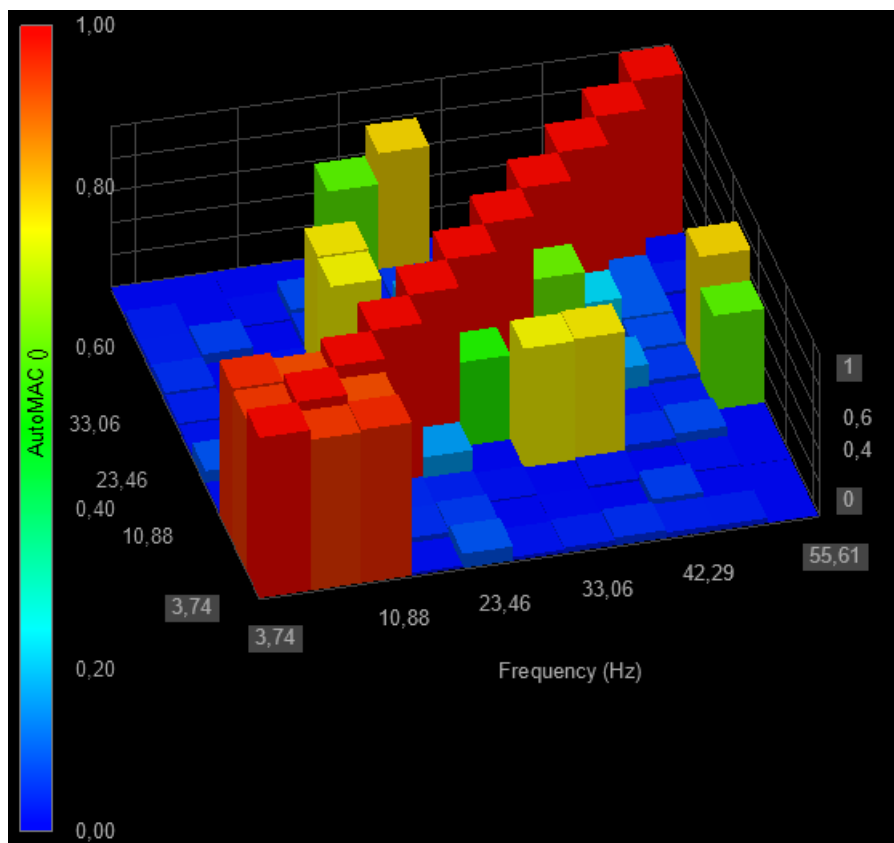
Devido à adição de massa associada ao *shaker*, as frequências obtidas na fase II foram menores em comparação às da Fase I. Já os amortecimentos foram maiores, em partes pelo contato com o cabo excitador. A Figura 4.29 apresenta as CMIF no domínio da frequência, e a Figura 4.30 exibe o MAC, ambos referentes à Fase II.

Figura 4.29 – CMIF no domínio da frequência da Fase II do *Shear Building*.



Fonte: Autor.

Figura 4.30 - Critério de garantia modal (MAC) da Fase II do *Shear Building*.



Fonte: Autor.

4.2 PÁ EÓLICA

Os ensaios experimentais foram realizados pela autora, no Laboratório de Vibração do Grupo de Dinâmica de Vibração do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB-FT/EnM/GDS/LV), Campus Darcy Ribeiro, Brasília, Brasil, nos dias 14 e 15 de março de 2025.

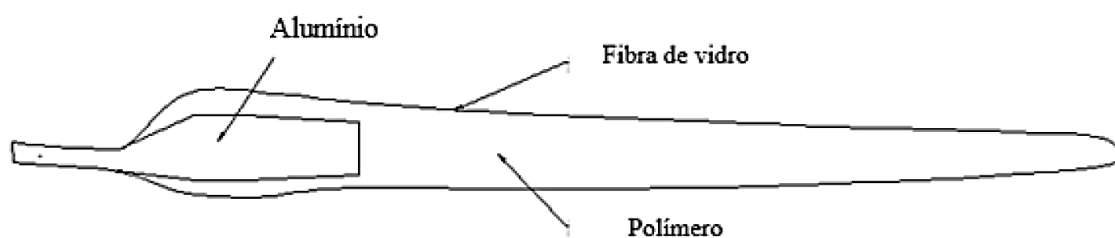
A estrutura analisada, corresponde a uma das pás da turbina eólica de eixo horizontal VERNE 555 (Figura 4.31), desenvolvida pela empresa ENERSUD, capaz de gerar até 6kW, atendendo pequenos conjuntos residenciais e localidades isoladas, como ilhas e zonas rurais, bem como, agrícolas e industriais de pequeno porte (ENERSUD, 2025). A pá possui 2,73m de comprimento e é composta por uma camada externa de fibra de vidro, reforço interno em alumínio e preenchimento com polímero termoplástico de aparência de “espuma” (Figura 4.32).

Figura 4.31 – Turbina Eólica Verne 555 da ENERSUD.



Fonte: ENERSUD, 2025.

Figura 4.32 – Materiais e detalhes da estrutura da pá.

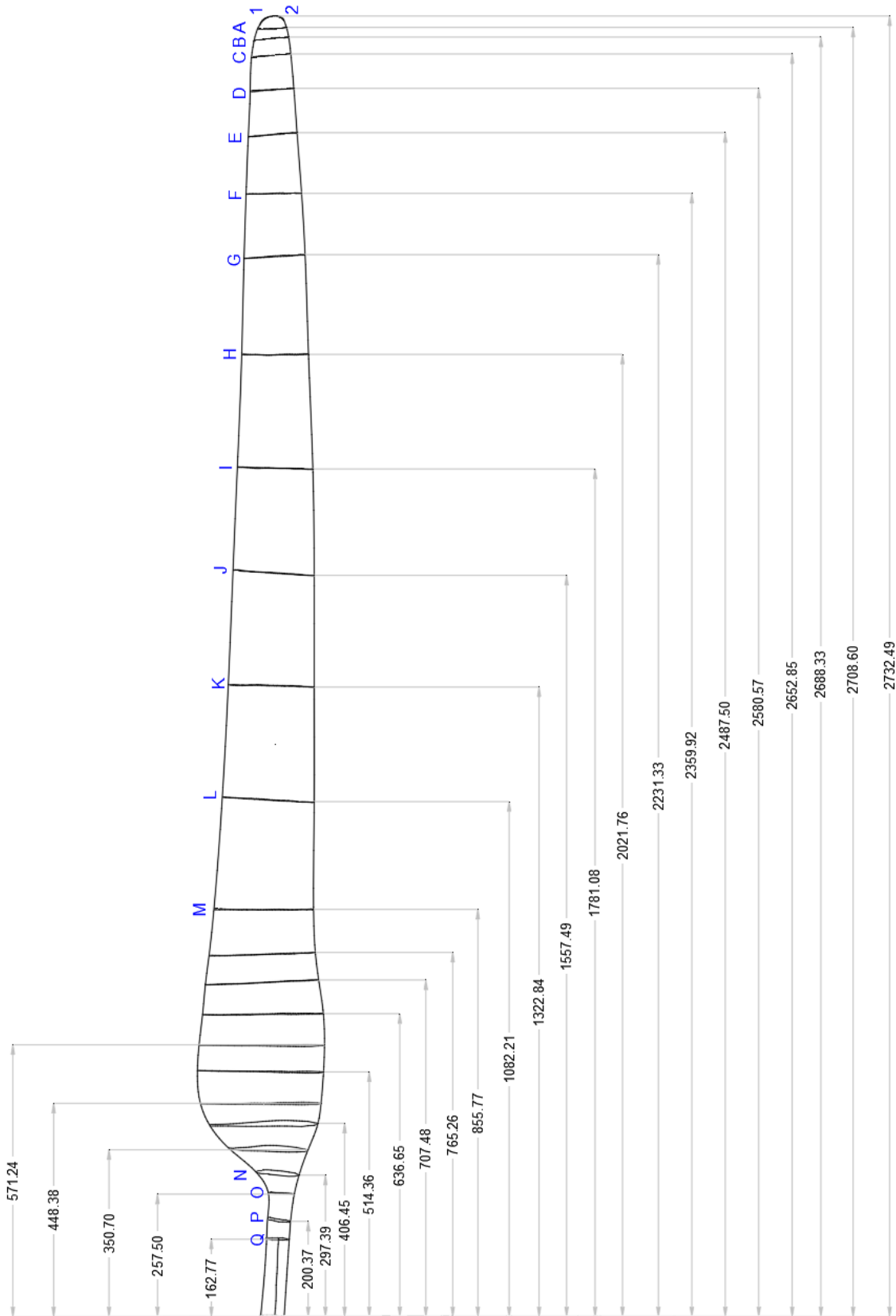


Fonte: Moraes, 2017.

As dimensões exatas da pá, bem como informações detalhadas sobre sua estrutura interna, não foram disponibilizadas pela fabricante devido a restrições de sigilo industrial. Diante disso, Morais (2017) realizou a digitalização da geometria da pá por meio de tecnologia de medição por coordenadas (x, y, z), de 25 seções transversais, no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Tais medições foram utilizadas para o desenvolvimento de modelos numéricos da pá por Araújo et al. (2016) e Morais (2017).

Para este trabalho, contudo, foram consideradas apenas as coordenadas nos eixos x e y das seções indicadas na Figura 4.33, as quais correspondem a pontos de excitação da estrutura, posições de leitura dos acelerômetros ou locais de adição de massas.

Figura 4.33 – Desenho geométrico da pá em CAD e suas respectivas seções transversais (mm).



Fonte: Morais, 2017.

A massa da estrutura foi determinada com o uso de uma balança de mão, em função do comprimento da pá, que inviabilizou o uso de balanças de precisão menores (Figura 4.34). A massa obtida foi de $10,85\text{kg} \pm 0,05\text{kg}$, já descontada a massa da cinta ($0,11\text{kg}$).

Figura 4.34 – Medição da massa da estrutura.



Fonte: Autor.

Informações adicionais sobre essa pá eólica podem ser encontradas em Araújo et al. (2016) e Moraes (2017), que realizaram modelagens em elementos finitos e ensaios diversos com finalidades distintas das abordadas neste trabalho.

4.2.1 Ensaio Dinâmico

Os ensaios foram conduzidos com a pá eólica rigidamente fixada a um suporte inercial GDS, com cunhamentos adicionais para evitar rotações indesejadas (Figuras 4.35 a 4.37).

Figura 4.35 – Vista posterior da pá eólica engastada ao suporte inercial GDS.



Fonte: Autor.

Figura 4.36 – Vista frontal da pá eólica engastada ao suporte inercial GDS.



Fonte: Autor.

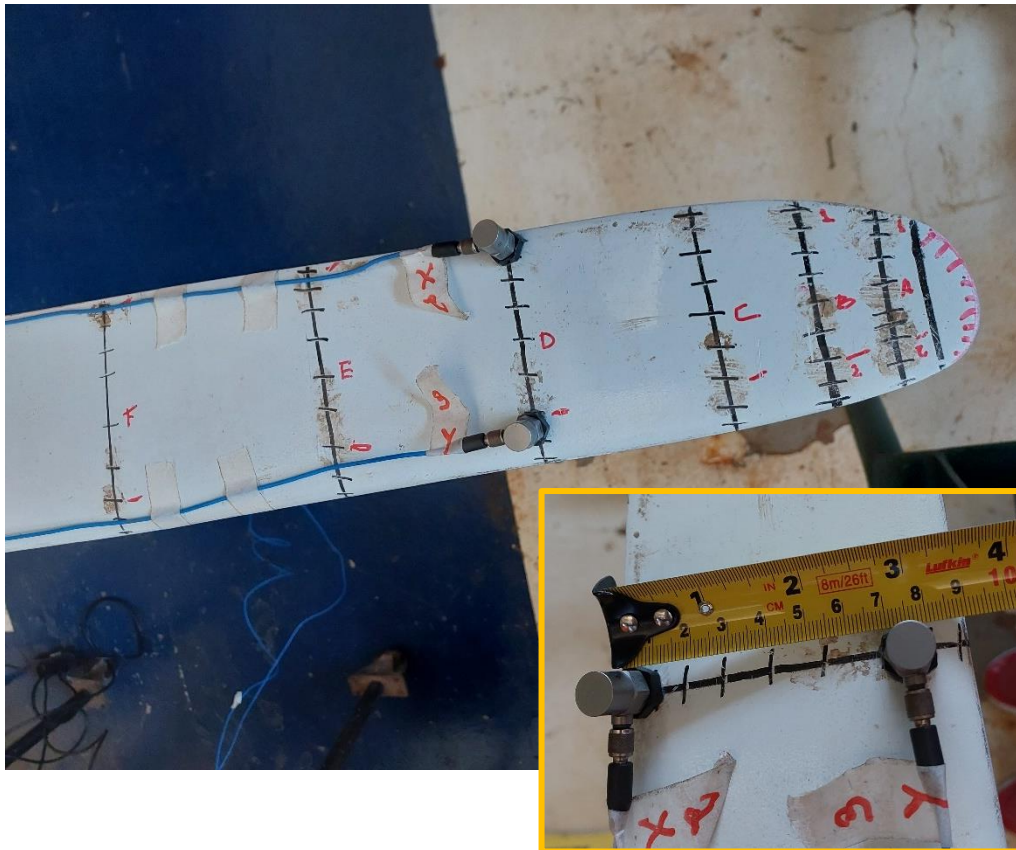
Figura 4.37 – Detalhe de fixação e cunhamento da pá eólica.



Fonte: Autor.

A aquisição dos dados foi realizada com o sistema SIRIUS Modular DAQ da Dewesoft (DEWESOFF, 2024) (Figura 4.2). A excitação foi feita com o martelo instrumental PCB Piezotronics modelo 086C03 (Figura 4.5), com célula de carga na ponta, e a resposta medida por dois acelerômetros PCB modelo 352C33, posicionados na seção transversal D, separados por 7,5 cm (Figura 4.38). O ponto de excitação foi B2, escolhido pela facilidade de acesso e boa resposta dinâmica (Figura 4.39). O impacto foi realizado perpendicularmente ao piso, e os acelerômetros foram posicionados paralelos ao deslocamento induzido, na mesma face do ponto de excitação.

Figura 4.38 – Posicionamento dos acelerômetros na pá.



Fonte: Autor.

Figura 4.39 – Local de impacto do martelo na pá.



Fonte: Autor.

A Tabela 4.8 detalha os equipamentos, seus locais de instalação ou aplicação, e os canais de aquisição. Outras especificações acerca dos equipamentos, podem ser encontradas em PCB Piezotronics (2025). As entradas utilizadas na DAQ são as mesmas apresentadas na Figura 4.10.

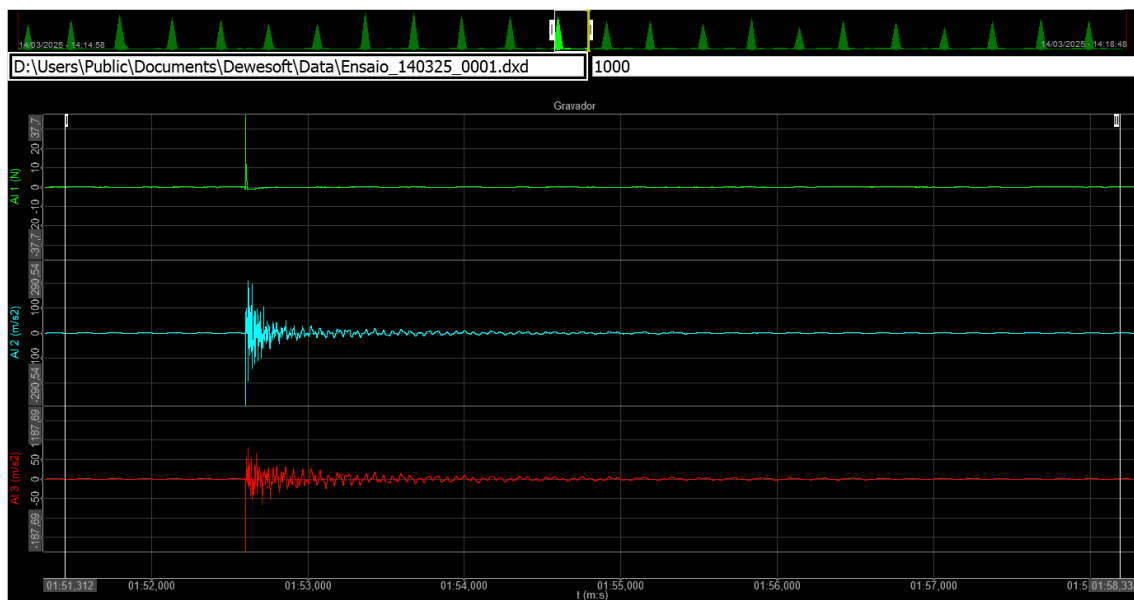
Tabela 4.10 – Dados dos acelerômetros usados no ensaio da pá eólica.

Fabricante: PCB Piezotronics					
Modelo	ID	Número Serial	Sensibilidade	Local	Canal DAQ
086C03	Martelo	-	2,25 mV/N	B2	1
352C33	Acelerômetro X 2	LW298203	10,28mV/m/s ²	D1	2
	Acelerômetro Y 3	128108	10,25mV/m/s ²	D2	3

Fonte: Autor.

A Figura 4.40 apresenta um exemplo dos sinais de impacto e respostas em aceleração no domínio do tempo.

Figura 4.40 – Exemplo dos sinais de força de impacto e de acelerações registrados em função do tempo.



Fonte: Autor.

Por restrições do uso compartilhado da estrutura, não foram induzidos danos permanentes. Assim, diferentes estados estruturais foram simulados pela adição de massas, inicialmente, no ponto F (Figura 4.41), com os seguintes valores: 9,63 g (0,09%), 14,93 g (0,14%), 29,74 g (0,27%), 69,17 g (0,64%), 130,74 g (1,20%), 220,12 g (2,03%) e 428,99 g (3,95%).

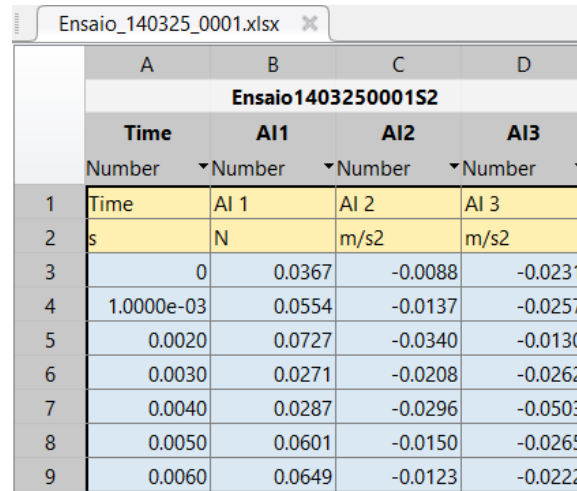
Figura 4.41 – Massa de 130g adicionada no ponto F.



Fonte: Autor.

Cada ensaio teve tempo de aquisição de 230s, com frequência de amostragem de 1000Hz, totalizando 230.000 leituras por canal. A Figura 4.42 ilustra o formato dos arquivos de dados, contendo o tempo, força de impacto e as acelerações medidas.

Figura 4.42 – Interface do arquivo de dados.



	A	B	C	D
Ensaio 140325000152				
	Time	AI1	AI2	AI3
	Number	Number	Number	Number
1	Time	AI 1	AI 2	AI 3
2	s	N	m/s ²	m/s ²
3	0	0.0367	-0.0088	-0.0231
4	1.0000e-03	0.0554	-0.0137	-0.0257
5	0.0020	0.0727	-0.0340	-0.0130
6	0.0030	0.0271	-0.0208	-0.0262
7	0.0040	0.0287	-0.0296	-0.0503
8	0.0050	0.0601	-0.0150	-0.0265
9	0.0060	0.0649	-0.0123	-0.0222

Fonte: Autor.

Os impactos foram realizados a cada 10 ou 20 segundos. Arquivos com impactos a cada 20 segundos foram segmentados em 11 arquivos de 15 segundos (um impacto por arquivo), enquanto os de 10 segundos foram divididos em 22 arquivos de 8 segundos.

O primeiro ensaio, em 14/03/2025, foi realizado com a estrutura intacta, seguido da adição progressiva de massas no ponto F. Posteriormente, foram feitos ensaios variando a posição das massas de 30g e 220g. Também foram realizados testes com impacto a cada 20 segundos, para verificar se há similaridade com as observações realizadas para o *Shear Building*.

Com base nas análises preliminares dos dados de 14/03, no dia 15/03/2025, foram repetidos os ensaios com a estrutura sem massa e com massa em F, para aumentar o número de amostras. Devido ao bom desempenho na identificação da massa de 30g, foram incluídas massas menores (10g e 15g) para avaliar os limites de sensibilidade dos métodos aplicados.

As Tabela 4.11 e 4.12 descrevem os arquivos adquiridos nos dois dias de ensaio, indicando data, nome, tempo entre impactos, massas adicionadas, local da massa e objetivo de cada análise.

Tabela 4.11 – Identificação dos dados do ensaio da pá eólica no dia 14/03/2025.

DATA	NOME DO ARQUIVO	TEMPO ENTRE IMPACTOS	MASSA ADIC. ≈	LOCAL DA MASSA	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE	
14/03/2025	Ensaio_140325_0001.xlsx	10 s	0 g	-	Sem massa	
	Ensaio_140325_0002.xlsx		30 g	F	Alterando quant. de massa em um mesmo ponto (F)	
	Ensaio_140325_0003.xlsx		70 g			
	Ensaio_140325_0004.xlsx		130 g			
	Ensaio_140325_0005.xlsx		220 g			
	Ensaio_140325_0006.xlsx		430 g			
	Ensaio_140325_0007.xlsx		30 g	C	Alterando a posição da massa de 30g	
	Ensaio_140325_0008.xlsx		30 g	D		
	Ensaio_140325_0009.xlsx		30 g	E		
	Ensaio_140325_0010.xlsx		30 g	G		
	Ensaio_140325_0011.xlsx		30 g	H		
	Ensaio_140325_0012.xlsx		30 g	J		
	Ensaio_140325_0013.xlsx		30 g	L		
	Ensaio_140325_0015.xlsx		220 g	E		Alterando a posição da massa de 220g
	Ensaio_140325_0016.xlsx		220 g	G		
	Ensaio_140325_0017.xlsx		220 g	H		
	Ensaio_140325_0018.xlsx		220 g	J		
	Ensaio_140325_0019.xlsx		220 g	L		
	Ensaio_140325_0021.xlsx		20 s	0 g	-	Testando impacto a cada 20 s
	Ensaio_140325_0022.xlsx	30g		F		

Fonte: Autor.

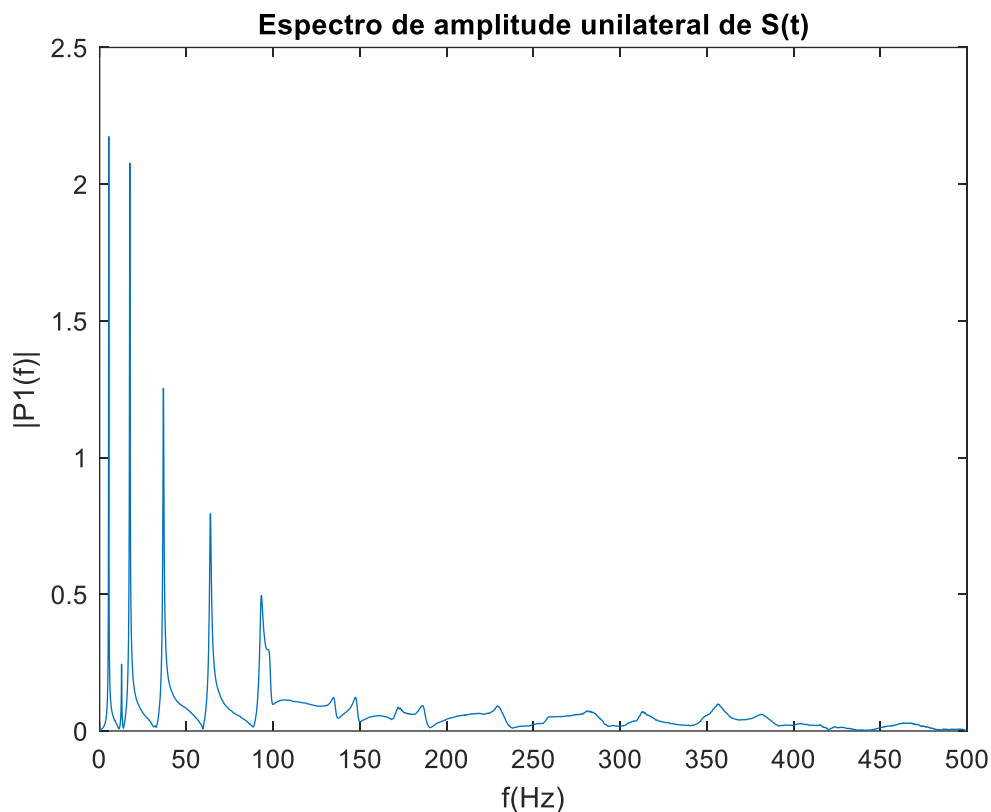
Tabela 4.12 – Identificação dos dados do ensaio da pá eólica no dia 15/03/2025.

DATA	NOME DO ARQUIVO	TEMPO ENTRE IMPACTOS	MASSA ADIC. ≈	LOCAL DA MASSA	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE	
15/03/2025	Ensaio_140325_0023.xlsx	10 s	0 g	-	Repetindo os ensaios com 10s alterando a quant. de massa em um mesmo ponto (F)	
	Ensaio_140325_0024.xlsx		30 g			
	Ensaio_140325_0025.xlsx		70 g			
	Ensaio_140325_0027.xlsx		130 g			
	Ensaio_140325_0028.xlsx		220 g			
	Ensaio_140325_0029.xlsx		430 g			
	Ensaio_140325_0030.xlsx		15 g			
	Ensaio_140325_0031.xlsx		15 g			
	Ensaio_140325_0033.xlsx		10 g			
	Ensaio_140325_0034.xlsx		10 g			
	Ensaio_140325_0035.xlsx	20 s	10 g		Adicionando massas menores a serem variadas no ponto (F)	
	Ensaio_140325_0037.xlsx		15 g			
	Ensaio_140325_0038.xlsx		70 g	F		
	Ensaio_140325_0039.xlsx		130 g			
	Ensaio_140325_0040.xlsx		220 g			
	Ensaio_140325_0041.xlsx		430 g			
	Ensaio_140325_0042.xlsx		430 g			
	Ensaio_140325_0043.xlsx		220 g			
	Ensaio_140325_0044.xlsx		130 g			
	Ensaio_140325_0045.xlsx		70 g			
	Ensaio_140325_0046.xlsx		30 g			
	Ensaio_140325_0047.xlsx		15 g			
	Ensaio_140325_0048.xlsx		10 g			
	Ensaio_140325_0049.xlsx		-	-		

Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 4.43 apresenta o espectro da frequência da estrutura intacta e Tabela 4.13 as três primeiras frequências identificadas através dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT) para cada um dos estados estruturais.

Figura 4.43 – Espectro da Frequência da Pá Eólica.



Fonte: Autor.

Tabela 4.13 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural da Pá Eólica.

Frequências Naturais (Hz) – Pá Eólica			
Massa add. / Freq.	1ª Frequência	2ª Frequência	3ª Frequência
Intacta (0g)	5,25	12,63	17,38
10 g em F	5,25	12,75	17,5
15 g em F	5,25	12,75	17,5
30 g em F	5,125	12,5	17,38
70 g em F	5,125	12,38	17,25
130 g em F	5,0	12,25	17,25
220 g em F	4,75	11,88	17,13
430 g em F	4,5	11,25	17,0
30 g em C	5,125	12,5	16,88
30 g em D	5,125	12,5	17
30 g em E	5,125	12,5	17,25
30 g em G	5,125	12,5	17,38
30 g em H	5,125	12,5	17,25
30 g em J	5,25	12,63	17,25
30 g em L	5,25	12,63	17,25
220 g em E	4,625	11,75	16,63
220 g em G	4,875	12,0	17,25

220 g em H	5,0	12,13	17,13
220 g em J	5,125	12,38	16,88
220 g em L	5,25	12,5	17,13

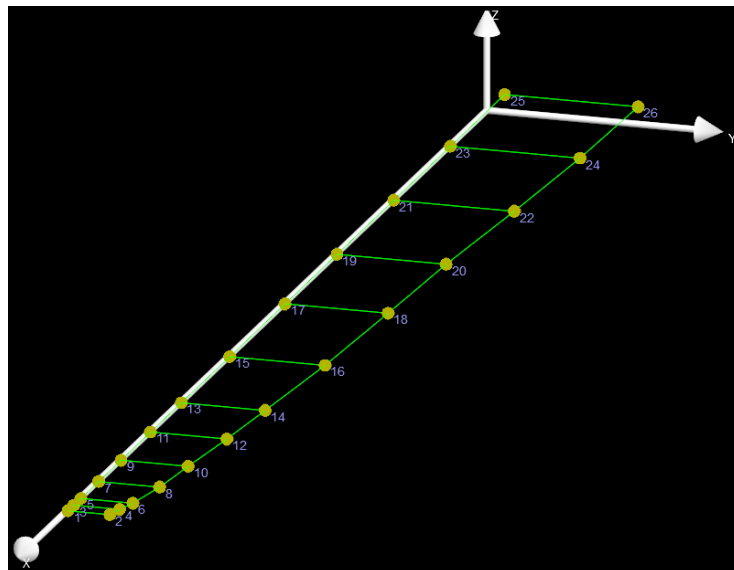
Fonte: Autor.

4.2.2 Ensaio Modal

O ensaio modal da pá foi realizado no software DewesoftX (DEWESOFT, 2024), visando identificar suas frequências naturais e modos de vibração, informações fundamentais para a caracterização dinâmica da estrutura e para aplicações em estudos futuros.

A Figura 4.44 apresenta os nós inseridos no editor de geometria do software, com suas coordenadas listadas na Tabela 4.14, totalizando 26 pontos distribuídos na superfície da pá, com coordenada $z=0$.

Figura 4.44 – Nós da pá inseridos no editor de geometria do software DewesoftX.



Fonte: Autor.

Tabela 4.14 – Coordenadas e pontos de impacto para a análise modal da pá ($z=0$).

Ponto	Nó	X (m)	Y (m)
A2	1	2,54	0,00
A1	2	2,54	0,06
B2	3	2,52	0,00
B1	4	2,52	0,06
C2	5	2,49	0,00
C1	6	2,49	0,07
D2	7	2,41	0,00
D1	8	2,41	0,08
E2	9	2,32	0,00

E1	10	2,32	0,09
F2	11	2,19	0,00
F1	12	2,19	0,10
G2	13	2,06	0,00
G1	14	2,06	0,11
H2	15	1,86	0,00
H1	16	1,86	0,13
I2	17	1,62	0,00
I1	18	1,62	0,14
J2	19	1,40	0,00
J1	20	1,40	0,14
K2	21	1,16	0,00
K1	22	1,16	0,16
L2	23	0,92	0,00
L1	24	0,92	0,17
M2	25	0,69	0,00
M1	26	0,69	0,18

Fonte: Autor.

Durante o ensaio, cada ponto foi excitado com quatro impactos utilizando o martelo instrumental, conforme recomendação de Ewins (2000) para assegurar qualidade nas FRFs. Como resultado, foram identificados nove modos de vibração, cujas frequências, taxas de amortecimento e tipos estão detalhados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Modos, frequências e taxas de amortecimento obtidos para a pá eólica.

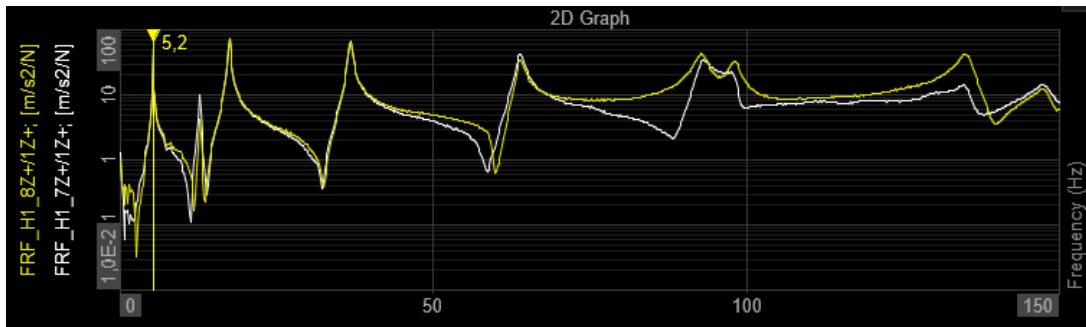
Modo (Id)	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento (%)	Tipo de Modo
1	5,21	0,783	1º Flexão
2	12,60	0,620	Flexo-torção
3	17,37	0,808	2º Flexão
4	36,72	0,741	3º Flexão
5	63,79	0,877	4º Flexão
6	92,76	1,173	Torção
7	98,18	0,875	Flexo-torção
8	135,07	0,676	Flexo-torção
9	148,32	0,717	Flexo-torção

Fonte: Autor.

A Figura 4.45 exibe o gráfico no domínio da frequência para os nós D2 e D1 (7 e 8), enquanto a Figura 4.46 apresenta os quatro primeiros modos de flexão da pá. A qualidade

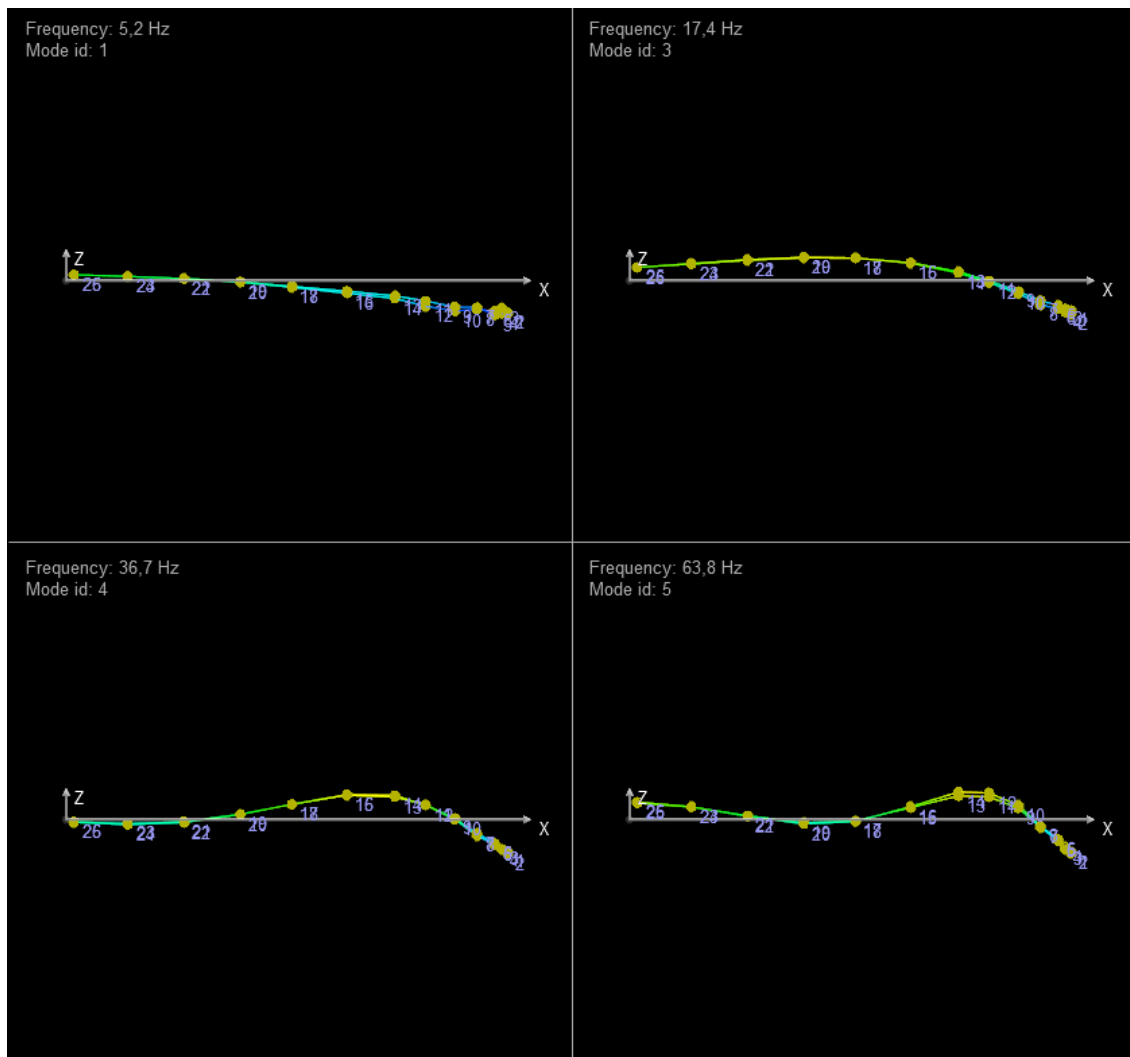
da identificação modal foi avaliada por meio do Critério de Garantia Modal (MAC), representado na Figura 4.47, com seus valores numéricos organizados na Tabela 4.16.

Figura 4.45 – Gráfico no domínio da frequência das leituras nos pontos 7 e 8.



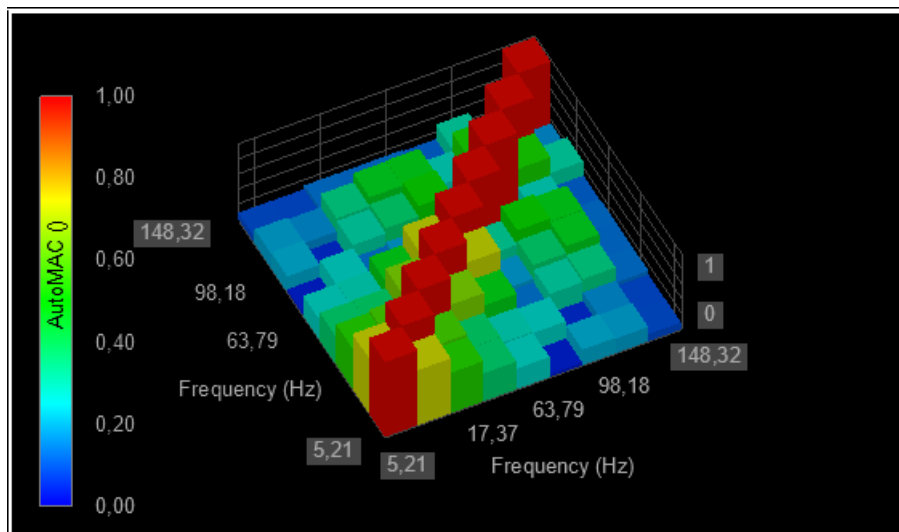
Fonte: Autor.

Figura 4.46 – Quatro primeiros modos de flexão da pá.



Fonte: Autor.

Figura 4.47 – Visualização por gradiente de cor do Critério de Garantia Modal (MAC).



Fonte: Autor.

Tabela 4.16 – Matriz MAC.

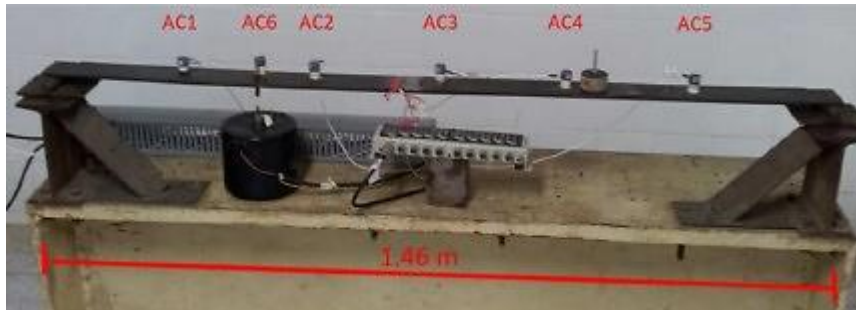
Frequency (Hz)	5,21	12,60	17,37	36,72	63,79	92,76	98,18	135,07	148,32
5,21	1,00	0,73	0,54	0,37	0,27	0,04	0,21	0,19	0,09
12,60	0,73	1,00	0,58	0,38	0,29	0,27	0,05	0,17	0,09
17,37	0,54	0,58	1,00	0,64	0,47	0,14	0,31	0,34	0,14
36,72	0,37	0,38	0,64	1,00	0,73	0,19	0,37	0,46	0,13
63,79	0,27	0,29	0,47	0,73	1,00	0,32	0,51	0,47	0,14
92,76	0,04	0,27	0,14	0,19	0,32	1,00	0,01	0,28	0,12
98,18	0,21	0,05	0,31	0,37	0,51	0,01	1,00	0,52	0,31
135,07	0,19	0,17	0,34	0,46	0,47	0,28	0,52	1,00	0,17
148,32	0,09	0,09	0,14	0,13	0,14	0,12	0,31	0,17	1,00

Fonte: Autor.

4.3 VIGA BIAPOIADA

Os ensaios experimentais de uma viga de aço biapoçada foram realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, com dados gentilmente cedidos pelo professor Ney Roitman para esta pesquisa. A viga e o sistema de aquisição possuem as características descritas na Tabela 4.17, sendo instrumentada com seis acelerômetros piezoelétricos PCB 336C31, conforme mostrado na Figura 4.48.

Figura 4.48 – Viga de aço biapoçada e instrumentada.



Fonte: Alves et al., 2015a, 2015b.

Tabela 4.17 – Características da viga de aço e das aquisições de dados.

Comprimento da viga	1,46 m
Seção transversal da viga	76,2 x 8,0 mm (retangular)
Sistema de aquisição de dados	Lynx ADS2002
Tipo dos acelerômetros	Piezoelétricos – PCB, 336C31
Tempo de aquisição de dados por ensaio	10 min
Período de amostragem	0,00025s
Frequência de amostragem	4000Hz

Fonte: Autor.

Foram conduzidos ensaios com dois tipos de excitação:

- ◆ Impacto periódico com martelo, aplicado a cada 10 segundos (Figura 4.49);
- ◆ Vibração aleatória (ruído branco), induzida continuamente por um excitador.

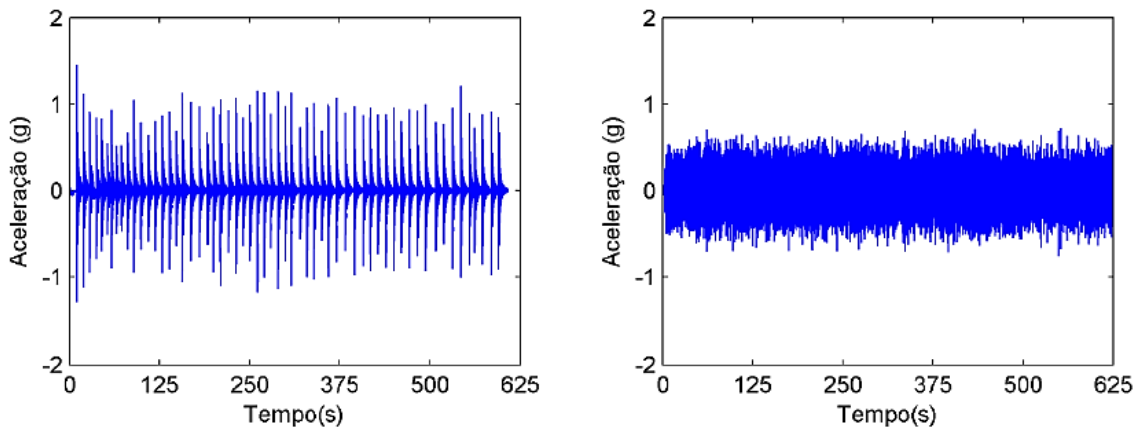
A Figura 4.50 ilustra exemplos dos sinais de aceleração no domínio do tempo para ambos os tipos de excitação.

Figura 4.49 – Viga de aço sob impacto de martelo, contendo dano provocado por furo de 12mm.



Fonte: Alves et al., 2015a, 2015b.

Figura 4.50 – Exemplos de ensaios de vibração realizados em laboratório: Impacto (esquerda) e vibração aleatória (direita).



Fonte: Alves et al., 2015a, 2015b.

Foram realizadas seis campanhas de aquisição, correspondentes a diferentes estados de dano aplicados progressivamente, por meio de furos concêntricos de diâmetros crescentes ou pela adição de massa, conforme descrito na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Tipos de danos provocados na estrutura.

NÍVEL	DANO IMPOSTO
Nível 0	Sem dano
Nível 1	Adição de uma massa apoiada de 500 g a 102,7 cm do apoio esquerdo da viga
Nível 2	Furo redondo de 12 mm de diâmetro
Nível 3	Furo redondo de 16 mm de diâmetro
Nível 4	Furo redondo de 22,5 mm de diâmetro
Nível 5	Furo redondo de 32 mm de diâmetro

Fonte: Autor.

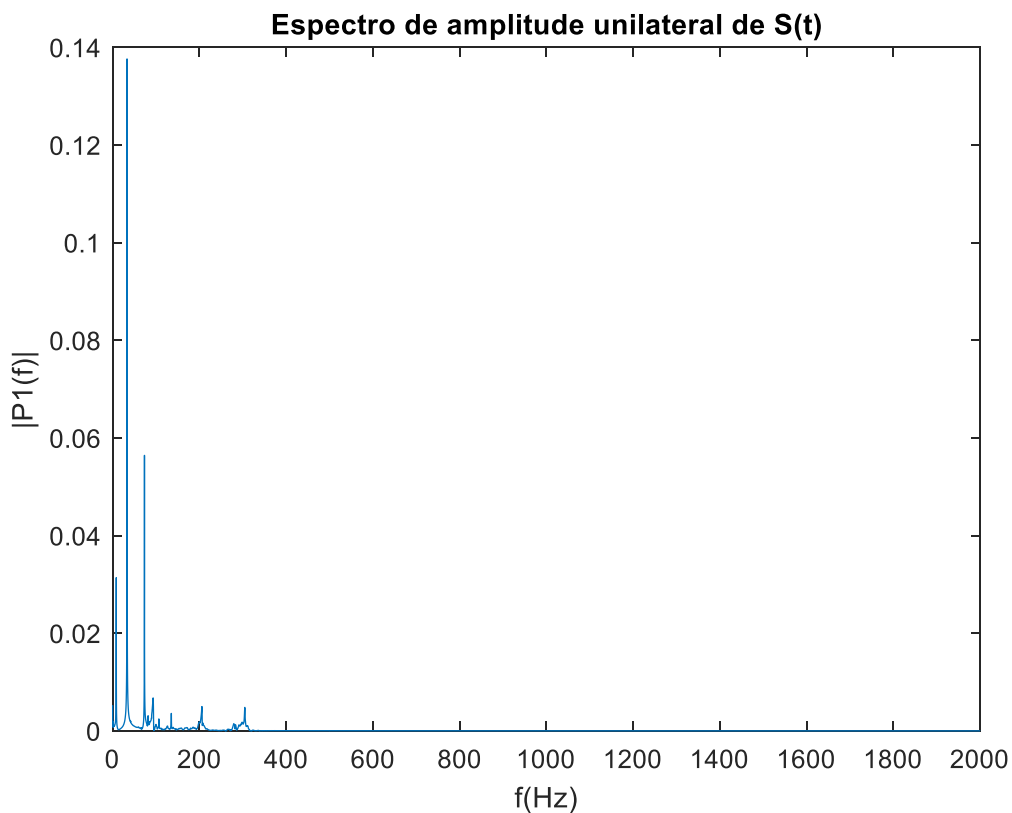
Cada campanha consistiu em três ensaios de 10 minutos, totalizando 18 ensaios dinâmicos por tipo de excitação (impacto e vibração aleatória). Cada ensaio gerou aproximadamente 2,4 milhões de valores por sensor, resultando em um total de 259,2 milhões de registros por tipo de excitação.

Os registros de três ensaios de 10 minutos foram posteriormente segmentados em:

- ◆ 180 arquivos de 5 segundos cada, no caso dos ensaios por impacto, contendo um impacto por arquivo;
- ◆ 180 arquivos de 10 segundos cada, para os ensaios de vibração aleatória, cada um representando um trecho contínuo da excitação.

Por fim, a Figura 4.51 apresenta o espectro da frequência da estrutura intacta e Tabela 4.19 as três primeiras frequências identificadas através dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT) para cada um dos estados estruturais.

Figura 4.51 – Espectro da Frequência da Viga Biapoiada.



Fonte: Autor.

Tabela 4.19 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural da Viga Biapoiada.

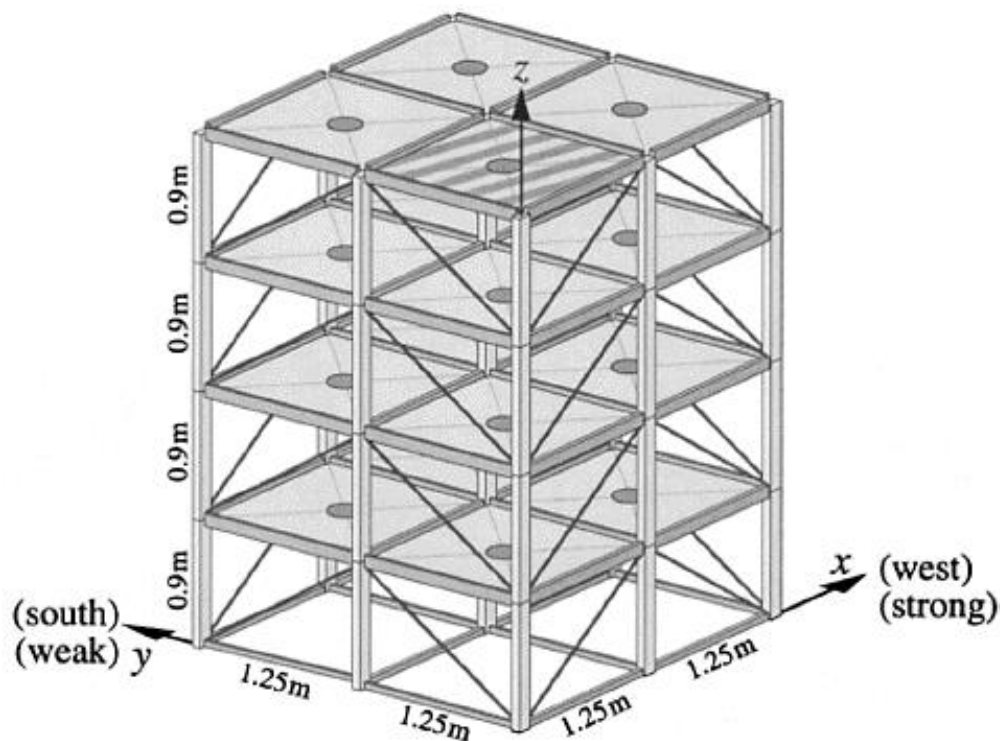
Frequências Naturais (Hz) – Viga Biapoiada			
Dano / Freq.	1ª Frequência	2ª Frequência	3ª Frequência
Intacta	8,04	33,2	73,4
500 g	8,0	31,4	73,6
Furo de 12 mm	8,2	33,2	74,2
Furo de 16 mm	8,2	33,2	74,0
Furo de 22,5 mm	8,2	33,2	74,6
Furo de 32 mm	8,4	33,0	74,2

Fonte: Autor.

4.4 BENCHMARK IASC-ASCE

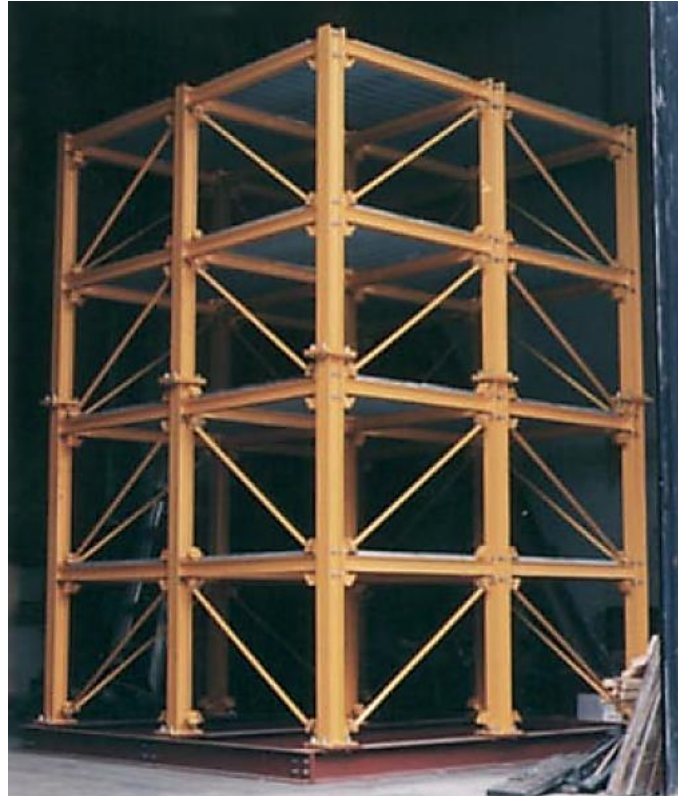
O grupo IASC-ASCE propôs um *Benchmark* com o objetivo de estabelecer uma estrutura padrão para a validação de métodos de detecção de danos, conforme apresentado por Johnson et al. (2002) (Figura 4.52).

Figura 4.52 – Modelo do *Benchmark* IASC-ASCE Fase I.



Fonte: Sanchez et al., 2020.

Na Fase I, o grupo desenvolveu um código de análise por elementos finitos (FEA) em Matlab (MATHWORKS, 2019) para simular a resposta dinâmica de uma estrutura de aço por meio de dados sintéticos, considerando diferentes cenários de dano. A estrutura, construída na Universidade de British Columbia (UBC), no Canadá, consiste em um edifício tridimensional de 4 andares, com baias 2x2 vãos (Figura 4.53).

Figura 4.53 – Estrutura real do *Benchmark IASC-ASCE*.

Fonte: Johnson et al., 2002.

A estrutura possui uma base de 2,5 x 2,5 m e altura de 3,6 m, composta por membros em aço 300W laminado a quente, com tensão de escoamento nominal de 300MPa. Os pilares estão orientados para maximizar a resistência à flexão em torno do eixo X, enquanto as vigas são dispostas para resistirem melhor as solicitações verticais. Os contraventamentos atuam apenas axialmente, sem rigidez à flexão, tornando sua orientação irrelevante.

Quanto às cargas, cada andar é composto por uma laje por vão:

- ◆ 1º andar: quatro lajes de 800 kg cada;
- ◆ 2º e 3º andares: quatro lajes de 600 kg cada;
- ◆ 4º andar: quatro lajes de 400 kg, ou três de 400 kg e uma de 550 kg, no caso em que se considera assimetria na distribuição de massa.

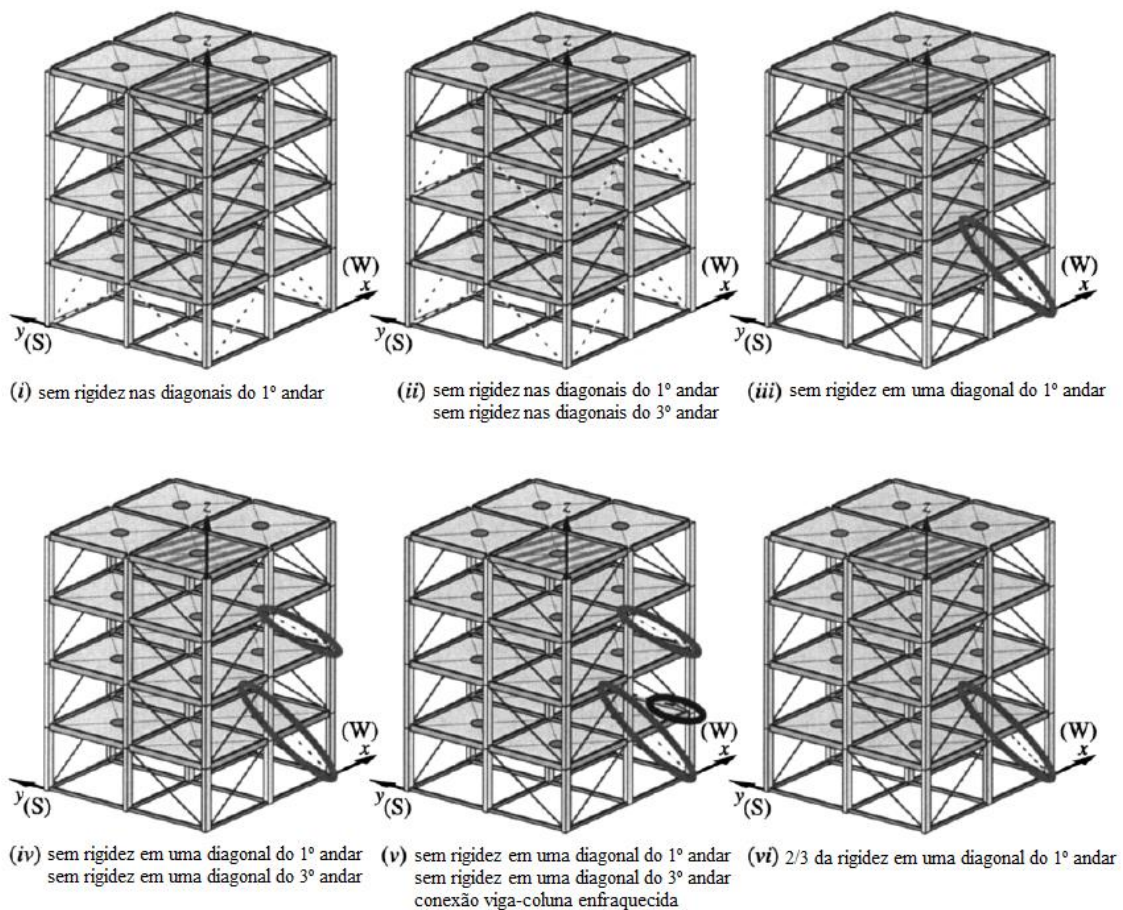
Dois modelos de elementos finitos foram desenvolvidos:

- ◆ O primeiro, simplificado, com 12 graus de liberdade (gdl), modela os pisos (lajes e vigas) como corpos rígidos capazes de se mover em translação nos eixos X e Y, e rotação θ em torno do centro do pavimento (3 gdl por andar). Os pilares foram modelados como vigas de Euler-Bernoulli e os contraventamentos como barras axiais.

- ◆ O segundo, mais refinado, com 120 gdl, foi utilizado para gerar os dados sintéticos, simulando medições mais realistas e incorporando erros de modelagem. Nesse modelo, os painéis de laje horizontais contribuem apenas para a rigidez no plano, fazendo com que o piso se comporte como corpos rígidos no interior do pavimento. Dessa forma, as translações horizontais (nos eixos X e Y) e a rotação em torno do eixo vertical (Z) são consideradas iguais para os nove nós de cada pavimento. Os demais graus de liberdade, fora do plano – ou seja, a translação vertical e as duas rotações associadas ao rolamento dos pisos – permanecem ativos em cada nó, totalizando 3 gdl por nó em cada andar.

Seis padrões de danos foram definidos na Fase Analítica I, conforme ilustrado na Figura 4.54.

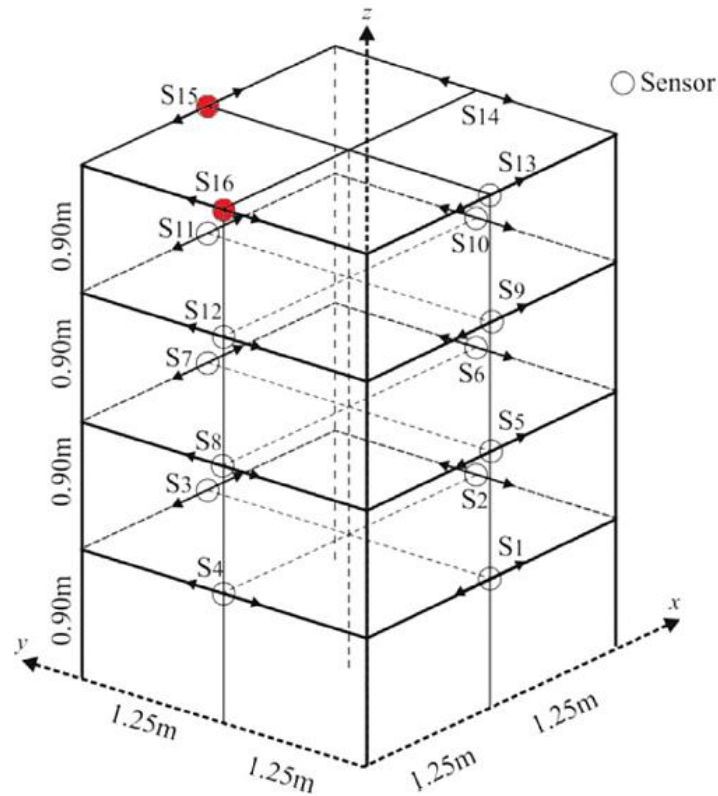
Figura 4.54 – Padrões de danos da Fase Analítica I do *Benchmark IASC-ASCE* referência.



Fonte: Adaptado de Sanchez et al., 2020.

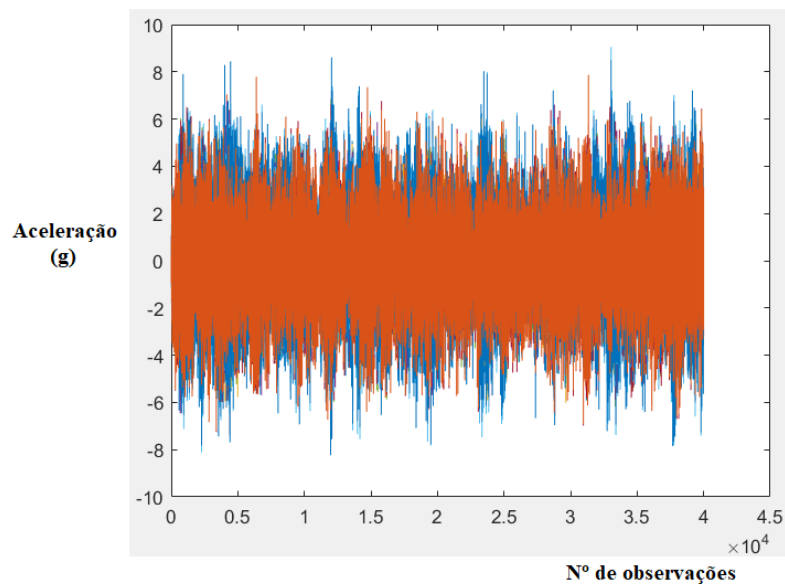
A aquisição dos sinais de vibração foi feita através de 16 sensores, distribuídos em quatro por andar, conforme apresentado na Figura 4.55. Um exemplo dos sinais simulados pode ser visualizado na Figura 4.56, que mostra as acelerações obtidas ao longo do tempo.

Figura 4.55 – Localização dos sensores.



Fonte: Sanchez et al., 2020.

Figura 4.56 - Exemplo de ensaio de vibração simulado no FEA para o *Benchmark* IASC-ASCE, contendo os registros dos acelerômetros 15 e 16.



Fonte: Autor.

Johnson et al. (2002) disponibiliza no FEA desenvolvido a opção de 5 casos com diferentes considerações quanto ao modelo utilizado, o tipo de excitação, de

carregamento, entre outras propriedades. Tais casos e suas considerações são relatadas na Figura 4.57 a seguir.

Figura 4.57 – Matriz de casos de simulação do *Benchmark* IASC-ASCE SHM Fase I.

ASCE Benchmark Problem: DATA Generation Program
CASE 1: 12-DOF (symmetric), load at all stories
CASE 2: 120-DOF (symmetric), load at all stories
CASE 3: 12-DOF (symmetric), load at roof
CASE 4: 12-DOF (unsymmetric), load at roof
CASE 5: 120-DOF (unsymmetric), load at roof
QUIT

Fonte: Adaptado de Johnson et al. (2002).

Neste trabalho, foi adotado o Caso 3, descrito por Johnson et al. (2002), que utiliza:

- ◆ Um modelo simplificado de pisos rígidos (12gdl);
- ◆ Distribuição de massa simétrica;
- ◆ Excitação aplicada por um vibrador diagonal no telhado, utilizando ruído branco com RMS igual a 10% do RMS do sinal mais forte, adicionado a cada um dos canais de saída;
- ◆ Filtro *butterworth* passa-baixa de 6ª ordem com um corte de 100 Hz;
- ◆ Quatro sensores por andar;
- ◆ Excitação desconhecida (entrada não medida).

A resposta estrutural foi gerada com parâmetros similares aos estabelecidos por Sanchez et al. (2020, 2022), utilizando uma frequência de amostragem de 1000 Hz, uma taxa de amortecimento modal de 1% para todos os modos, porém alterando o tempo de aquisição utilizado, de 40 segundos para 90 segundos. Para cada estado de dano foram simulados nove ensaios independentes, utilizando diferentes sementes aleatórias para gerar variações nos ruídos e excitações. Posteriormente, os nove ensaios de 90 segundos, foram divididos em quatro diferentes tamanhos de janelas de corte (10, 15, 30 e 45 segundos), para posterior análise quanto a identificação dos estados estruturais.

A Tabela 4.20 apresenta um resumo dos diferentes estados estruturais abordados para essa estrutura.

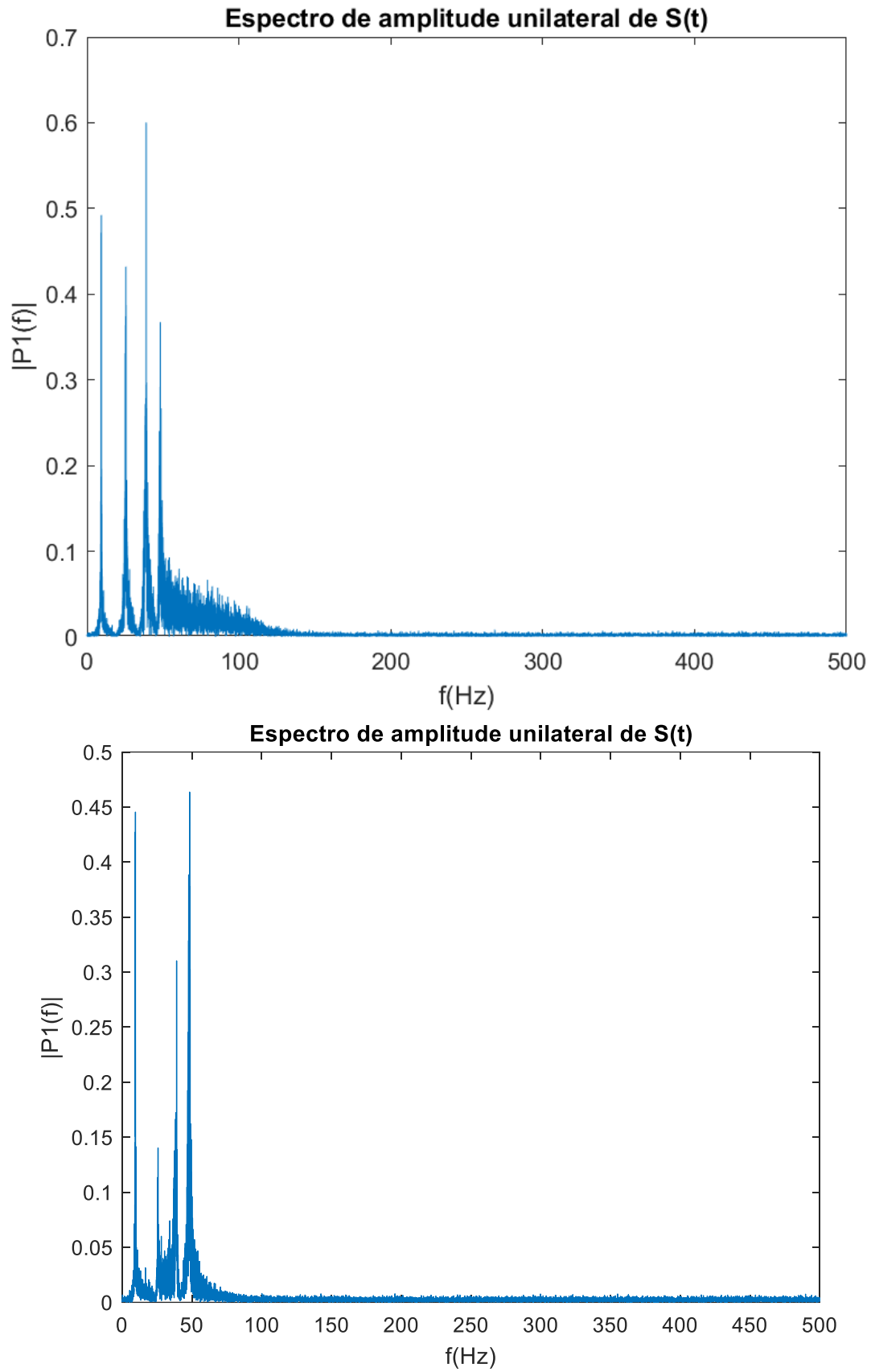
Tabela 4.20 – Identificação dos dados de análise quanto aos estados estruturais do *Benchmark* IASC-ASCE.

NÍVEL	DANO IMPOSTO
0	Sem dano
1	Sem rigidez nas diagonais do primeiro andar.
2	Sem rigidez nas diagonais do primeiro e terceiro andar.
3	Sem rigidez em uma diagonal do primeiro andar.
4	Sem rigidez em uma diagonal do primeiro e uma do terceiro andar.
5	Sem rigidez em uma diagonal do primeiro, uma do terceiro andar e enfraquecimento de uma conexão viga-coluna.
6	Sem 2/3 da rigidez de uma diagonal no 1º andar.

Fonte: Autor.

No contexto de danos estruturais progressivos, foram estabelecidas duas sequências a serem analisadas: a primeira com foco em danos mais significativos (0,1,2) e a segunda em danos menores (0,6,3,4,5).

Por fim, a Figura 4.58 apresenta o espectro da frequência da estrutura intacta e Tabela 4.21 as três primeiras frequências identificadas através dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT) para cada um dos estados estruturais.

Figura 4.58 – Espectro da Frequência do *Benchmark IASC-ASCE*.

Fonte: Autor.

Tabela 4.21 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural do *Benchmark* IASC-ASCE.

Frequências Naturais (Hz) – <i>Benchmark</i> IASC-ASCE			
Dano / Freq.	1ª Frequência	2ª Frequência	3ª Frequência
Intacta	9,467	16,7	25,67
s/ rigidez nas diagonais do 1º andar	6,167	11,77	21,43
s/ rigidez nas diagonais do 1º e do 3º andar	5,83	14,93	35,63
s/ rigidez em um diagonal do 1º andar	8,967	15,97	24,8/38,1
s/ rigidez em uma diagonal do 1º e 3º andar	8,867	15,93	24,67
s/ rigidez em uma diagonal do 1º e 3º andar e uma conexão viga coluna enfraquecida	8,833	15,83	24,53
2/3 da rigidez em uma diagonal do 1º andar	9,2	16,37	25,1

Fonte: Autor.

4.5 PONTE FERROVIÁRIA KW51

A Ponte ferroviária KW51 (Figura 4.59) é uma estrutura metálica em arco, com 115 metros de comprimento e 12,4 metros de largura, localizada na linha ferroviária L36N, entre as cidades de Leuven e Bruxelas, na Bélgica. Inaugurada em 2003, a ponte cruza o canal Leuven-Mechelen e é composta por duas vias curvas eletrificadas com lastro, destinadas ao tráfego de trens de passageiros, com velocidade máxima de 160 km/h.

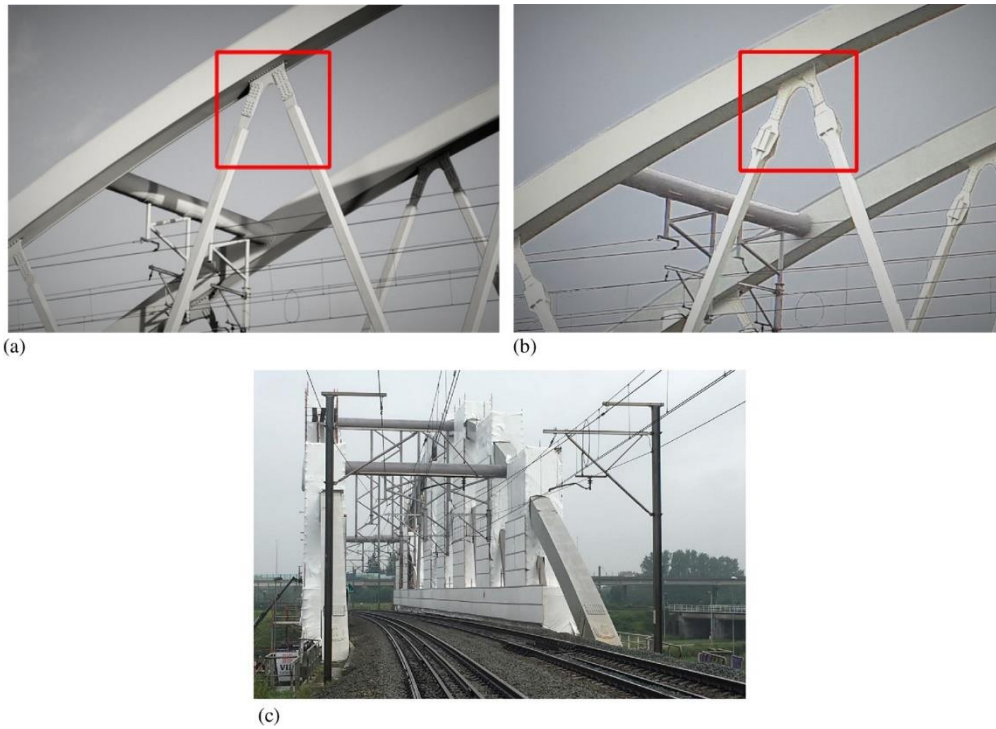
Figura 4.59 – Ponte Ferroviária KW51.



Fonte: Ovmonitoring, 2025.

Lombaert e Maes (2021) apresentam um conjunto de dados obtidos a partir de uma campanha de monitoramento de 15 meses, iniciada em 2 de outubro de 2018 e encerrada no dia 15 de janeiro de 2020, abrangendo o período de reforma da ponte, ocorrido entre 15 de maio e 7 de setembro de 2019. Durante essa intervenção, as conexões das diagonais que ligam o tabuleiro aos arcos foram reforçadas após a identificação de danos, conforme ilustra a Figura 4.60.

Figura 4.60 – Reforço nas conexões das diagonais. (a) Ligações originais; (b) ligações reforçadas; (c) andaimes instalados na ponte durante a reforma.



Fonte: Lombaert e Maes, 2021.

O monitoramento compreendeu medições de aceleração no tabuleiro e nos arcos da ponte, deformações no tabuleiro e nas diagonais, deformações nos trilhos, deslocamento nos mancais, além de temperatura e umidade relativa. Contudo, nesta pesquisa serão analisadas exclusivamente as acelerações, conforme o foco do estudo. As demais medições estão detalhadas em Maes e Lombaert (2021), com os dados disponibilizados em Maes e Lombaert (2020).

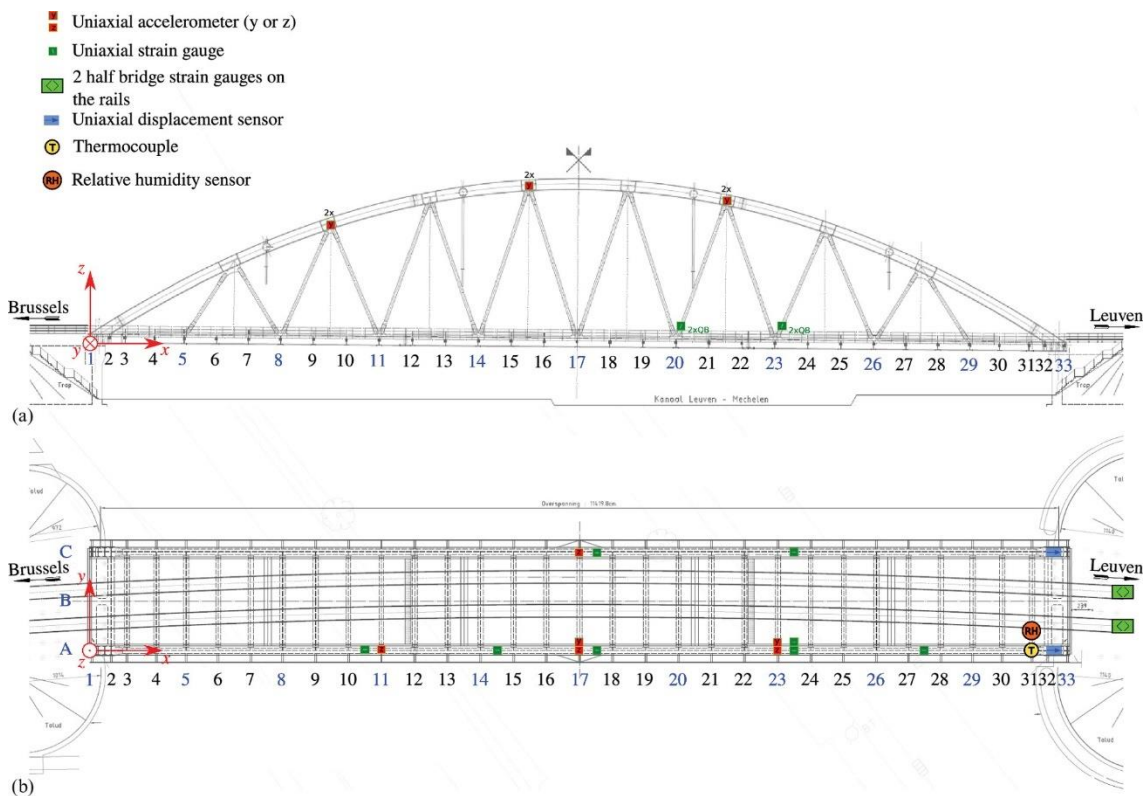
Os dados de aceleração referem-se a duas passagens de trem e seis períodos de vibração ambiente por dia, abrangendo diferentes estados da estrutura – antes, durante e após a reforma. No presente trabalho, serão utilizados apenas os dados associados às passagens de trem, uma vez que esse tipo de excitação gera respostas dinâmicas com amplitudes significativamente maiores e espectros mais definidos, favorecendo a identificação e comparação das propriedades dinâmicas da estrutura.

As passagens foram identificadas automaticamente por meio de software, com base no valor móvel da raiz quadrada média (RMS) da aceleração registrada por um dos sensores (aBD11Az), com limiar de $0,04 \text{ m/s}^2$. Para cada dia em que a ponte esteve em operação, são disponibilizadas duas passagens: a primeira após as 9h e a segunda após as 18h, considerando o Horário da Europa Central (CET), correspondente a UTC+1 durante o inverno e UTC+2 durante o verão. Cada registro de vibração compreende uma janela de

tempo iniciada 10 segundos antes da entrada do trem na ponte e finalizada 30 segundos após sua saída.

As acelerações do tabuleiro e dos arcos foram medidas por meio de 12 acelerômetros uniaxiais do tipo PCB 393B04, com sensibilidade de aproximadamente 1.000mV/g, dispostos conforme a Figura 4.61. Os seis acelerômetros dos arcos foram instalados apenas após a realização dos reforços estruturais e, por essa razão, não foram utilizados na presente análise.

Figura 4.61 – Visão geral da configuração de medição. (a) Sensores instalados nas diagonais e arcos (vista lateral); (b) Sensores instalados no tabuleiro da ponte (vista superior).



Fonte: Maes e Lombaert, 2021.

Os seis acelerômetros instalados no tabuleiro foram posicionados no flange inferior das vigas principais, nas intersecções com as vigas transversais (Figura 4.62). Destes, quatro registram aceleração na direção vertical (z) e dois na direção lateral (y).

Figura 4.62 – Acelerômetro aBD17Az e aBD17Ay.

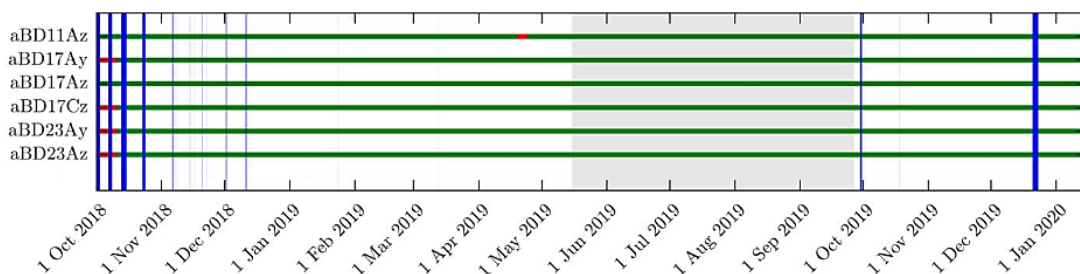


Fonte: Maes e Lombaert, 2021.

Os rótulos dos canais de medição seguem nomenclatura $aBD\alpha\beta\gamma$, onde $\alpha\alpha$ indica a posição ao longo da direção longitudinal (01 a 33), β indica a posição na direção lateral (A ou C), e γ representa a direção de medição (y ou z).

A aquisição dos sinais de aceleração foi realizada com módulos NI 9234, com resolução de 24 bits e faixa de ± 5 V. Os dados foram amostrados a 1.651,6 Hz e, posteriormente, decimados para 825,8 Hz, após a aplicação de filtros passa-baixa e passa-alta que evitam aliasing e eliminam componentes de baixa frequência e ruído. Também foi realizada a remoção do valor médio dos sinais.

A Figura 4.63 fornece uma visão geral da operação dos acelerômetros no tabuleiro da ponte por meio de um gráfico de *Gantt*. Em verde estão indicados os períodos de operação normal dos sensores; em vermelho, os períodos em que o sensor esteve ausente ou apresentou mau funcionamento; e, em azul, os períodos de interrupção na aquisição. A fase de intervenção estrutural está representada por um sombreamento cinza.

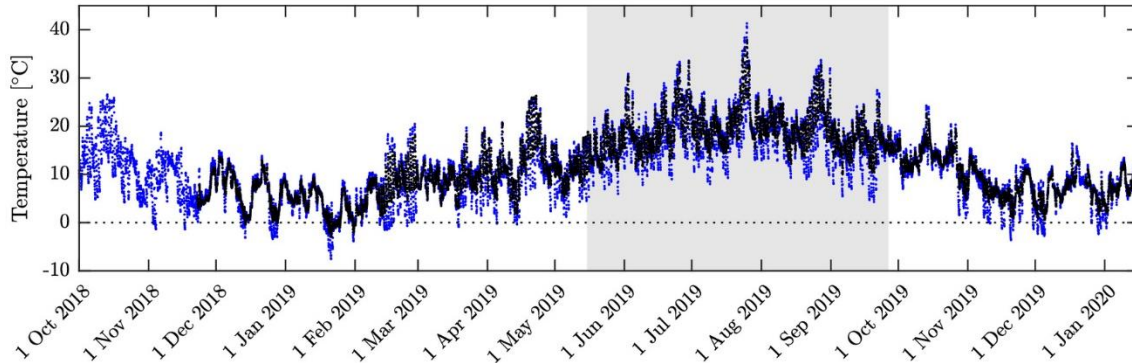
Figura 4.63 – Gráfico de *Gantt* da operação dos acelerômetros no tabuleiro da ponte ferroviária KW51.

Fonte: Adaptado de Maes e Lombaert, 2021.

Considerando que a Bélgica apresenta ampla variação térmica ao longo do ano, adotou-se como critério a seleção de dados correspondentes a diferentes estados estruturais, porém com gradientes térmicos semelhantes. Essa estratégia visa minimizar a influência da temperatura sobre os parâmetros dinâmicos analisados. Assim, os dados utilizados

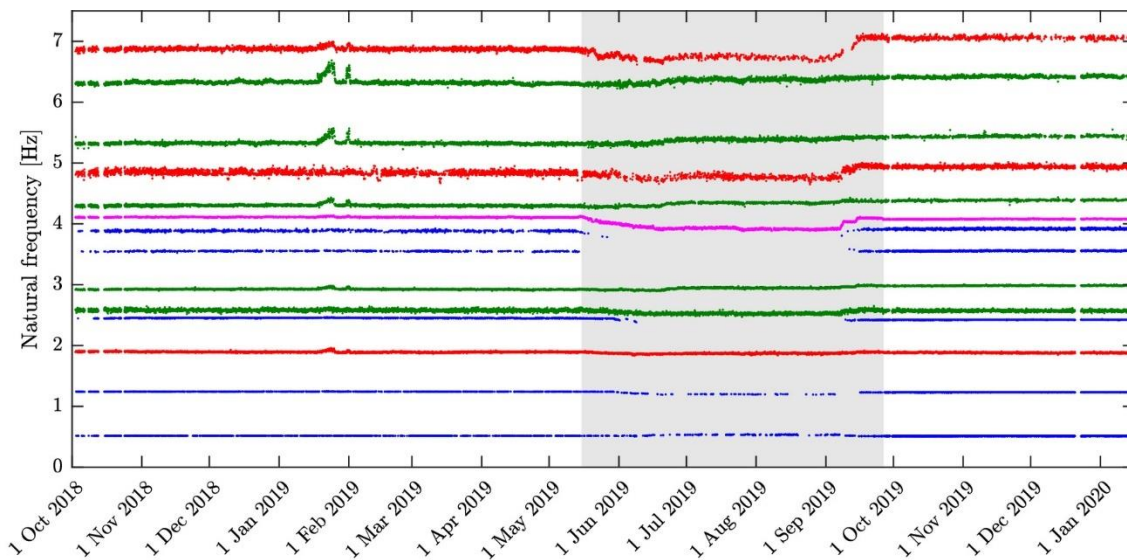
nesta pesquisa referem-se aos meses de dezembro de 2018 (antes do reparo) e dezembro de 2019 (após o reparo), cujos históricos de temperatura e evoluções das frequências estão apresentados nas Figuras 4.64 e 4.65.

Figura 4.64 – Histórico temporal da temperatura da superfície sob o tabuleiro da ponte (preto) e da temperatura do ar no Edifício Vliet (azul).



Fonte: Adaptado de Maes e Lombaert, 2021.

Figura 4.65 – Evolução das frequências naturais identificadas ao longo do tempo. Azul: modos laterais dos arcos; vermelho: modos laterais do tabuleiro; verde: modos verticais globais; magenta: modos torcionais globais.



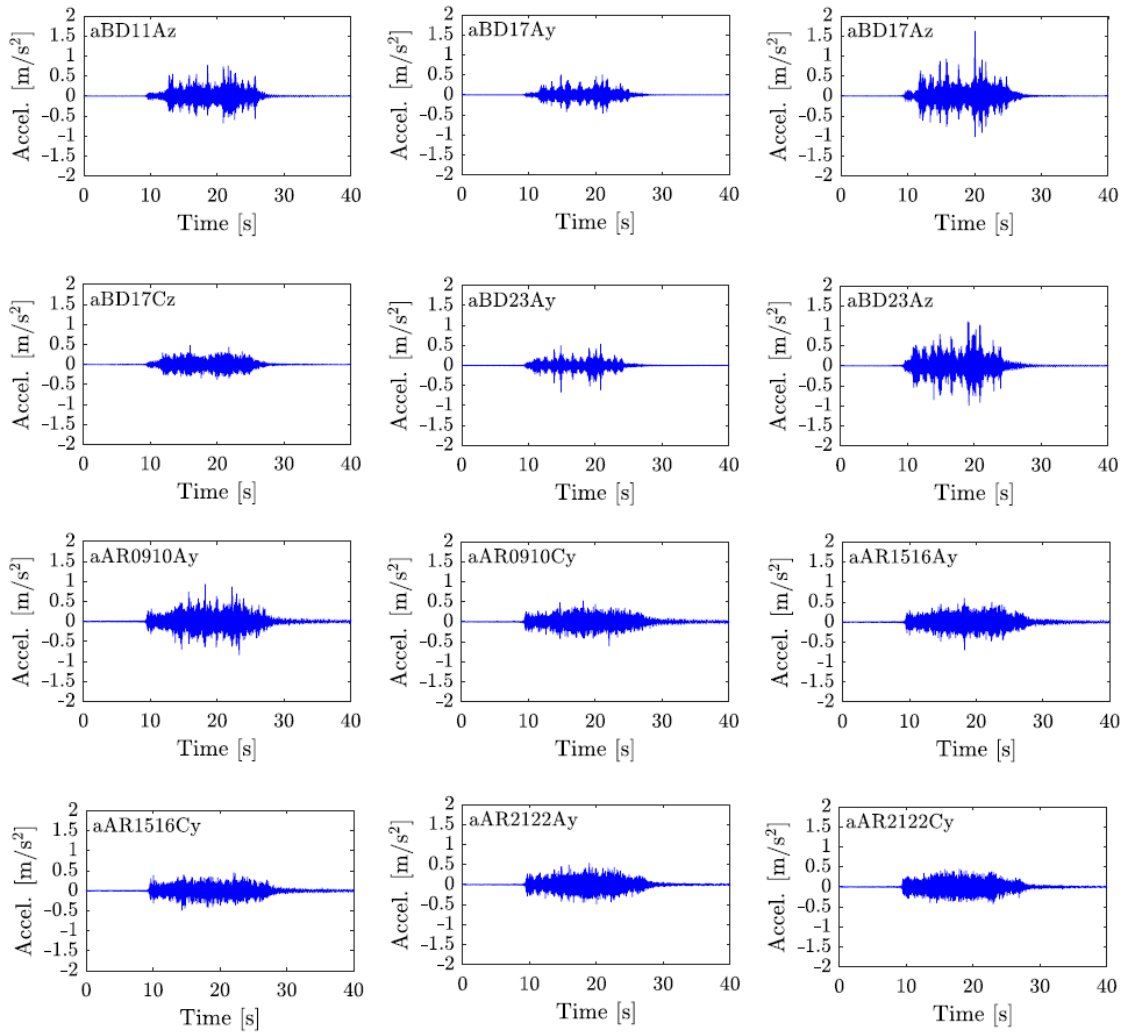
Fonte: Adaptado de Maes e Lombaert, 2021.

Nos meses de dezembro de 2018 e dezembro de 2019, foram registradas 60 e 56 passagens de trem, respectivamente. Para fins de análise comparativa, foram considerados dois estados estruturais distintos: antes do reparo (0) e após o reparo (1).

Devido ao grande volume de dados disponíveis, optou-se por utilizar apenas as acelerações medidas pelo sensor aBD17Az, posicionado no centro do vão da ponte (Figura 4.61). A escolha desse sensor se deve à sua presumida alta sensibilidade à resposta vertical da estrutura, decorrente de sua localização central. Esse comportamento esperado

é compatível com os resultados apresentados na Figura 4.66, na qual o sensor em questão registrou as maiores amplitudes de aceleração em comparação aos demais.

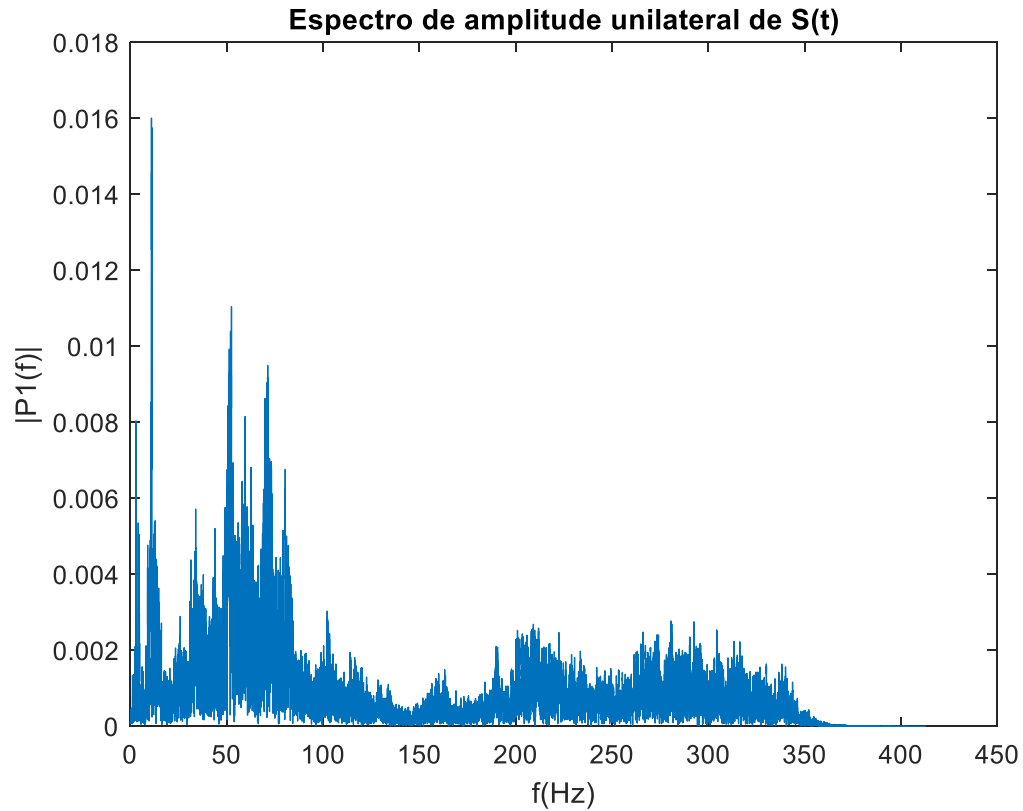
Figura 4.66 – Dados de aceleração correspondentes à passagem de um trem em 4 de novembro de 2019, às 8:01:20 (UTC).



Fonte: Lombaert e Maes, 2021.

Por fim, a Figura 4.67 apresenta o espectro da frequência da estrutura intacta e Tabela 4.22 as três primeiras frequências identificadas através dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT) para cada um dos estados estruturais.

Figura 4.67 – Espectro da Frequência da Ponte Ferroviária KW51.



Fonte: Autor.

Tabela 4.22 – Três primeiras frequências para cada estado estrutural da Ponte Ferroviária KW51.

Frequências Naturais (Hz) – Ponte Ferroviária KW51			
Reparo / Freq.	1ª Frequência	2ª Frequência	3ª Frequência
Antes do reparo	2,91	6,29	11,25
Após o reparo	2,98	6,40	11,33

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS

Diferentemente das pesquisas abordadas na Revisão Bibliográfica (Capítulo 2) ou na Fundamentação Teórica (Capítulo 3), esta tese não propõe, de imediato, um conjunto fixo de parâmetros a serem combinados para a classificação dos estados estruturais. Em vez disso, são avaliados diversos parâmetros nos domínios do tempo e da frequência, considerando-se o desempenho individual de cada um.

Para essa análise, foi desenvolvido um algoritmo no ambiente MATLAB (MATHWORKS, 2019), responsável pelo cálculo dos parâmetros estatísticos dos registros de aceleração das estruturas descritas no Capítulo 4, em seus diferentes estados estruturais e domínios de análise. Os parâmetros utilizados estão resumidos na Seção 3.1.5 e listados nas Tabelas 3.1 a 3.4.

A fim de serem corretamente processados pelo algoritmo, os dados de aceleração precisaram ter sua nomenclatura e organização padronizadas, conforme as características e variáveis específicas de cada estrutura. Na maioria dos casos, os registros foram ainda particionados em segmentos menores – janelas temporais ou trechos contendo apenas um impacto, a depender do tipo de excitação – com o objetivo de aumentar o número de ensaios e/ou repetições disponíveis para posterior classificação dos estados estruturais.

Detalhes sobre a nomenclatura dos arquivos, as características dos dados e os critérios de particionamento podem ser consultados no Apêndice A, tomando como referência a natureza dos dados já descrita no Capítulo 4.

Após o pré-processamento, foram gerados boxplots para os registros de aceleração, organizados por estrutura, tipo de excitação e estado estrutural. Esses gráficos estão apresentados no Apêndice B, e os principais comentários, referentes aos dados brutos, estão reunidos na Seção 5.1.

Cabe destacar que, embora o algoritmo calcule os parâmetros para todos os sensores de resposta das estruturas, esta análise considera apenas um acelerômetro por estrutura. Essa escolha justifica-se pelo elevado volume de dados e pela necessidade de racionalização das análises. Foram selecionados os sensores que, em avaliações preliminares, apresentaram maior sensibilidade às mudanças estruturais ou que, como no caso da ponte ferroviária, apresentam maior potencial de resposta.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo das principais análises realizadas, abrangendo todos os estados de dano considerados para cada estrutura, conforme as diferentes variações

adotadas. São discriminados o identificador da análise (Id.), o número identificador do acelerômetro analisado (acc), o tipo de excitação aplicada, os níveis de dano ou estados estruturais considerados (nd), o número de repetições por estado (δ) e a quantidade de intervalos de frequência determinado pela regra de Sturges (k), conforme estabelecido na Equação (3.4).

Tabela 5.1 – Características das análises principais.

Análises Principais								
Id.	acc	Estrutura	Excitação	Danos avaliados	nd	Ensaio s (δ)	Sturges (k)	
A	1	Viga Biapoiada	Impacto	0-500(g)-12-16-22,5-32(mm)	6	180	16	
B	5		Shaker				17	
C	1	Shear Building – Fase I	Impacto 20s	0-0,5-1-2-5-6(kg)	6	11	15	
D			Impacto 10s	0-0,5-1-2-5-6(kg)	6	22	14	
E			Impacto 10s	10 ^o -8 ^o -6 ^o -4 ^o -2 ^o (andar)_5kg	5	11	15	
F	1	Shear Building – Fase II	Impacto 10s	0-130-220-500(g)-1-2-3-5-6(kg)	9	44	14	
G			Shaker X					45
H			Shaker 45 ^o					
I	2	Pá Eólica	Impacto 10s	0-10-15-30-70-130-220-430(g)	8	44	15	
J				C-D-E-F-G-H-J-L(local)_30g				22
K				E-F-G-H-J-L(local)_220g				6
L			Impacto 20s	0-10-15-30-70-130-220-430(g)	8	22	15	
M	16	Benchmark	Shaker	0-Todas 1 ^o -Todas 1 ^o e 3 ^o	3	27	16	
N				0- 2/3.1 ^o - 1.1 ^o - 1.1 ^o +3 ^o - 1.1 ^o +3 ^o +vg				5
O	3	Ponte Ferroviária KW51	Trem	Antes do reparo – Após o reparo	2	56	17	

Fonte: Autor.

Em seguida, a Tabela 5.2 apresenta o tempo de processamento do algoritmo de cálculo dos parâmetros para cada uma das análises (Id). O algoritmo foi executado em um notebook Acer Predator PH315-52, equipado com processador IntelCore I7-9750H, 16 GB de memória RAM, placa de vídeo dedicada NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti e sistema operacional Windows 10 Home Single Language.

Os tempos variam conforme o número de ensaios (δ), sensores (na) considerados e observações por ensaio (quantidade de acelerações lidas por ensaio). O total de observações é dado pela multiplicação entre a quantidade de danos (nd), o número de

ensaios (δ), o número de sensores (n_a) e o número de acelerações lidas por sensor (Obs./ensaio).

Tabela 5.2 – Tempo de processamento do algoritmo de cálculo dos parâmetros.

Tempo de Processamento do Algoritmo de Parâmetros								
Id.	Estrutura	Excitação	nd	Ensaio (δ)	n_a	Obs./ensaio	Total obs.	Tempo
A	Viga Biapoiada	Impacto	6	180	6	20.000	$129,6 \cdot 10^6$	650 s
B		Shaker				40.000	$259,2 \cdot 10^6$	1328 s
C	Shear Building – Fase I	Impacto 20s	6	11	2	15.000	$1,98 \cdot 10^6$	14,38 s
D		Impacto 10s	6	22		8.000	$2,112 \cdot 10^6$	15,48 s
E			5	11		15.000	$1,65 \cdot 10^6$	11,95 s
F	Shear Building – Fase II	Impacto 10s	9	44	2	8.000	$6,336 \cdot 10^6$	39,95 s
G		Shaker X		45		5.000	$4,05 \cdot 10^6$	36,24 s
H		Shaker 45º				5.000	$4,05 \cdot 10^6$	35,95 s
I	Pá Eólica	Impacto 10s	8	44	2	8.000	$5,632 \cdot 10^6$	40,42 s
J				22		8.000	$2,816 \cdot 10^6$	20,40 s
K			6	22		8.000	$2,112 \cdot 10^6$	17,49 s
L			Impacto 20s	8		22	15.000	$5,28 \cdot 10^6$
M	Benchmark	Shaker	3	27	16	30.000	$38,88 \cdot 10^6$	193 s
N			5	27		30.000	$64,8 \cdot 10^6$	313 s
O	Ponte Ferroviária KW51	Trem	2	56	6	37.158	$24,97 \cdot 10^6$	129 s

Fonte: Autor.

Os maiores tempos de processamento foram observados nas análises da Viga Biapoiada, com duração de 10 minutos e 50 segundos (impacto) e, 22 minutos e 8 segundos (*shaker*), devido ao grande número de ensaios por sensor e à elevada quantidade de observações por ensaio. No entanto, de forma geral, o tempo de execução para as demais estruturas foi satisfatoriamente rápido.

Após o cálculo dos parâmetros, deu-se início à análise estatística formal para avaliar a eficácia de cada parâmetro na distinção entre os estados estruturais. Para isso, foi empregado o método de agrupamento de médias proposto por *Scott-Knott* (1974), implementado por meio do programa SISVAR (FERREIRA, 2011). Essa técnica permite verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos parâmetros, analisando-os individualmente.

O método foi escolhido por permitir quantificar a capacidade discriminativa individual de cada indicador estatístico, ao verificar se os estados estruturais formam grupos

distintos com base nas medidas estatísticas extraídas das acelerações, além de, garantir a alocação exclusiva de cada medida em um único grupo.

A organização da planilha de entrada utilizada no *software* SISVAR segue o formato exemplificado na Figura 5.1, na qual são apresentados os valores de cada parâmetro calculado para os ensaios realizados. Os parâmetros correspondentes aos ensaios de um mesmo estado de dano — ou de registros obtidos em uma mesma época de monitoramento de uma estrutura — são atribuídos a um mesmo tratamento (primeira coluna), e suas repetições são numeradas em ordem crescente (segunda coluna). A definição dos tratamentos pode se basear em estados de dano previamente conhecidos ou, em casos de análise cega, nas diferentes datas de aquisição dos dados.

Devido às limitações do programa quanto à leitura de caracteres especiais, ao número máximo de caracteres por campo, entre outras restrições, os nomes dos parâmetros calculados foram abreviados de modo a conter no máximo 12 caracteres, sem acentos, espaços ou símbolos especiais. Parâmetros iniciados por “T_” correspondem a métricas extraídas dos registros no domínio do tempo, enquanto aqueles iniciados por “F” referem-se a parâmetros calculados no domínio da frequência, seguidos por uma abreviação que identifica o tipo de parâmetro.

Figura 5.1 – Exemplo de planilha de entrada de dados no SISVAR.

TRATAMENTO	REPETICAO	T_MIN	T_MAX	T_1_QUARTIL	T_3_QUARTIL	T_MEDIA_ARIT	T_MEDIA_HARM
4	1	-12,68376446	17,5609951	-0,020044091	0,023215662	0,000445494	-0,029500216
4	2	-5,972362041	7,834311485	-0,018745312	0,02038618	-0,000445559	0
4	3	-21,13361549	29,35528183	-0,04871868	0,045735547	-6,61439E-05	-0,05424235
4	4	-15,86407185	18,83769989	-0,025418947	0,024192644	-0,000281086	0
4	5	-13,24856472	15,27827072	-0,023456284	0,01936861	-0,000727758	0
4	6	-11,78200626	13,28185749	-0,029022476	0,022960544	0,000271219	0
4	7	-13,45040226	16,38170433	-0,020986285	0,024815941	0,000302682	-0,149461335
4	8	-13,42192268	15,28090858	-0,02919642	0,02780777	-0,000345616	-0,087788719
4	9	-16,58663368	26,27611542	-0,033463834	0,031570749	-0,001558105	-0,232577596
4	10	-12,95800877	17,74386215	-0,019907835	0,022140111	-0,000735705	0
4	11	-15,17729092	21,88187408	-0,026355342	0,026433616	-0,000746786	-0,112428425
12	1	-25,84015083	45,34728241	-0,054737126	0,057824623	7,50139E-05	-0,095886916
12	2	-26,74099159	50,80288315	-0,035078607	0,036325205	0,000371093	0
12	3	-19,0883522	32,21777725	-0,02981102	0,030170503	0,000263604	-1,22568234
12	4	-47,19793701	93,38990784	-0,044857135	0,045033976	0,000142088	0
12	5	-23,11003685	49,81481552	-0,032539034	0,032243328	-0,000351673	-1,779746541
12	6	-24,32514763	39,66334915	-0,035849757	0,031953422	-0,000294223	0,052985773
12	7	-20,9908886	40,35630417	-0,029570397	0,030941653	0,000191617	0
12	8	-25,39679146	42,30798721	-0,0332551	0,033823317	-0,000303584	0,104272009
12	9	-22,36521149	45,66447449	-0,033005781	0,033455135	-0,000897792	0
12	10	-11,11689854	20,20316887	-0,021638573	0,022731518	0,000326626	0
12	11	-17,17689323	30,06705284	-0,026082831	0,026001656	-0,000156813	0

Fonte: Autor.

Por exemplo, os parâmetros T_MIN e T_MAX representam os valores mínimo e máximo das amostras; T_1_QUARTIL e T_3_QUARTIL correspondem ao primeiro e ao terceiro quartis; T_MEDIA_ARIT refere-se à média aritmética, e T_MED_HARM, à média harmônica. Todos esses valores são extraídos dos registros de aceleração no domínio do tempo, sendo calculados para cada repetição de ensaio correspondente a um mesmo tratamento.

Ainda que uma única planilha contenha os valores referentes a todos os parâmetros, para cada um dos ensaios, por domínio analisado, o teste de Scott-Knott é aplicado individualmente a cada parâmetro.

Após a análise das planilhas no *software*, os resultados são apresentados em forma de relatório, contendo a análise de variância (ANOVA) e os resultados do teste de agrupamento escolhido – neste caso, o teste de *Scott-Knott* com significância igual a 0,05 ($\alpha=5\%$) – para cada uma das variáveis (parâmetros) analisadas, conforme ilustrado na Figura 3.15. Quando o teste identifica diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, estes são classificados em grupos distintos. Caso contrário, ou seja, na ausência de diferenças significativas, os tratamentos são alocados em um mesmo grupo. Podendo haver mais de um tratamento (estado de dano, ou leituras em diferentes datas) em um mesmo grupo (grupos identificados como estatisticamente diferentes pelo teste), mas jamais um mesmo tratamento em mais de um grupo identificado, sendo característica fundamental do teste, garantir a alocação exclusiva de cada média entre os tratamentos a um único grupo identificado.

Entretanto, para que o teste *de Scott-Knott* seja aplicado, é necessário que ANOVA identifique variabilidade significativa entre os tratamentos e possa estimar o erro experimental. Caso uma variável apresente ausência de variabilidade, seja porque todos os valores observados são nulos ou constantes entre todas as repetições e tratamentos, o SISVAR não realiza a ANOVA e, conseqüentemente, não aplica o teste de agrupamento.

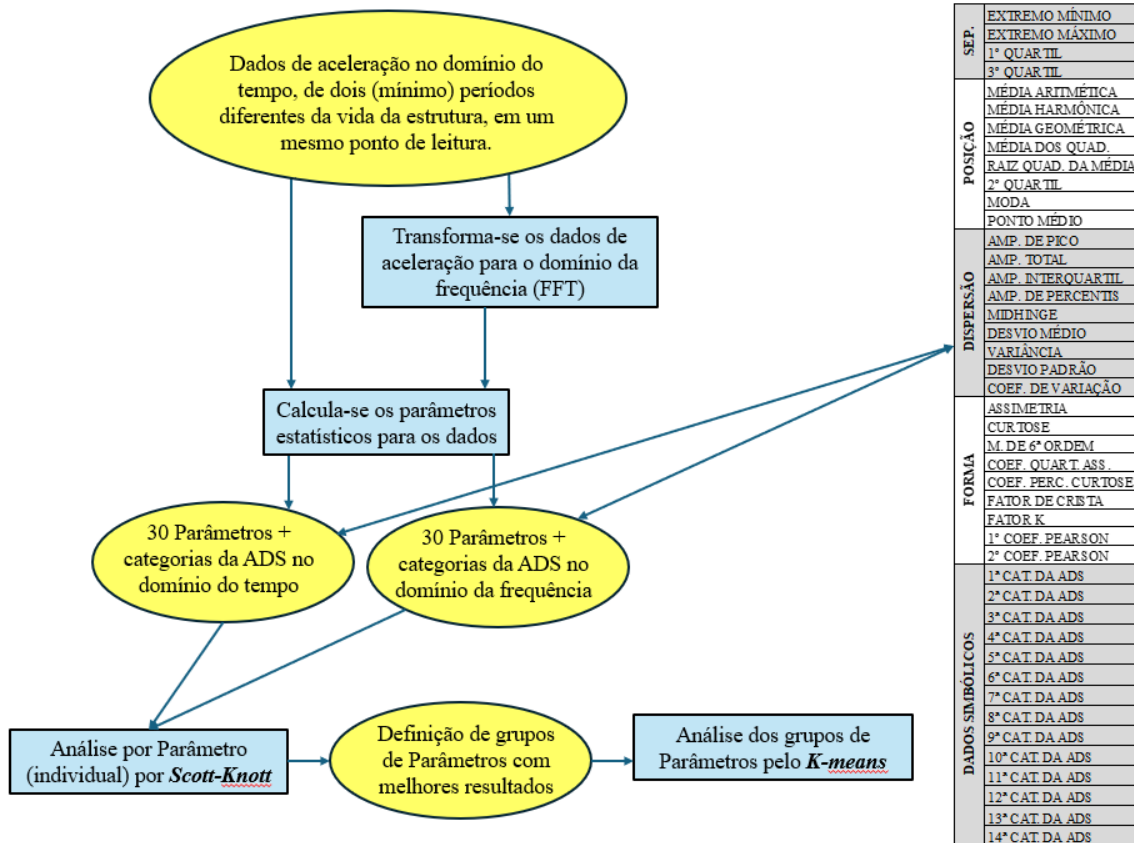
É importante destacar que não é necessário que todos os tratamentos apresentem valores nulos para que esse impedimento ocorra. Basta que a variável em questão não possua variação suficiente entre os grupos ou dentro dos grupos (repetições) para que a estatística F da ANOVA não possa ser calculada. Nesses casos, o *software* emite um alerta, informando a impossibilidade de realizar o teste devido à falta de variabilidade. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, quando uma das colunas de uma variável analisada contém muitos valores iguais a zero, como no caso apresentado na Figura 5.1.

As tabelas contendo os resultados dos testes aplicados nas diferentes análises encontram-se reunidas no Apêndice C e são discutidas na Seção 5.2. A Seção 5.3 apresenta um resumo da análise de tendência dos parâmetros com os gráficos dispostos nos Apêndices F e G, para os domínios do tempo e da frequência, respectivamente. A Seção 5.4 apresenta um resumo e uma discussão dos principais resultados das análises comparativas descritas na seção anterior, com destaque para a seleção de quatro grupos de parâmetros a serem analisados por meio do algoritmo *k-means* (análise multivariada), uma vez que o método de *Scott-Knott* (análise univariada) não é aplicável a essa abordagem.

Por fim, a Seção 5.5 apresenta os resultados da aplicação do algoritmo *k-means* aos parâmetros propostos, comparando-os com diversos parâmetros sugeridos por outros autores.

De forma resumida, Figura 5.2 apresenta um fluxograma da metodologia adotada na presente pesquisa. Tais etapas serão aplicadas aos dados das diversas estruturas abordadas anteriormente.

Figura 5.2 – Fluxograma da metodologia adotada.



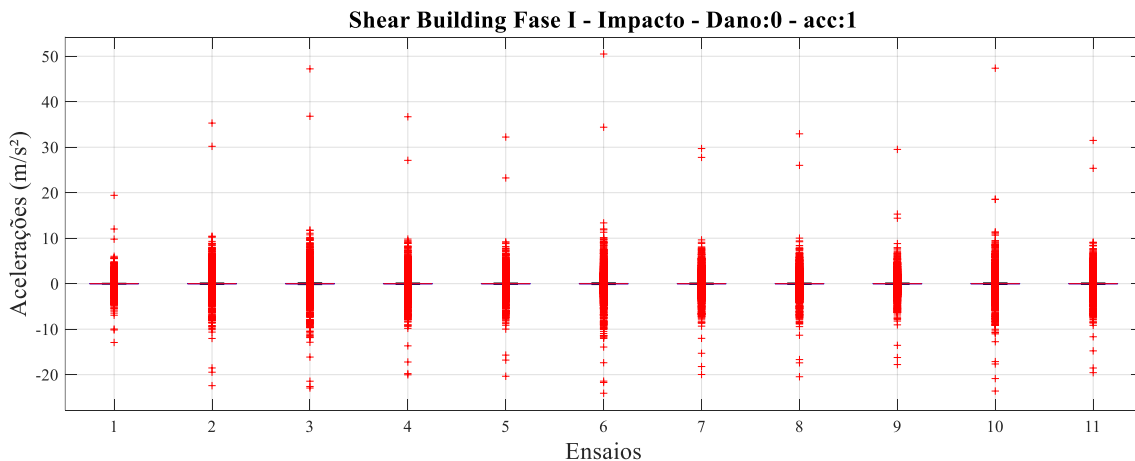
Fonte: Autor.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS BRUTOS

A análise exploratória dos sinais de aceleração obtidos nos experimentos começa com a interpretação dos boxplots apresentados no Apêndice B. Esses gráficos permitem observar padrões de simetria, variação e comportamento geral da resposta dinâmica das estruturas sob diferentes níveis de dano e excitação (PIANA et al., 2013).

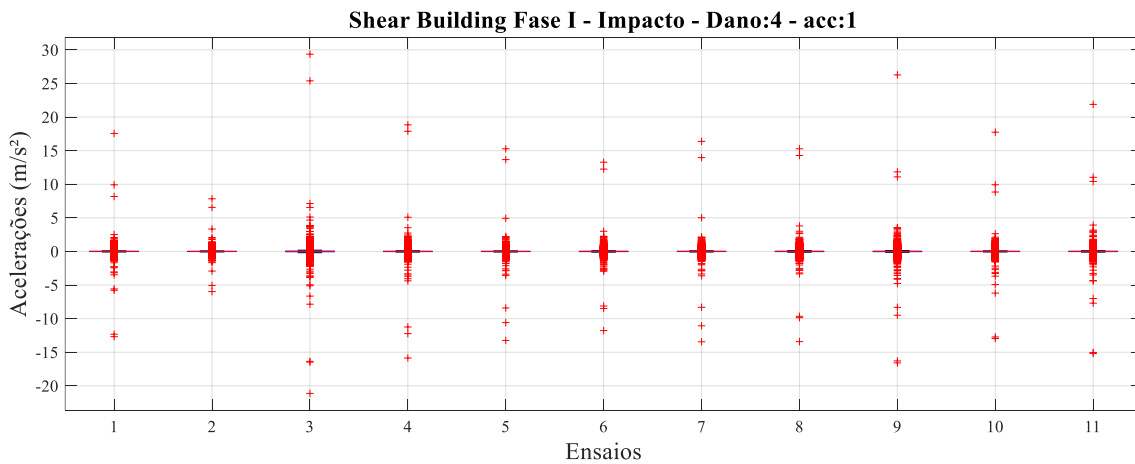
No *Shear Building* – Fase I, com impacto a cada 20 segundos (Figuras B.1 a B.6), os dados apresentam distribuição aproximadamente simétrica em torno de zero, com medianas centradas nas caixas e dispersão moderada e uniforme entre os ensaios (Figura 5.3 ou B.1). Esse padrão indica estabilidade na resposta da estrutura em condições semelhantes. A presença de outliers — tanto positivos quanto negativos — é notável, mas distribuída de forma aleatória, sem sugerir tendências específicas. Observa-se ainda que, à medida que a massa alocada aumenta (Figura 5.4 ou B.5), as amplitudes das respostas tendem a diminuir, possivelmente devido à maior inércia do sistema.

Figura 5.3 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

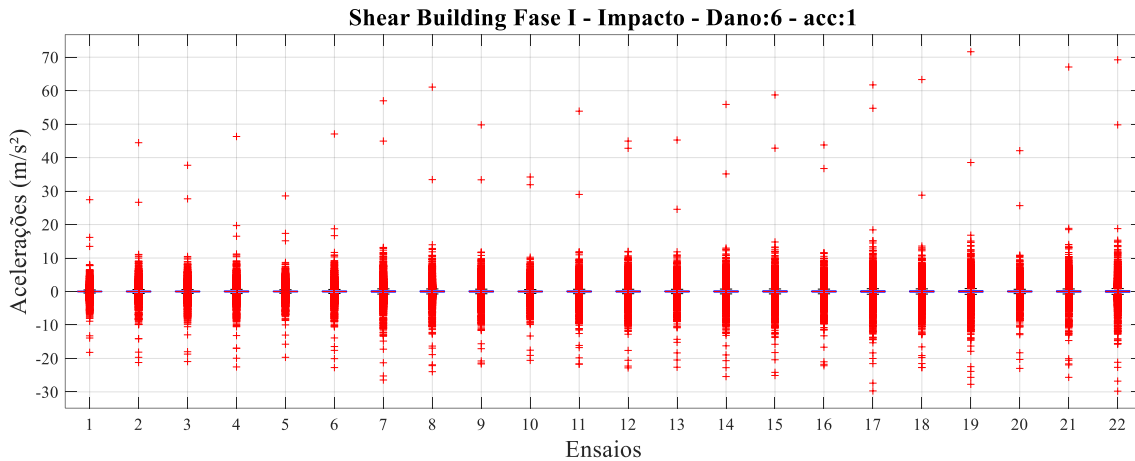
Figura 5.4 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 10º andar.



Fonte: Autor.

Nos ensaios com impacto a cada 10 segundos (Figuras B.7 a B.12), percebe-se um leve aumento no número de *outliers* positivos (Figura 5.5 ou B.7), indicando que a redução do intervalo entre excitações pode ter provocado pequenas variações nas respostas máximas. Ainda assim, a simetria e a consistência geral da distribuição permanecem preservadas.

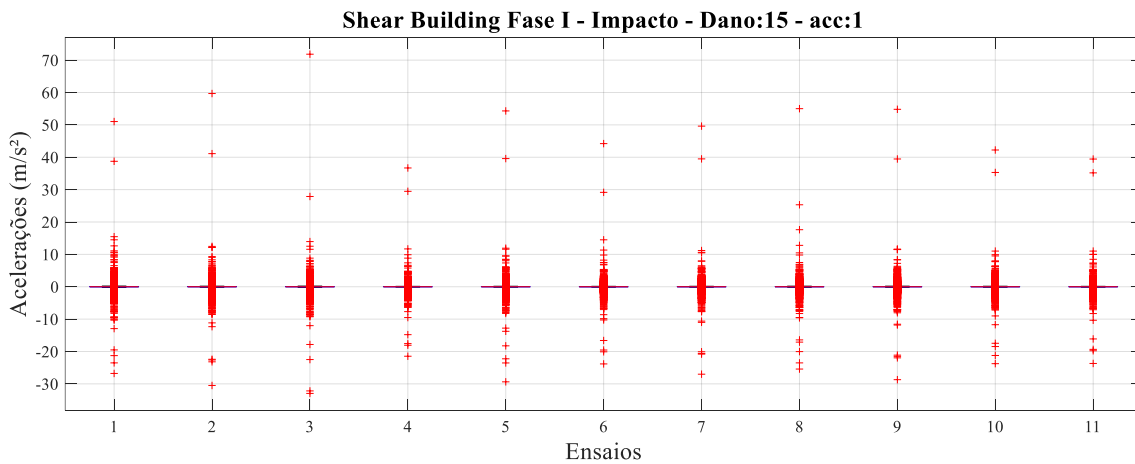
Figura 5.5 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

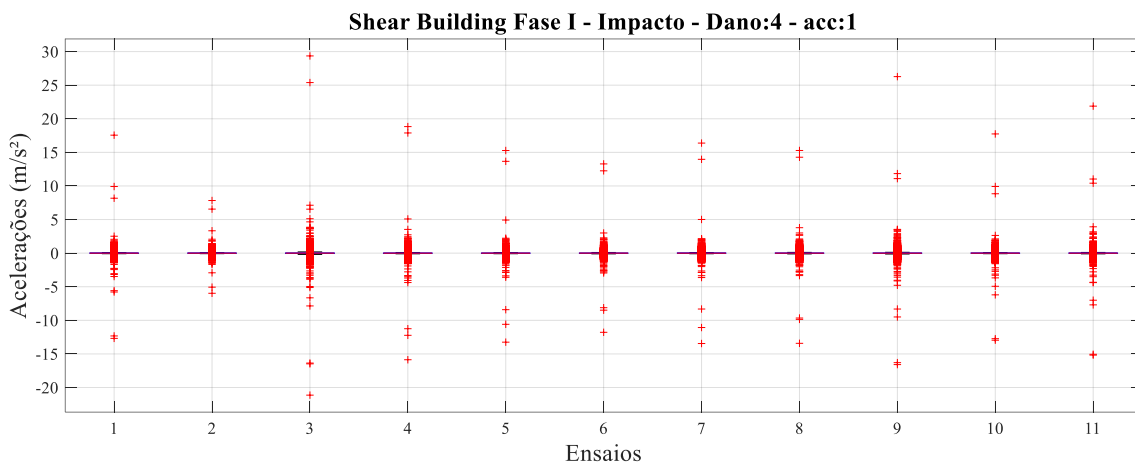
Ao se variar a posição da massa na estrutura (Figuras B.13 a B.16), verifica-se um aumento gradual da amplitude do sinal à medida que a massa se aproxima da base do edifício (Figuras 5.6 ou B.16 e 5.7 ou B.5). O comportamento geral se assemelha ao demais ensaios com impacto a cada 20 segundos, evidenciando que a localização da massa influencia diretamente a intensidade da resposta dinâmica.

Figura 5.6 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 2º andar.



Fonte: Autor.

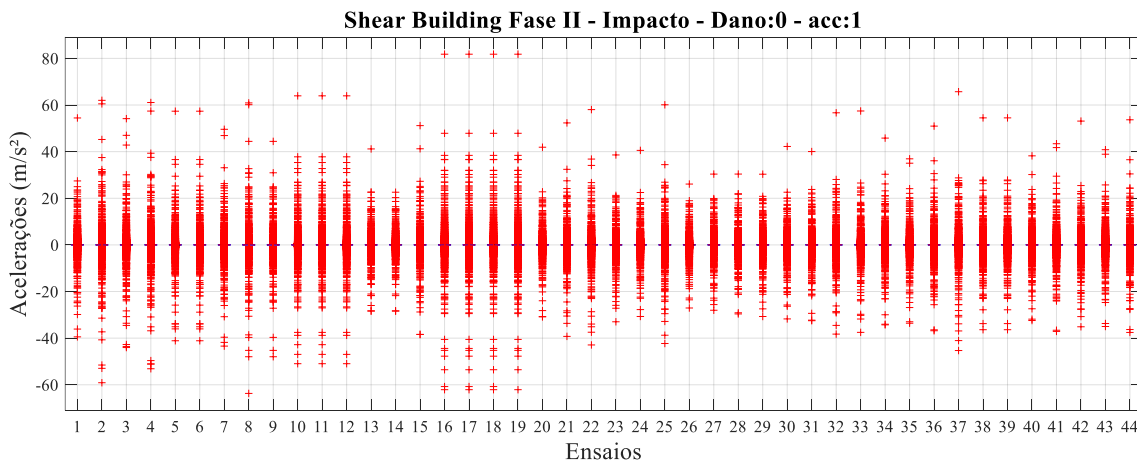
Figura 5.7 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 10º andar.



Fonte: Autor.

Para o *Shear Building* – Fase II, com excitação por impacto (Figuras B.17 a B.25), a simetria em torno de zero se mantém, mas há aumento na dispersão vertical e no número de outliers (Figura 5.8 ou B.17). As caixas se alongam visivelmente, sinalizando maior variabilidade nas respostas. Esse comportamento era esperado, pois o shaker apoiado sobre a estrutura atua como uma massa adicional, modificando a rigidez aparente do sistema.

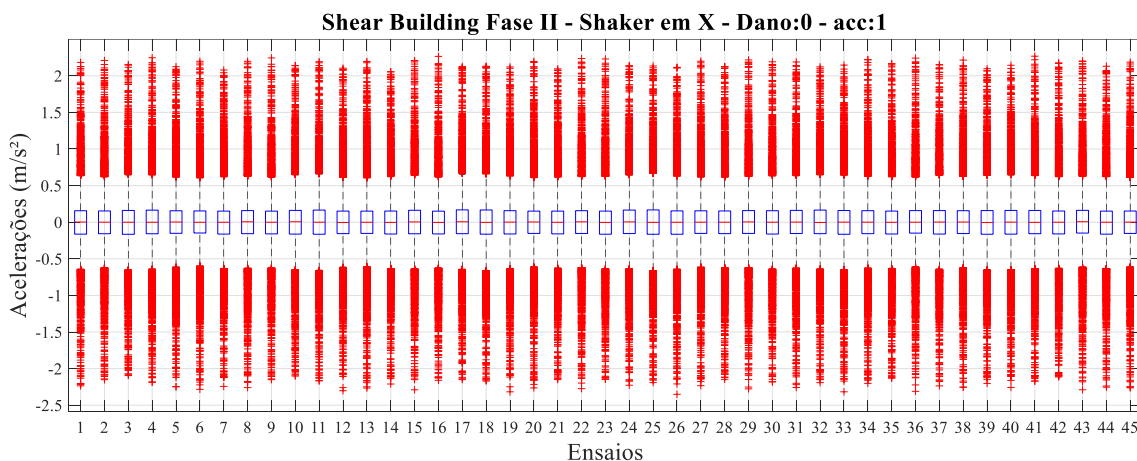
Figura 5.8 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

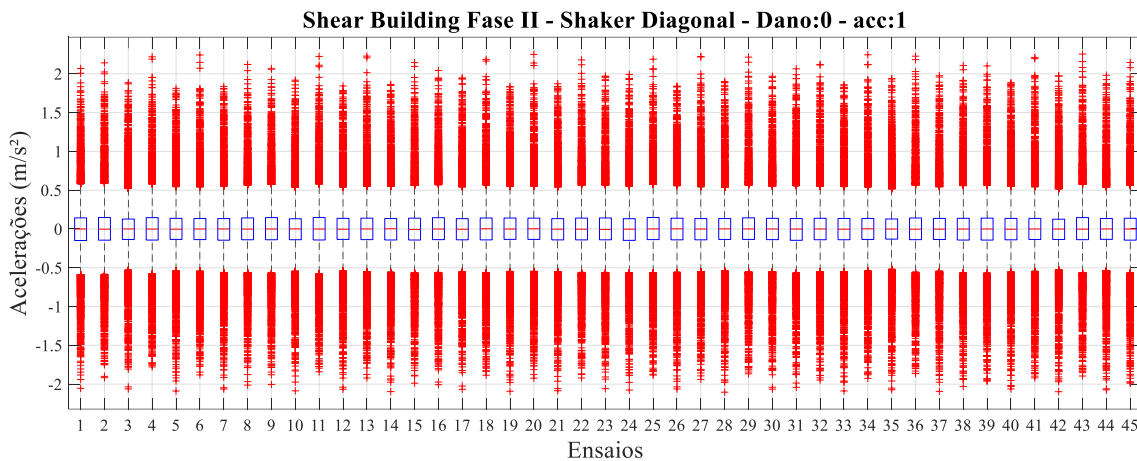
Sob excitação controlada por shaker com sinal senoidal (Figuras B.26 a B.34), o padrão muda: os boxplots tornam-se mais compactos, com amplitude interquartil reduzida e consistência entre ensaios (Figura 5.9 ou B.26). As medianas permanecem próximas de zero e a simetria é preservada. A regularidade das respostas reflete a natureza controlada da excitação. Quando o shaker é rotacionado para atuar na diagonal (Figuras B.35 a B.43), o comportamento permanece semelhante, com ligeira redução na amplitude das respostas (Figura 5.10 ou B.35).

Figura 5.9 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e a estrutura intacta.



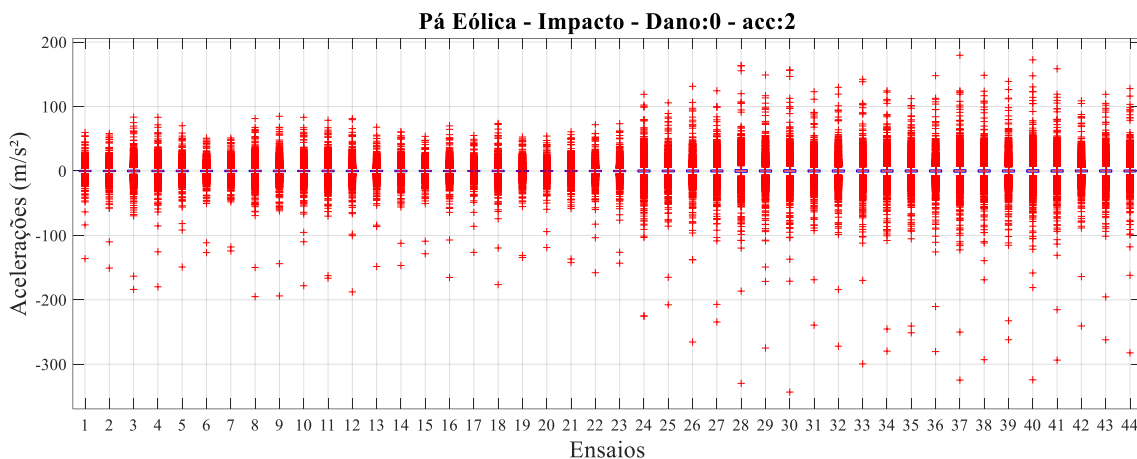
Fonte: Autor.

Figura 5.10 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e a estrutura intacta.



A Pá Eólica (Figuras B.44 a B.71) exibe maior dispersão em comparação às demais estruturas, com outliers negativos mais pronunciados. As caixas são visivelmente alongadas, mas ainda simétricas e centradas (Figura 5.11 ou B.44). Isso reflete uma maior variabilidade dinâmica, compatível com uma estrutura mais leve, flexível e menos rígida que o *Shear Building*.

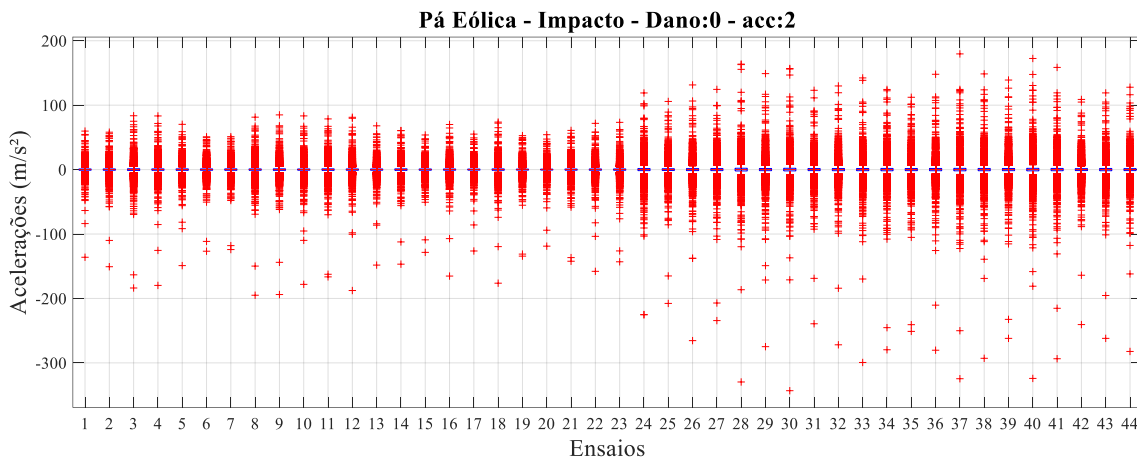
Figura 5.11 - Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

Um aspecto peculiar desses ensaios está nas Figuras B.44 e B.47 a B.51, nas quais os registros foram realizados em dois dias distintos (Figura 5.12 ou B.44). Com exceção do último (maior massa), os demais mostram diferenças claras entre os 22 primeiros e os 22 últimos ensaios: a segunda metade apresenta maior dispersão e número de *outliers*. Nas Figuras B.45 e B.46, em que todos os ensaios foram realizados no mesmo dia, esse comportamento não se repete. Essa diferença pode estar relacionada a variações experimentais entre os dias, como temperatura, umidade, fixação da estrutura, do sensor ou mesmo na aplicação dos impactos.

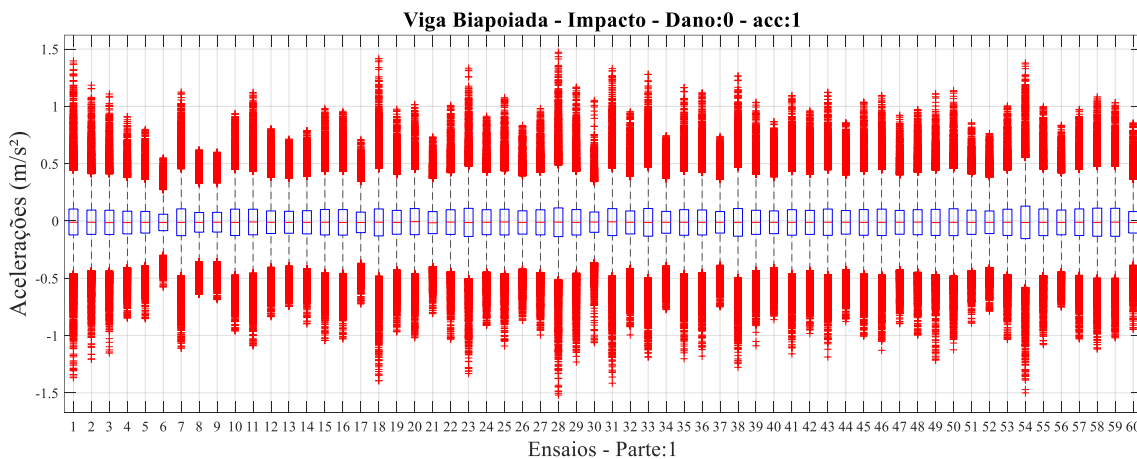
Figura 5.12 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

Os boxplots da Viga Biapoiada foram divididos em três partes devido ao grande número de ensaios. Sob excitação por impacto (Figuras B.72 a B.89), observa-se simetria em torno de zero, medianas centrais e dispersão relativamente estreita (Figura 5.13 ou B.72). A presença de outliers é regular e distribuída em ambas as direções. Um comportamento cíclico na dispersão, conhecido como *beating* (CELEBI, 2012), é evidente ao longo dos ensaios, possivelmente causado pelo curto intervalo entre impactos, que impede o amortecimento completo da estrutura e gera interferência entre vibrações consecutivas.

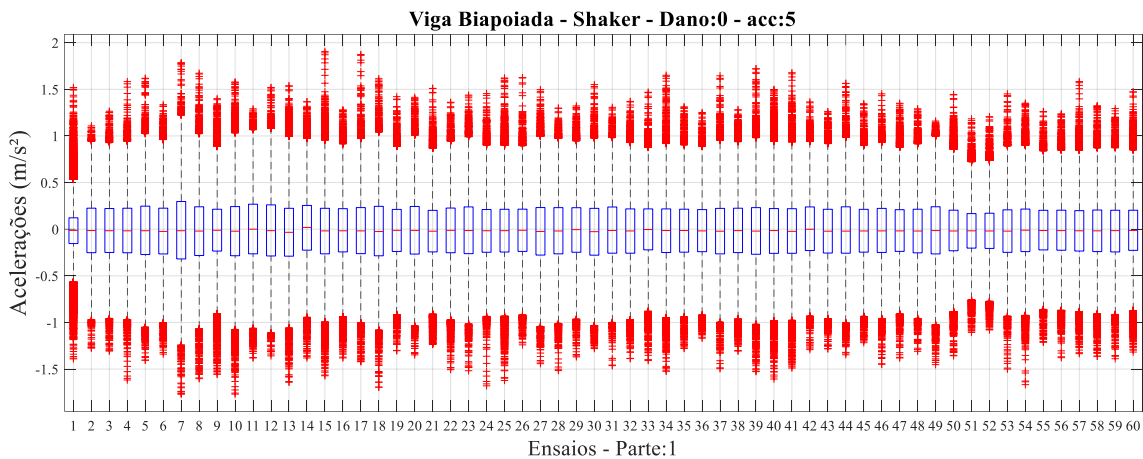
Figura 5.13 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

Sob excitação por shaker (Figuras B.90 a B.107), a resposta da viga se mostra estável: simétrica, com amplitude interquartil constante e presença moderada de *outliers* (Figura 5.14 ou B.90). Pequenas flutuações são observadas, mas não há modulação cíclica pronunciada como nos ensaios por impacto, refletindo o controle maior proporcionado pelo shaker.

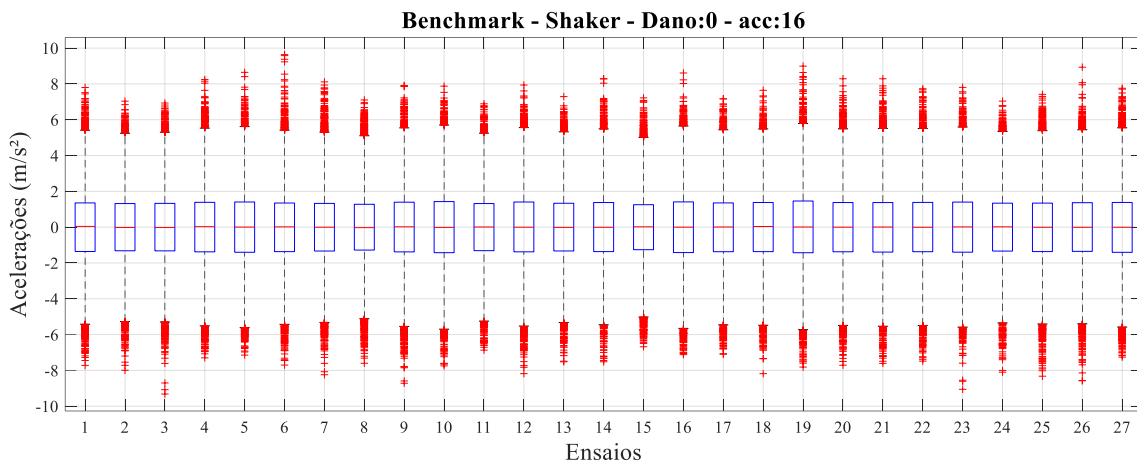
Figura 5.14 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e a estrutura intacta.



Fonte: Autor.

No Benchmark IASC-ASCE, as Figuras B.108 a B.114 revelam distribuição simétrica e mediana próxima de zero. A dispersão é pequena e constante, e a presença de *outliers* é limitada (Figura 5.15 ou B.108). Esses resultados reforçam a consistência dos dados sintéticos sob condições controladas.

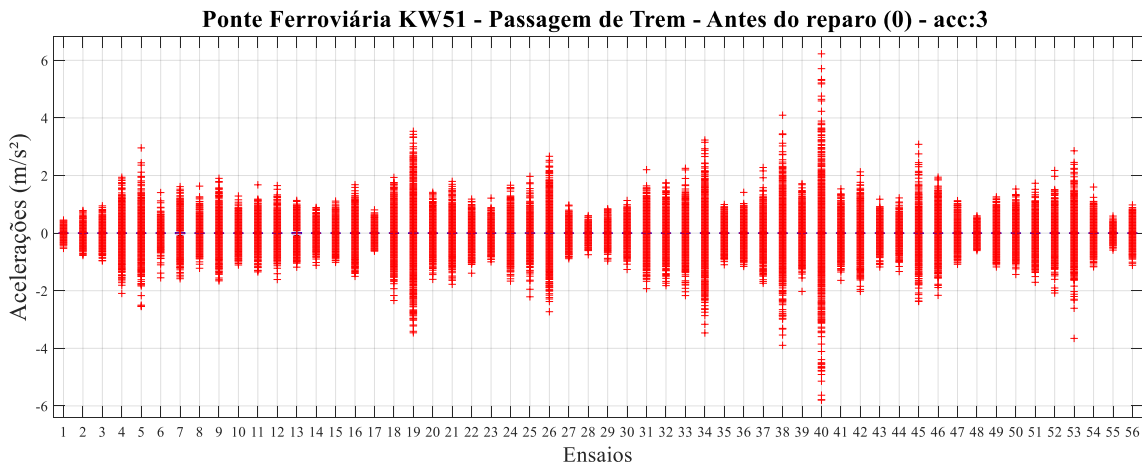
Figura 5.15 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, para estrutura intacta.



Fonte: Autor.

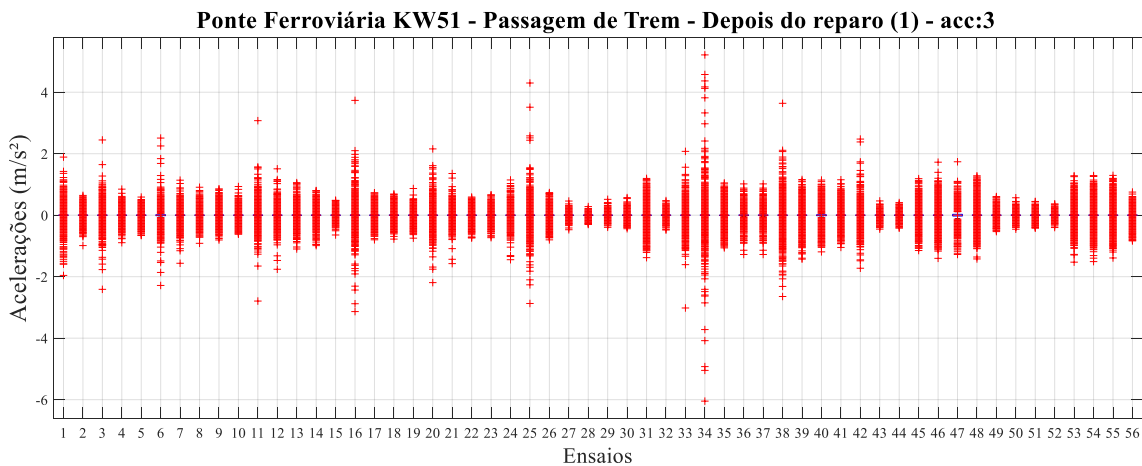
Por fim, as Figuras 5.16 (B.115) e 5.17 (B.116) retratam os dados da ponte ferroviária KW51, com dispersão variável ao longo dos ensaios e picos evidentes em alguns trechos. Apesar da simetria geral, o número de *outliers* aumenta nas regiões com maior excitação, condizente com o carregamento real da estrutura durante a passagem dos trens.

Figura 5.16 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, antes da realização dos reparos.



Fonte: Autor.

Figura 5.17 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, após os reparos.



Fonte: Autor.

Um destaque importante é o pico de amplitude no Ensaio 40 (Figura B.115), ocorrido à tarde do dia 21/12/2018, uma sexta-feira que antecedeu o Natal. Esse aumento abrupto foi associado à lotação excessiva dos trens no período, refletindo diretamente nas acelerações registradas. Já o pico no Ensaio 34 (Figura B.116) ocorreu em 17/12/2019, durante uma greve ferroviária na Bélgica, quando a redução na frequência dos trens resultou em superlotação e aumento das cargas dinâmicas transmitidas à estrutura (JOHNSTON, 2019).

A Tabela 5.3 apresenta os valores mínimos, máximos e a amplitude máxima registrada nas acelerações para cada estrutura, considerando o tipo de excitação.

Tabela 5.3 – Valores mínimos, máximos e a amplitude registrada nas acelerações das estruturas.

Estrutura	Excitação	Extremo inferior (m/s ²)	Extremo Superior (m/s ²)	Amplitude Máxima (m/s ²)
Shear Building – Fase I	Impacto	-53,24	+93,39	146,63
Shear Building – Fase II	Impacto	-75,15	+88,45	163,60
	<i>Shaker</i> em X (CHIRP Senoidal)	-3,33	+2,98	6,31
	<i>Shaker</i> Diagonal (CHIRP Senoidal)	-2,36	+2,33	4,69
Pá Eólica	Impacto	-409,22	+371,14	780,36
Viga Biapoiada	Impacto	-1,95	+1,82	3,77
	<i>Shaker</i> (Ruído Branco)	-1,99	+2,54	4,53
Benchmark	<i>Shaker</i> (Ruído Branco)	-12,01	+11,62	23,63
Ponte Ferroviária KW51	Passagem de trem	-6,05	+6,23	12,28

Fonte: Autor.

5.2 AGRUPAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO SCOTT-KNOTT

Diversas análises foram conduzidas com o objetivo de identificar as principais características que influenciam o desempenho dos parâmetros estatísticos, extraídos dos sinais de aceleração, na correta classificação dos estados estruturais pelo teste de Scott-Knott. Os resultados das análises discutidos nessa seção estão contidos nas tabelas do Apêndice C.

Inicialmente, foram realizadas as análises consideradas principais, por serem as mais completas, conforme descrito na Tabela 5.1. Essas análises abrangem os diversos estados de dano de cada estrutura, com os diferentes tipos de excitação e o maior número de ensaios disponíveis.

Posteriormente, identificou-se a necessidade de realizar pequenas variações nas análises principais, a fim de investigar fatores específicos e responde a questões motivadoras da pesquisa. Assim, foram definidas as análises secundárias, apresentadas na Tabela 5.4. Os identificadores das análises secundárias iniciam-se com a letra correspondente à análise

principal da qual derivam, e os itens modificados em relação à análise original estão destacados na tabela.

Tabela 5.4 – Características das análises secundárias.

Análises Secundárias						
Id.	Estrutura	Excitação	Danos avaliados	nd	Ensaio (δ)	Sturges
A1	Viga Biapoiada	Impacto	0-500(g)-12-16-22,5-32(mm)	6	90	16
A2					44	
A3					22	
A4					11	
B1		Shaker (Ruído Branco)			90	17
B2					44	
B3					22	
B4					11	
D1	Shear Building – Fase I	Impacto 10s	0-0,5-1-2-5-6(kg)	6	11	14
F1	Shear Building – Fase II	Impacto 10s	0-500(g)-1-2-5-6(kg)	6	44	14
F2		Impacto 10s			22	14
I1	Pá Eólica	Impacto 10s	0-10-15-30-70-130-220-430(g)	8	22	14
I2		Impacto 10s	0-30-70-130-220-430(g)	6	44	14

Fonte: Autor.

5.2.1 Comparação por Estrutura Analisada

As Tabelas C.1 a C.12 apresentam os resultados do teste de *Scott-Knott* aplicados às análises principais e secundárias, a partir dos parâmetros extraídos dos sinais de aceleração, nos domínios do tempo e da frequência, organizados conforme a estrutura avaliada.

Complementarmente, as Tabelas 5.5 e 5.6 reúnem as médias gerais de classificação dos parâmetros para cada estrutura, considerando os dois domínios de análise. Observa-se que a Ponte Ferroviária KW51 apresenta um percentual elevado de acertos, o que se deve, em grande parte, à existência de apenas dois estados estruturais e apenas uma análise realizada. Esse fator pode superestimar a eficácia de alguns parâmetros nessa estrutura em relação às demais.

A Tabela 5.7 destaca, organizando por estrutura, os parâmetros que obtiveram 100% de acerto na identificação dos estados estruturais (X), em pelo menos uma das análises

principais ou secundárias, bem como aqueles que não atingiram esse desempenho em nenhuma estrutura. Os parâmetros com baixo desempenho foram categorizados por domínio e sinalizando-os por cores: amarelo, para o domínio do tempo; azul, para o domínio da frequência; e verde, para os parâmetros com desempenho insatisfatório em ambos os domínios. Os tipos de excitação foram representados por I (impacto), S (shaker) e T (trem).

Entre os parâmetros que apresentaram os melhores resultados médios de classificação nas estruturas analisadas, destacam-se a **variância**, a **média dos quadrados dos valores**, a **raiz quadrada da média**, o **desvio médio** e o **desvio padrão**. Esses parâmetros mostraram-se consistentes, com percentuais médios superiores a 65% de acerto em ambos os domínios, e apareceram recorrentemente com classificação máxima (100%) em diferentes estruturas e tipos de excitação.

Por outro lado, a análise conjunta das Tabelas 5.5 a 5.7, evidencia o baixo desempenho no domínio do tempo da **média aritmética**, da **moda**, do **coeficiente de variação**, do **1º coeficiente de Pearson**, além das **primeiras e últimas categorias da ADS**. No domínio da frequência os piores resultados foram observados para o **ponto médio**, o **extremo mínimo** e as **últimas categorias da ADS**. A **média harmônica** apresentou resultado insatisfatório em ambos os domínios. A **moda**, embora tenha alcançado resultados relevantes na ponte, não se mostrou eficaz nas demais estruturas.

O comportamento das categorias da ADS no domínio do tempo pode ser explicado pela concentração de dados nos intervalos centrais, enquanto as categorias extremas apresentaram excesso de valores nulos, decorrentes da ocorrência de picos positivos e negativos nos sinais de aceleração. Já no domínio da frequência, com os dados transformados pela FFT (em módulo e normalizados), observa-se maior concentração nas categorias iniciais, o que reduz a representatividade das categorias superiores da ADS.

A partir da análise integrada dos resultados, nota-se que os parâmetros estatísticos tradicionais de **dispersão**, como **desvio padrão**, **variância** e **desvio médio**, apresentam desempenho superior à maioria das medidas baseadas em separatrizes ou dados simbólicos, especialmente no domínio da frequência. A transformação dos dados por meio da FFT contribuiu significativamente para essa melhora, pois, segundo Ewins (2000), o espectro resultante apresenta maior regularidade e concentração de energia, o que favorece a discriminação entre os estados estruturais.

Tabela 5.5 – Comparativo da efetividade dos parâmetros no domínio do tempo na identificação dos estados de dano, por estrutura analisada.

ANÁLISE COMPARATIVA POR ESTRUTURA										
DOM. TIPO	ESTRUTURA	VIGA	SHEAR I	SHEAR II	PÁ EÓLICA	BENCHMARK	PONTE	Média	Média	
								PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (%)	
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	75%	35%	47%	44%	43%	100%	57%	56%
		EXTREMO MÁXIMO	73%	39%	38%	55%	60%	100%	61%	
		1º QUARTIL	75%	56%	31%	39%	70%	50%	53%	
		3º QUARTIL	73%	56%	36%	39%	70%	50%	54%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	48%	22%	22%	41%	37%	50%	37%	46%
		MÉDIA HARMÔNICA	0%	18%	13%	14%	27%	50%	20%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0%	38%	13%	39%	70%	100%	43%	
		MÉDIA DOS QUAD.	73%	65%	56%	51%	70%	100%	69%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	77%	69%	56%	55%	70%	100%	71%	
		2º QUARTIL	57%	48%	47%	62%	27%	50%	48%	
		MODA	25%	22%	28%	14%	43%	100%	39%	
		PONTO MÉDIO	37%	44%	30%	51%	27%	50%	40%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	73%	39%	42%	44%	43%	50%	49%	57%
		AMP. TOTAL	77%	39%	44%	51%	60%	100%	62%	
		AMP. INTERQUARTIL	73%	56%	37%	39%	70%	50%	54%	
		AMP. DE PERCENTIS	73%	78%	63%	37%	70%	50%	62%	
		MIDHINGE	53%	34%	39%	53%	27%	50%	43%	
		DESVIO MÉDIO	73%	83%	60%	50%	70%	100%	73%	
		VARIÂNCIA	73%	65%	56%	51%	70%	100%	69%	
		DESVIO PADRÃO	77%	69%	56%	55%	70%	100%	71%	
	COEF. DE VARIACÃO	53%	18%	13%	14%	27%	50%	29%		
	FORMA	ASSIMETRIA	55%	61%	29%	54%	27%	50%	46%	46%
		CURTOSE	43%	73%	51%	42%	27%	50%	48%	
		M. DE 6º ORDEM	40%	26%	47%	32%	53%	50%	41%	
		COEF. QUART. ASS.	28%	38%	47%	52%	27%	50%	40%	
		COEF. PERC. CURTOSE	43%	82%	46%	53%	27%	50%	50%	
		FATOR DE CRISTA	48%	64%	36%	49%	27%	100%	54%	
		FATOR K	75%	48%	42%	45%	60%	100%	62%	
		1º COEF. PEARSON	30%	18%	24%	14%	27%	50%	27%	
		2º COEF. PEARSON	40%	34%	47%	63%	27%	50%	43%	
		DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	17%	18%	24%	4%	43%	0%	
	2ª CAT. DA ADS		17%	18%	31%	15%	43%	0%	21%	
	3ª CAT. DA ADS		30%	35%	47%	10%	53%	0%	29%	
4ª CAT. DA ADS	37%		48%	33%	38%	53%	50%	43%		
5ª CAT. DA ADS	47%		62%	49%	26%	70%	50%	50%		
6ª CAT. DA ADS	65%		74%	43%	30%	70%	100%	64%		
7ª CAT. DA ADS	73%		47%	49%	45%	43%	100%	60%		
8ª CAT. DA ADS	53%		26%	38%	50%	60%	100%	54%		
9ª CAT. DA ADS	72%		23%	42%	49%	70%	100%	59%		
10ª CAT. DA ADS	63%		23%	44%	45%	43%	100%	53%		
11ª CAT. DA ADS	72%		18%	39%	35%	60%	100%	54%		
12ª CAT. DA ADS	52%		17%	32%	17%	70%	100%	48%		
13ª CAT. DA ADS	37%		21%	17%	4%	63%	50%	32%		
14ª CAT. DA ADS	33%		13%	31%	0%	53%	50%	30%		
15ª CAT. DA ADS	28%		27%	-	0%	43%	0%	20%		
16ª CAT. DA ADS	18%		-	-	-	10%	0%	9%		
17ª CAT. DA ADS	27%		-	-	-	-	0%	13%		
MÉDIA POR ESTRUTURA		51%	42%	39%	37%	49%	64%	46%		

Fonte: Autor.

Tabela 5.6 - Comparativo da efetividade dos parâmetros no domínio da frequência na identificação dos estados de dano, por estrutura analisada.

ANÁLISE COMPARATIVA POR ESTRUTURA										
DOM.	TIPO	ESTRUTURA	VIGA	SHEAR I	SHEAR II	PÁ EÓLICA	BENCHMARK	PONTE	Média	Média
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (%)						Par.	Tipo
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	42%	31%	31%	34%	27%	50%	36%	53%
		EXTREMO MÁXIMO	70%	70%	64%	38%	43%	100%	64%	
		1º QUARTIL	53%	35%	51%	50%	63%	50%	50%	
		3º QUARTIL	58%	39%	50%	52%	63%	100%	60%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	82%	43%	56%	51%	80%	100%	69%	56%
		MÉDIA HARMÔNICA	52%	39%	32%	46%	53%	50%	45%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	57%	40%	44%	53%	63%	50%	51%	
		MÉDIA DOS QUAD.	70%	65%	47%	51%	70%	100%	67%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	77%	69%	56%	55%	70%	100%	71%	
		2º QUARTIL	53%	40%	49%	47%	53%	50%	49%	
		MODA	42%	31%	31%	30%	27%	50%	35%	
		PONTO MÉDIO	70%	70%	64%	38%	43%	100%	64%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	70%	70%	64%	38%	43%	100%	64%	64%
		AMP. TOTAL	70%	70%	64%	38%	43%	100%	64%	
		AMP. INTERQUARTIL	57%	39%	54%	59%	53%	100%	61%	
		AMP. DE PERCENTIS	68%	48%	64%	55%	43%	100%	63%	
		MIDHINGE	53%	39%	47%	55%	63%	50%	51%	
		DESVIO MÉDIO	80%	60%	51%	56%	80%	100%	71%	
		VARIÂNCIA	70%	65%	43%	45%	70%	100%	66%	
		DESVIO PADRÃO	77%	69%	61%	50%	70%	100%	71%	
	COEF. DE VARIÇÃO	68%	60%	53%	56%	60%	100%	66%		
	FORMA	ASSIMETRIA	62%	78%	57%	55%	43%	50%	57%	58%
		CURTOSE	60%	61%	48%	49%	43%	50%	52%	
		M. DE 6º ORDEM	37%	35%	61%	34%	43%	50%	43%	
		COEF. QUART. ASS.	55%	35%	49%	49%	43%	100%	55%	
		COEF. PERC. CURTOSE	53%	52%	54%	47%	53%	100%	60%	
		FATOR DE CRISTA	57%	62%	60%	61%	43%	50%	55%	
		FATOR K	72%	65%	61%	43%	53%	100%	66%	
		1º COEF. PEARSON	67%	60%	59%	55%	60%	100%	67%	
		2º COEF. PEARSON	67%	61%	48%	56%	60%	100%	65%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	80%	57%	53%	52%	47%	100%	65%	36%
		2ª CAT. DA ADS	73%	57%	43%	50%	53%	100%	63%	
		3ª CAT. DA ADS	63%	48%	54%	46%	27%	100%	56%	
		4ª CAT. DA ADS	55%	69%	52%	51%	43%	100%	62%	
		5ª CAT. DA ADS	47%	60%	51%	44%	60%	100%	60%	
		6ª CAT. DA ADS	50%	40%	68%	35%	43%	100%	56%	
		7ª CAT. DA ADS	48%	48%	43%	35%	43%	100%	53%	
8ª CAT. DA ADS		38%	48%	37%	22%	10%	100%	42%		
9ª CAT. DA ADS		28%	39%	41%	13%	10%	50%	30%		
10ª CAT. DA ADS		35%	35%	37%	8%	10%	50%	29%		
11ª CAT. DA ADS		25%	35%	31%	17%	10%	50%	28%		
12ª CAT. DA ADS		23%	25%	36%	10%	10%	50%	26%		
13ª CAT. DA ADS		15%	25%	28%	10%	0%	50%	21%		
14ª CAT. DA ADS	10%	25%	7%	4%	0%	0%	8%			
15ª CAT. DA ADS	13%	17%	-	0%	0%	0%	6%			
16ª CAT. DA ADS	2%	-	-	-	0%	0%	1%			
17ª CAT. DA ADS	7%	-	-	-	-	0%	3%			
MÉDIA POR ESTRUTURA		53%	50%	49%	41%	43%	74%	50%		

Fonte: Autor.

Tabela 5.7 – Parâmetros, por estrutura, que obtiveram 100% de acerto na classificação dos estados de dano.

IDENTIFICAÇÃO 100%		DOMÍNIO DO TEMPO								DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA																	
TIPO	ESTRUTURA	VIGA		SHEAR I		SHEAR II		PÁ EÓLICA		BENCHMARK		PONTE		CONTADOR	VIGA		SHEAR I		SHEAR II		PÁ EÓLICA		BENCHMARK		PONTE		CONTADOR
		PAR. / EXCITAÇÃO	I	S	I	I	S	I	S	T	I	S	I		I	S	I	S	T	I	S	T					
SEP.	EXTREMO MÍNIMO		X							X				2												0	
	EXTREMO MÁXIMO		X							X	X			3										X		1	
	1º QUARTIL		X							X				2												0	
	3º QUARTIL									X				1										X		1	
	MÉDIA ARITMÉTICA													0		X			X			X	X			4	
POSICÃO	MÉDIA HARMÔNICA												0													0	
	MÉDIA GEOMÉTRICA									X	X			2												0	
	MÉDIA DOS QUAD.						X			X	X			3							X	X				2	
	RAIZ QUAD. DA MÉDIA						X			X	X			3					X		X	X				3	
	2º QUARTIL													0												0	
	MODA										X			1												0	
	PONTO MÉDIO													0										X		1	
	AMP. DE PICO			X										1										X		1	
	AMP. TOTAL			X							X	X		3										X		1	
DISPERSÃO	AMP. INTERQUARTIL									X				1										X		1	
	AMP. DE PERCENTIS									X				1					X					X		2	
	MIDHINGE													0												0	
	DESVIO MÉDIO						X			X	X			3		X					X	X				3	
	VARIÂNCIA						X			X	X			3							X	X				2	
	DESVIO PADRÃO						X			X	X			3					X		X	X				3	
	COEF. DE VARIAÇÃO													0							X	X				2	
	ASSIMETRIA			X				X						2			X									1	
	CURTOSE				X									1												0	
FORMA	M. DE 6º ORDEM													0												0	
	COEF. QUART. ASS.													0										X		1	
	COEF. PERC. CURTOSE				X									1										X		1	
	FATOR DE CRISTA									X				1												0	
	FATOR K			X						X	X			3										X		1	
	1º COEF. PEARSON													0									X	X		2	
	2º COEF. PEARSON													0									X	X		2	
	1ª CAT. DA ADS													0		X			X					X		3	
	2ª CAT. DA ADS													0		X									X	2	
3ª CAT. DA ADS													0											X	1		
4ª CAT. DA ADS													0											X	1		
5ª CAT. DA ADS									X				1									X	X		2		
6ª CAT. DA ADS									X	X			2											X	1		
7ª CAT. DA ADS										X			1											X	1		
8ª CAT. DA ADS									X	X			2											X	1		
9ª CAT. DA ADS									X	X			2												0		
10ª CAT. DA ADS										X			1												0		
11ª CAT. DA ADS		X							X	X			3												0		
12ª CAT. DA ADS									X	X			2												0		
13ª CAT. DA ADS													0												0		
14ª CAT. DA ADS													0												0		
15ª CAT. DA ADS													0												0		
16ª CAT. DA ADS													0												0		
17ª CAT. DA ADS													0												0		
		1	7	2	0	5	1	19	19	47	0	4	1	0	5	1	13	27	47								

Fonte: Autor.

5.2.2 Comparação por Tipo de Excitação

As Tabelas C.12 a C.16 apresentam os resultados das análises principais e secundárias, organizadas de acordo com o tipo de excitação aplicado às estruturas. De modo geral, observa-se que, na identificação dos estados estruturais, o domínio da frequência

apresentou desempenho superior ao domínio do tempo, principalmente nas excitações por trem e *shaker*, que apresentaram os maiores percentuais médios de acerto.

Em contrapartida, os resultados médios das estruturas excitadas por impacto foram os menores, 40% no tempo e 46% na frequência, enquanto o *shaker* apresentou médias superiores, 48% e 51%, respectivamente.

Destaca-se ainda que os *shakers* que emitiram ruído branco tiveram melhor desempenho quando comparados àqueles com sinal *chirp* senoidal. Essa diferença pode ser explicada pela capacidade do ruído branco de excitar simultaneamente todas as frequências com igual intensidade, resultando em respostas modais mais uniformes e maior robustez à geração de funções de resposta em frequência (FRFs). Sinais aleatórios (como ruído branco) se destacam por fornecer informações mais limpas e menos suscetíveis a distorções do que sinais determinísticos como o *chirp* (VARAHRAM et al., 2019).

Um caso específico que resultou na redução das médias, é a análise identificada por “N” (*Benchmark*), que, apesar de ter sido excitada por *shaker*, apresentou baixo desempenho devido à presença de danos com variações extremamente sutis entre os estados estruturais, comprometendo a capacidade discriminativa dos parâmetros.

O domínio do tempo, por sua vez, apresentou desempenho mais modesto e maior sensibilidade a ruídos e picos locais nos sinais, resultando em ampla variabilidade entre os parâmetros avaliados. Tal comportamento está alinhado com a literatura de análise de sinais, que aponta fragilidade de métricas estatísticas no domínio do tempo quando os sinais apresentam alta impulsividade (SKOWRONEK et al., 2024).

Segundo Barbetta et al. (2004), a média e o desvio padrão são as medidas mais utilizadas para avaliar a posição central e a dispersão de um conjunto de valores. No entanto, por serem fortemente influenciadas por valores discrepantes, sua aplicação deve ser cautelosa em distribuições assimétricas ou com presença de *outliers*. Ainda segundo os autores, medidas baseadas na ordenação dos dados – como separatrizes – são menos sensíveis a esses desvios. Piana et al. (2013) e Barbetta et al. (2004) reforçam que, apesar dessas limitações, a média aritmética e a variância permanecem amplamente empregadas devidos às suas boas propriedades estatísticas e facilidade de interpretação. Destacam, contudo, que essas medidas são mais adequadas para distribuições unimodais, simétricas e mesocúrticas.

Ainda assim, os parâmetros de dispersão – como desvio padrão, desvio médio e variância – demonstraram-se, em geral, mais eficazes no domínio do tempo. Uma exceção pontual

foi observada na excitação por trem, onde medidas de posição e separatrizes apresentaram desempenho semelhante ou até ligeiramente superior (75% contra 72%).

Os resultados indicam que os parâmetros de dispersão são consistentemente superiores em desempenho, especialmente no domínio da frequência e sob excitação por trem e shaker. O desvio padrão e a variância atingiram 100% de acerto em diversas análises em ambos os domínios. E, as medidas simbólicas e separatrizes extremas devem ser empregados com cautela, principalmente no domínio do tempo ou sob excitação por impacto.

5.2.3 Comparação por Intervalo entre Impactos

Nesta seção, analisam-se os efeitos da variação no intervalo de tempo entre impactos sobre a eficácia dos parâmetros estatísticos na identificação dos estados estruturais. Foram consideradas duas estruturas experimentais, o *Shear Building* – Fase I e a Pá Eólica, avaliadas com tempos entre impactos de 10 e 20 segundos. Os resultados são apresentados nas Tabelas C.17 e C.18, referentes, respectivamente, aos domínios do tempo e da frequência.

Embora os intervalos de 10 segundos permitam um maior número de amostras, a comparação foi realizada mantendo-se constante o número de observações, de forma a isolar o efeito da quantidade de impactos sobre os parâmetros de análise.

Os resultados indicam comportamentos distintos entre as estruturas. Para o *Shear Building* – Fase I, o aumento do tempo entre impactos (de 10 s para 20 s) proporcionou uma melhora em torno de 4% e 3% nas médias dos percentuais de acerto dos domínios do tempo e frequência, respectivamente. Essa melhora pode estar associada à redução da sobreposição de respostas consecutivas, o que favorece uma separação mais clara dos espectros de cada estado estrutural (EWINS, 2000).

Por outro lado, a Pá Eólica apresentou desempenho superior com intervalo de 10 segundos, tanto no domínio do tempo (53% contra 32%) quanto no da frequência (54% contra 38%). Esse comportamento pode estar relacionado às características específicas da estrutura e de sua resposta dinâmica, nas quais impactos mais frequentes promovem uma excitação mais eficiente do sistema e aumentam a sensibilidade na detecção de alterações estruturais (MAIA; SILVA, 1997; FARRAR; WORDEN, 2012).

Em ambos os domínios, destacaram-se três medidas de dispersão (variância, desvio padrão e desvio médio) e duas de posição (média dos quadrados dos valores e raiz

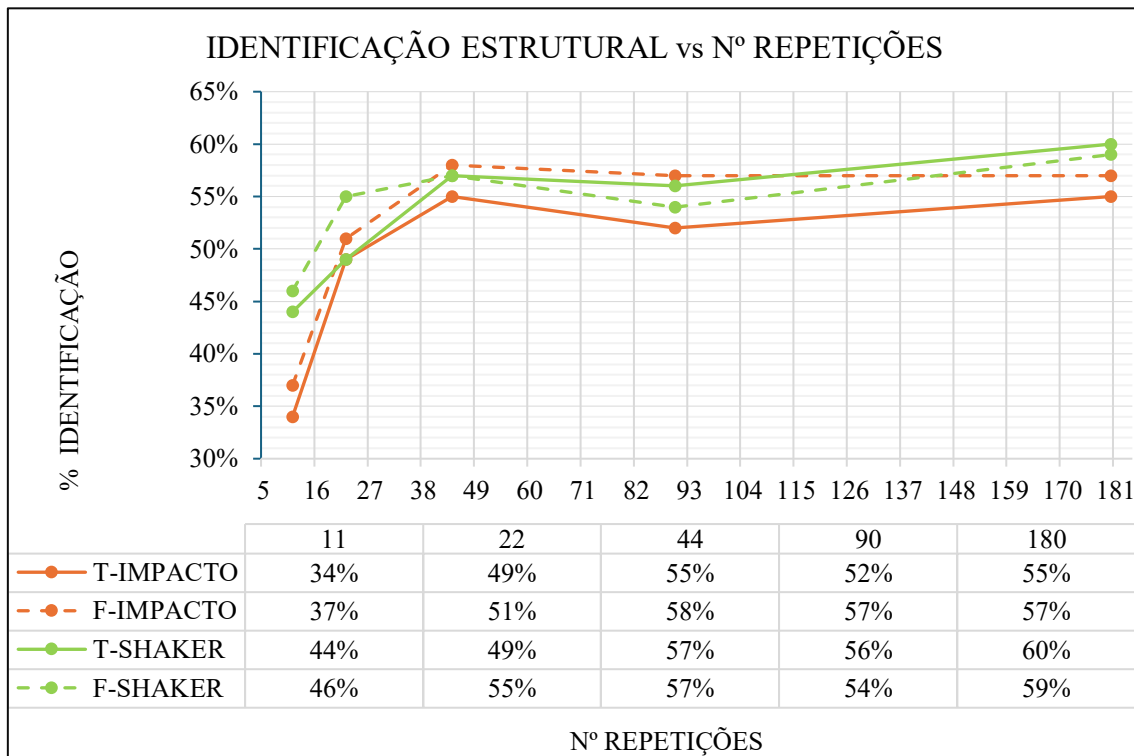
quadrada da média). Entretanto, para os tempos menores, os parâmetros de forma – assimetria e a curtose – apresentaram desempenho superior em relação aos tempos maiores. Esse resultado pode estar associado à maior excitação do sistema em intervalos mais curtos, o que tende a intensificar as diferenças na forma das distribuições das respostas dinâmicas entre os diferentes estados estruturais. Como a assimetria e a curtose são sensíveis à deformação e ao alongamento das caudas da distribuição, essas alterações favorecem sua capacidade discriminativa (BARBETTA et al., 2004).

Por fim, a análise evidencia que a influência do tempo entre impactos sobre a eficácia dos parâmetros está associada ao amortecimento da estrutura e à posição do acelerômetro. Nessa condição, o intervalo entre cada impacto deve corresponder ao tempo necessário para que a resposta estrutural se aproxime de zero ao final do registro.

5.2.4 Comparação por Número de Repetições

As Tabelas C.1 a C.4 apresentam análises da Viga Biapoiada, considerando todos os estados de dano, com variação no número de ensaios (repetições) utilizados, para excitação por impacto e por *shaker*, nos dois domínios do tempo e da frequência. A Figura 5.18 resume as médias de identificação dos parâmetros nesses dois domínios e tipos de excitação, considerando cinco conjuntos de repetições para cada estado de dano: 11, 22, 44, 90 e 180.

Figura 5.18 – Resumo das médias de identificação da Viga Biapoiada variando o número de ensaios analisados.



Fonte: Autor.

Observa-se um ganho significativo na precisão de identificação ao aumentar o número de repetições de repetições de 11 para 22 e, em seguida, para 44, especialmente para o domínio temporal com excitação por impacto (T-IMPACTO), que evolui de 34% para 49% e para 55%. Após esse ponto, os ganhos adicionais são reduzidos, indicando tendência à estabilização dos resultados.

Verifica-se uma leve queda no desempenho entre 44 e 90 repetições, o que pode estar relacionado a presença de ruído estatístico, variação na qualidade dos dados ou inconsistências experimentais (WORDEN; MANSON, 2007).

Outro ponto importante é que os testes com excitação por *shaker* apresentaram melhor desempenho global, com maiores índices de identificação em praticamente todas as faixas de repetição. A combinação de excitação controlada e análise no domínio da frequência mostrou-se particularmente eficiente, alcançando até 60% de identificação (T-SHAKER) com 180 repetições.

Conclui-se que, a partir de 44 repetições, os resultados tendem a se estabilizar, e que a escolha do tipo de excitação (*shaker*) e do domínio de análise (especialmente frequência) é mais determinante para a eficácia da identificação estrutural do que o simples aumento

da quantidade de repetições. A análise destaca a importância de um planejamento experimental cuidadoso e da consistência dos dados coletados.

5.2.5 Comparação por Posição da Massa

Os resultados de identificação referentes à variação da posição da massa estão apresentados nas Tabelas C.19 e C.20. Para o Shear Building – Fase I, foram realizadas leituras com uma massa de 5 kg, posicionada alternadamente a cada dois andares da estrutura. No caso da pá eólica, o procedimento foi conduzido inicialmente com uma massa de 30g e, posteriormente, com uma de 220 g, distribuídas em diferentes pontos ao longo do comprimento da pá.

Observa-se que as massas maiores (5 kg e 220g) proporcionaram resultados melhores de identificação, tanto no domínio do tempo (38% e 41%, respectivamente), quanto no domínio da frequência (48% e 42%, respectivamente), em comparação com a massa de 30g (29% no tempo e 32% na frequência). Esse desempenho superior pode estar associado ao aumento da excitação modal induzida pelas massas maiores, que segundo Ewins (2000), favorece uma resposta dinâmica mais acentuada e diferenciada entre os estados estruturais, facilitando a separação dos grupos pelo método de agrupamento.

Diferentemente das demais análises, verifica-se que a variação da posição da massa provocou um aumento no percentual de identificação de estados para os parâmetros de forma, igualando (no dom. tempo) ou superando (no dom. da frequência) o desempenho dos parâmetros de dispersão.

No domínio do tempo, destacam-se a amplitude de percentis, o desvio médio, a assimetria, a curtose e o coeficiente percentílico de curtose como os parâmetros com maior capacidade de separação entre os grupos.

Outros parâmetros que se destacaram no domínio da frequência incluem o extremo máximo, o ponto médio, a amplitude de pico, a amplitude total, a assimetria e o fator de crista, demonstrando que medidas associadas à forma e à intensidade do espectro possuem papel relevante na diferenciação dos estados estruturais, especialmente sob excitação localizada.

De forma geral, embora alguns parâmetros tenham apresentado bons desempenhos sob determinadas condições, a identificação de variações de estados estruturais a partir da realocação da massa não se mostrou uma das estratégias mais eficazes. Os percentuais de acerto, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, foram inferiores aos observados

nas análises comparativas comentadas anteriormente. Isso sugere que, embora a realocação da massa ao longo da estrutura possa modificar a resposta dinâmica, tais alterações não são suficientemente consistentes ou sistemáticas nos parâmetros estatísticos extraídos, o que compromete a eficácia do agrupamento para fins de identificação automática.

5.2.6 Comparação por Tamanho das Janelas de Dados

Durante o pré-processamento dos dados do *Benchmark* IASC-ASCE, surgiu a necessidade de investigar qual o tempo de janela mais adequado para a identificação dos estados estruturais. Para isso, foram testadas quatro durações distintas de janelas de corte dos sinais de aceleração: 10, 5, 30 e 45 segundos, conforme descrito na Tabela 5.8. A análise considerou os três estados de dano que apresentaram maior variação. Com o objetivo de isolar o efeito do tempo de janela, o número de repetições foi mantido constante entre as diferentes durações.

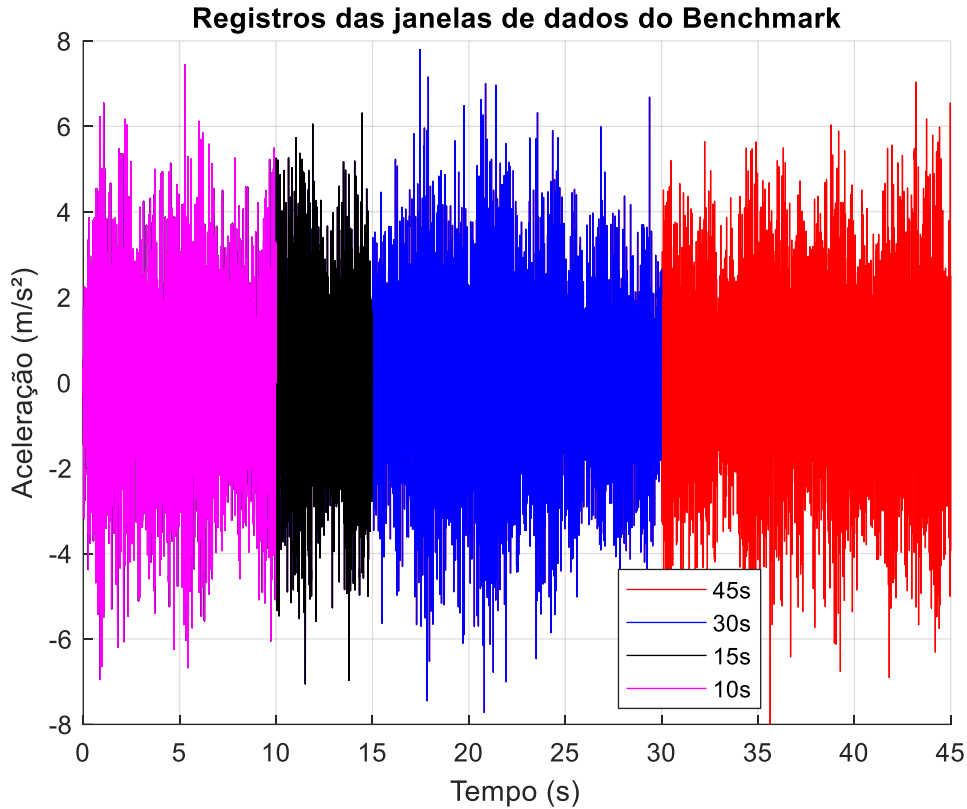
Tabela 5.8 – Descrição da análise comparativa entre diferentes janelas de dados do *Benchmark* IASC-ASCE.

Análises de Janelas de Dados								
Id.	Est.	Excitação	Tempo	Obs./ensaio	Danos	Nd	Ensaio s (δ)	Sturges
M	Benchmark	Shaker	10 s	10.000	0 Todas 1 ^o Todas 1 ^o e 3 ^o	3	18	15
			15 s	15.000				15
			30 s	30.000				16
			45 s	45.000				17

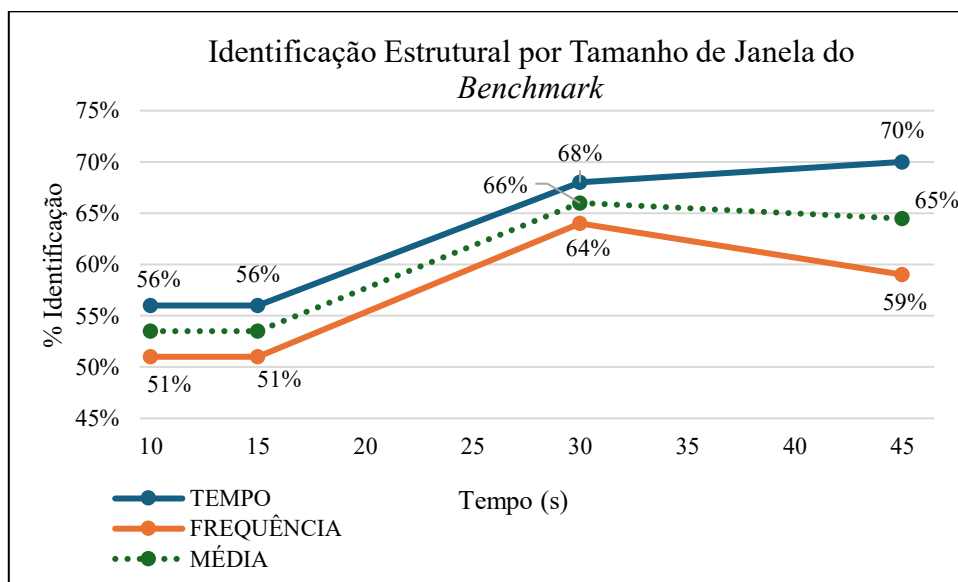
Fonte: Autor.

Os resultados dessa análise estão disponíveis nas Tabelas C.21 e C.22. A Figura 5.19 ilustra um mesmo sinal de aceleração segmentado pelas quatro janelas propostas, evidenciando os diferentes intervalos temporais utilizados. A Figura 5.20 resume as médias de acerto na identificação dos estados estruturais, tanto no domínio do tempo quanto da frequência.

Figura 5.19 – Exemplo de segmentação de um registro de aceleração por diferentes janelas de tempo.



Fonte: Autor.

Figura 5.20 – Médias de identificação para diferentes tamanhos de janelas de dados do *Benchmark* IASC-ASCE.

Fonte: Autor.

Observa-se um salto significativo nos resultados de identificação entre as janelas de 15s e 30s, seguido de uma estabilização dos valores para 45s. A janela de 30 segundos apresentou resultados médios superiores à janela de 15 s e muito próximos da de 45 s,

indicando que essa duração já captura adequadamente as informações essenciais da resposta dinâmica da estrutura.

No domínio do tempo, as médias de identificação para janelas de 30 e 45 segundos diferem em apenas 2%, sendo a janela de 45 segundos ligeiramente superior. Essa diferença pode ser atribuída ao aumento do número de observações (45.000), o que permite uma discretização mais refinada dos dados simbólicos com base na regra de Sturges (Sturges, 1926). Nesse caso específico, o aumento do número de categorias contribuiu positivamente para a identificação, possivelmente por capturar nuances mais sutis da resposta dinâmica. Embora a literatura aponte que um número excessivo de categorias pode introduzir ruído ou sobreajuste (LIN et al., 2003), os resultados obtidos indicam que, para essa estrutura e conjunto de dados, o refinamento simbólico foi benéfico.

No domínio da frequência, entretanto, a janela de 45 segundos apresentou um decréscimo no desempenho de 5% em relação à de 30 segundos. Esse decréscimo está relacionado, sobretudo, à análise de dados simbólicos e à assimetria dos espectros — sendo esta última influenciada pela relação entre tempo de observação e resolução espectral: enquanto janelas maiores oferecem maior resolução de frequência, podem também incorporar ruídos ou variações não relevantes, diluindo a capacidade discriminante de certos parâmetros (Juang, 1994; Ewins, 2000).

Considerando a média geral de identificação apresentada na Figura 5.20, a janela de 30 segundos alcança 66%, enquanto a de 45 segundos atinge 65%, o que confirma sua eficiência e equilíbrio entre duração e qualidade da informação extraída.

No domínio do tempo, destacaram-se as medidas separatrizes (79%) em relação às de dispersão (70%) e posição (56%). Dentre elas, obtiveram 100% de acerto o extremo máximo, o primeiro e o terceiro quartis, a média geométrica, a média dos quadrados, a raiz quadrada da média, além das amplitudes total, de pico, interquartil e de percentis, o desvio médio, a variância e o desvio padrão. Entre as medidas de forma, apenas o fator K se mostrou relevante.

No domínio da frequência, embora a média geral tenha sido inferior à do domínio do tempo, as medidas de posição, dispersão e forma obtiveram resultados superiores, com destaque para: as médias (aritmética, quadrática e raiz da média dos quadrados), o desvio médio, a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação, a assimetria espectral e os coeficientes de Pearson.

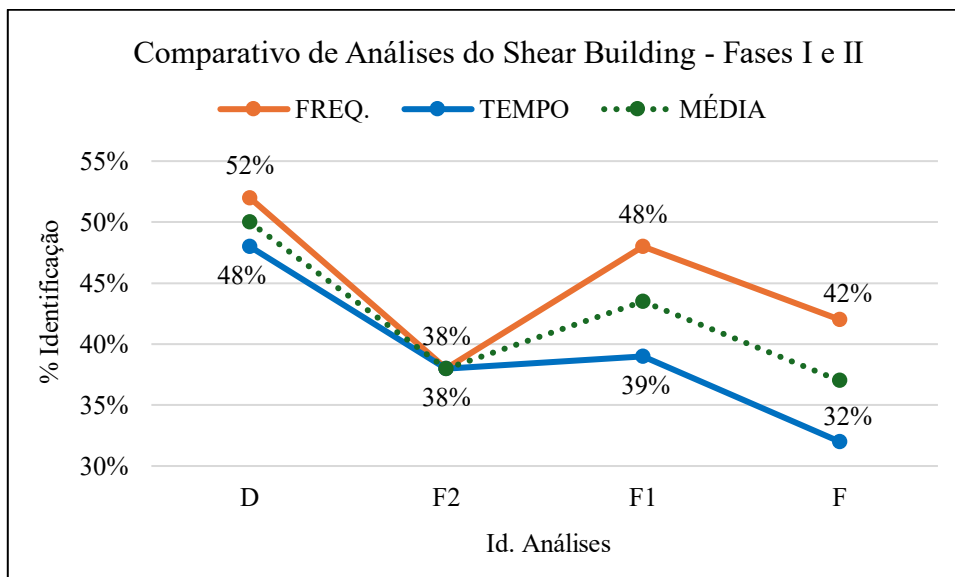
5.2.7 Comparação com Remoção das Menores Massas

As análises complementaras (Tabelas C.23 a C.25) exploram a influência da exclusão de massas menores no desempenho de identificação estrutural, considerando múltiplos estados de dano. O objetivo foi avaliar a sensibilidade dos parâmetros frente a variações sutis de massa.

As análises D (Fase I) e F2 (Fase II), que compartilham os mesmos estados de dano e número de repetições, indicam conforme a Figura 5.21, que a Fase I apresentou desempenho superior em ambos os domínios: 48% contra 38% no domínio do tempo e, 52% contra 38% no domínio da frequência. Conforme esperado, os resultados sugerem que a adição da massa do shaker na Fase II comprometeu a identificação estrutural.

Ao dobrar o número de repetições na Fase II (análise F1), houve um incremento de 10% no domínio da frequência, mas apenas 1% no domínio do tempo, reforçando que o aumento de repetições favorece principalmente os parâmetros espectrais. Por outro lado, a adição de três massas (130 g, 220 g e 3 kg) na análise F reduziu ainda mais a taxa de acerto, evidenciando a dificuldade de discriminação das massas menores quando inseridas em conjunto com massas maiores.

Figura 5.21 – Comparativo das médias de identificação nas Fases I e II do Shear Building.



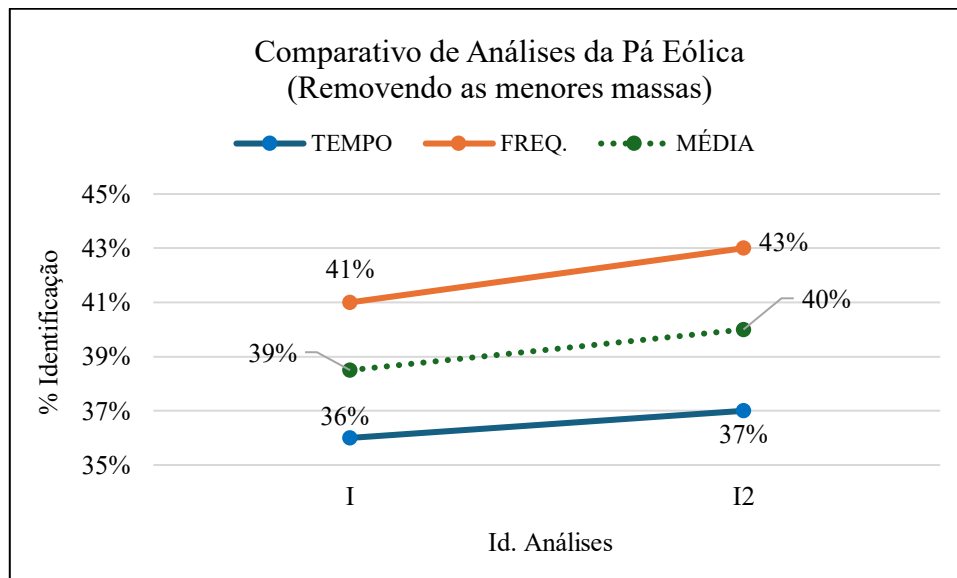
Fonte: Autor.

Na análise da Pá Eólica, a análise I2, que exclui as massas de 30 g e 70 g, apresentou um aumento proporcional na identificação em ambos os domínios (Figura 5.22), indicando que essas pequenas variações não eram detectáveis pelos parâmetros utilizados. Nessa estrutura, destacaram-se parâmetros que não haviam obtido bom desempenho em outras

análises, como o extremo máximo, o segundo quartil, o *midhinge*, e o segundo coeficiente de Pearson, no domínio do tempo. Já no domínio da frequência, sobressaíram-se o fator de crista e o coeficiente de variação.

Esses resultados evidenciam que a sensibilidade dos parâmetros varia de acordo com a estrutura analisada e o tipo de alteração introduzida. Reforçam, ainda, a importância de uma análise exploratória cuidadosa nas escolhas dos descritores que melhor capturam a presença de dano.

Figura 5.22 – Comparativo das análises da Pá Eólica com e sem as menores massas.



Fonte: Autor.

5.2.8 Comparação entre Dois Estados Estruturais

As análises realizadas até o momento, com exceção da Ponte, consideraram múltiplos estados de dano. A partir desta seção, serão apresentadas análises comparativas entre apenas dois estados de dano para cada estrutura, com o objetivo de avaliar a capacidade discriminante dos parâmetros utilizados. Essa abordagem se justifica pela necessidade evidenciada nas análises anteriores, especialmente no que diz respeito à sensibilidade dos parâmetros frente a variações leves ou acentuadas nos diferentes níveis de dano.

A Tabela 5.9 apresenta o conjunto de análises baseadas nessa abordagem. As análises estão codificadas da seguinte forma:

- ◆ P: comparação entre estados de dano leve com variações leves;
- ◆ G: Variações leves em danos severos;
- ◆ I: Variações acentuadas (entre extremos).

A única estrutura não incluída nestas análises é a Ponte Ferroviária, que possui apenas dois estados de dano disponíveis (pré e pós reparo). No entanto, seus resultados, apresentados na Tabela C.12, serão discutidos em conjuntos com os dados dessa seção.

Tabela 5.9 – Características das análises comparativas considerando dois estados estruturais.

ANÁLISES ENTRE DOIS DANOS								
Id.	Est.	Excitação	Danos (P)	Danos (I)	Danos (G)	nd	Ensaio (δ)	Sturges
A	Viga Biapoiada	Impacto	0-12 (mm)	0-32(mm)	16-32(mm)	2	180	16
B		Shaker						17
D	Shear Building - Fase I	Impacto 10s	0-0,5(kg)	0-6kg	5-6kg		22	14
F	Shear Building - Fase II	Impacto 10s	0-130(g)	0-6kg	5-6kg		44	
G		Shaker X					45	
I	Pá Eólica	Impacto 10s	0-10(g)	0-430(g)	220-430(g)		44	
N	Benchmark	Shaker	0-2/3.1 ^o	0-1.1 ^o +3 ^o +vg	1.1 ^o +3 ^o -		27	16
					1.1 ^o +3 ^o +vg			
					1.1 ^o -1.1 ^o +3 ^o			

Fonte: Autor.

Sendo:

- ◆ 2/3.1^o – 2/3 da rigidez em 1 diagonal do 1^o andar;
- ◆ 1.1^o – sem rigidez em uma diagonal do primeiro andar;
- ◆ 1.1^o+3^o – sem rigidez em uma diagonal do 1^o andar e uma do 3^o andar;
- ◆ 1.1^o+3^o+vg – sem rigidez em uma diagonal do 1^o andar, uma do 3^o andar e uma conexão viga coluna enfraquecida.

5.2.8.1 Variações Leves com Danos Leves

Nesta análise, foram consideradas comparações entre o estado estrutural intacto e o menor nível de dano para cada estrutura avaliada. Os resultados, apresentados nas Tabelas C.26 e C.27, mostram que, mesmo em cenários com variações mínimas – como no *Benchmark*, onde foi introduzida apenas a redução de 2/3 da rigidez de uma diagonal no 1^o andar –, foi possível alcançar 100% de identificação dos danos mais leves em todas as estruturas incluindo a Ponte Ferroviária, para os seguintes parâmetros:

- ◆ No domínio do tempo:
 - ◆ Média dos quadrados (posição);

- ◆ **Raiz quadrada da média** (posição);
- ◆ **Variância** (dispersão);
- ◆ **Desvio padrão** (dispersão);
- ◆ No domínio da frequência:
 - ◆ **3º Quartil** (separatriz);
 - ◆ **Raiz Quadrada da média** (posição);
 - ◆ **Desvio médio** (dispersão);
 - ◆ **Desvio padrão** (dispersão);

Além desse, a Tabela 5.10 apresenta os parâmetros que obtiveram identificação correta em todas as estruturas, com exceção de apenas uma, indicando desempenho consistente entre diferentes cenários de análise. A tabela está organizada por domínio e identifica para quais estruturas cada parâmetro falhou.

Tabela 5.10 – Parâmetros com desempenho consistente nas análises com variações leves em danos leves, falhando em apenas uma estrutura.

DOMÍNIO	PARÂMETRO	SHEAR BUILDING I (Impacto)	SHEAR BUILDING II (shaker)	BENCHMARK IASC-ASCE (shaker)
TEMPO	Amplitude Total; Fator K		X	
	Desvio Médio			X
	12ª Cat. da ADS	X		
FREQUÊNCIA	Média Aritmética; Ponto Médio; 1ª e 2ª Cat. ADS			X
	Média Geométrica		X	
	Amplitude Interquartil; Coeficiente de Variação	X		

Fonte: Autor.

A elevada taxa de identificação observada nas análises com variações leves em danos leves demonstra a eficácia de determinados parâmetros estatísticos na detecção de alterações sutis na resposta dinâmica das estruturas. No domínio do tempo, destacaram-se métricas de dispersão, como variância e desvio padrão, que respondem diretamente às variações na energia do sinal e são amplamente reconhecidas por sua sensibilidade a pequenas mudanças nas propriedades estruturais (BARBETTA et al., 2004; PIANA et al., 2013). A média dos quadrados e a raiz quadrada da média também se mostraram eficazes, conforme já discutido por Ewins (2000), por estarem relacionadas à potência vibratória do sistema.

No domínio da frequência, parâmetros como o desvio médio, o coeficiente de variação e o terceiro quartil apresentaram excelente desempenho, refletindo sua capacidade de captar assimetrias e dispersões espectrais geradas por danos leves. Esses resultados estão em conformidade com estudos como o de Peeters e De Roeck (2001), que mostraram que até mesmo variações mínimas na rigidez estrutural podem produzir alterações detectáveis nas respostas espectrais. Isso reforça o potencial dessas métricas para aplicações em monitoramento de integridade estrutural em fases iniciais de degradação.

5.2.8.2 Variações Leves com Danos Severos

Nesta etapa da análise, foram consideradas comparações entre os dois estados finais de dano de cada estrutura, de modo a avaliar o desempenho dos parâmetros frente a danos acentuados, mas com pequenas variações entre os estados comparados. Os resultados encontram-se nas Tabelas C.28 e C.29.

No caso do *Benchmark* IASC-ASCE, foram testadas duas configurações distintas. Na primeira (GN1), a variação consistiu apenas no enfraquecimento de uma ligação viga-coluna (Figura 4.54). Na segunda (GN2), a comparação foi entre o estado sem rigidez em uma diagonal do 1º andar e o estado sem rigidez em diagonais do 1º e 3º andares (uma em cada).

Para a configuração GN1, apenas as médias aritméticas no domínio do tempo apresentaram diferença estatisticamente significativa – um resultado que levanta dúvidas quanto à possibilidade de um falso positivo. Dessa forma, considerou-se que os parâmetros avaliados não são eficazes para a identificação de danos extremamente sutis, como o afrouxamento de um ligação viga-coluna em um pórtico de quatro pavimentos que já possuía perdas de rigidez de duas diagonais na mesma face. Por esse motivo, essa configuração foi desconsiderada nas análises subsequentes.

Os resultados obtidos nas análises com variações leves em estados de dano severos demonstram um cenário mais desafiador para os parâmetros estatísticos, especialmente no domínio do tempo. Nenhum parâmetro foi capaz de identificar com precisão absoluta todas as variações estruturais nesse domínio, o que está em conformidade com a literatura que destaca a maior suscetibilidade de métricas temporais a ruídos, picos locais e efeitos não relacionados diretamente ao dano (SKOWRONEK et al., 2024). Ainda que alguns parâmetros tenham apresentado desempenho satisfatório em determinadas estruturas, sua generalização foi limitada.

Por outro lado, o domínio da frequência mostrou-se mais eficaz para capturar alterações estruturais mesmo com pequenas variações entre estados de dano avançado. Parâmetros como a **amplitude interquartil** e a **segunda categoria da análise de dados simbólicos (ADS)** se destacaram por atingir desempenho máximo em todas as estruturas analisadas. Como apontado por Allemang (1999), o domínio da frequência é menos vulnerável a ruídos aleatórios e irregularidades locais do sinal, o que favorece sua aplicação em situações de baixa variação relativa entre estados danificados severos.

A Tabela 5.11 apresenta ainda os parâmetros que tiveram desempenho satisfatório em todas as estruturas, com exceção de apenas uma, organizando-os por domínio e indicando a estrutura em que não atingiram 100% de identificação.

Tabela 5.11 – Parâmetros com desempenho consistente nas análises com variações leves em danos severos, falhando em apenas uma estrutura.

DOMÍNIO	PARÂMETRO	SHEAR BUILDING Fase I – Impacto	BENCHMARK
TEMPO	6ª Categoria da ADS		X
FREQUÊNCIA	Desvio padrão		X
	Coefficiente Quartílico de Assimetria		X
	1ª Categoria da ADS	X	

Fonte: Autor.

5.2.8.3 Variações Acentuadas

Nesta comparação, foram analisados os dados referentes aos estados intactos e aos níveis mais severos de dano de cada estrutura, com o objetivo de avaliar a capacidade dos parâmetros estatísticos em identificar variações estruturais significativas. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas C.30 e C.31.

No domínio do tempo, desconsiderando os dados da ponte ferroviária, quatro parâmetros alcançaram 100% de acerto na identificação dos estados estruturais em todas as demais estruturas: **1º quartil**, **3º quartil**, **amplitude interquartil** e **desvio médio**. Dentre eles, o **desvio médio** foi o único parâmetro com desempenho máximo mesmo na ponte, sendo, portanto, o mais robusto nesse domínio.

No domínio da frequência, embora diversos parâmetros tenham alcançado altos índices de identificação, seu desempenho foi prejudicado pela baixa acurácia na estrutura Shear Building – Fase II. Essa limitação comprometeu a média geral de acerto, mesmo para parâmetros com ótimo desempenho nas demais estruturas.

A Tabela 5.12 apresenta os parâmetros que identificaram corretamente os estados estruturais em todas as estruturas, exceto uma, destacando aqueles com desempenho consistente frente a danos acentuados. Os parâmetros estão organizados por domínio de análise e por estrutura associada ao erro, permitindo avaliar sua aplicabilidade geral.

Tabela 5.12 – Parâmetros com identificação quase completa para variações acentuadas.

DOM.	PARÂMETRO	SHEAR BUILDING II - Impacto	PÁ EÓLICA	BENCHMARK	PONTE
TEMPO	1º Quartil; 3º Quartil; Amplitude Interquartil				X
	Média dos Quadrados dos valores; Raiz Quadrada da Média; Variância; Desvio Padrão; Fator K	X			
	7ª Categoria da ADS			X	
FREQUÊNCIA	Extremo Máximo		X		
	3º Quartil; Média Aritmética; Média dos Quadrados; Raiz Quadrada da Média	X			
	Ponto Médio; Amplitude de Pico; Amplitude Total; Fator K		X		
	Amplitude Interquartil; Desvio Médio; Variância; Desvio padrão	X			
	7ª Categoria da ADS			X	

Fonte: Autor.

A análise evidencia que, em casos de danos acentuados, a maioria dos parâmetros — especialmente os de dispersão estatística — apresentou excelente desempenho, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Isso era esperado, pois alterações estruturais significativas tendem a modificar substancialmente a resposta dinâmica global das estruturas, o que é refletido em métricas de amplitude, variabilidade e forma espectral (FARRAR; WORDEN, 2012)

No domínio do tempo, os parâmetros baseados em quartis e medidas de dispersão foram particularmente eficazes. O desvio médio, por exemplo, apresentou sensibilidade robusta a alterações nas formas de onda causadas por danos estruturais, com alta estabilidade mesmo frente a ruídos ou perturbações externas.

Já no domínio da frequência, diversos parâmetros demonstraram ser sensíveis a alterações nas frequências naturais e na redistribuição de energia modal, conforme também indicado por Peeters e De Roeck (2001), que destacam a vantagem do domínio da frequência em ambientes ruidosos ou com excitações variáveis.

5.2.9 Análise de Falsos Positivos

Enquanto as análises anteriores focaram na avaliação da ocorrência de falsos negativos (erro tipo II), nos quais o método falha em identificar um dano existente, esta seção tem como objetivo verificar a suscetibilidade do método a falsos positivos (erro tipo I), ou seja, alarme falso — quando o método indica a presença de dano, mesmo que o sistema esteja estruturalmente inalterado.

Para realizar essa verificação, foram selecionados registros de um mesmo estado de dano, que foram divididos ao meio e tratados como se pertencessem a dois grupos distintos. Esses grupos foram então submetidos à análise estatística via teste de *Scott-Knott*, a fim de verificar se algum parâmetro seria indevidamente identificado como estatisticamente diferente, o que caracterizaria um falso positivo (FP).

A seleção dos estados de dano foi feita de forma aleatória, com o intuito de contemplar diferentes condições estruturais e variadas combinações de excitação e severidade. A Tabela 5.13 apresenta as características das análises realizadas, incluindo a estrutura, o tipo de excitação, o estado de dano utilizado e o número de ensaios disponíveis. A identificação da análise, leva a letra inicial da análise base (Tabela 5.1), “FP” e o nº do estado de dano analisado conforme as Tabelas do Apêndice A.

Tabela 5.13 – Características das análises para identificação de falsos positivos.

Análises de Falsos Positivos				
Id.	Estrutura	Excitação	Dano	Ensaio por simulação de dano
AFP5	Viga Biapoiada	Impacto	32 mm	90
BFP5		Shaker	32 mm	90
IFP2	Pá Eólica	Impacto	15 g	22
DFP10	Shear Building I	Impacto	5 kg	11
FFP4	Shear Building II	Impacto	1 kg	22
GFP2		Shaker X	220 g	22
MFP1	Benchmark	Shaker	Todas 1º	13
OFP0	Ponte	Trem	Antes do reparo	30

Fonte: Autor.

Os resultados dessa análise estão apresentados nas Tabelas C.32 e C.33. Nelas, os parâmetros que foram erroneamente agrupados pelo método de *Scott-Knott* em dois grupos distintos receberam o rótulo “FP” (em vermelho). Os que permaneceram em um único grupo homogêneo foram marcados como “OK”, e aqueles cuja análise falhou por problemas estatísticos (por exemplo, ausência de variabilidade) foram indicados com “0”.

Nas linhas e colunas finais das tabelas, discriminadas entre tempo e frequência, estão indicados:

- ◆ O número total de falsos positivos por parâmetro (coluna final);
- ◆ O número de falsos positivos por estrutura (penúltima linha);
- ◆ E o percentual de falsos positivos por domínio (linha final).

Os resultados revelaram que a maior parte dos falsos positivos ocorreu nos registros da Viga Biapoiada, especialmente sob excitação por impacto. No domínio do tempo, três estruturas não apresentaram nenhum falso positivo em nenhum dos parâmetros analisados, sugerindo que, em muitas condições, o método apresenta alta robustez frente a variações internas do próprio dado.

A seguir, os resultados são resumidos nas Tabelas 5.14 a 5.17, organizados por estrutura, tipo de excitação, número de repetições e severidade do dano (definida pela posição relativa entre os estados disponíveis da estrutura, em ordem crescente de dano).

Tabela 5.14 – Percentual de incidência de FP por estrutura.

	VIGA	PÁ	SHEAR I	SHEAR II	BENCH	PONTE
TEMPO	83%	10%	5%	2%	0%	0%
FREQ.	74%	1%	8%	8%	3%	6%
MÉDIA	78%	6%	7%	5%	1%	3%

Fonte: Autor.

Tabela 5.15 – Percentual de incidência de FP por excitação.

	IMPACTO	SHAKER	TREM
TEMPO	59%	41%	0%
FREQ.	53%	42%	6%
MÉDIA	56%	41%	3%

Fonte: Autor.

Tabela 5.16 – Percentual de incidência de FP por quantidade de ensaios utilizados.

	11	13	22	30	90
TEMPO	5%	0%	12%	0%	83%
FREQ.	8%	3%	10%	6%	74%
MÉDIA	7%	1%	11%	3%	78%

Fonte: Autor.

Tabela 5.17 – Percentual de incidência de FP por severidade de dano.

	0	1	2	4	5
TEMPO	0%	0%	10%	7%	83%
FREQ.	6%	3%	8%	10%	74%
MÉDIA	3%	1%	9%	8%	78%

Fonte: Autor.

A observação dos resumos permite identificar que a estrutura em si teve maior influência na geração de falsos positivos do que o tipo de parâmetro avaliado. A Viga Biapoiada apresentou os maiores índices de falsos positivos, o que pode estar associado a características específicas da sua resposta dinâmica, como a ocorrência de resposta contínua, sem pausas claras entre os eventos de excitação, o que possivelmente gerou sobreposição de sinais e aumento da variabilidade estatística artificial.

No que diz respeito ao número de repetições, não se observou uma tendência clara de aumento ou redução na incidência de FP. Ainda que os conjuntos com 22 repetições tenham apresentado mais FPs em números absolutos, isso pode ser explicado pelo fato de que três estruturas foram analisadas com esse número de repetições. Quando normalizado, o valor médio de incidência de FP por estrutura com 22 repetições (~3,67%) acompanha os valores observados nas outras categorias (11 ou 30 ensaios), indicando que a quantidade de repetições, por si só, não é determinante.

Apesar da presença de falsos positivos em algumas análises, especialmente na Viga Biapoiada, o desempenho geral dos parâmetros foi considerado aceitável. A análise reforça a importância de considerar as características da estrutura e da excitação na avaliação da confiabilidade de métodos de identificação de dano.

Sugere-se, para trabalhos futuros, repetir esta análise com diferentes estados de dano e registros adicionais para cada estrutura, a fim de confirmar se a elevada incidência de FP em determinados casos é uma anomalia estatística ou reflete uma limitação estrutural ou instrumental específica (KAMALI et al., 2024).

5.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS

Em complementação à apresentação dos resultados estatísticos, foram realizadas análises gráficas de tendência dos parâmetros extraídos dos registros de aceleração, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, conforme apresentados nos Apêndices F e G, respectivamente. Essas análises permitiram observar o comportamento de cada parâmetro em função da evolução do estado estrutural, para os diversos ensaios analisados, considerando situações como acréscimo de massa, dano simulado e aplicação de reparo, em diferentes estruturas.

As análises de tendência confirmaram a coerência com os resultados anteriores, com os agrupamentos formados pela técnica de Scott-Knott. De modo geral, os parâmetros que apresentaram melhores desempenhos na classificação estatística também exibiram

gráficos de tendência com maior variação entre os estados, evidenciada pela inclinação mais acentuada das linhas de tendência. Esse comportamento sugere que tais parâmetros possuem maior sensibilidade às mudanças estruturais, sendo, portanto, mais eficazes para fins de monitoramento e detecção de danos.

De forma geral, a análise de tendência demonstrou ser uma ferramenta complementar importante para reforçar a interpretação dos resultados estatísticos e a capacidade de detecção de danos. Os gráficos de tendência permitiram visualizar, de forma intuitiva e progressiva, como os parâmetros se comportam frente às modificações estruturais, contribuindo para a validação visual e prática dos resultados obtidos por meio das técnicas estatísticas.

5.4 SELEÇÃO DE PARÂMETROS PROPOSTA

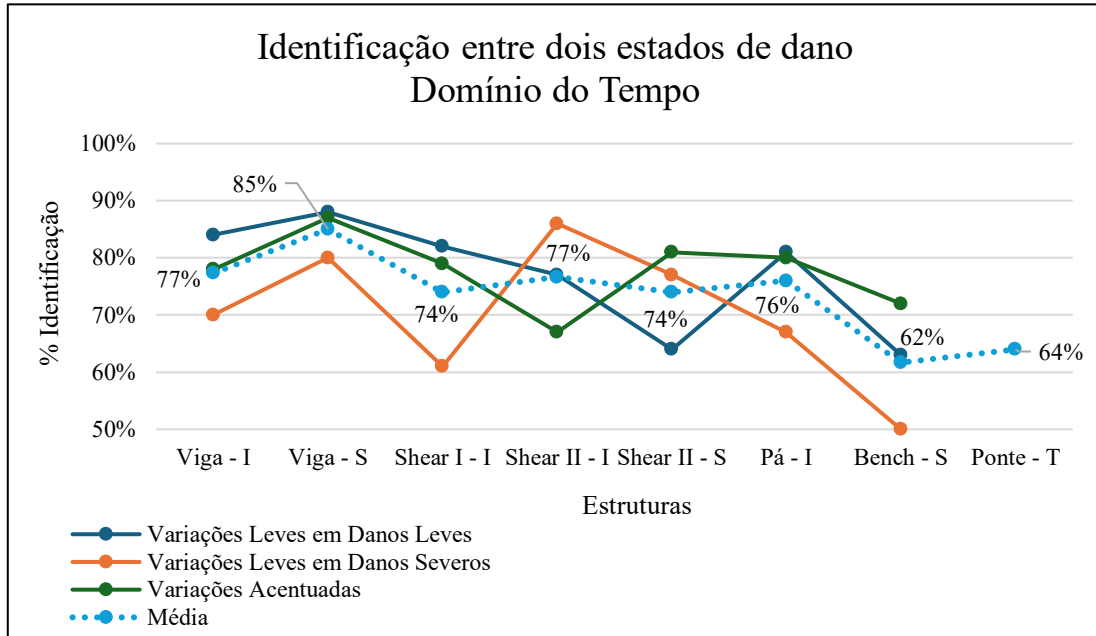
As Tabelas 5.18 e 5.19, juntamente com as Figuras 5.23 e 5.24, apresentam um resumo das médias de identificação entre dois estados de dano, por estrutura, nos domínios do tempo e da frequência, respectivamente. Essas médias representam o desempenho agregado dos parâmetros estatísticos para cada estrutura, considerando diferentes tipos de excitação e variações de severidade dos danos estruturais. Os tipos de excitação estão representados por suas iniciais após o nome da estrutura.

Tabela 5.18 – Resumo das médias de identificação no domínio do tempo.

Domínio do Tempo								
Análise / Estrutura	Viga - I	Viga - S	Shear I - I	Shear II - I	Shear II - S	Pá - I	Bench - S	Ponte - T
Variações Leves em Danos Leves	84%	88%	82%	77%	64%	81%	63%	
Variações Leves em Danos Severos	70%	80%	61%	86%	77%	67%	50%	
Variações Acentuadas	78%	87%	79%	67%	81%	80%	72%	
Média	74%	77%	85%	74%	77%	74%	76%	64%

Fonte: Autor.

Figura 5.23 – Representação gráfica da Tabela 5.18.



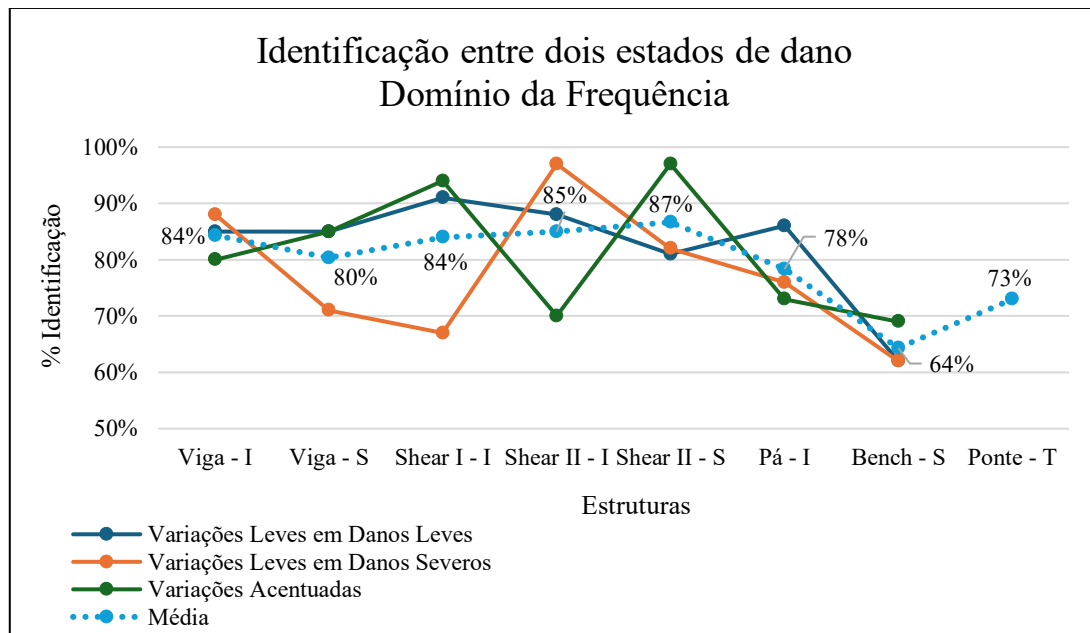
Fonte: Autor.

Tabela 5.19 – Resumo das médias de identificação, no domínio da frequência.

Domínio da Frequência								
Análise / Estrutura	Viga - I	Viga - S	Shear I - I	Shear II - I	Shear II - S	Pá - I	Bench - S	Ponte - T
Variações Leves em Danos Leves	85%	85%	91%	88%	81%	86%	62%	
Variações Leves em Danos Severos	88%	71%	67%	97%	82%	76%	62%	
Variações Acentuadas	80%	85%	94%	70%	97%	73%	69%	
Média	80%	84%	80%	84%	85%	87%	78%	73%

Fonte: Autor.

Figura 5.24 – Representação gráfica da Tabela 5.19.



Fonte: Autor.

Tanto no domínio do tempo quando da frequência as médias gerais de identificação dos parâmetros não apresentaram oscilações significativas entre as estruturas, com exceção

do *Benchmark* IASC-ASCE, que obteve os menores índices de acerto em ambas as análises. Esse desempenho inferior pode ser atribuído à presença de variações extremamente sutis entre os estados de dano analisados, conforme discutidos na Seção 5.2.8.2. No domínio do tempo, destaca-se o comportamento da viga biapoiada sob excitação por *shaker*, que apresentou maiores percentuais de identificação entre as estruturas. No entanto, na análise de falsos positivos, considerando dois estados de dano, essa mesma estrutura (com adição de massa de 5kg) resultou em uma alta taxa alarmes falsos, o que pode ter inflado artificialmente seus índices de acerto, comprometendo a confiabilidade do resultado.

Em relação ao desempenho por parâmetro estatístico, os resultados da Tabela 5.20 evidenciam que os melhores desempenhos ocorreram nos cenários de variações leves com danos leves (P) e variações acentuadas (I), com diversos parâmetros superando 90% de acurácia em ambos os domínios, reforçando sua robustez frente a pequenas e grandes alterações estruturais. Para os cenários com variações leves em danos severos (G), houve queda generalizada no desempenho, refletindo o desafio adicional de detectar alterações estruturais sutis em condições já comprometidas. Esse comportamento confirma a necessidade de selecionar parâmetros que mantenham bom desempenho de forma consistente entre diferentes cenários de dano, evitando métricas que apresentem desempenho pontual, mas instável.

Tabela 5.20 – Relação de Parâmetros com melhor desempenho da identificação entre dois estados de dano.

DOMÍNIO		TEMPO				FREQUÊNCIA			
PARÂMETROS		P	G	I	MÉDIA	P	G	I	MÉDIA
SEP.	EXTREMO MÍNIMO	81%	81%	81%	81%	81%	63%	81%	75%
	EXTREMO MÁXIMO	88%	81%	88%	85%	88%	81%	94%	88%
	1º QUARTIL	88%	75%	94%	85%	94%	81%	81%	85%
	3º QUARTIL	75%	63%	94%	77%	100%	81%	94%	92%
POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	69%	69%	63%	67%	94%	81%	94%	90%
	MÉDIA HARMÔNICA	38%	44%	38%	40%	81%	75%	81%	79%
	MÉDIA GEOMÉTRICA	56%	56%	63%	58%	88%	75%	88%	83%
	MÉDIA DOS QUAD.	100%	81%	94%	92%	88%	81%	94%	88%
	RAIZ QUAD. DA MÉDIA	100%	81%	94%	92%	100%	81%	94%	92%
	2º QUARTIL	63%	69%	81%	71%	94%	75%	88%	85%
	MODA	63%	69%	63%	65%	81%	63%	81%	75%
	PONTO MÉDIO	75%	63%	69%	69%	94%	81%	94%	90%
DISPERSÃO	AMP. DE PICO	81%	69%	81%	77%	88%	81%	94%	88%
	AMP. TOTAL	94%	81%	88%	88%	88%	81%	94%	88%
	AMP. INTERQUARTIL	81%	75%	94%	83%	94%	94%	94%	94%
	AMP. DE PERCENTIS	88%	75%	88%	83%	88%	81%	88%	85%
	MIDHINGE	81%	75%	75%	77%	88%	75%	88%	83%
	DESvio MÉDIO	94%	81%	100%	92%	100%	75%	94%	90%
	VARIÂNCIA	100%	75%	94%	90%	81%	81%	94%	85%
	DESvio PADRÃO	100%	81%	94%	92%	100%	88%	94%	94%
FORMA	COEF. DE VARIAÇÃO	63%	63%	63%	63%	94%	75%	88%	85%
	ASSIMETRIA	69%	63%	81%	71%	81%	75%	75%	77%
	CURTOSE	81%	56%	81%	73%	81%	69%	81%	77%
	M. DE 6ª ORDEM	88%	69%	88%	81%	88%	75%	81%	81%
	COEF. QUART. ASS.	56%	75%	75%	69%	88%	88%	75%	83%
	COEF. PERC. CURTOSE	75%	56%	81%	71%	81%	81%	88%	83%
	FATOR DE CRISTA	81%	69%	75%	75%	81%	63%	81%	75%
	FATOR K	94%	81%	94%	90%	94%	81%	94%	90%
	1º COEF. PEARSON	56%	75%	50%	60%	88%	81%	88%	85%
	2º COEF. PEARSON	63%	69%	81%	71%	88%	81%	81%	83%
DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	44%	31%	38%	38%	94%	88%	88%	90%
	2ª CAT. DA ADS	50%	38%	44%	44%	94%	94%	88%	92%
	3ª CAT. DA ADS	63%	50%	75%	63%	88%	75%	81%	81%
	4ª CAT. DA ADS	81%	69%	88%	79%	88%	81%	88%	85%
	5ª CAT. DA ADS	75%	75%	88%	79%	81%	81%	88%	83%
	6ª CAT. DA ADS	81%	88%	88%	85%	81%	63%	88%	77%
	7ª CAT. DA ADS	81%	69%	94%	81%	88%	69%	94%	83%
	8ª CAT. DA ADS	81%	75%	75%	77%	81%	63%	88%	77%
	9ª CAT. DA ADS	81%	75%	88%	81%	56%	44%	56%	52%
	10ª CAT. DA ADS	81%	75%	75%	77%	69%	69%	69%	69%
	11ª CAT. DA ADS	81%	69%	88%	79%	56%	50%	63%	56%
	12ª CAT. DA ADS	94%	69%	81%	81%	56%	44%	50%	50%
	13ª CAT. DA ADS	63%	50%	63%	58%	44%	44%	44%	44%
	14ª CAT. DA ADS	69%	56%	56%	60%	31%	31%	13%	25%
	15ª CAT. DA ADS	75%	25%	50%	50%	13%	13%	0%	8%
	16ª CAT. DA ADS	13%	25%	10%	16%	0%	13%	0%	4%
	17ª CAT. DA ADS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MÉDIA ANÁLISE	73%	65%	74%	71%	78%	69%	77%	75%	

Fonte: Autor.

Com base nos desempenhos observados, foram elaboradas quatro propostas iniciais de conjuntos de parâmetros (Tabela 5.21) para aplicação em métodos multivariados de identificação de estados estruturais. A seleção dos parâmetros considerou os seguintes critérios:

- ◆ Consistência de desempenho, priorizando médias de identificação iguais ou superiores a 90%, indicando bom desempenho nas três categorias de alteração estrutural consideradas;
- ◆ Abrangência entre diferentes estruturas e tipos de excitação (impacto, *shaker* e trem);
- ◆ Prevenção de redundâncias entre métricas fortemente correlacionadas, a fim de evitar sobreposição informacional e garantir maior eficiência do modelo.

Tabela 5.21 – Propostas de conjuntos de parâmetros para uso em classificação estrutural.

PROPOSTAS	1 ^a		2 ^a		3 ^a		4 ^a	
PARÂMETROS	T	F	T	F	T	F	T	F
MÉDIA ARITMÉTICA		x				x		
MÉDIA DOS QUAD.	x	x	x	x	x	x	x	x
RAIZ QUAD. DA MÉDIA	x	x	x	x	x	x	x	x
AMP. INTERQUARTIL	x	x		x	x	x		x
DESVIO MÉDIO	x	x	x		x	x	x	
DESVIO PADRÃO	x	x	x	x	x	x	x	x
FATOR K	x	x	x	x				
1 ^a CAT. DA ADS		x		x				
2 ^a CAT. DA ADS		x		x		x		x
QUANT. PAR.	15		12		12		9	

Fonte: Autor.

A quantidade total de parâmetros (QUANT. PAR.) corresponde à soma dos parâmetros adotados em cada proposta, considerando tanto o domínio do tempo quanto o domínio da frequência. Algumas observações adicionais foram levadas em consideração na definição das propostas:

- ◆ Redundância evitada: embora o 3º quartil no domínio da frequência tenha apresentado média de 92%, foi excluído em favor da amplitude interquartil, que já incorpora esse valor em seu cálculo e obteve desempenho superior e mais estável nos dois domínios.
- ◆ Desempenho excepcional em cenários específicos: a média dos quadrados no domínio da frequência (88%) destacou-se no cenário de variações leves e danos discretos, atingindo 100% de acerto em todas as estruturas, com exceção do *Shear Building II* sob excitação por shaker, onde ocorreu falha na análise de variância — fator que reduziu sua média geral de forma não representativa. Por esse motivo, o parâmetro foi fixado entre os principais (em verde).
- ◆ Parâmetros com desempenho pontual elevado: métricas como a amplitude interquartil no domínio do tempo (83%), a média aritmética e o desvio médio no domínio da frequência (ambos com 90%), foram incluídas em um grupo de análise complementar (marcado em azul), por apresentarem excelentes

desempenhos principalmente em excitações por impacto. Contudo, é necessário avaliar se sua inclusão compromete o desempenho em estrutura com excitação por *shaker*.

- ◆ Parâmetros derivados com bons resultados: o fator K, derivado da raiz quadrada da média, apresentou bons resultados em ambos os domínios (ambos com 90%) e foi incluído em um grupo de verificação adicional (em laranja). A 1ª categoria da Análise de Dados Simbólicos (ADS) no domínio da frequência, também com 90%, foi incluída neste mesmo grupo com objetivo de avaliar possíveis sua contribuição em relação à segunda categoria da ADS, que já integra o conjunto principal.

Importa ressaltar que nenhum dos parâmetros selecionados apresentou incidência elevada de falsos positivos nas análises realizadas. Desconsiderando os registros da Viga Biapoiada, a maioria dos parâmetros gerou no máximo um falso positivo, o que reforça a confiabilidade dos conjuntos propostos para aplicações práticas em monitoramento da integridade estrutural (SHM).

Este cuidado é essencial, pois a adoção de parâmetros com alta sensibilidade, mas também alta propensão a alarmes falsos, pode comprometer a confiabilidade do sistema como um todo, conforme alertado por Farrar e Worden (2012).

5.5 AGRUPAMENTO PELO MÉTODO *K-MEANS*

Nesta seção, apresentam-se os resultados do agrupamento multivariado realizado por meio do algoritmo *k-means*, utilizando inicialização aleatória e a métrica de similaridade *cityblock*. A escolha dessas configurações, em detrimento de outras opções discutidas na Seção 3.2.2, fundamenta-se nos resultados satisfatórios obtidos por Vasconcelos (2024), os quais estão em concordância com os resultados apresentados por Alves (2016)

O algoritmo *k-means* foi incorporado ao código desenvolvido para extração de parâmetros estatísticos a partir de registros de aceleração, com o objetivo de agrupar os dados segundo os estados estruturais, em um número previamente definido de *clusters*. Adicionalmente, implementou-se uma adaptação ao final da rotina permitindo a associação dos grupos inicialmente formados (tratamentos) a estados estruturais nomeados, com base na maioria dos registros atribuídos a cada *cluster*. Essa adaptação possibilitou uma visualização mais clara do agrupamento final dos registros por tratamento.

O algoritmo *k-means*, ao contrário do teste de *Scott-Knott*, realiza análises multivariadas, sendo assim, foram propostos grupos com os parâmetros estatísticos que apresentaram os melhores resultados na análise univariada por *Scott-Knott*. Inicialmente, foram analisadas as quatro propostas de grupos de parâmetros estatísticos descritas na Tabela 5.21, compostas por 15, 12, 12 e 9 parâmetros em ambos os domínios. Essas propostas foram aplicadas aos dados das seguintes estruturas: *Benchmark* IASC-ASCE, *Shear Building* – Fase I (submetido a excitação por impacto) e à Ponte Ferroviária KW51.

Na etapa seguinte, o grupo de parâmetros que apresentou melhor desempenho foi comparado, para as mesmas estruturas, com conjuntos de parâmetros propostos por diversos autores. Os resultados comparativos obtidos por meio do algoritmo *k-means* são apresentados a seguir.

5.5.1 COMPARATIVO ENTRE GRUPOS DE PARÂMETROS PROPOSTOS

As Tabelas 5.22 a 5.25 apresentam os resultados do agrupamento multivariado realizado por meio do algoritmo *k-means* para os seguintes casos: *Benchmark* IASC-ASCE (acelerômetros 16 e 1), *Shear Building* – Fase I (excitação por impacto a cada 10 s) e Ponte Ferroviária KW51, considerando as quatro propostas de grupos de parâmetros descritas na Seção 5.3 (Tabela 5.21).

Em cada tabela, são indicados os grupos nomeados (estados de dano) aos quais os conjuntos de registros de aceleração foram atribuídos, com base na maioria das classificações obtidas em cada cluster. Também são apresentados o número de identificações corretas quanto ao estado estrutural real e os percentuais de acerto em relação ao total de registros por tratamento (informado abaixo do nome de cada estrutura). Os estados de dano foram definidos conforme as análises principais M, D e O, conforme especificado na Tabela 5.1.

Tabela 5.22 – Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para o *Benchmark* (acelerômetro 16).

K-MEANS		PROPOSTAS											
ESTRUTURA	DANO	1 - PAR15				2 - PAR12			3 - PAR 12			4 - PAR 9	
BENCHMARK	0	a3	27	100%	a2	25	93%	a1	26	96%	a3	27	100%
	1	a3	5	19%	a2	7	26%	a1	8	30%	a3	0	0%
27	2	a1a2	13	48%	a1	19	70%	a2	22	81%	a2	15	56%
ACC 16	MÉDIA			56%			63%			69%			52%

Fonte: Autor.

Tabela 5.23 - Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para o *Benchmark* IASC-ASCE (acelerômetro 1).

K-MEANS		PROPOSTAS											
ESTRUTURA	DANO	1 - PAR15				2 - PAR12			3 - PAR 12			4 -PAR 9	
BENCHMARK	0	a2	22	81%	a2	22	81%	a1	17	63%	a3	17	63%
	1	a3	19	70%	a3	19	70%	a2	26	96%	a2	26	96%
	27	2	a1	27	100%	a1	26	96%	a3	27	100%	a1	27
ACC 1	MÉDIA			84%			83%			86%			86%

Fonte: Autor.

Tabela 5.24 - Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para o *Shear Building* – Fase I, sob impacto a cada 10s.

K-MEANS		PROPOSTAS											
ESTRUTURA	DANO	1 - PAR15				2 - PAR12			3 - PAR 12			4 -PAR 9	
SHEAR BUILDING I Impacto 10s	6	a6	8	36%	a6	9	41%	a1a5	9	41%	a4	9	41%
	7	a1	8	36%	a3	9	41%	a4	18	82%	a4	13	59%
	8	a2	3	14%	a3	3	14%	a3	14	64%	a3	13	59%
	9	a3	5	23%	a2	7	32%	a6	15	68%	a2	15	68%
	10	a5	9	41%	a5	8	36%	a2	0	0%	a6	2	9%
22	11	a5	13	59%	a5	13	59%	a2	22	100%	a6	20	91%
ACC 1	MÉDIA			35%			37%			59%			55%

Fonte: Autor.

Tabela 5.25 - Resultados de agrupamento dos parâmetros propostos para a Ponte Ferroviária KW51.

K-MEANS		PROPOSTAS											
ESTRUTURA	DANO	1 - PAR15				2 - PAR12			3 - PAR 12			4 -PAR 9	
PONTE	0	a1	33	59%	a2	40	71%	a2	33	59%	a1	33	59%
56	1	a2	40	71%	a1	33	59%	a1	41	73%	a2	41	73%
ACC3	MÉDIA			65%			65%			66%			66%

Fonte: Autor.

A proposta 3 apresentou os melhores resultados de classificação em todas as estruturas e acelerômetros analisados. Embora para a ponte e para o acelerômetro 1 do *Benchmark* as propostas 3 e 4 tenham tido médias equivalentes, observou-se uma redução de desempenho de 17% e 4%, respectivamente, ao se utilizar a proposta 4. Dessa forma, foi selecionada a proposta 3 que considera um conjunto com 12 parâmetros estatísticos (PAR 12), a saber:

- ◆ Média dos quadrados, raiz quadrada da média, amplitude interquartil, desvio médio e desvio padrão, nos domínios do tempo e da frequência;
- ◆ Média aritmética e 2ª categoria da ADS, no domínio da frequência.

Tais resultados mostraram que, embora parâmetros como a média aritmética (domínio da frequência), amplitude interquartil (tempo) e o desvio médio (frequência) tenham se destacado na identificação de estruturas submetidas a impacto, sua inclusão no grupo de parâmetros não compromete a análise de estruturas submetidas a outros tipos de excitação.

Por outro lado, a inclusão de parâmetros que apresentaram bons (mas não ótimos) resultados, como o fator K (tempo e frequência) e a 1ª categoria da ADS (frequência), prejudicaram os resultados das análises.

A escolha de incluir também o acelerômetro 1 na análise do *Benchmark* IASC-ASCE, deve-se à observação de bons resultados obtidos por ele em comparação aos demais sensores. De acordo com a Figura 4.55, esse acelerômetro está posicionado próximo ao local dos danos simulados, (ausência de rigidez nas diagonais do 1º, e posteriormente do 1º e 3º andar). Na média geral, os resultados obtidos com o acelerômetro 1 foram 20,75% superiores aos do acelerômetro 16, localizado no topo da estrutura e em direção oposta.

Essas evidências indicam uma forte influência do posicionamento dos sensores na eficácia do método. A análise mostra que a correta classificação do estado estrutural depende mais do nível e da localização do dano, bem como do posicionamento do sensor, do que do tipo da estrutura ou da excitação aplicada, ao menos no contexto das estruturas avaliadas.

5.5.2 COMPARATIVO COM PARÂMETROS PROPOSTOS POR OUTROS AUTORES

Nesta seção, são avaliados três grupos de parâmetros propostos pela autora: o parâmetro simbólico ADS S, publicado em Vasconcelos et al. (2024), cuja distribuição de frequências adota o número de categorias definido pela regra de Sturges; o desvio padrão no domínio da frequência (F-SD), identificado na Tabela 5.20 como o parâmetro estatístico de melhor desempenho individual; e o conjunto multivariado PAR 12, desenvolvido ao longo deste trabalho. Esses grupos são comparados com os conjuntos de parâmetros sugeridos por outros autores, conforme descrito na Seção 3.1.5-II e sintetizados na Tabela 5.26.

A escolha de incluir um parâmetro isolado na comparação com os demais grupos justifica-se pelo fato de que, na seção anterior, a inserção de variáveis com desempenho apenas razoável comprometeu os resultados obtidos com os conjuntos compostos. Assim, optou-se por avaliar o desempenho individual do parâmetro F-SD por meio do algoritmo de agrupamento *k-means*.

No Apêndice D encontram-se as Tabelas completas com os resultados das análises resumidas na Tabela 5.27, a qual apresenta os percentuais de acerto do algoritmo *k-means* para diferentes conjuntos de parâmetros, aplicados a quatro estruturas: Benchmark

(acelerômetros 16 e 1), *Shear Building* – Fase I, e Ponte Ferroviária KW51. A última coluna mostra a média de desempenho geral de cada conjunto. A Figura 5.25 apresenta a representação gráfica da Tabela 5.27.

Tabela 5.26 – Resumo dos parâmetros analisados.

Autores	Id.	Quant.	Parâmetros
Autor	PAR 12	12	Média dos Quadrados, Raiz Quadrada da Média, Amplitude Interquartil, Desvio Médio e Desvio Padrão (Tempo e Frequência) e Média Aritmética e 2ª categoria da ADS (Frequência)
	F-SD	1	Desvio Padrão (Frequência)
Choi e Sweetmans (2010)	PAR4	4	Média; Desvio Padrão; Curtose; Assimetria
Farrar e Worden (2012)	PAR 10	10	Média; Desvio Padrão; Curtose; Assimetria; Amplitude de Pico; Média dos Quadrados; Raiz Quadrada da Média; Variância; Fator de Crista; Fator K
Santos et al. (2017)	IQR	1	Amplitude Interquartil
Cardoso (2019b)	IQRM	3	1º, 2º e 3º Quartis
Cardoso (2019a)	TF-IQRM	6	1º, 2º e 3º Quartis (Tempo e Frequência)
Cury (2010)	ADS 20	20	Distribuição de frequência com 20 categorias
Alves (2012)	ADS 12	12	Distribuição de frequência com 12 categorias
Alves (2016)	ADS 10	10	Distribuição de frequência com 10 categorias
Vasconcelos et al. (2024)	ADS S	k	Distribuição de frequência com k categorias, sendo k determinada pela regra de Sturges (Equação 3.4)

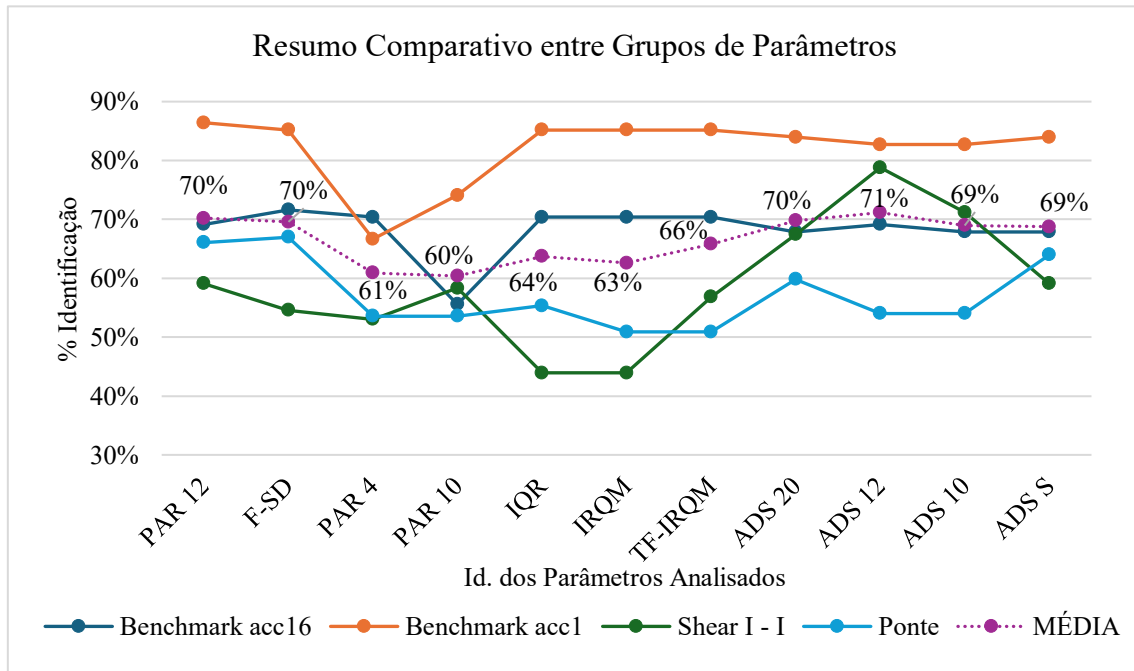
Fonte: Autor.

Tabela 5.27 – Resumo do desempenho de diversos parâmetros propostos.

K-MEANS	ESTRUTURA	Benchmark	Benchmark	Shear I - I	Ponte	MÉDIA
AUTORES	ID.	acc16	acc1	acc 1	acc 3	
Autor	PAR 12	69%	86%	59%	66%	70%
	F-SD	72%	85%	55%	67%	70%
Choi e Sweetmans (2010)	PAR 4	70%	67%	53%	54%	61%
Farrar e Worden (2012)	PAR 10	56%	74%	58%	54%	60%
Santos et al. (2017)	IQR	70%	85%	44%	55%	64%
Cardoso (2019b)	IRQM	70%	85%	44%	51%	63%
Cardoso (2019a)	TF-IRQM	70%	85%	57%	51%	66%
Cury (2010)	ADS 20	68%	84%	67%	60%	70%
Alves (2012)	ADS 12	69%	83%	79%	54%	71%
Alves (2016)	ADS 10	68%	83%	71%	54%	69%
Vasconcelos et al. (2024)	ADS S	68%	84%	59%	64%	69%

Fonte: Autor.

Figura 5.25 – Representação gráfica da Tabela 5.27.



Os melhores desempenhos foram apresentados pelos grupos **PAR 12** (Autor), **F-SD** (Autor) e os grupos que utilizaram a Análise de Dados Simbólicos no domínio do tempo – **ADS 20** (CURY, 2010), **ADS 12** (ALVES, 2012), **ADS 10** (ALVES, 2016), **ADS TS** (Autor), todos com médias gerais de correta identificação acima de 69%.

O parâmetro **F-SD** demonstrou um comportamento notável, considerando que é representado por apenas uma variável (desvio padrão no domínio da frequência), superando diversos grupos compostos. Seu desempenho só foi inferior ao do conjunto **ADS 12** na estrutura *Shear Building*.

Apesar de a **ADS 12** ter apresentado melhor média geral (71%), a dependência do método em relação à definição do número de categorias para cada tipo de sinal e estrutura configura uma limitação importante — já relatada por Cury (2010). Nesta própria análise, observou-se variação significativa no desempenho dos grupos aplicados aos sinais do *Shear Building*, mesmo com quantidades próximas de categorias (20, 12, 10 e $k=15$).

Ainda assim, é inegável o superior desempenho dos métodos ADS frente à excitação por impacto, superando os resultados obtidos com PAR 12 e F-SD, que, por sua vez, apresentaram melhor desempenho nas demais estruturas, alcançando médias gerais de 70%.

Ao observar a divisão dos grupos nas Tabelas D.1 e D.2, verifica-se que, embora a ADS12 tenha apresentado resultados excelentes para o *Shear Building* – sendo o único grupo

capaz de identificar todos os estados estruturais dessa estrutura sem sobreposição –, tanto ela quanto a ADS 10 não foram capazes de separar os estados de dano da Ponte Ferroviária.

Também se constata que nenhum dos grupos com melhor desempenho foi capaz de distinguir o estado estrutural intacto daquele com ausência de rigidez nas diagonais do 1º andar, quando utilizados os registros do acelerômetro 16 do *Benchmark*. Tal resultado reforça a importância da utilização de múltiplos sensores, estrategicamente posicionados ao longo da estrutura, especialmente em sistemas de grande porte, de modo a possibilitar a identificação de danos localizados e de diferentes magnitudes.

De modo geral, os parâmetros propostos pela autora (**PAR 12** e **F-SD**) demonstraram-se robustos e adequados, especialmente na análise de estruturas reais e de grande porte, como a Ponte Ferroviária KW51 e o *Benchmark* IASC-ASCE, caracterizadas por maior influência do ruído e da complexidade da resposta dinâmica. Esses conjuntos foram capazes de classificar corretamente todos os estados de dano em diferentes clusters, evidenciando sua eficácia mesmo em contextos desafiadores.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo central investigar e comparar diferentes estratégias de parametrização de dados para a identificação de estados e danos estruturais, com foco em abordagens estatísticas e simbólicas, avaliadas por meio dos métodos de agrupamento *k-means* e *Scott-Knott*. As análises abrangeram diferentes estruturas, incluindo modelos experimentais e estruturas reais de grande porte, a fim de validar a robustez dos parâmetros sob variadas condições operacionais e níveis de excitação.

Os resultados obtidos evidenciaram a eficácia dos parâmetros propostos neste trabalho, especialmente o grupo **PAR 12**, composto por estatísticas clássicas extraídas nos domínios do tempo e da frequência, complementadas por componentes da Análise de Dados Simbólicos (ADS). Esse conjunto demonstrou desempenho consistente e equilibrado entre as diferentes estruturas analisadas, obtendo média geral de acerto igual ou superior à de outros conjuntos consagrados na literatura. Além disso, o desempenho isolado do parâmetro **F-SD** (desvio padrão no domínio da frequência) se destacou ao superar, em diversas situações, grupos compostos por múltiplas variáveis, indicando seu alto poder discriminante e potencial de aplicação prática.

Conjuntos baseados em ADS, especialmente **ADS 12**, apresentaram desempenho superior em estruturas submetidas à excitação por impacto, como o Shear Building – Fase I. No entanto, observou-se uma limitação significativa relacionada à necessidade de definição prévia do número de categorias, o que torna o método mais sensível às características específicas do sinal e da estrutura analisada, conforme já relatado por Cury (2010). Essa dependência foi reforçada pelos resultados variáveis entre as versões ADS 20, ADS 12, ADS 10 e ADS S.

A análise detalhada dos agrupamentos revelou ainda que, embora alguns conjuntos tenham sido eficazes em distinguir múltiplos estados estruturais, nenhum deles foi capaz de separar, com os dados do acelerômetro 16 do *Benchmark*, o estado estrutural intacto daquele com ausência de rigidez nas diagonais do 1º andar. Tal limitação reforça a relevância da utilização de múltiplos sensores estrategicamente posicionados, para aumentar a sensibilidade espacial da detecção de danos, especialmente em estruturas reais de grande porte, onde o ruído e a complexidade da resposta dinâmica são acentuados.

De modo geral, conclui-se que os parâmetros **PAR 12** e **F-SD**, propostos nesta pesquisa, e associados ao algoritmo *k-means*, se mostraram robustos, sensíveis e adequados para

aplicação em diferentes contextos estruturais, com destaque para estruturas reais como a Ponte Ferroviária KW51 e de maior porte como o *Benchmark* IASC-ASCE. Esses conjuntos foram capazes de classificar corretamente todos os estados de dano em diferentes *clusters*, evidenciando sua aplicabilidade mesmo em cenários desafiadores e reforçando sua relevância para aplicações práticas em monitoramento de integridade estrutural.

Vale ressaltar ainda que os métodos propostos são qualitativos, ou seja, indicam a presença, ausência ou variação relativa dos estados de dano, sem quantificar diretamente sua magnitude ou localização exata. A abordagem baseia-se na análise comparativa entre respostas dinâmicas, considerando padrões estatísticos e espectrais dos sinais de aceleração, o que permite inferir alterações estruturais com base em desvios das condições de referência.

Embora não forneçam métricas precisas sobre o nível de dano, esses métodos se mostram eficazes para triagem, monitoramento contínuo e detecção preliminar, especialmente em contextos, onde medições constantes são limitadas ou economicamente inviáveis. Em aplicações práticas, esse tipo de análise pode subsidiar decisões sobre inspeções mais detalhadas ou intervenções corretivas.

Por fim, destaca-se que nas análises individuais dos parâmetros, realizadas por meio do método *Scott-Knott*:

- ◆ Nenhum dos parâmetros analisados foi capaz de identificar danos leves, como o afrouxamento de uma das ligações viga-coluna no *Benchmark* IASC-ASCE, utilizando as leituras do acelerômetro 16 (talvez de outro acelerômetro fosse possível);
- ◆ As categorias centrais da ADS no domínio do tempo, em geral, apresentaram bons resultados de classificação, bem como as primeiras categorias no domínio da frequência;
- ◆ As medidas separatrizes e de posição mostraram melhor desempenho em estruturas submetidas a impacto;
- ◆ Na análise dos parâmetros extraídos dos ensaios da Viga Biapoiada, foram identificados diversos falsos positivos, provavelmente provenientes de impactos associados;

- ◆ Os estados de dano severos, mas com variações pequenas no *Shear Building*, como a adição de 5kg e 6kg, mostraram-se de difícil detecção, possivelmente em razão das massas não estarem devidamente fixadas, apenas apoiadas.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

As principais contribuições desta pesquisa incluem:

- ◆ A realização de ensaios inéditos em duas estruturas (***Shear Building de 10 pavimentos e Pá Eólica***), ampliando o banco de dados disponível para testes de técnicas de SHM;
- ◆ A análise do comportamento individual de diversos parâmetros estatísticos e categorias da Análise de Dados Simbólicos (ADS), tanto no domínio do tempo quanto da frequência;
- ◆ A aplicação do método de agrupamento de médias proposto por ***Scott-Knott (1974)*** como técnica de identificação de estados estruturais a partir de parâmetros extraídos de registros de aceleração;
- ◆ A definição e proposição de um novo grupo de parâmetros estatísticos (**PAR 12**) e de um parâmetro individual (**F-SD**), que se mostraram robustos e eficazes para diferentes tipos de estrutura e condição operacional;
- ◆ A realização de um estudo comparativo entre os parâmetros propostos e diversos conjuntos previamente sugeridos na literatura, utilizando o algoritmo ***k-means*** como ferramenta de agrupamento.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para pesquisas futuras, destacam-se:

- ◆ Analisar o desempenho dos parâmetros propostos utilizando os registros de todos os acelerômetros disponíveis nas estruturas, especialmente no Benchmark IASC-ASCE, com o objetivo de identificar sensores mais sensíveis a danos localizados, como o afrouxamento da ligação viga-coluna;
- ◆ Investigar a influência da temperatura na identificação de danos por meio dos parâmetros propostos;

- ◆ Avaliar o comportamento dos parâmetros frente à variação na localização de massas, ou danos, especialmente em estruturas excitadas por shaker, comparando com os resultados obtidos sob excitação por impacto;
- ◆ Analisar o desempenho dos parâmetros após a aplicação de transformações estatísticas ou espectrais aos dados, como as sugeridas por Morettin e Bussab (2010);
- ◆ Realizar testes com diferentes tamanhos de janelas temporais, tanto em função do tempo quanto da frequência de aquisição, para o Benchmark IASC-ASCE e outras estruturas;
- ◆ Aplicar os conjuntos PAR 12 e F-SD a bancos de dados de outras estruturas reais, para verificar sua generalização;
- ◆ Estudar a ocorrência de falsos positivos em outros estados de dano, tanto com os parâmetros propostos quanto com os de outros autores, avaliando se o comportamento varia conforme a severidade ou localização do dano;
- ◆ Avaliar o potencial dos parâmetros propostos não apenas para detecção, mas também para localização de danos ou indicação de regiões críticas;
- ◆ Realizar testes com o k-means utilizando centroides iniciais fixos, para verificar a sensibilidade dos resultados à inicialização do algoritmo e avaliar a robustez dos parâmetros frente a essa variação.

7 REFERÊNCIAS

ABDELJABER, O.; AVCI, O.; KIRANYAZ, S.; GABBOUJ, M.; INMAN, D. J. Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks. **Journal of Sound and Vibration**, v. 388, p. 154-170, 2017.

ABOZEID, H. M.; FAYED, M. N.; MOURAD, S. M.; KHALIL, A. H. Damage detection of cable-stayed bridge using curvature changes in modal shapes. **International Conference on Bridge Management Systems - Monitoring, Assessment and Rehabilitation**, Cairo, Egypt, 2006.

ADAMS, R. D.; BROWNJOHN, J. M. W.; CAWLEY, P. The detection of defects in GRP lattice structures by vibration measurements. **NDT & E International**, 24(3), p. 123–134, DOI:10.1016/0963-8695(91)90143-q, 1991.

ALLEMANG, R. J. **Vibration: Experimental Modal Analysis**. (Lecture Notes) Cincinnati: Department of Mechanical Engineering, University of Cincinnati, 1999.

ALLEMANG, R.; BROWN, D. A correlation coefficient for modal vector analysis, in: **Proceedings of the International Modal Analysis Conference**, 1, Orlando, Estados Unidos, p. 145-151, 1982.

ALVES, Vinícius Nicchio. **Estudo de novas estratégias para identificação de danos estruturais a partir de dados vibracionais**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2012.

ALVES, Vinícius Nicchio. **Técnicas de anormalidade aplicadas à detecção de danos estruturais**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016.

ALVES, V., CURY, A. A fast and efficient feature extraction methodology for structural damage localization based on raw acceleration measurements. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 28, n. 7. DOI: 10.1002/stc.2748. 2021.

ALVES, V.; CURY, A.; ROITMAN, N.; MAGLUTA, C.; CREMONA, C. Novelty detection for SHM using raw acceleration measurements. **Structural Control and Health Monitoring**, 22(9), 1193–1207, DOI:10.1002/stc.1741, 2015a.

ALVES, V.; CURY, A.; ROITMAN, N.; MAGLUTA, C.; CREMONA, C. Structural modification assessment using supervised learning methods applied to vibration data. **Engineering Structures**, v. 99, p. 439-448, 2015b.

ALVES, V. N.; OLIVEIRA, M. M.; RIBEIRO, D.; CALÇADA, R.; CURY, A. Model-based damage identification of railway bridges using genetic algorithms. **Engineering Failure Analysis**, v. 118, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104845, 2020.

AMARAL, Rafaelle Piazzaroli Finotti. **Aplicação de métodos computacionais a dados vibracionais para detecção de alterações estruturais**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2017.

AMARAL, Rafaelle Piazzaroli Finotti. **Inteligência artificial aplicada ao monitoramento de estruturas: Detecção de alterações mecânico-estruturais baseada**

no uso de redes neurais autocodificadoras esparsas para a caracterização de respostas dinâmicas. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2022.

ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. **Identificação de Estruturas em Operação Através de Análise Modal Híbrida**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ARAÚJO, D. C.; SHZU, M. A. M.; ÁVILA, S. M.; MORAIS, M. V. G. Análise numérica e experimental de um protótipo de pá de turbina eólica, in: **Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEC, Brasília, DF, Brazil, 2016.

ASADOLLAHI, P.; HUANG, Y.; LI, J. Bayesian Finite Element Updating and Assessment of Cable-Stayed Bridges using Wireless Sensor Data. **Sensors**, v. 18, n.9, p. 1-22, 2018.

AVCI, O.; ABDELJABER, O.; KIRANYAZ, S.; HUSSEIN, M.; GABBOUI, M.; INMAN, D. J. A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 147, 107077, DOI:10.1016/j.ymssp.2020.107077. 2021.

AZAM, S. E.; RAGEH, A.; LINZELL, D. Damage detection in structural systems utilizing artificial neural networks and proper orthogonal decomposition. **Structural Control and Health Monitoring**, v.26, n.2, p. 1–24, DOI: 10.1002/stc.2288. 2019.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2004. 410 p.

BERNARDES, P. L. Jr. **Amortecedor tipo pêndulo invertido para controle de vibrações em edifícios altos**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 85 p.

BEZERRA, R. A. **Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração**. 2004. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

BRANCO, H. **Colapsos de pontes: Lições aprendidas**. 2013. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2013.

CALINSKI, T.; HARABASZ, J. A dendrite method for cluster analysis. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v. 3(1), p. 1–27. DOI: 10.1080/03610927408827101, 1974.

CARDOSO, Rharã de Almeida. **Approaches for automated damage detection in structural health monitoring**. 2018. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CARDOSO, R. A.; CURY, A.; BARBOSA, F. Automated real-time damage detection strategy using raw dynamic measurements. **Engineering Structures**, 196, 109364, DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109364, 2019a.

- CARDOSO, R. A.; CURY, A.; BARBOSA, F.; GENTILE, C. Unsupervised real-time SHM technique based on novelty indexes. **Structural Control and Health Monitoring**, e2364, DOI: 10.1002/stc.2364, 2019b.
- CATBAS, F. N.; BROWN, D. L.; AKTAN, A. E. Use of Modal Flexibility for Damage Detection and Condition Assessment: Case Studies and Demonstrations on Large Structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 132, n. 11, p. 1699-1712, 2006.
- CAWLEY, P.; ADAMS, R. D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v.14, n.2), 49–57, DOI:10.1243/03093247v142049, 1979.
- CELEBI, M. Beating Effect Identified from Seismic Responses of Instrumented Buildings. **New Horizons and Better Practices**. DOI:10.1061/40946(248)14. 2012.
- CHAIM, Lucas Perroni. **Detecção e classificação de falhas estruturais de um sistema mecânico por meio de uma rede neural artificial**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.
- CHAIM, L. P.; CHAVARETTE, F. R.; LOPES, M. L. M. Caracterização de Padrões de Falha através de uma Rede Neural Artificial Fuzzy ARTMAP. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, v.6, n.1, 2018.
- CHANG, H. T.; ALLEN, D. H. Predicted dynamic response of a composite beam with history-dependent damage. **Computer & Structures**, v. 26, n. 4, p. 575-580, 1987.
- CHEN, J. C.; GARBA, J. A. On-orbit damage assessment for large space structures. **AIAA Journal**, 26(9), 1119-1126, DOI: 10.2514/3.10019, 1988.
- CHOI, M.; SWEETMAN, B. Efficient Calculation of Statistical Moments for Structural Health Monitoring. **Structural Health Monitoring**, v. 9, n. 1, p. 13–24, 2010.
- CHOI, S., PARK, S., YOON, S., & STUBBS, N. Nondestructive damage identification in plate structures using changes in modal compliance. **NDT & E International**, v. 38, n.7, p. 529–540. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.01.007. 2005.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamic of structures**. 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003.
- CONG, Y.; SIN-CHI, K.; LIAM, J. B.; CAMPBELL, R. M. Implementing bridge model updating for operation and maintenance purposes: examination based on UK practitioners' views. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 18, n.12, p.1638–1657, DOI: 10.1080/15732479.2021.1914115. 2021.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. **Mathematics of Computation**, v. 19, n. 90, p. 297-301, DOI: 10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1, 1965.
- CRÉMONA, C.; CURY, A.; ORCESI, A.; DIELEMAN, L. Symbolic data analysis and supervised/non supervised learning algorithms for bridge health monitoring. **In. 9th World Congress on Railway Research**, 9., 2011. Lille. Anais... Lille: World Congress on Railway Research, 2011.

- CURY, A. Techniques d'anormalité appliquées à la surveillance de santé structurale. 2010. Université Paris-Est, 2010.
- CURY, A. A.; CRÉMONA, C.; DIDAY, E. Application of symbolic data analysis for structural modification assessment. **Engineering Structures**, v. 32, n. 3, p. 762-775, DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.12.004, 2010.
- CURY, A. A.; CRÉMONA, C. Assignment of structural behaviours in long-term monitoring: application to a strengthened railway bridge. **Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 4, p. 422-441, DOI: 10.1177/1475921711434858, 2012.
- CURY, A. A.; CRÉMONA, C.; DUMOULIN, J. Long-term monitoring of a PSC box girder bridge: operational modal analysis, data normalization and structural modification assessment. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 33, p. 13-37, DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.07.005, 2012.
- CURY, A. A.; RIBEIRO, D. R. F.; MELO, A. D. **Técnicas de monitoramento de estruturas**: uma revisão abrangente. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 248 p.
- DACKERMANN, U.; SMITH, W. A.; RANDALL, R. B. Damage identification based on response-only measurements using cepstrum analysis and artificial neural networks. **Structural Health Monitoring**, v. 13, n. 4, p. 430-444, 2014.
- DACKERMANN, U.; SMITH, W. A.; ALAMDARI, M. M.; LI, J.; RANDALL, R. B. Cepstrum-based damage identification in structures with progressive damage. **Structural Health Monitoring**, v. 18, n. 1, p. 87-102, 2018.
- DAVIES, D. L.; BOULDIN, D. W. A Cluster Separation Measure. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, PAMI-1(2), p. 224-227. DOI: 10.1109/tpami.1979.4766909, 1979.
- DEWESOFT. **DewesoftX** v. 2024.5. 2024.
- DIPASQUALE, E.; CAKMAK, A. S. **Identification of the serviceability limit state and detection of seismic structural damage**. Report NCCER-88-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y., 1988.
- DIPASQUALE, E.; CAKMAK, A. S. Seismic damage assessment using linear models. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 9, n. 4, 1990.
- DIPASQUALE, E.; JU, J.; ASKAR, A.; CAKMAK, A. S. Relation between Global Damage Indices and Local Stiffness Degradation. **Journal of Structural Engineering**, 116(5), p. 1440-1456, DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:5(1440), 1990.
- DOEBLING, S. W. Minimum-rank optimal update of elemental stiffness parameters for structural damage identification. **AIAA Journal**, v.34, n.12, p. 2615-2621. DOI:10.2514/3.13447. 1996.
- DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. **The Shock and Vibration Digest**, 1998.

DYER, D.; STEWART, R. M. Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. **Journal of Mechanical Design**, v. 100, p. 229-235, 1978.

ENERSUD. **Indústria e Soluções Energéticas Ltda.** 2025. Disponível em: <<https://www.enersud.com.br/turbina-eolica-verne-555/>>. Acesso em: 20 maio 2025.

ESPOSITO, F.; MALERBA, D.; TAMMA, V. **Analysis of Symbolic Data: Exploratory Methods for Extracting Statistical Information from Complex Data**, Springer-Verlag, chapter Dissimilarity Measures for Symbolic Data, p. 165-185. 2000.

EWINS, D. J. **Modal Testing: Theory, Practice and Application**. 2 ed., Research Studies Press, 2000.

FINOTTI, R. P.; CURY, A. A.; BARBOSA, F. S. An SHM approach using machine learning and statistical indicators extracted from raw dynamic measurements. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v.16, n.2, e165. DOI: 10.1590/1679-78254942. 2019.

FONTANA, A.; NALDI, M. C. Estudo de Comparação de Métodos para Estimação de Números de Grupos em Problemas de Agrupamento de Dados. São Carlos: ICMC, 2009.

FARRAR, C. R., WORDEN, K. An Introduction to Structural Health Monitoring. **Springer**, p. 1-7, 1975.

FARRAR, C.R., WORDEN, K. **Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective**. Chichester, Wiley, 2012.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: um programa para análises e ensino de estatística**. Versão 5.8. Lavras: UFLA, 2021. Disponível em: <https://des.ufla.br/~danielff/sisvar.html>. Acesso em: dez, 2024.

FERREIRA, J. C. **Desempenho comparativo das Transformadas de Fourier e Hartley e aplicação embarcada para análise de vibrações mecânicas**. 2016. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade de Franca, Franca.

FIELD, A. **Discovering Statistic Using IBM SPSS Statistics**. 4 ed., SAGE Publications. 2013.

FISHER, R. A. **Statistical Methods for Research Workers**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925.

FRISWELL, M. I. Damage identification using inverse methods. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 365, n. 1851, p. 393–410, 2007.

GADÉA, A. S. M. **Identificação de Danos Estruturais a Partir das Funções de Reposta em Frequência (FRF)**. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

GOH, L.D.; BAKHARY, N.; RAHMAN, A. A.; AHMAD, B. H. Application of Neural Network for Prediction of Unmeasured Mode Shape in Damage Detection. **Advances in Structural Engineering**, v.16, n.1, p. 99–103, DOI: 10.1260/1369-4332.16.1.99. 2013.

GONZÁLEZ-PÉREZ, C.; VALDÉS-GONZÁLEZ, J. Identification of Structural Damage in a Vehicular Bridge using Artificial Neural Networks. **Structural Health Monitoring**, v.10, n.1, p. 33–48, DOI:10.1177/1475921710365416. 2010.

GULGEC, N. S.; TAKÁČ, M.; PAKZAD, S. N. Convolutional Neural Network Approach for Robust Structural Damage Detection and Localization. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v.33, n. 3, p. 1–11, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000820. 2019.

HAKIM, S. J. S.; RAZAK, H. A. Structural damage detection of steel bridge girder using artificial neural networks and finite element models. **Steel and Composite Structures**, v.14, n. 4, p. 367–377, <https://doi.org/10.12989/scs.2013.14.4.367>. 2013.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data Mining: concepts and techniques**. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. 3. ed. Elsevier, 2011. 740 p.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction**. 2. ed. Stanford: Springer, 2009.

HICKMAN, G. A.; GERARDI, J. J.; FENG, Y. Application of Smart Structures to Aircraft Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2(3), p. 411–430, DOI:10.1177/1045389x9100200308, 1991.

HOSSAIN, M. S.; CHAO, O. Z.; ISMAIL, Z.; NOROOZI, S.; KHOO, S. Y. Artificial neural networks for vibration based inverse parametric identifications: A review. **Applied Soft Computing**, v.52, p. 203–219, DOI: 10.1016/j.asoc.2016.12.014. 2017.

JESUS, W. P.; LIMA, E. J. G.; ALVARES, R. G.; SILVA, J. R.; ROCHA, D. A.; PEIXOTO, Z. M. A. Aplicação de técnicas de machine learning para o monitoramento de vibração e detecção de trincas em pontes. In: **Congresso Brasileiro de Automática**, v. 2, n. 1, 2020. Anais [...]. ISSN 2525-831. DOI 10.48011/asba.v2i1.1269.

JIN, C.; JANG, S.; SUN, X.; LI, J.; CHRISTENSON, R. Damage detection of a highway bridge under severe temperature changes using extended Kalman filter trained neural network. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 3, p. 545-560, 2016.

JOHNSON, E. A.; LAM, H. F.; KATAFYGIOTIS, L. S.; BECK, J. L. The Phase I IASC-ASCE Structural Health Monitoring Benchmark Problem using Simulated Data. **Journal of Engineering Mechanics**, 2002.

JOHNSTON, Jules. Belgian rail strike: What to expect on Thursday. **The Brussels Times**, Brussels, 18 dez. 2019. Disponível em: reportagem online. Acesso em: 30 jun. 2025.

JU, F. D.; MIMOVICH, M. E. Experimental Diagnosis of Fracture Damage in Structures by the Modal Frequency Method. **Journal of Vibration Acoustics Stress and Reability in Design**, 110(4), 456, DOI: 10.1115/1.3269550, 1988.

- JUANG, J. **Applied System Identification**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1994.
- KALYNASUNDARAM, S.; LUTZ J. D.; HAISLER, W. E.; ALLEN, D. H. Effect of degradation of material properties on the dynamic response of large space structures. **Journal Spacecraft Rockets**, 23, p. 297-302, 1986.
- KAMARIOTIS, A.; CHATZI, E.; STRAUB, D. Value of information from vibration-based structural health monitoring extracted via Bayesian model updating. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 166, p.108465, DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.108465, 2021.
- KAMALI, S.; PALERMO, Q. A.; MARZANI, A. Reducing false alarms in structural health monitoring systems by exploiting time information via Binomial Distribution Classifier. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 207, DOI: 10.1016/j.ymsp.2023.110938, 2024.
- KAOUK, M.; ZIMMERMAN, D. C.; SIMMERMACHER, T. W. Assessment of Damage Affecting All Structural Properties Using Experimental Modal Parameters. **Journal of Vibration and Acoustics**, v.122, n.4), p. 456, DOI:10.1115/1. 2000.
- KAUSS, KARIN. **Monitoramento da integridade estrutural utilizando modelos autorregressivos**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2022.
- KO, J. M.; SUN, Z. G.; NI, Y. Q. Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge. **Engineering Structures**, v. 24, p. 857-868, 2002.
- KULLAA, J. Damage detection using different types of sensors. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2647, DOI: 0.1088/1742-6596/2647/18/182006, 2024.
- LEE, J. J.; YUN, C. B. Damage diagnosis of steel girder bridges using ambient vibration data. **Engineering Structures**, v. 28, p. 912-925, 2006.
- LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: Teoria e Aplicações Usando Microsoft Excel em português**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- LIFSHITZ, J. M., ROTEM, A. Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique. **Journal of Composite Materials**, 3(3), p. 412–423, DOI:10.1177/002199836900300305, 1969.
- LIN, J.; KEOGH, E.; LONARDI, S.; CHIU, B. A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms. **Association for Computing Machinery**, New York, p. 2–11, 2003. DOI: 10.1145/882082.882086.
- MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: **Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability**. Berkeley: University of California Press, v. 1, p. 281–297, 1967.
- MAES, K.; LOMBAERT, G. **Monitoring data for railway bridge KW51 in Leuven, Belgium, before, during, and after retrofitting (1.0)** [Data set]. Zenodo. Acesso em: 26 de junho de 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3745914>. 2020.

- MAES, K.; LOMBAERT, G. Monitoring Railway Bridge KW51 Before, During, and After Retrofitting. **Journal of Bridge Engineering**, 26(3): 0472100. 2021.
- MAIA, N. M. M.; SILVA, M. M. S. **Theoretical and Experimental Modal Analysis**. Research Studies Press. 1997.
- MARCY, M. C. A. **Desenvolvimento de uma metodologia baseada em redes neurais artificiais para a detecção de danos estruturais**. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, 2017.
- MARCY, M.; SANTOS, I. C.; BRITO, J. L. V.; DOZ, G. N. Atualização e Identificação de Danos baseada em Dados Experimentais de Vigas com condições de apoio livre-livre. **Proceedings of the XXXVII Iberian-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEX, Brasília, DF, Brazil, November 6-9, 2016.
- MARTIN, H. R.; HONARVAR, F. Application of statistical moments to bearing failure detection. **Applied Acoustics**, 44(1), 67-77, DOI: 10.1016/0003-682x(94)p4420-b, 1995.
- MATHWORKS. **MATLAB R 2019b**. v.9.7.0. 2019.
- MAYES, R. L. Experimental algorithm for detecting damage applied to the I-40 bridge over the Rio Grande. **Proceedings of the SPIE Conference**, v. 2446, p. 204–214, 1995.
- MEHRJOO, M.; KHAJI, N.; MOHARRAMI, H.; BAHREININEJAD, A. Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks. **Expert Systems with Applications**, v.35, p. 1122–1131, DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.008. 2008.
- MENACHE, M. S. M.; ESTRADA, R. S.; CASTRO, S. A. Z.; LAGUNES, E. G. L. Deteccion de daño em puentes mediante um modelo experimental. **XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural**, 2012.
- MILLIGAN, G. W.; COOPER, M. C. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. **Psychometrika**, v. 50(2), p. 159–179. DOI: 10.1007/bf02294245, 1985.
- MINNETYAN, L.; MURTHY, P. L. N.; CHAMIS, C. C. Composite structure global fracture toughness via computational simulation. **Computers & Structures**, v. 37, n. 2, p. 175-180, 1990.
- MITCHELL, J. S. **Introduction to Machinery Analysis and Monitoring**. Oklahoma: Penn Well Books, U.S.A., 1993. 566p.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 10th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.
- MORAIS, A. A. **Análise numérico-experimental da pá eólica do aerogerador modelo VERNE 555**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Faculdade UnB Gama – Universidade de Brasília. Brasília, 2017.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

- MOTULSKY, H. **Intuitive Biostatistics: A Nonmathematical Guide to Statistical Thinking**. 3 ed. Oxford University Press, 2013.
- NEVES, A. C.; GONZÁLEZ, I.; LEANDER, J.; KAROUMI, R. Structural health monitoring of bridges: a model-free ANN-based approach to damage detection. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 7, n. 5, p. 689-702, 2017.
- NOZARI A., BEHMANECH I., YOUSEFIANMOGHADAM S., MOAVENI B., STAVRIDIS A. Effects of variability in ambient vibration data on model updating and damage identification of a 10-story building. **Engineering Structures**, v. 151, p. 540-53, 2017.
- NUNES, Lorena Andrade. **Detecção de dano em estruturas baseada em técnicas de aprendizado híbrido**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2020.
- NUNES, D. S.; BRITO, J. L.V.; DOZ, G. N. Assessment of the structural condition of a cable-stayed footbridge based on dynamic tests. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v.21, n.2, e522, DOI: 10.1590/1679-78257847. 2024.
- NUNES, L. A.; FINOTTI, R. P.; BARBOSA, F. S.; CURY, A. A. A hybrid learning strategy for structural damage detection. **Structural Health Monitoring**, v. 20, n.4, 2143-2160, DOI: 10.1177/1475921720966943. 2020.
- ORTIZ MORALES, Fabricio Alejandro. **Avaliação da influência da temperatura sobre os parâmetros modais de estruturas**. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- OVMONITORING. **KW51 railway bridge (Leuven)**. Disponível em: <https://ovmonitoring.be/project/kw51-railway-bridge-leuven/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- PANDEY, A. K.; BISWAS, M. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. **Journal of Sound and Vibration**, v.169, n. 1, p. 3-17, 1994.
- PANDEY, A. K.; BISWAS, M.; SAMMAN, M. M. Damage detection from changes in curvature mode shapes. **Journal of Sound and Vibration**, 145(2), p. 321–332, DOI:10.1016/0022-460x(91)90595-b, 1991.
- PEETERS, B., DE ROECK, G. One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 30(2), 149–171. 2001.
- PCB PIEZOTRONICS, INC. **Home – PCB Piezotronics**. Disponível em: <https://www.pcb.com/>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- PIANA, C. F. B.; MACHADO, A. A.; SELAU, L. P. R. **Estatística Básica**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, Departamento de Matemática e Estatística, 2013. 204 p.
- PIMENTEL, E. P.; FRANÇA, V. F. DE; OMAR, N. A identificação de grupos de aprendizes no ensino presencial utilizando técnicas de clusterização. **Anais do Simpósio Brasileiro de Informática na Educação**, v. 1, n. 1, p. 495–504, 2003.

- PIPPI, A. S. **Resposta dinâmica para diferentes modelos de edificações adjacentes acopladas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 83 p.
- PRATES, W. O. **Estatística para as ciências sociais aplicadas I**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Ciências Contábeis, Superintendência de Educação a Distância, 2017. 156 p.
- QUNFENG, D.; CHUNRONG, Z.; YING, T.; SANFENG, Z. Damage Detection in road and bridge based on modal strain energy method. **Proceedings of the Fourth International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2013)**, ASCE 2013, p. 1753-1758, 2013.
- REN, W. -X.; PENG, X. -L. Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests. **Computers and Structures**, v. 83, p. 536-550, 2005.
- ROCHA, Levi Freire da. **O uso de aprendizado de máquina para o monitoramento de estruturas da construção civil**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.
- ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53–65, DOI: 10.1016/0377-0427(87)90125-7, 1987.
- RYTTER, T. **Vibration based inspection of civil engineering structure**. 1993. Aalborg University, 1993.
- SALAWU, O. S. Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: a Review. **Engineering Structures**, v. 19, n. 9, p. 718-723, 1997.
- SAMANTA, B.; AL-BALUSHI, K. R. Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.17, n. 2, p. 317-328, DOI: 10.1006/mssp.2001.1462, 2003.
- SAMPAIO, N. A. S.; ASSUMPÇÃO, A. R. P.; FONSECA, B. B. **ESTATÍSTICA DESCRITIVA**. 1. ed. Belo Horizonte: Poisson, 2018. 70 p.
- SAMPAIO, R. P. C.; MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. Damage detection using the frequency-response-function curvature method. **Journal of Sound and Vibration**, v. 226, n. 5, p. 1029-1042, 1999.
- SANAYEI, M.; KJALOO, A.; GUL, M.; CATBAS, F. N. Automated finite element model updating of a scale bridge model using measured static and modal test data. **Engineering Structures**, v. 102, p. 66-79, 2015.
- SANCHEZ, W. D.; BRITO, J. V.; AVILA, S. M. Structural Health Monitoring Using Synchrosqueezed Wavelet Transform on IASC-ASCE Benchmark Phase I. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, vol. 20, n. 12, p. 14, DOI: 10.1142/s0219455420501382, 2020.
- SANCHEZ, W. D.; AVILA, S. M.; BRITO, J. V. A methodology based on empirical mode decomposition and synchrosqueezed wavelet transform for modal properties identification and damage detection. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, DOI: 10.1007/s40430-022-03818-y, 2022.

SANTOS, J. C.; PALECHOR, E. U. L.; VIEIRA, L. L. Identificação de Danos em Vigas utilizando Transformada Discreta de Wavelet. **Proceedings of the XXXVII Iberian-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEX, Brasília, DF, Brazil, November 6-9, 2016.

SANTOS, J. P.; CREMONA, C.; ORCESI, A. D.; SILVEIRA, P. Early Damage Detection Based on Pattern Recognition and Data Fusion. **Journal of Structural Engineering**, 143(2), 04016162, DOI:10.1061/(asce)st.1943-541x.0001643, 2017.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, v.30, n.3, p. 507-512, 1974.

SHU, J.; ZHANG, Z.; GONZALEZ, I.; KAROUMI, R. The application of a damage detection method using Artificial Neural Network and train-induced vibrations on a simplified railway bridge model. **Engineering Structures**, v. 52, p. 408-421, 2013.

SKOWRONEK, K.; BARSZCZ, T.; ANTONI, J.; ZIMROZ, R.; WYŁOMAŃSKA, A. Assessment of background noise properties in time and time–frequency domains in the context of vibration-based local damage detection in real environment. **ARxiv:2403.08359**, v.199, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2403.08359. 2024.

SOARES, Daniel A. C. **Desenvolvimento de um Sistema para monitoramento automático de integridade estrutural**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2022.

SOBRINHO, Brunno Emidio. Análise Numérica e Experimental de Otimização e Identificação de Danos pelo Método de Evolução Diferencial. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília, 2021.

SOHN, H.; FARRAR, C. R.; HEMEZ, F. M.; SHUNK, D. D.; STINEMATES, D. W.; NADLER, B. R. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. **Los Alamos National Laboratory Report**, LA-13976-MS, 2003.

SOUZA, C. P. G. **Diagnóstico de estruturas civis baseado em medidas de vibração: Uma abordagem a partir de algoritmos não-adaptativos para treinamento de redes neurais artificiais**. 2020. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

SOUZA, M.; CASTELLO, D.; ROITMAN, N.; RITTO, T. Impacto of Damping Models in Damage Identification. **Shock and Vibration**, v. 2019, n.1, DOI:10.1155/2019/4652328. 2019.

SOUZA, M. L. M.; ROITMAN, N.; CASTELLO, D. A. Damage Identification with Model Updating: A Bayesian Approach. **Proceedings of the XLV Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEC, Maceió, Alagoas, 2024.

SOUZA, M. L. M.; ROITMAN, N.; CASTELLO, D. Model selection in damage identification using approximate Bayesian computations. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 235, DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112867, 2025.

SHARIFI, Y.; MOGHBELI, A.; HOSSEINPOUR, M.; SHARIFI, H. Neural networks for lateral torsional buckling strength assessment of cellular steel I-beams. **Advances in**

Structural Engineering, v.22, n.9, p. 2192–2202, DOI: 10.1177/1369433219836176. 2019.

STEPHENS, J. E.; YAO, J. T. P. Damage Assessment Using Response Measurements. **Journal of Structural Engineering**, 113(4), p. 787-801, DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1987)133:4(787), 1987.

STEWART, Ian. **17 Equações que mudaram o mundo**. 1.ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2013.

STRACZKIEWICZ, M.; BARSZCZ, T. Application of Artificial Neural Network for Damage Detection in Planetary Gearbox of Wind Turbine. **Shock and Vibration**, v.1, p. 1–12, 10.1155/2016/4086324. 2016.

STURGES, H. A. The choice of a class interval. **Journal of the American Statistical Association**, 21(153), 65-66, 1926.

TENG, S.; CHEN, G.; LIU, G.; LV, J.; CUI, F. Modal Strain Energy-Based Structural Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. **Applied Sciences**, v. 9, n.16, p. 3376, DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163376>. 2019.

TEUGHEL, A.; DE ROECK, G. Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. **Journal of Sound and Vibration**, v. 278, p. 589-610, 2004.

TIBSHIRANI, R.; WALTHER, G.; HASTIE, T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)**, 63(2), 411–423, DOI: 10.1111/1467-9868.00293, 2001.

TOUSSI, S.; YAO, J. T. P. Assessment of Structural Damage Using the Theory of Evidence. **Structural Safety**, vol. 1, Elsevier Publishing Co. Amsterdam, The Netherlands, p. 107-121, 1982.

VARAHRAM, P.; JALALI, M. H.; S ADEGHI, S.; L OTFAN, S. Experimental Study on the Effect of Excitation Type on the Output-Only Modal Analysis Results. **Transactions of FAMENA**, Zagreb, v. 43, n. 3, p. 37–52, 2019. DOI: 10.21278/TOF.43303.

VASCONCELOS, R.; DOZ, G.; BRITO, J. L. V. Impact of parameters on damage indicators of structures: Symbolic data analysis and principal components. **Latin American Journal of Solids and Structures**, 21(12), e573, DOI: 10.1590/1679-78258289, 2024.

VIERO, P. F. **Verificação da Influência dos Danos nos Parâmetros Modais de Estruturas Offshore Fixas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

WORDEN K., MANSON, G. The application of machine learning to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 365(1851), 515–537. 2007.

XU, B., SONG, G., MASRI, S.F. Damage detection for a frame structure model using vibration displacement measurement. **Structural Health Monitoring**, v.11, n.3, p. 281-292. 2012.

YANG, J. C. S.; CHEN, J.; DAGALAKIS, N. G. Damage Detection in Offshore Structures by the Random Decrement Technique. **Journal of Energy Resources Technology**, 106(1), 38, DOI: 10.1115/1.3231021, 1984.

YEUNG, W. T.; SMITH, J. W. Damage detection in bridges using neural networks for pattern recognition of vibration signatures. **Engineering Structures**, v. 27, p. 685-698, 2005.

ZIMMERMAN, D. C., KAOUK, M. Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory. **Journal of Vibration and Acoustics**, 116(2), p. 222, DOI:10.1115/1.2930416, 1994.

APÊNDICES

APÊNDICE A

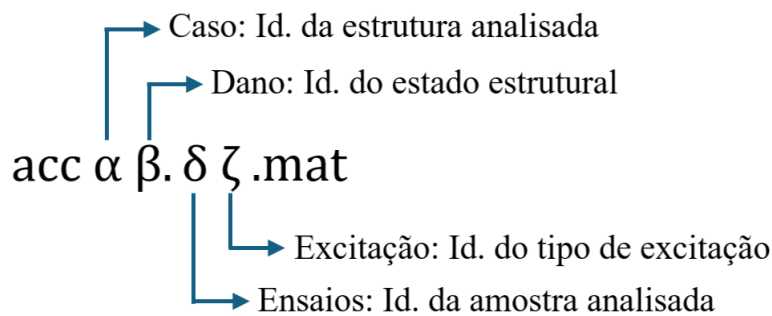
IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS PARTICIONADOS

Para a realização das análises das estruturas, os arquivos de dados originais (extensão .xls ou outros formatos) foram particionados e agrupados conforme suas características experimentais. Os novos arquivos foram gerados no formato “.mat”, adotando um padrão de organização tanto na estrutura dos dados quanto na nomenclatura dos arquivos. Essa padronização foi necessária para viabilizar o processamento automático dos dados no algoritmo desenvolvido no MATLAB (MATHWORKS,2019).

Um arquivo com extensão “.mat” corresponde ao formato nativo de armazenamento de dados do MATLAB. Trata-se de um arquivo binário compactado, capaz de armazenar variáveis, vetores, matrizes, tabelas, estruturas e outros objetos diretamente no ambiente MATLAB, preservando seus formatos, tipos e organização interna.

A convenção de nomenclatura adotada para os arquivos de dados está representada esquematicamente na Figura A.1.

Figura A.1 – Modelo de nomenclatura padronizada dos arquivos de dados (.mat).



Fonte: Autor.

Cada arquivo “.mat” contém uma matriz numérica do tipo *double*, denominada *acc*, composta por:

- ◆ Linhas: correspondentes ao número de amostras de acelerações adquiridas em cada ensaio (em função do tempo de aquisição, da taxa de amostragem e da segmentação realizada);
- ◆ Colunas: correspondentes à quantidade de sensores lidos na aquisição.

A seguir, são apresentadas as tabelas que descrevem a organização dos arquivos de dados para cada estrutura analisada, especificando os valores das variáveis que compõem a nomenclatura dos arquivos. Ressalta-se que os nomes originais dos arquivos apresentados

nas tabelas se referem aos últimos dois dígitos ou ao texto dos nomes apresentados nas tabelas do Capítulo 4, onde estão descritos os dados originais de cada ensaio.

Para cada estrutura, foi desenvolvido um algoritmo específico de segmentação dos arquivos no MATLAB (MATHWORKS, 2019), considerando o tipo de excitação, as características dos dados, a frequência de aquisição (F_s), as amplitudes e o tempo desejado para os cortes. De forma geral, o último segmento dos registros originais foi descartado, por ter duração menor devido ao tempo inicial do registro.

Para os arquivos de impacto do *Shear Building* — Fase I (Tabela A.1), o algoritmo identificou picos nos registros de força do martelo acima de 40 N, desde que o valor anterior fosse inferior a esse limite. A partir desse ponto, cada segmento iniciou cinco amostras antes do pico e teve duração de 8 segundos (para impactos a cada 10 s) ou 15 segundos (para impactos a cada 20 s), garantindo que não houvesse dois impactos no mesmo arquivo.

Tabela A.1 – Identificação dos dados particionados do *Shear Building* Fase I.

Shear Building Fase I – Caso (α): 5 – F_s : 1.000 Hz							
Excitação (ζ)	Nome original	Dano (β)	Massa (kg)	Local da massa	Tempo (s)	Nº de obs/ensaio	Ensaio (δ)
Martelo de Impacto ($\zeta = 1$)	00	0	-	10º andar	15	15.000	1 a 11
	06	1	0,5				
	05	2	1				
	04	3	2				
	03	4	5				
	02	5	6		8	8.000	1 a 22
	07	6	-				
	12	7	0,5				
	11	8	1				
	10	9	2		15	15.000	1 a 11
	9	10	5				
	8	11	6				
	14	12	5	8º andar			
	15	13		6º andar			
16	14	4º andar					
17	15	2º andar					

Os arquivos de impacto do *Shear Building* — Fase II foram segmentados de forma semelhante à Fase I, porém adotando um limite de 20 N para detecção dos picos. Para os arquivos provenientes do *shaker*, com excitação periódica a cada 5 segundos, a

segmentação foi baseada na identificação do início do primeiro período. Esse ponto foi determinado somando blocos de cinco amostras das acelerações de entrada até que a soma fosse inferior a 5 m/s², indicando a ausência de excitação. A partir desse instante, os arquivos foram segmentados em trechos de 5 segundos (Tabela A.2).

Tabela A.2 – Identificação dos dados particionados do *Shear Building* Fase II.

Shear Building Fase II – Caso (α): 6 – Fs: 1.000 Hz							
Excitação (ζ)	Nome original	Dano (β)	Massa	Local da massa	Tempo (s)	Nº de obs/ensaio	Ensaio (δ)
Martelo de Impacto ($\zeta = 1$)	00+01	0	-	9º andar	8	8.000	1 a 44
	02+03	1	130 g				
	04+05	2	220 g				
	06+07	3	500 g				
	08+09	4	1 kg				
	10+11	5	2 kg				
	12+13	6	3 kg				
	14+15	7	5 kg				
	16+17	8	6 kg				
Shaker em X ($\zeta = 2$)	00	0	-	9º andar	5	5.000	1 a 45
	01	1	130 g				
	02	2	220 g				
	03	3	500 g				
	04	4	1 kg				
	05	5	2 kg				
	06	6	3 kg				
	07	7	5 kg				
	08	8	6 kg				
Shaker 45° ($\zeta = 3$)	09	0	-	9º andar	5	5.000	1 a 45
	10	1	130 g				
	11	2	220 g				
	12	3	500 g				
	13	4	1 kg				
	14	5	2 kg				
	15	6	3 kg				
	16	7	5 kg				
	17	8	6 kg				

Os arquivos de impacto da pá eólica (Tabela A.3) foram segmentados de forma semelhante aos anteriores, adotando um limite de 18 N. Picos com intervalos menores

que 5 segundos foram ignorados, por representarem repiques ou efeitos do amortecimento de impactos mais intensos.

Tabela A.3 - Identificação dos dados particionados da Pá Eólica.

Pá Eólica - Caso (α): 7 - Fs: 1.000 Hz							
Excitação (ζ)	Nome original	Dano (β)	Massa (g)	Local da massa	Tempo (s)	Nº de obs/ensaio	Ensaio (δ)
Martelo de Impacto ($\zeta = 1$)	01+23	0	-	F	8	8.000	1 a 44
	33+34	1	10				
	30+31	2	15				
	02+24	3	30				
	03+25	4	70				
	04+27	5	130				
	05+28	6	220				
	06+29	7	430				
	07	8	30	C	8	8.000	1 a 22
	08	9		D			
	09	10		E			
	10	11		G			
	11	12		H			
	12	13		J			
	13	14		L			
	15	15	220	E	8	8.000	1 a 22
	16	16		G			
	17	17		H			
	18	18		J			
	19	19		L			
	21+49	20	-	F	15	15.000	1 a 22
	35+48	21	10				
	37+47	22	15				
	22+46	23	30				
	38+45	24	70				
	39+44	25	130				
	40+43	26	220				
41+42	27	430					

Para a viga biapoada (Tabela A.4), os arquivos de impacto adotaram limites específicos para cada estado de dano e para cada uma das três repetições. Esses limites foram ajustados por meio de testes sucessivos, até que se encontrassem valores adequados às amplitudes e aos intervalos dos picos.

Adicionalmente, foram impostas restrições ao algoritmo para evitar repiques e impactos com intervalos curtos, uma vez que, embora Alves et al. (2015a, 2015b) afirmem que os impactos foram realizados a cada 10 segundos, a maioria dos registros apresenta intervalos menores.

Tabela A.4 - Identificação dos dados particionados da Viga Biapoiada.

Viga Biapoiada – Caso (α): 1 – Fs: 4.000 Hz						
Excitação (ζ)	Nome original	Dano (β)	Dano Imposto	Tempo (s)	Nº de obs/ensaio	Ensaio (δ)
Martelo de Impacto ($\zeta = 1$)	Nível 0	0	-	5	20.000	1 a 180
	Nível 1	1	500 g			
	Nível 2	2	12 mm			
	Nível 3	3	16 mm			
	Nível 4	4	22,5 mm			
	Nível 5	5	32 mm			
Ruído Branco ($\zeta = 2$)	Nível 0	0	-	10	40.000	1 a 180
	Nível 1	1	500 g			
	Nível 2	2	12 mm			
	Nível 3	3	16 mm			
	Nível 4	4	22,5 mm			
	Nível 5	5	32 mm			

Como o objetivo de viabilizar uma análise comparativa entre as diferentes janelas de tempo, os 810 segundos (9 ensaios de 90 segundos) de sinais do *Benchmark*, obtidos para cada condição foram segmentados em janelas de tempo distintas. Essa segmentação resultou em diferentes quantidades de registros, com tempos e número de observações por ensaio proporcionais ao total disponível. A organização desses registros, incluindo a duração das janelas e o número de observações por ensaio, está detalhada na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Identificação dos dados particionados do *Benchmark*.

<i>Benchmark</i> – Caso (α): 3 – Fs: 1.000 Hz						
Excitação (ζ)	Nome original	Dano (β)	Dano Imposto	Tempo (s)	Nº de obs/ensaio	Ensaio (δ)
Ruído Branco ($\zeta = 2$)	Nível 0	0	-	10 15 30 45	10.000 15.000 30.000 45.000	1 a 81 1 a 54 1 a 27 1 a 18
	Nível 1	1	Sem rigidez nas diagonais do primeiro andar.			
	Nível 2	2	Sem rigidez nas diagonais do primeiro e terceiro andar.			
	Nível 3	3	Sem rigidez em uma diagonal do primeiro andar.			
	Nível 4	4	Sem rigidez em uma diagonal do primeiro e uma do terceiro			

			andar.			
	Nível 5	5	Sem rigidez em uma diagonal do primeiro, uma do terceiro andar e enfraquecimento de uma conexão viga-coluna.			
	Nível 6	6	Sem 2/3 da rigidez de uma diagonal no 1º andar.			

Por fim, a Tabela A.6 apresenta a identificação dos dados de aceleração registrados no tabuleiro da ponte ferroviária. Esses dados foram obtidos a partir do monitoramento da estrutura durante a passagem de trens nos meses de dezembro de 2018 e 2019, sendo que cada registro corresponde a uma única travessia, e foram gerados dois registros por dia em quase todos os dias. A única etapa de pré-processamento aplicada aos arquivos constituiu na padronização do comprimento dos sinais de aceleração, de modo a uniformizar o número de amostras por registro. Para isso, adotou-se como referência o menor número de amostras encontrado entre os registros, correspondente a 37.158 valores, aplicando-se esse mesmo limite aos demais arquivos por meio de truncamento.

Tabela A.6 – Identificação dos dados da Ponte.

Ponte Ferroviária KW51 – Caso (α): 8 – Fs: 825,8065 Hz					
Excitação (ζ)	Nome original	Dano (β)	Tempo (s)	Nº de obs/ensaio	Ensaio (δ)
Trem ($\zeta = 1$)	Antes do reparo	0	45 s	37.158	1 a 60
	Após o reparo	1			1 a 56

APÊNDICE B

BOXPLOTS DAS ACELERAÇÕES DAS ESTRUTURAS

A seguir, são apresentados os *boxplots* dos dados de aceleração referentes a todos os ensaios analisados para cada estrutura, separados pelos estados de dano identificados conforme as tabelas descritas no Apêndice A. A notação acc refere-se ao acelerômetro de resposta utilizado neste trabalho para cada estrutura.

B.1. SHEAR BUILDING – FASE I

B.1.1. Impacto (20 s) – Variando quantidade de massa (10º andar)

Figura B.1 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e a estrutura intacta.

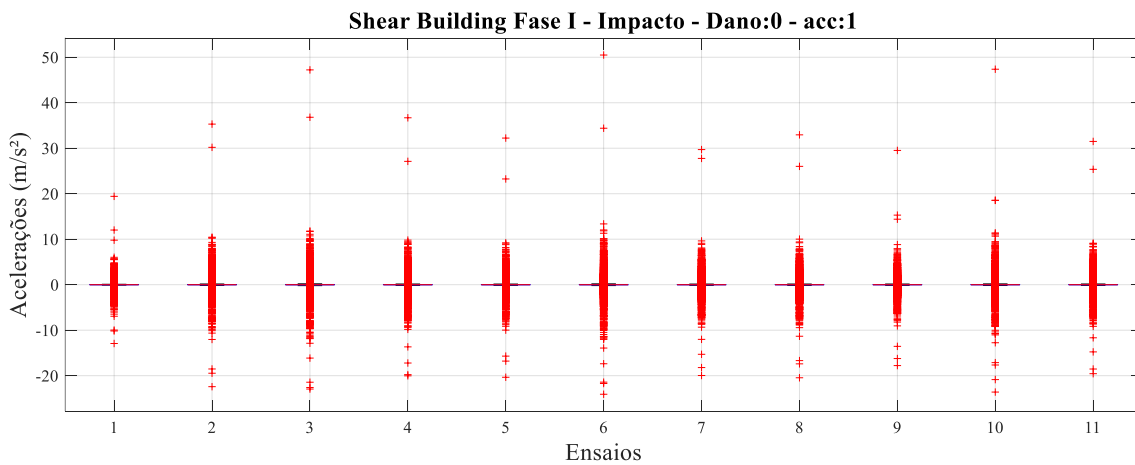


Figura B.2 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 0,5 kg no 10º andar.

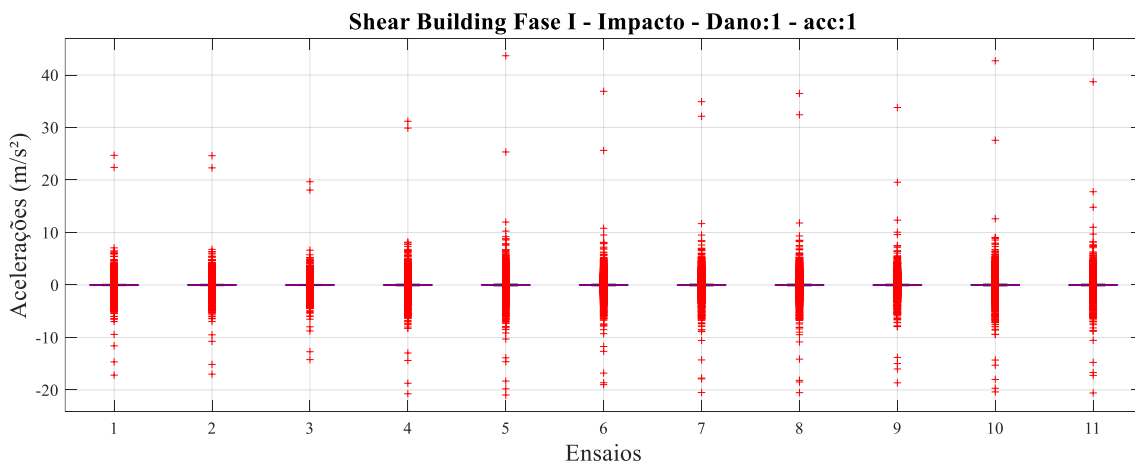


Figura B.3 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 1 kg no 10º andar.

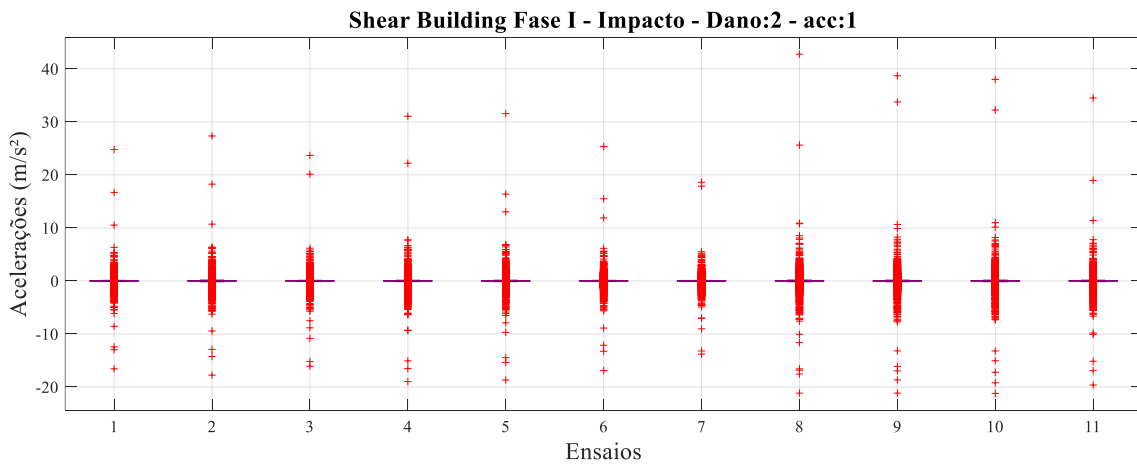


Figura B.4 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 2 kg no 10º andar.

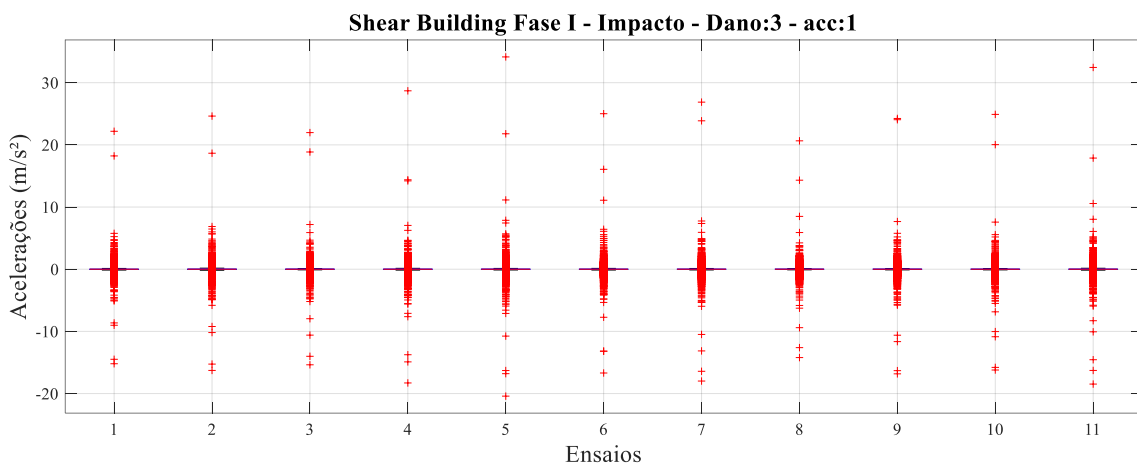


Figura B.5 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 10º andar.

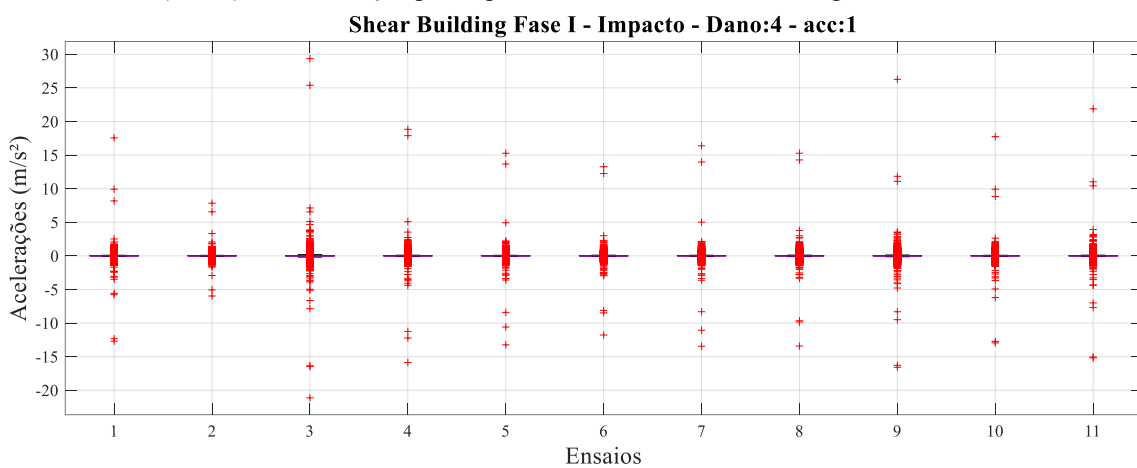
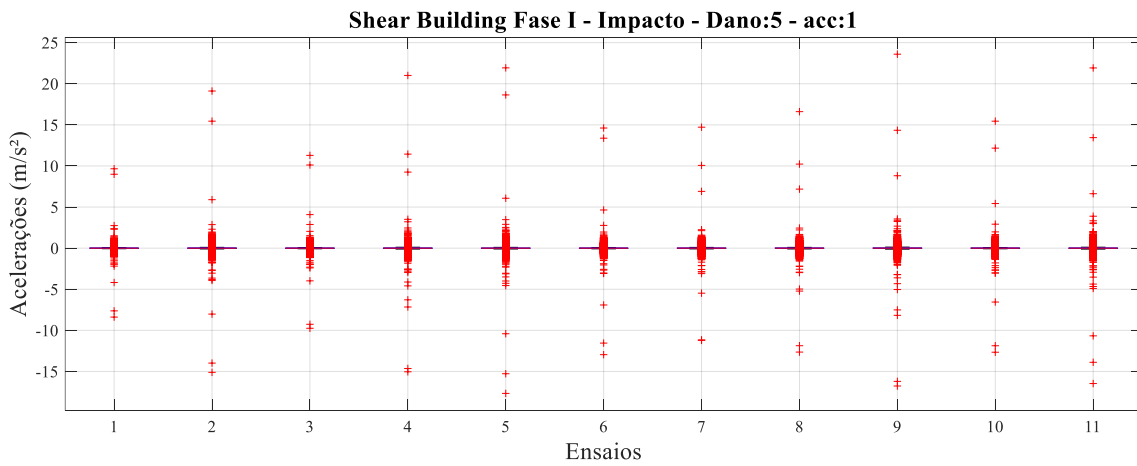


Figura B.6 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 6 kg no 10º andar.



B.1.2. Impacto (10s) – Variando quantidade de massa (10º andar)

Figura B.7 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.

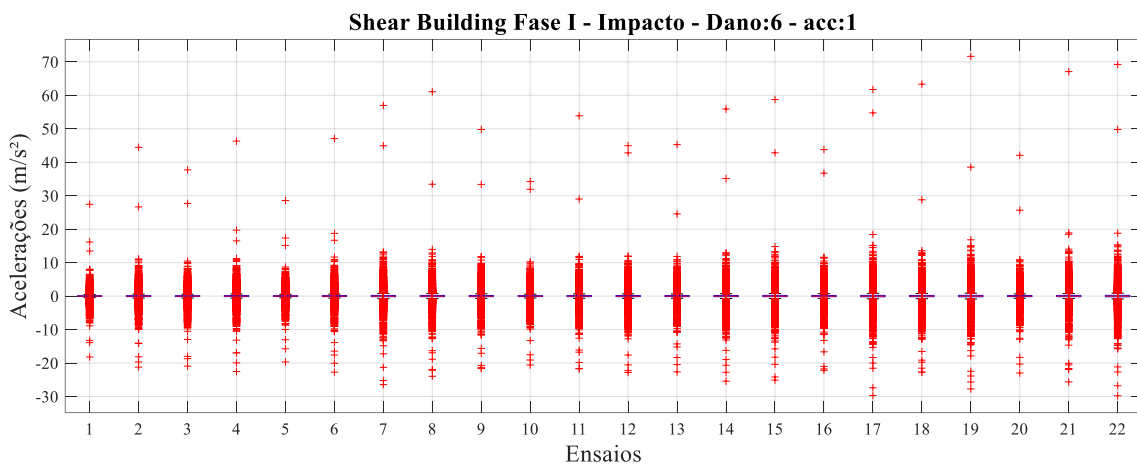


Figura B.8 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 0,5 kg no 10º andar.

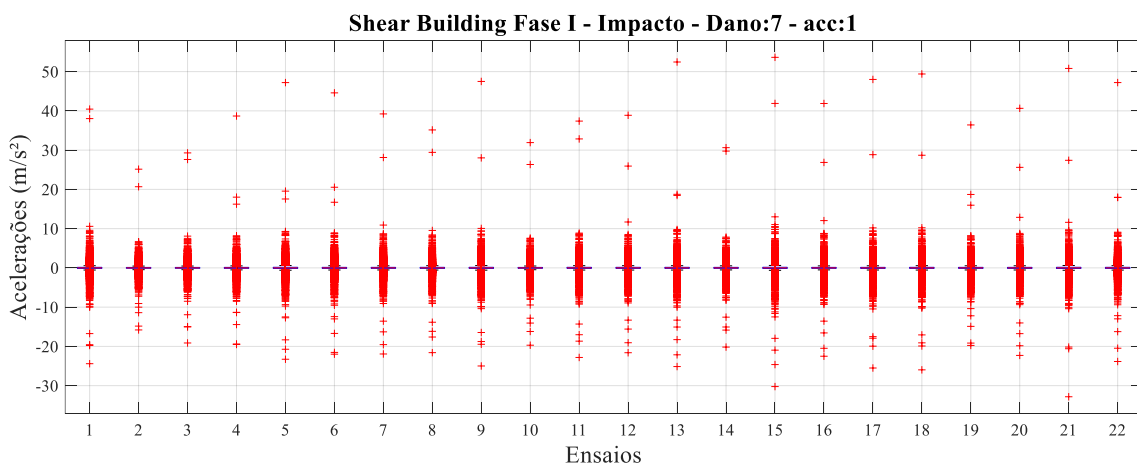


Figura B.9 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 1 kg no 10º andar.

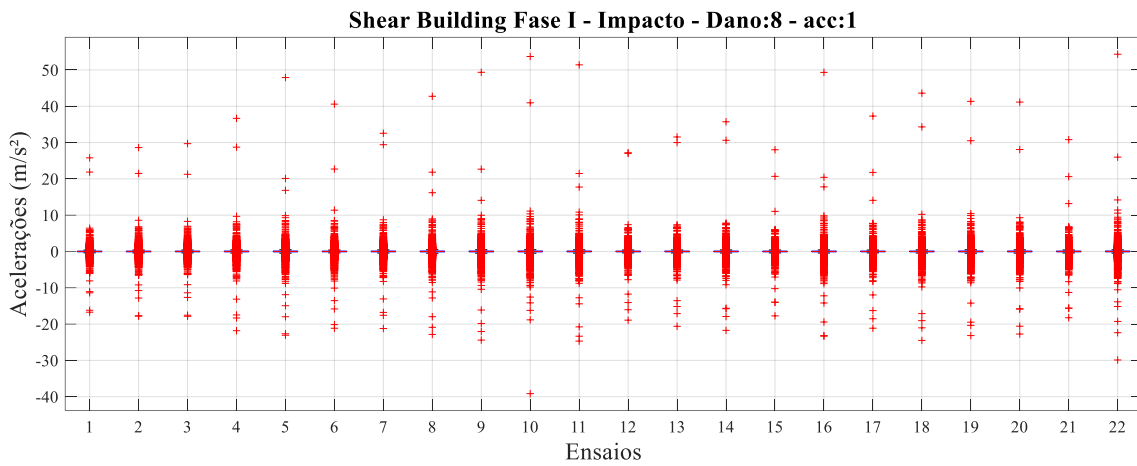


Figura B.10 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 2 kg no 10º andar.

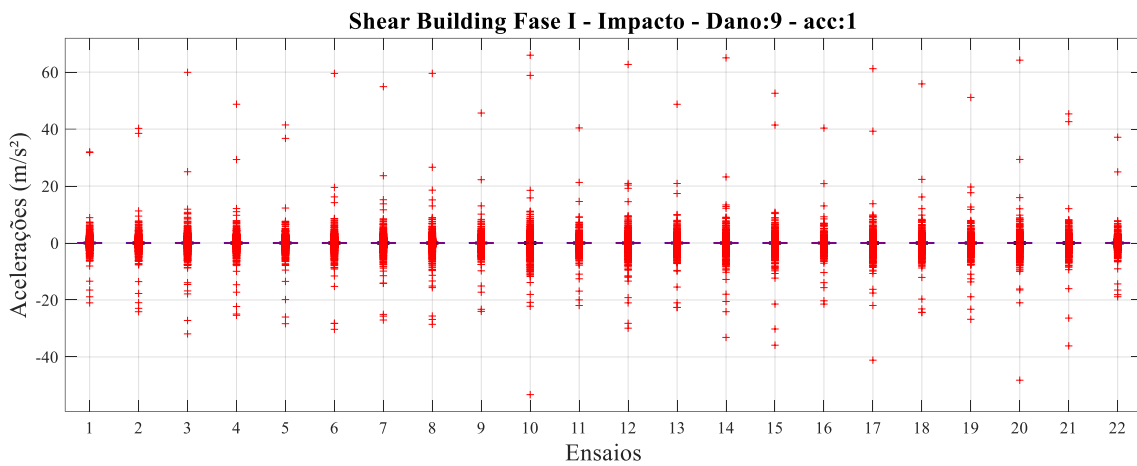


Figura B.11 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 5 kg no 10º andar.

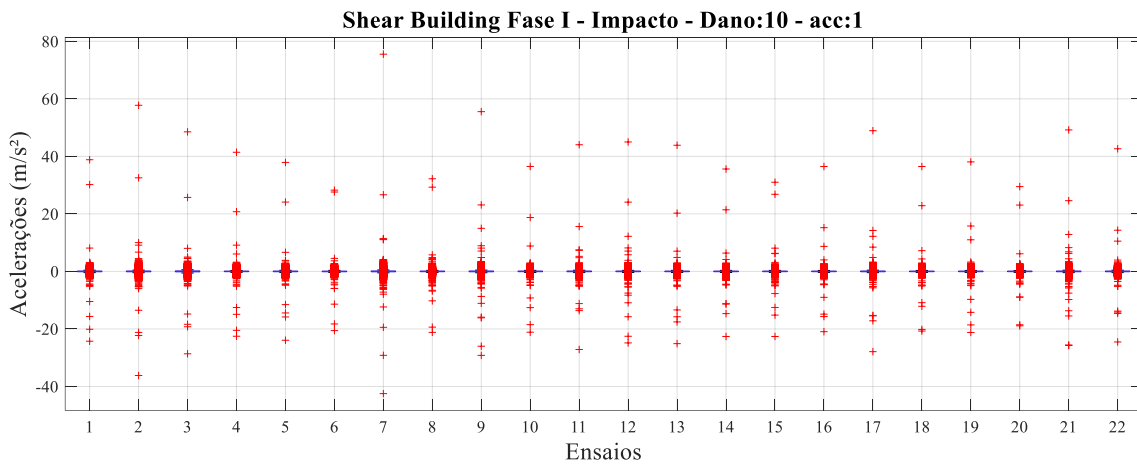
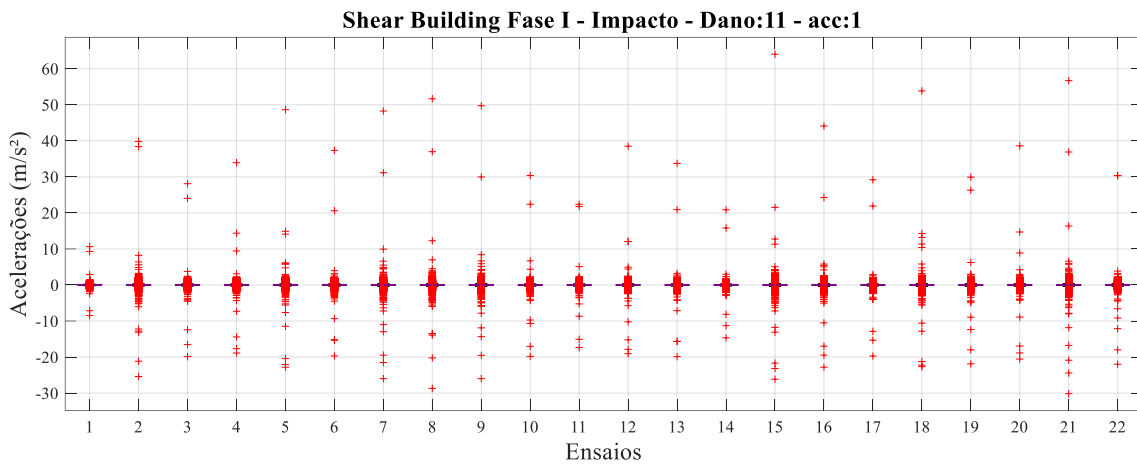


Figura B.12 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 22 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 6 kg no 10º andar.



B.1.3. Impacto (20 s) – Variando local da massa (5 kg)

Figura B.13 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 8º andar.

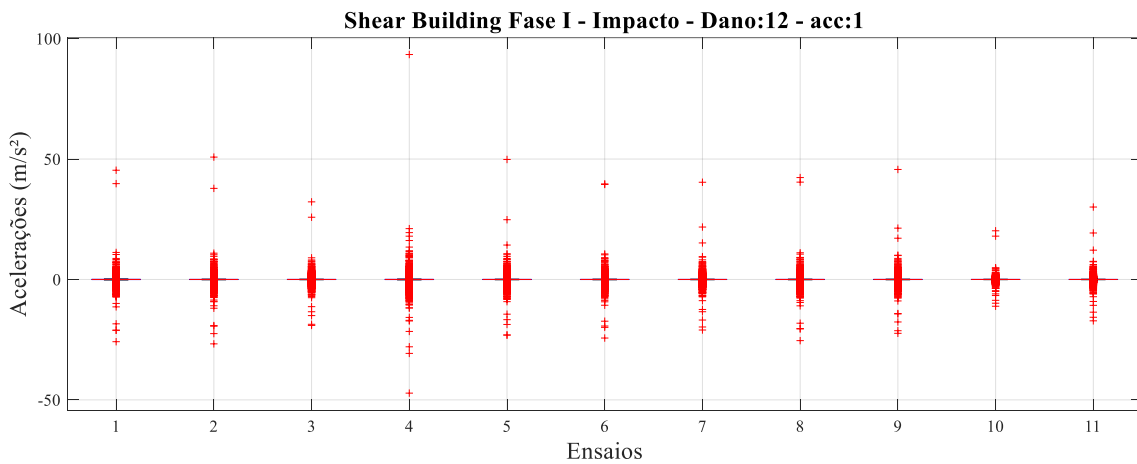


Figura B.14 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 6º andar.

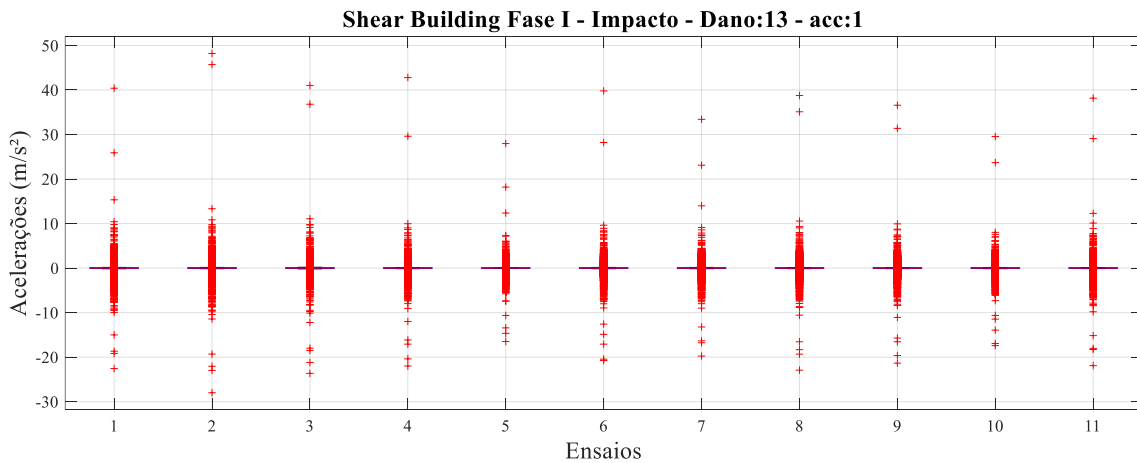


Figura B.15 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 4º andar.

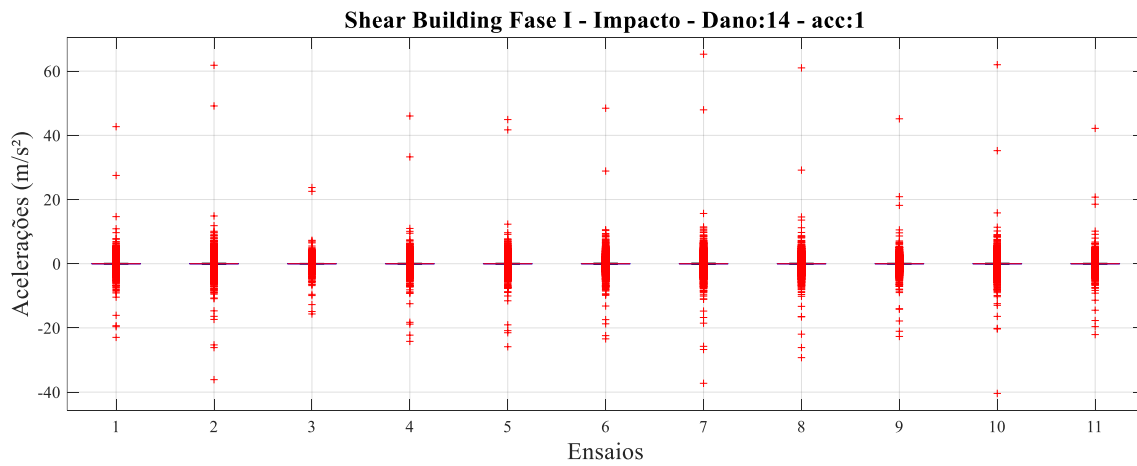
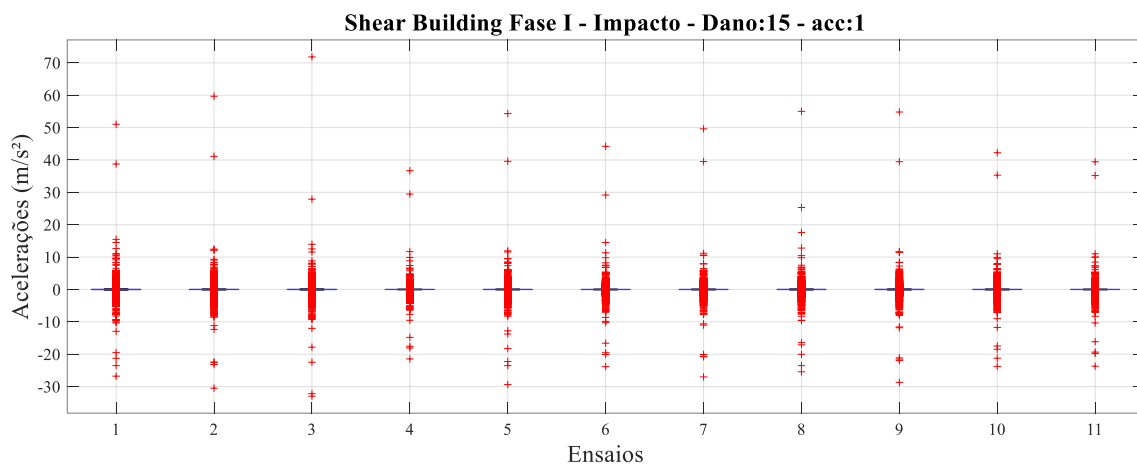


Figura B.16 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 11 ensaios do Shear Building (Fase I), com excitação por impacto a cada 20 s e massa de 5 kg no 2º andar.



B.2. SHEAR BUILDING – FASE II

B.2.1. Impacto (10 s) – Variando quantidade de massa (9º andar)

Figura B.17 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e a estrutura intacta.

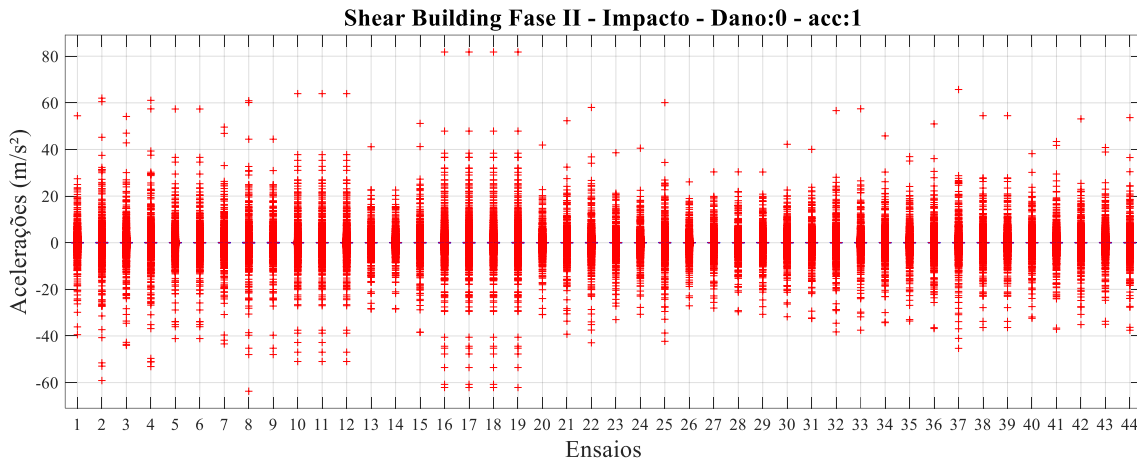


Figura B.18 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 130 g no 9º andar.

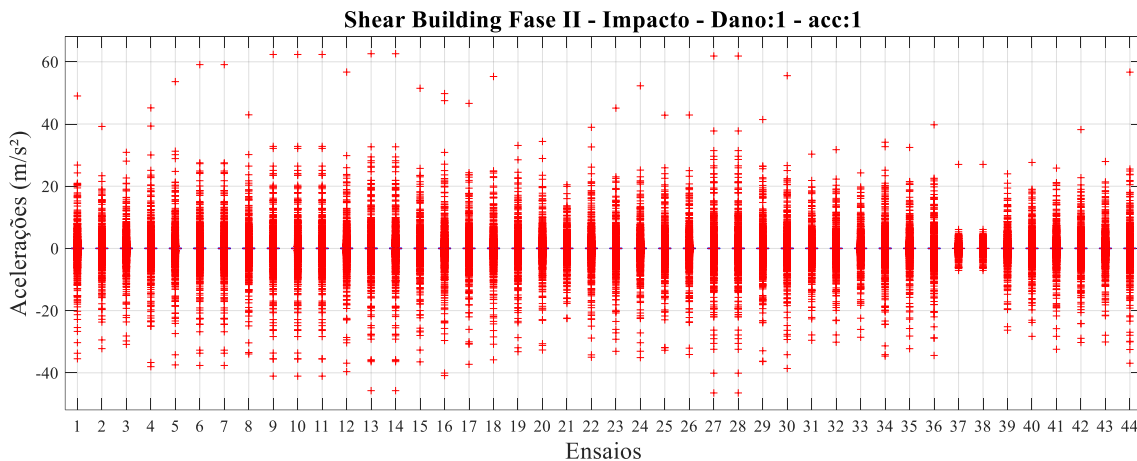


Figura B.19 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 220 g no 9º andar.

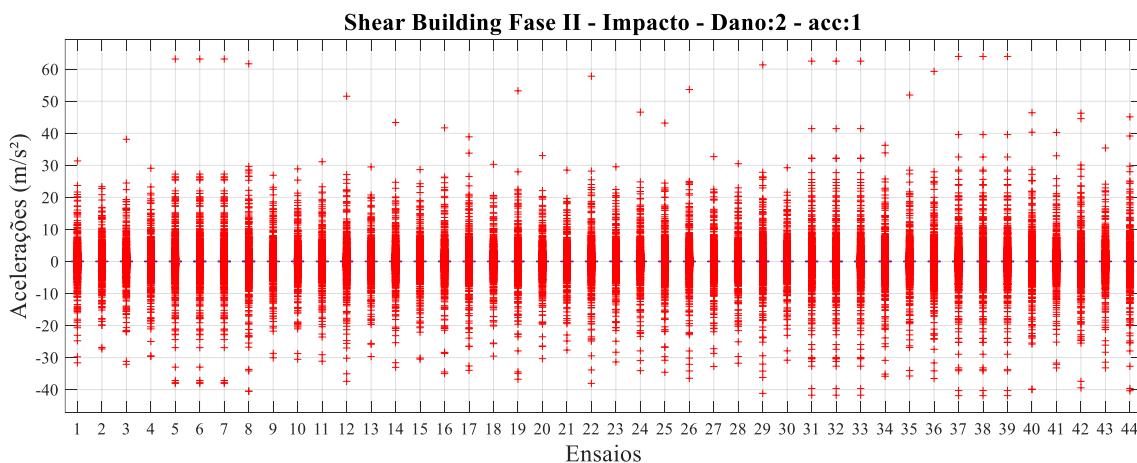


Figura B.20 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 500 g no 9º andar.

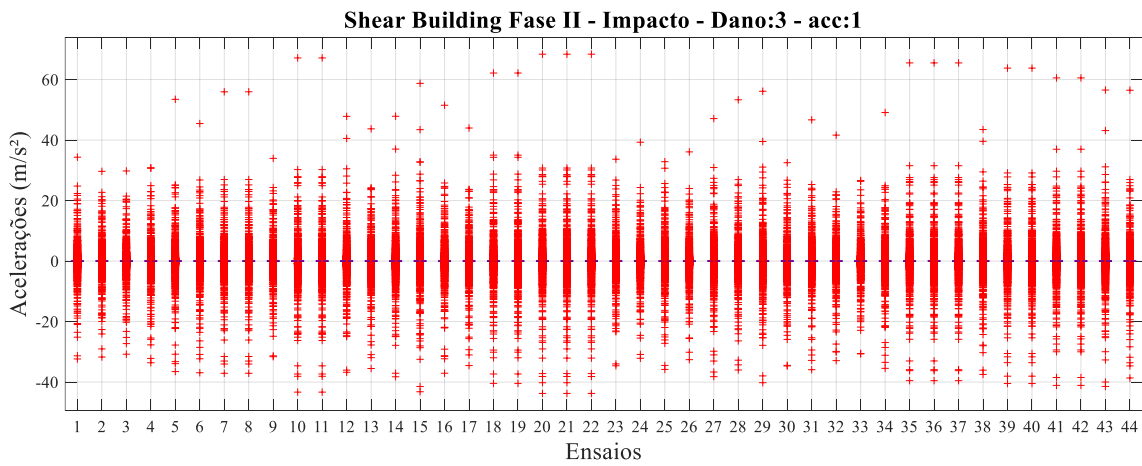


Figura B.21 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 1 kg no 9º andar.

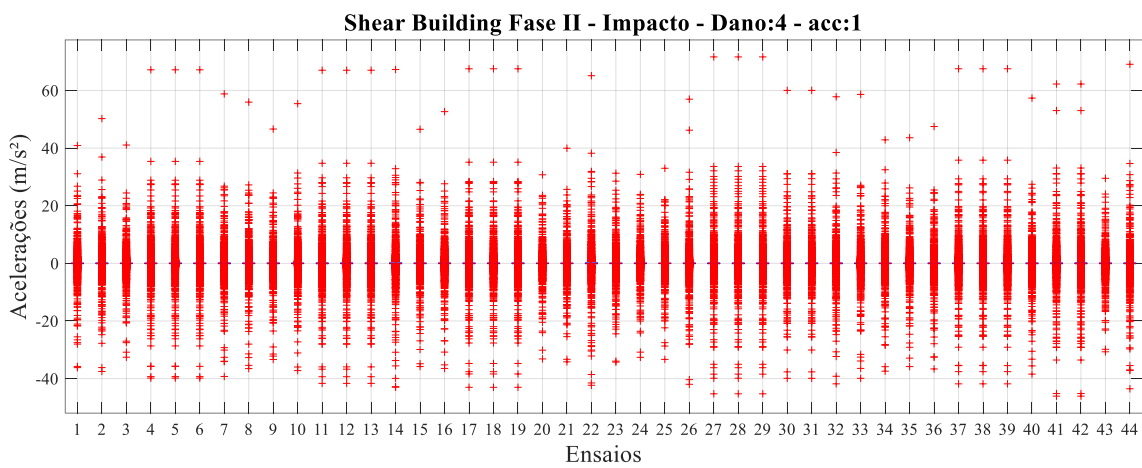


Figura B.22 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 2 kg no 9º andar.

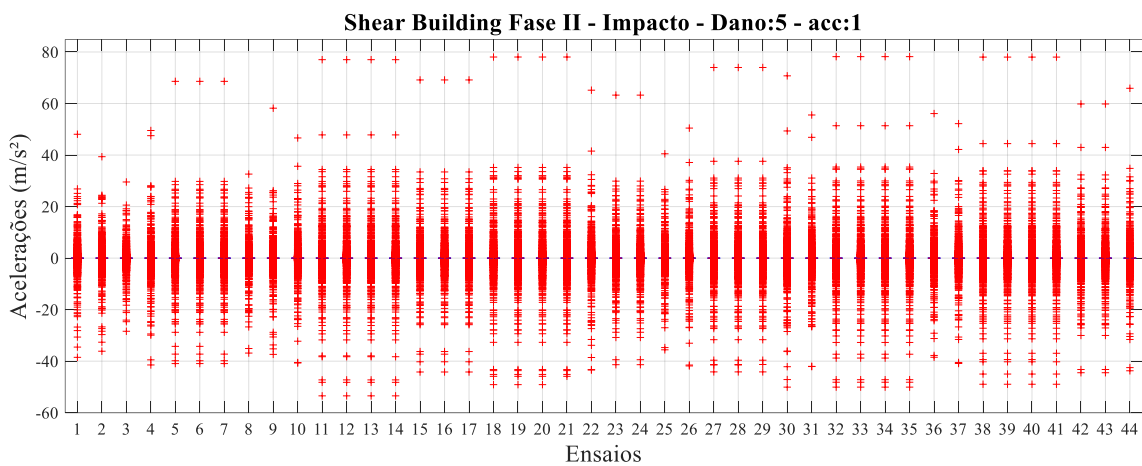


Figura B.23 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 3 kg no 9º andar.

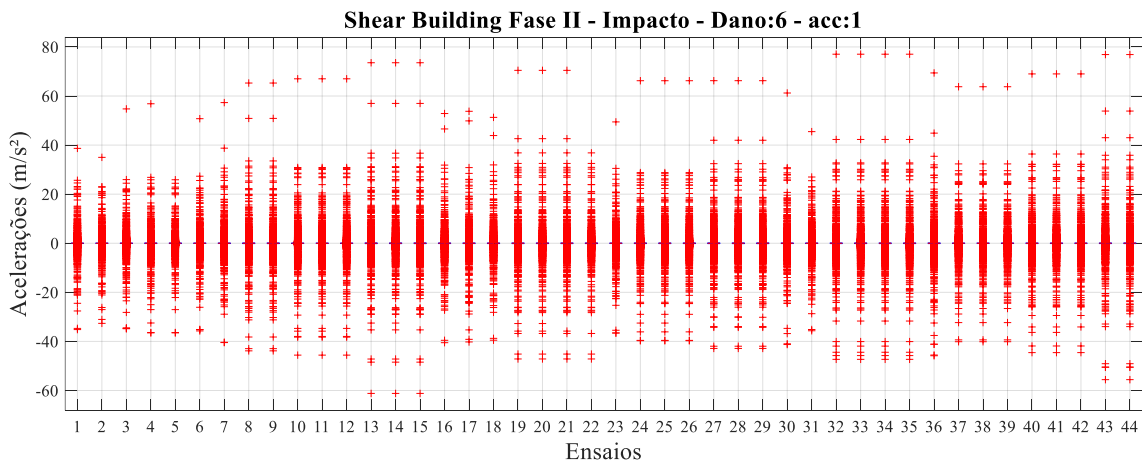


Figura B.24 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 5 kg no 9º andar.

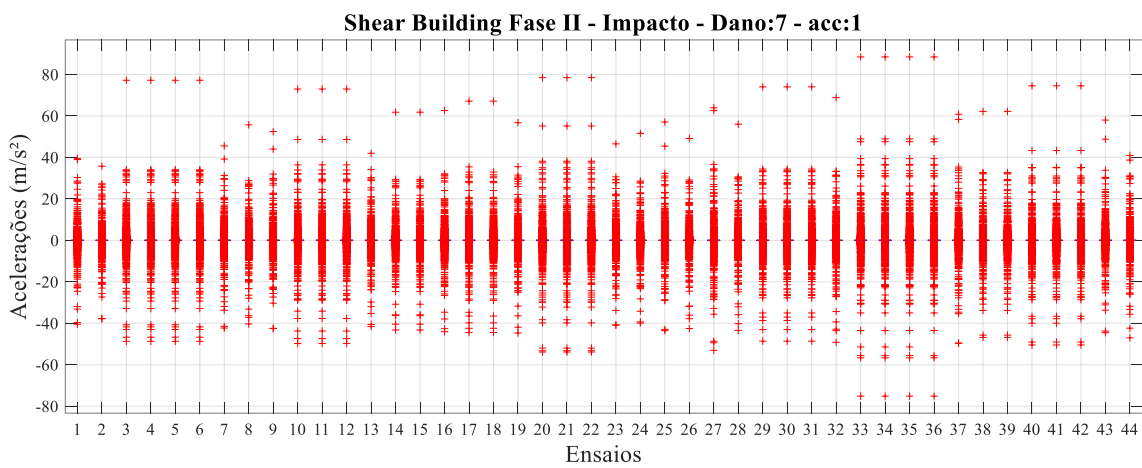
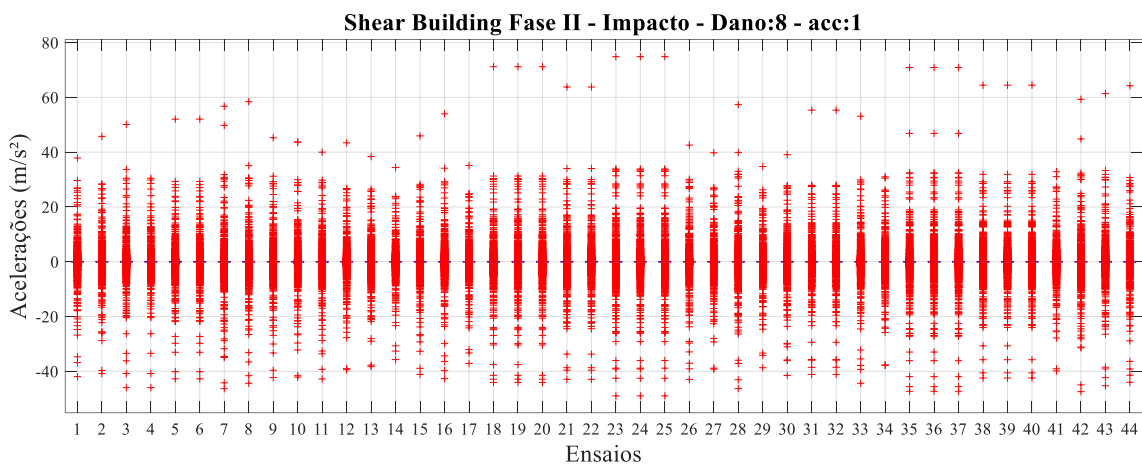


Figura B.25 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 44 ensaios do Shear Building (Fase II), com excitação por impacto a cada 10 s e massa de 6 kg no 9º andar.



B.2.2. Shaker em X – Variando quantidade de massa (9º andar)

Figura B.26 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e a estrutura intacta.

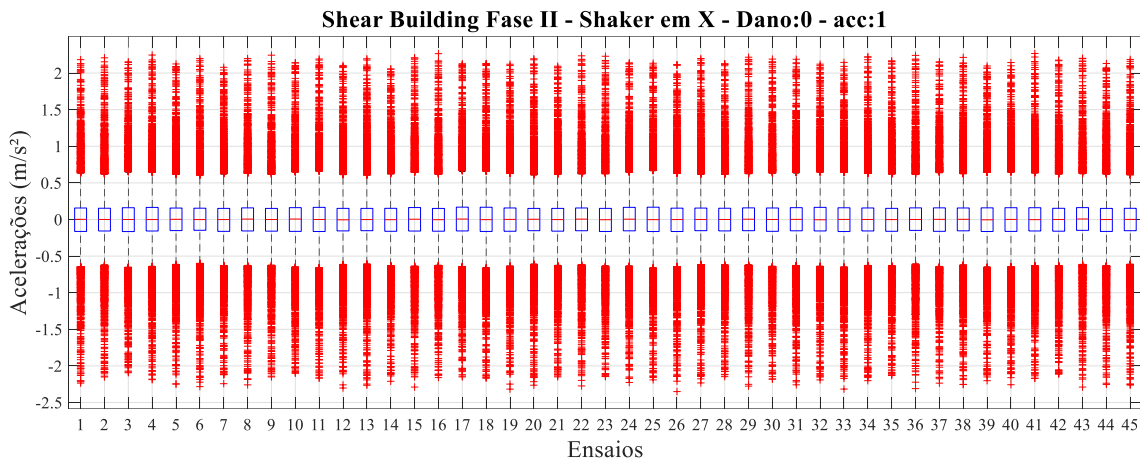


Figura B.27 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 130 g posicionada no 9º andar.

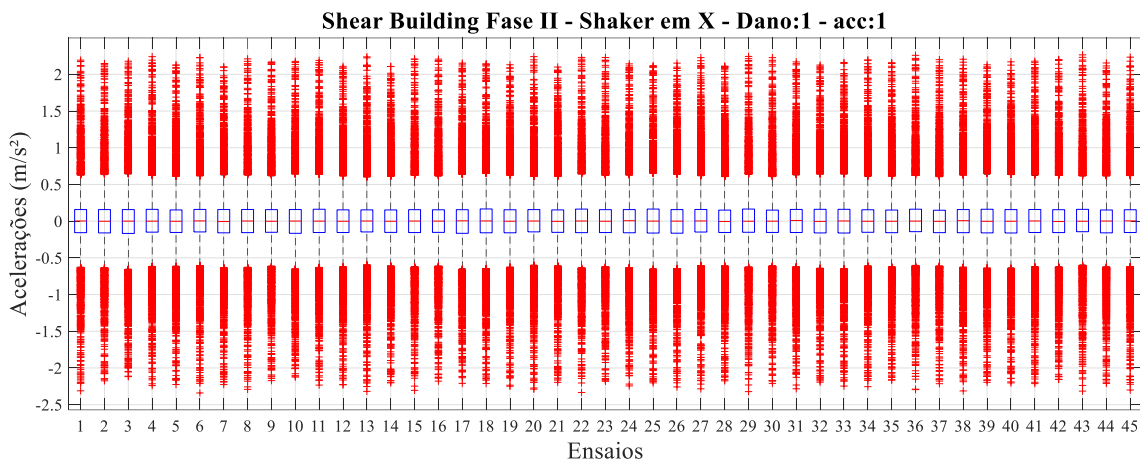


Figura B.28 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 220 g posicionada no 9º andar.

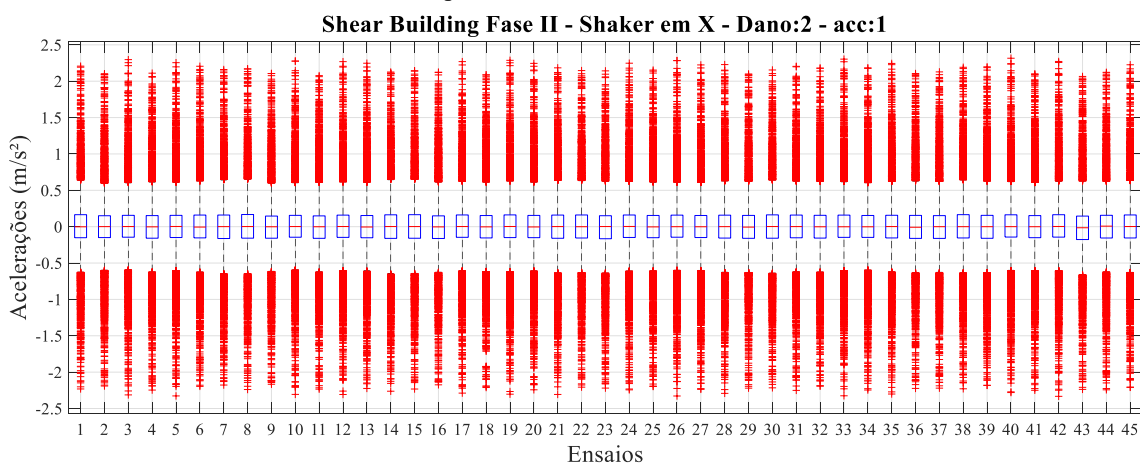


Figura B.29 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 500 g posicionada no 9º andar.

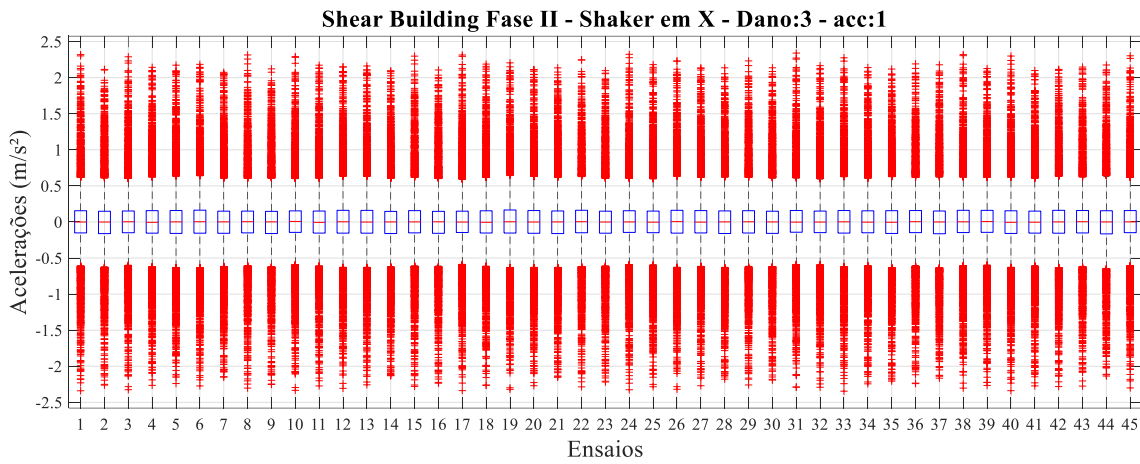


Figura B.30 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 1 kg posicionada no 9º andar.

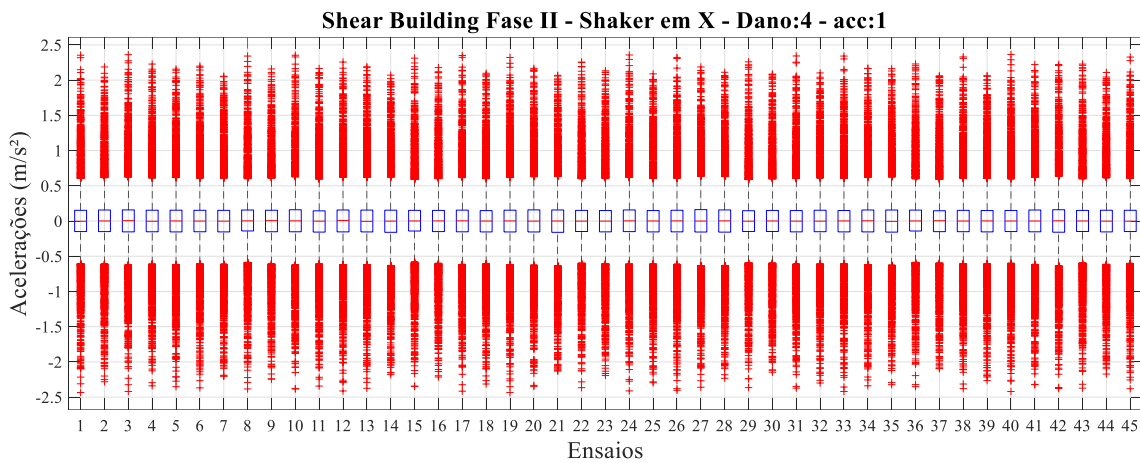


Figura B.31 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 2 kg posicionada no 9º andar.

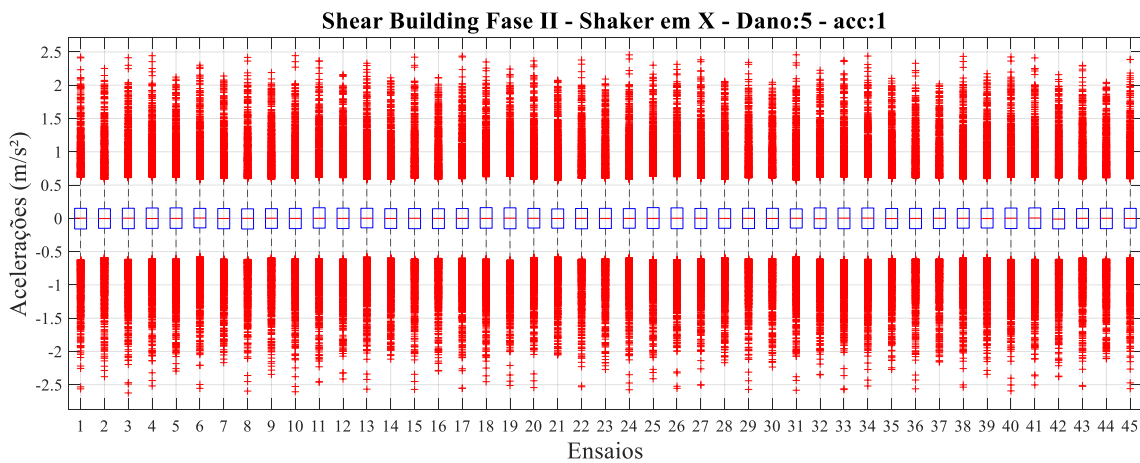


Figura B.32 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 3 kg posicionada no 9º andar.

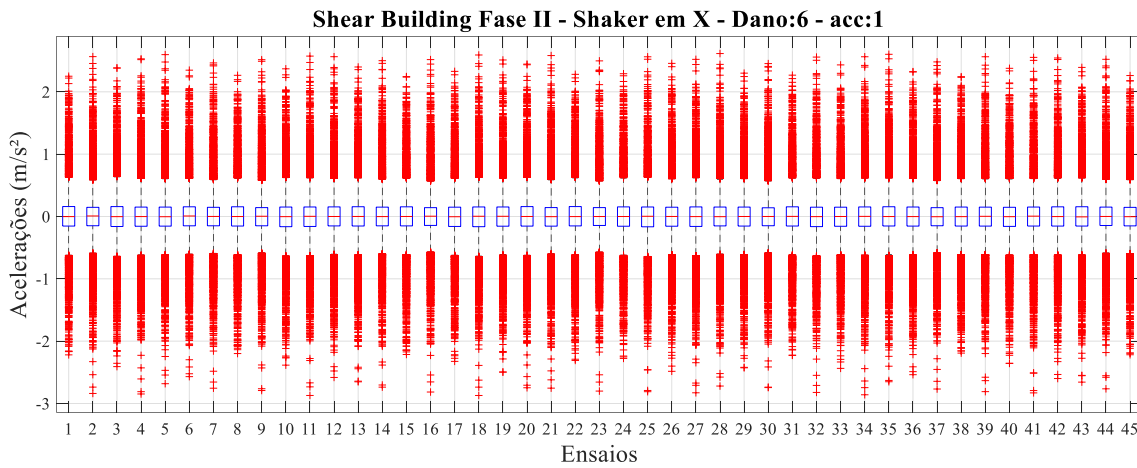


Figura B.33 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 5 kg posicionada no 9º andar.

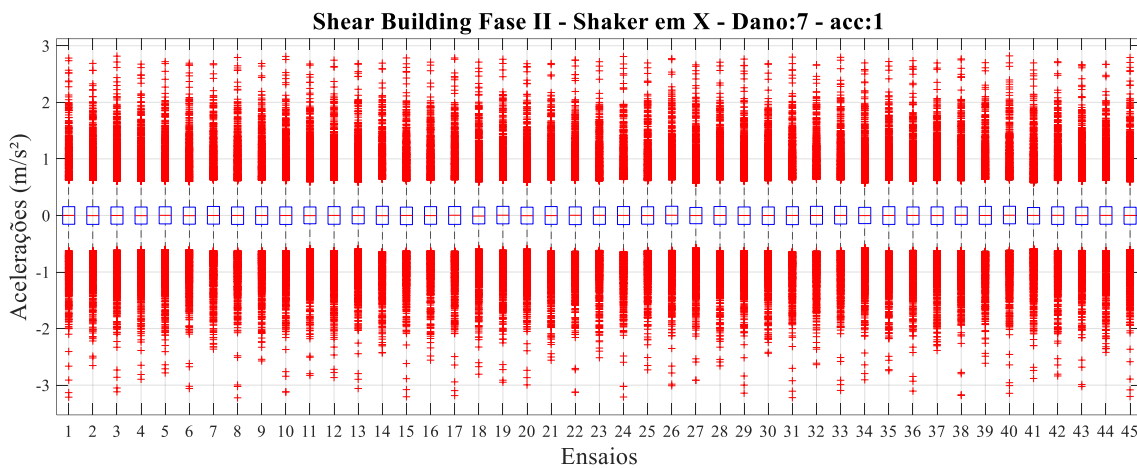
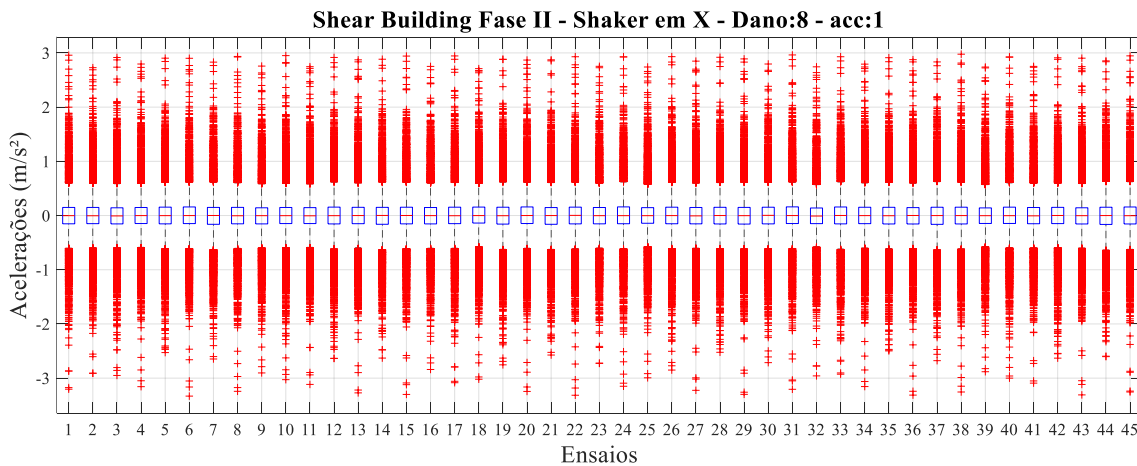


Figura B.34 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na direção de x, e massa de 6 kg posicionada no 9º andar.



B.2.3. Shaker Diagonal – Variando quantidade de massa (9º andar)

Figura B.35 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e a estrutura intacta.

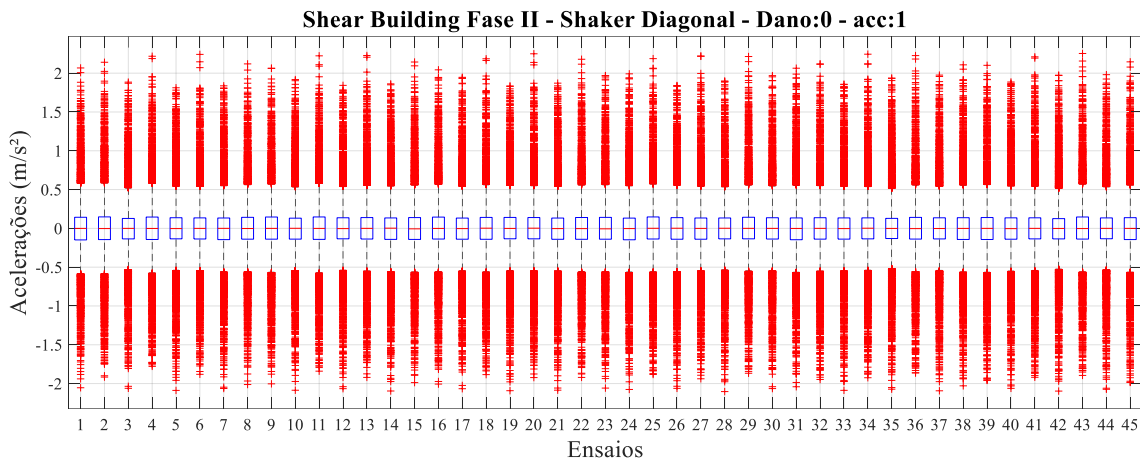


Figura B.36 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 130 g posicionada no 9º andar.

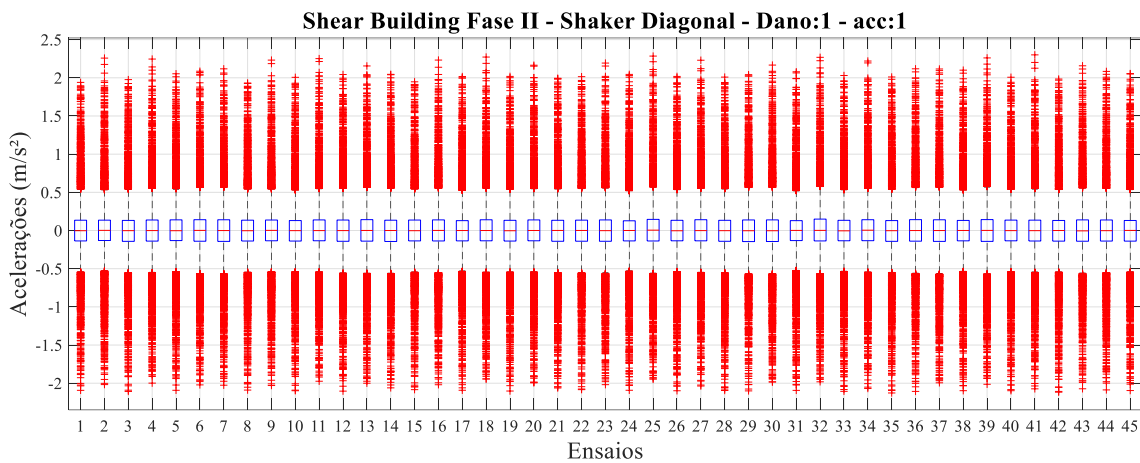


Figura B.37 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 220 g posicionada no 9º andar.

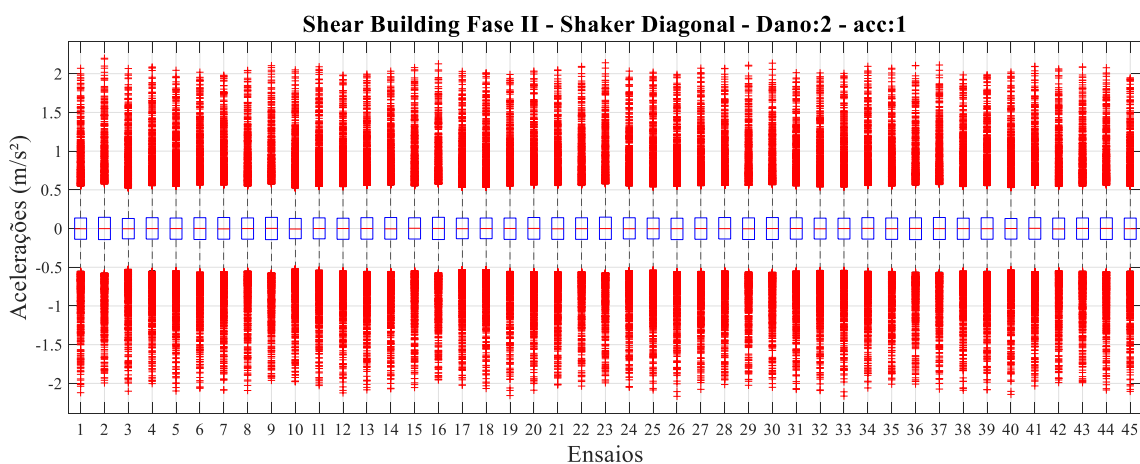


Figura B.38 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 500 g posicionada no 9º andar.

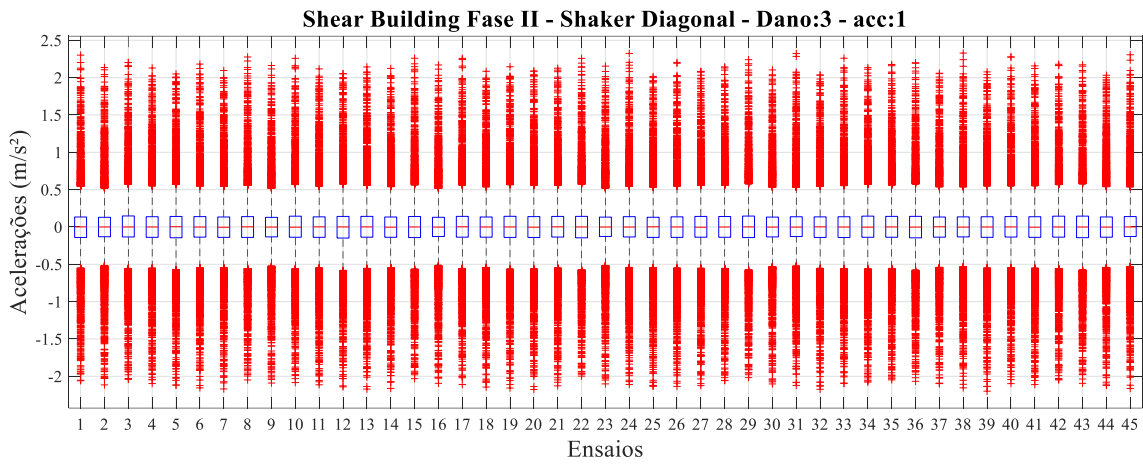


Figura B.39 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 1 kg posicionada no 9º andar.

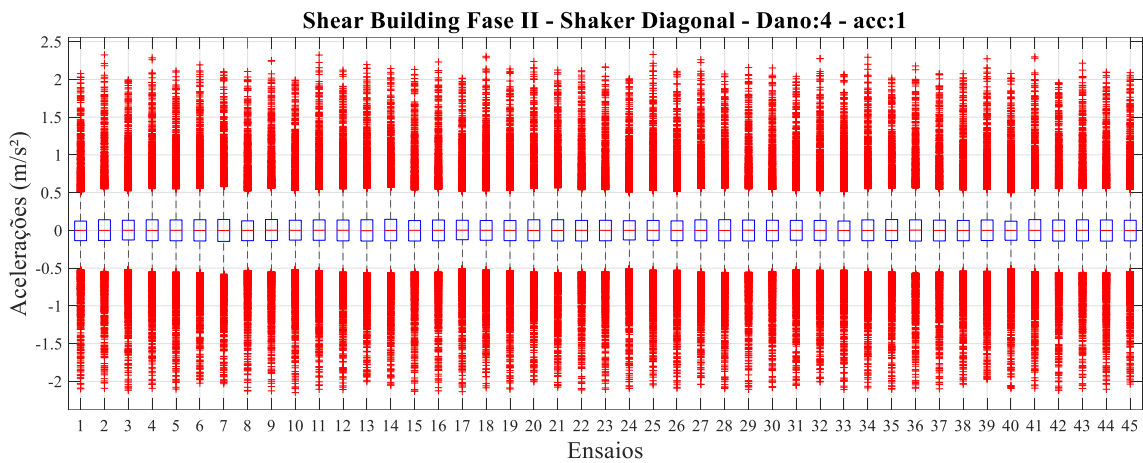


Figura B.40 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 2 kg posicionada no 9º andar.

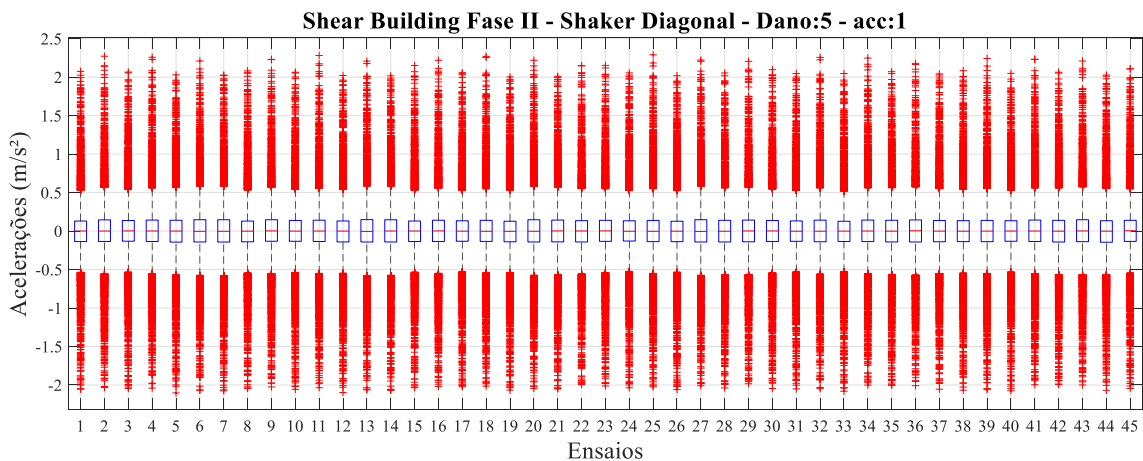


Figura B.41 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 3 kg posicionada no 9º andar.

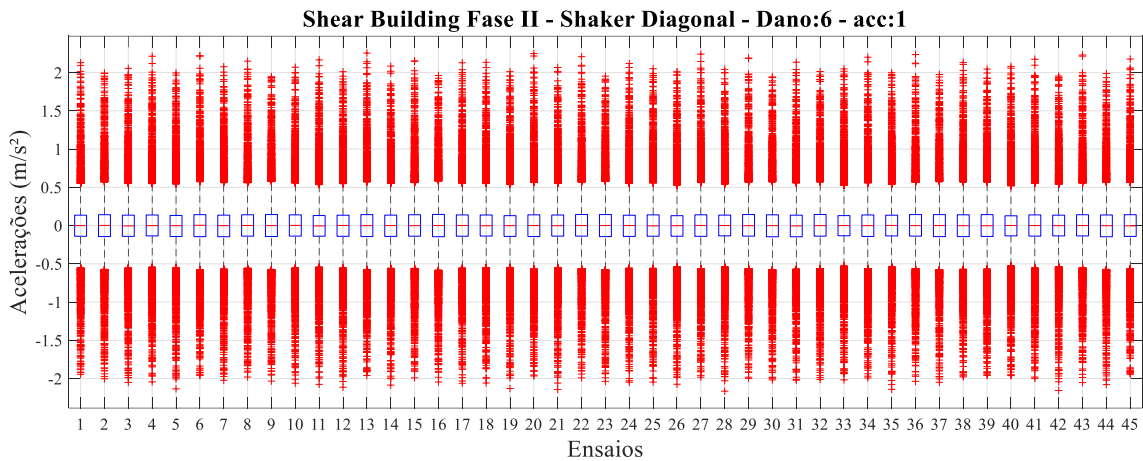


Figura B.42 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 5 kg posicionada no 9º andar.

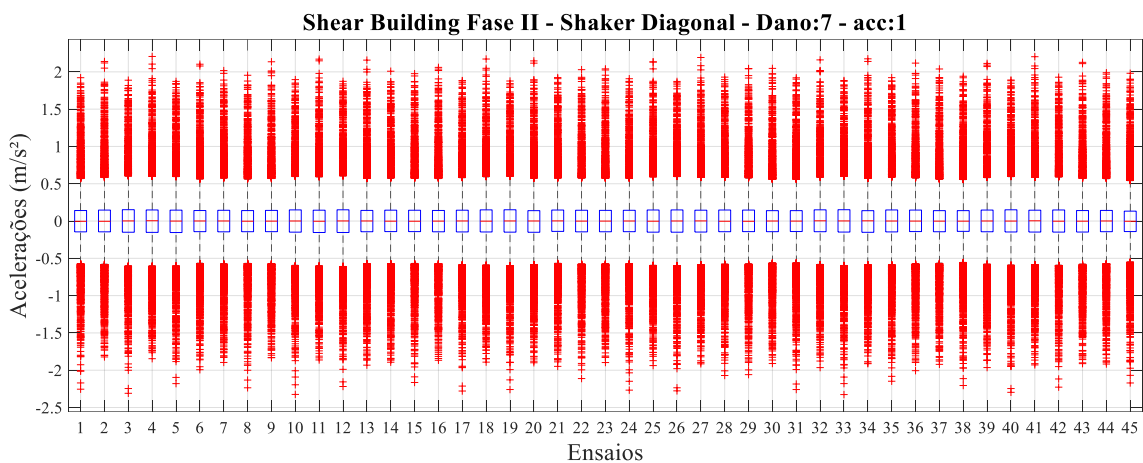
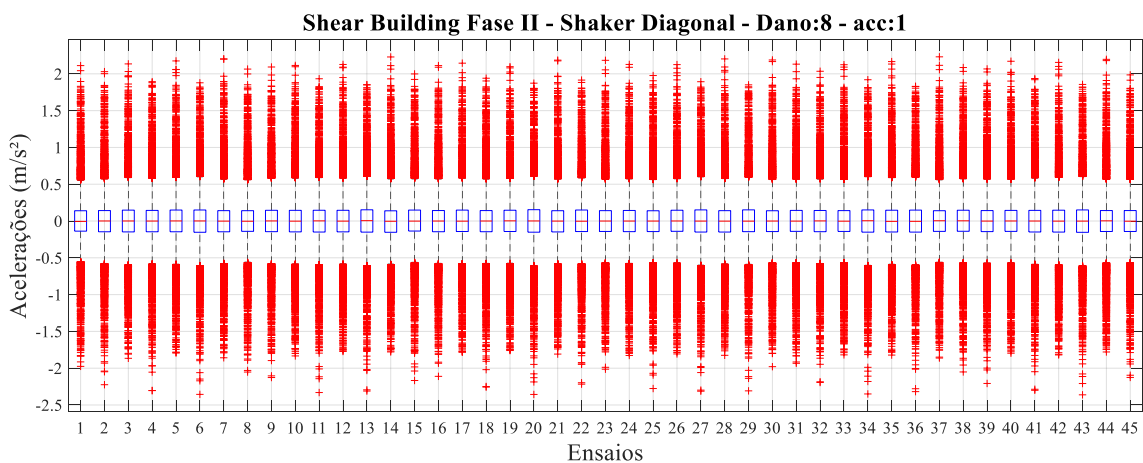


Figura B.43 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1 nos 45 ensaios do Shear Building (Fase II), sob excitação por *shaker* com sinal *CHIRP* senoidal na diagonal, e massa de 6 kg posicionada no 9º andar.



B.3. PÁ EÓLICA

B.3.1. Impacto (10 s) – Variando quantidade de massa (F)

Figura B.44 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e a estrutura intacta.

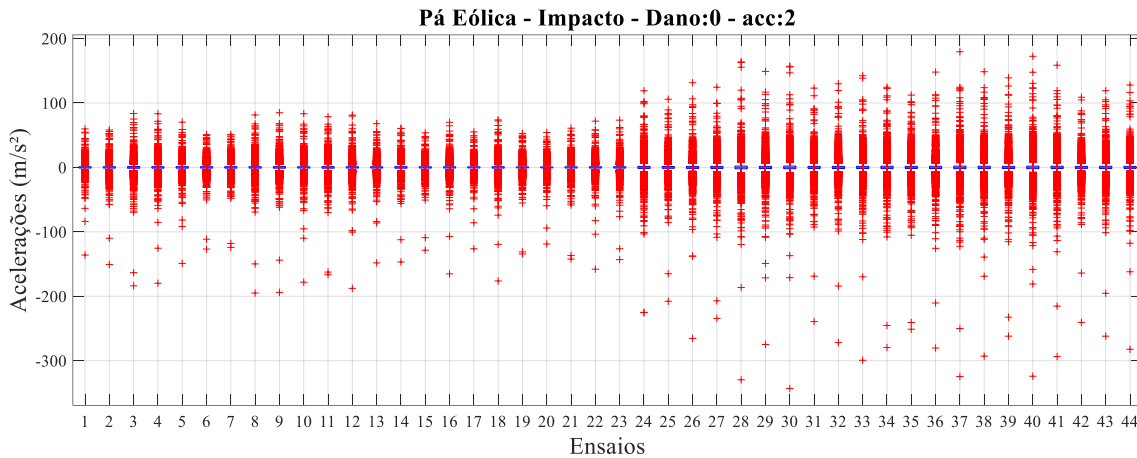


Figura B.45 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 10 g posicionada em F.

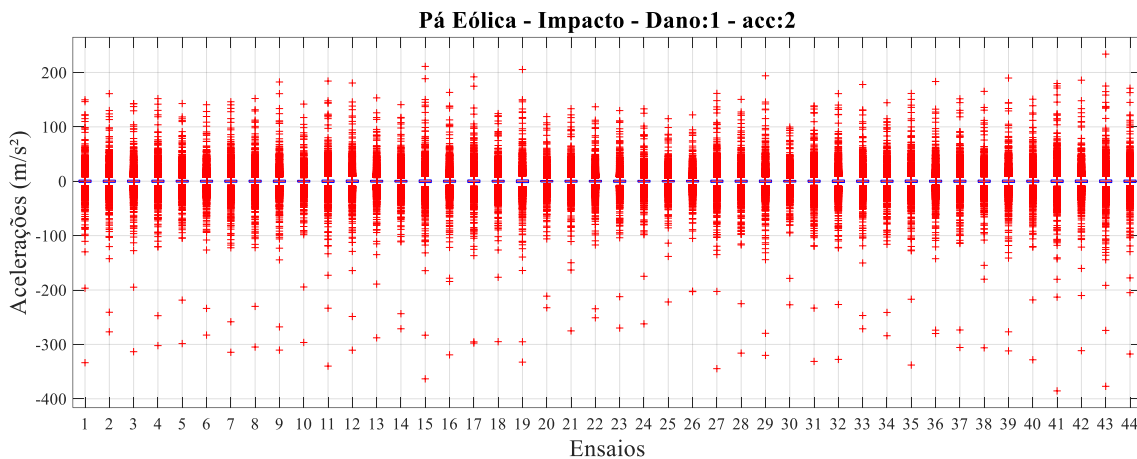


Figura B.46 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 15 g posicionada em F.

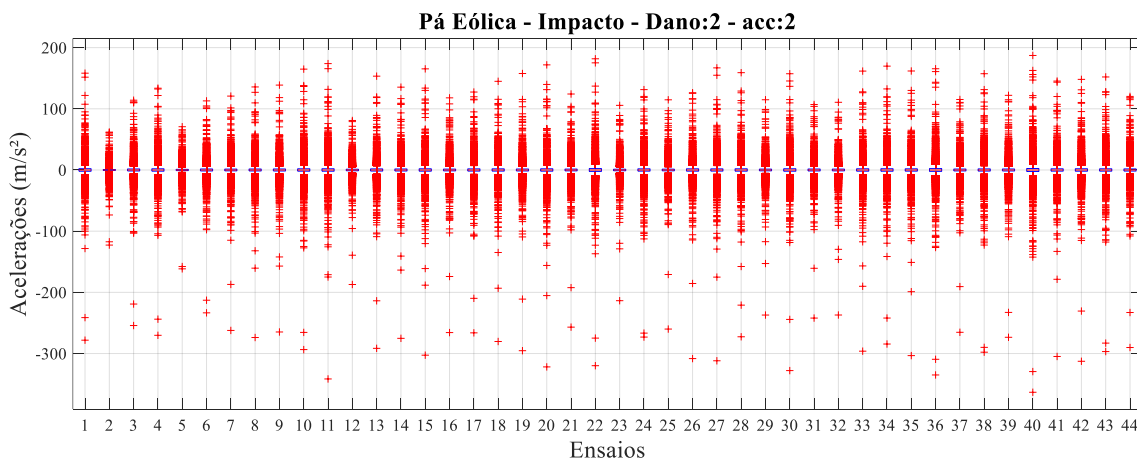


Figura B.47 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em F.

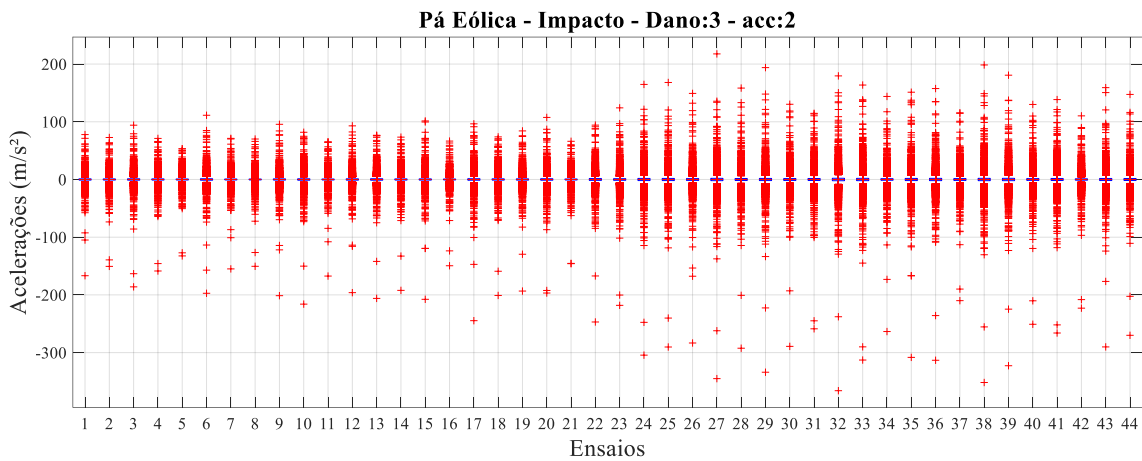


Figura B.48 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 70 g posicionada em F.

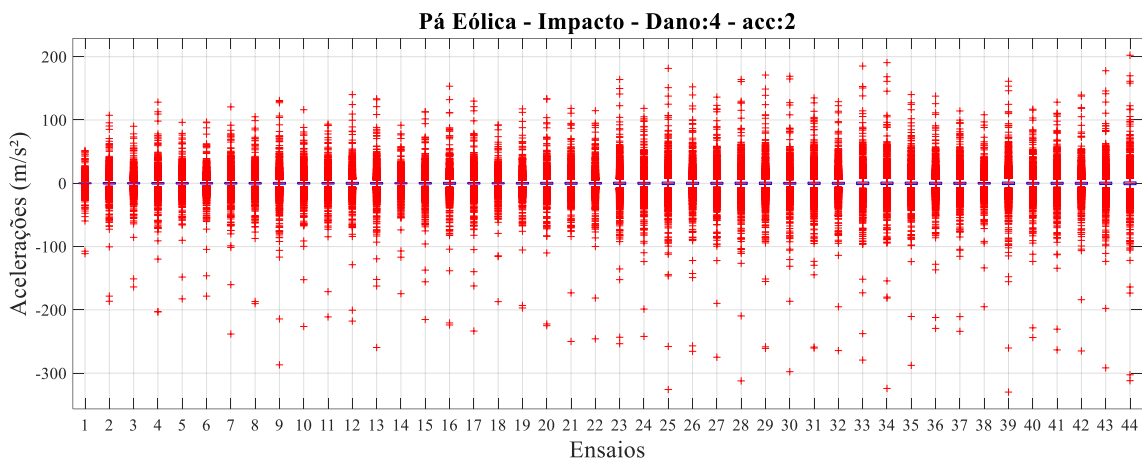


Figura B.49 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 130 g posicionada em F.

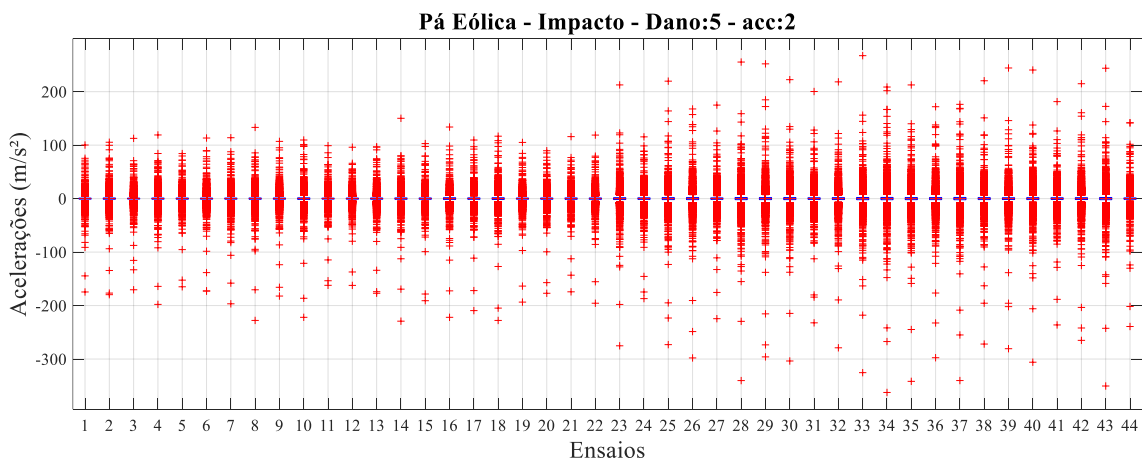


Figura B.50 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em F.

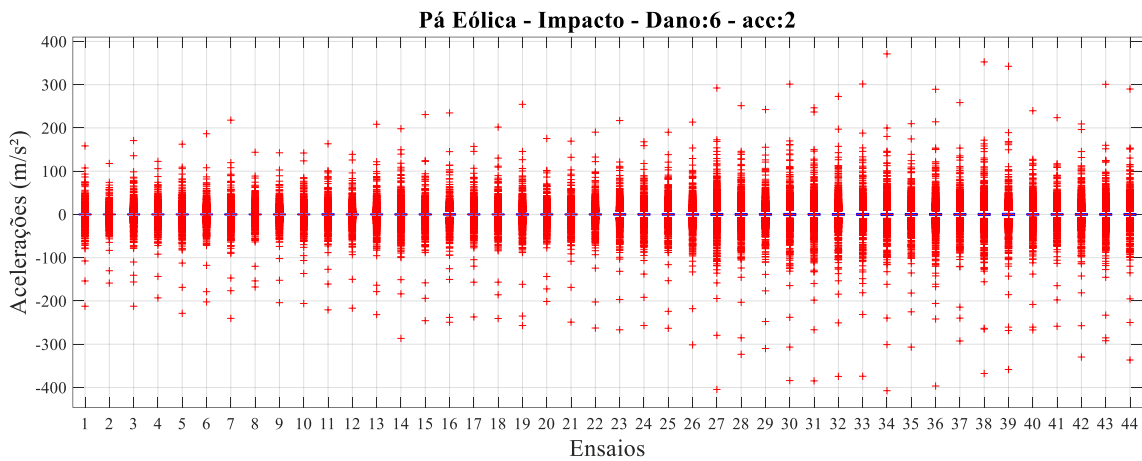
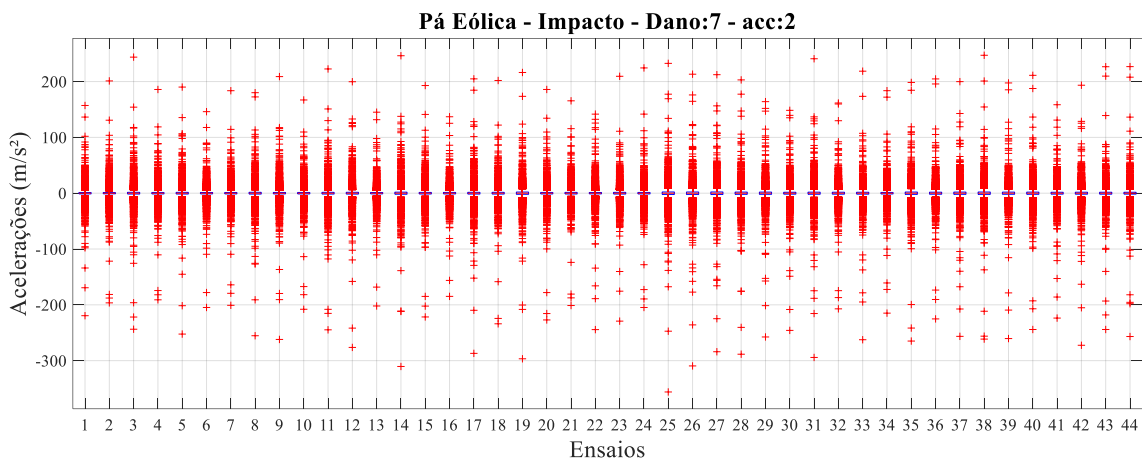


Figura B.51 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 44 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 430 g posicionada em F.



B.3.2. Impacto (10 s) – Variando local da massa (30 g)

Figura B.52 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em C.

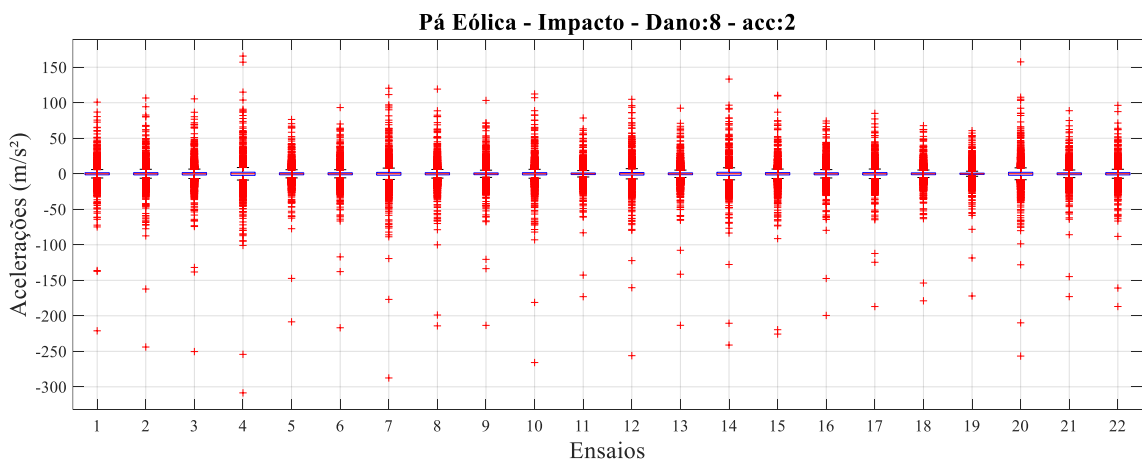


Figura B.53 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em D.

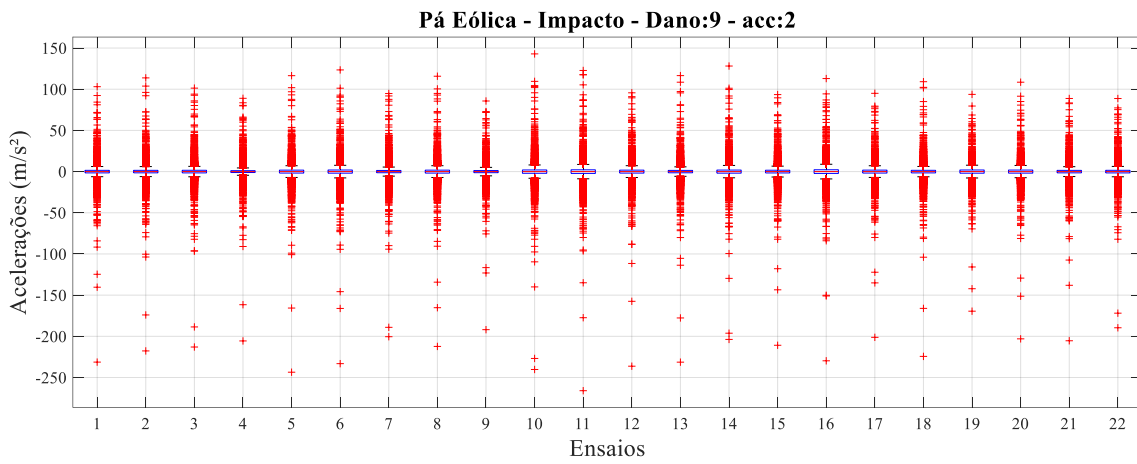


Figura B.54 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em E.

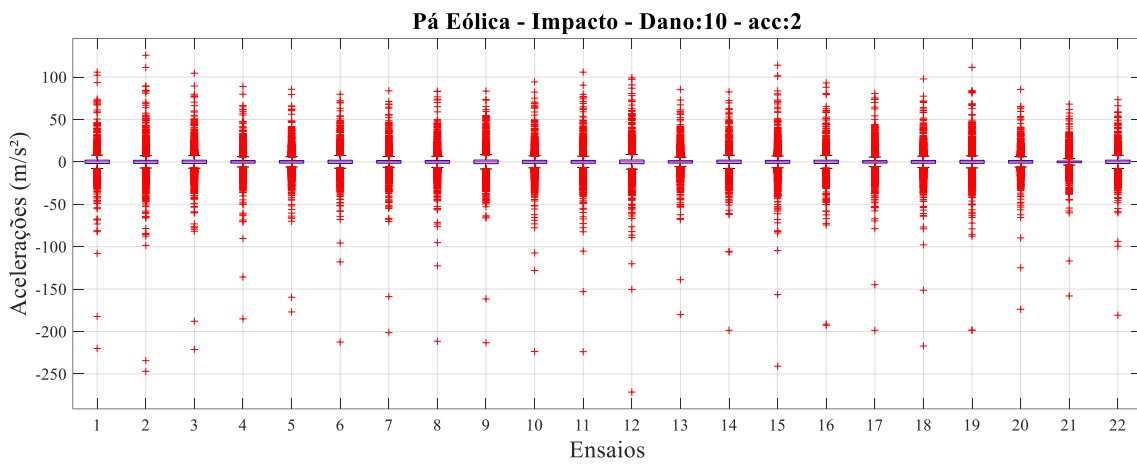


Figura B.55 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em G.

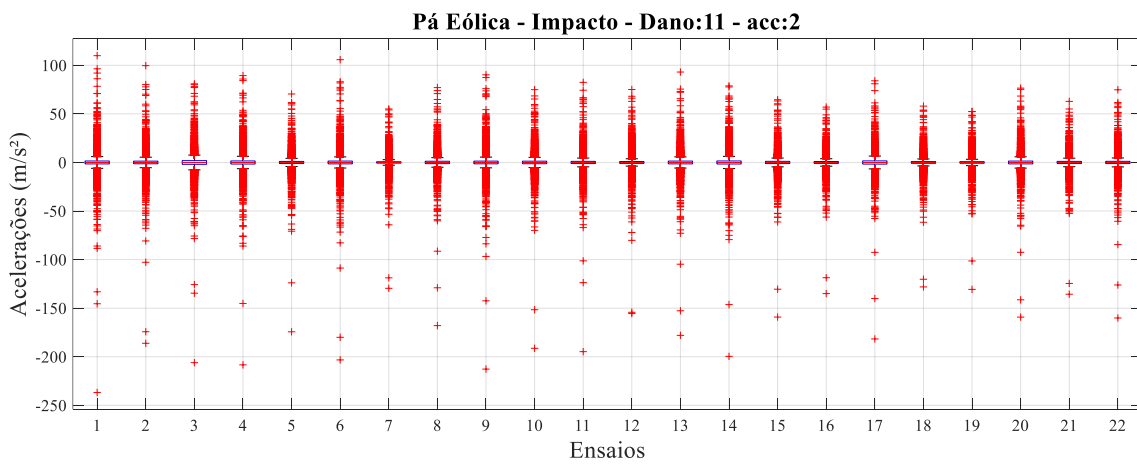


Figura B.56 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em H.

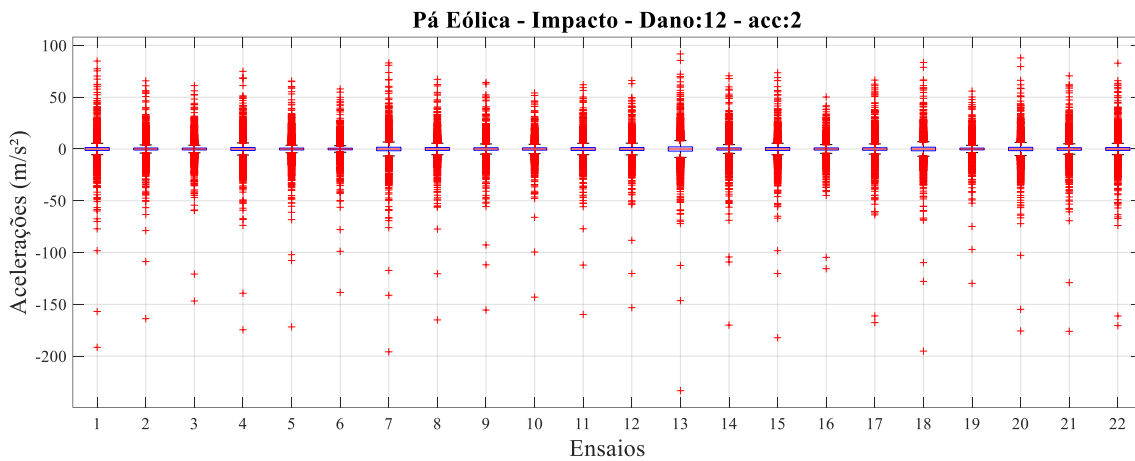


Figura B.57 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em J.

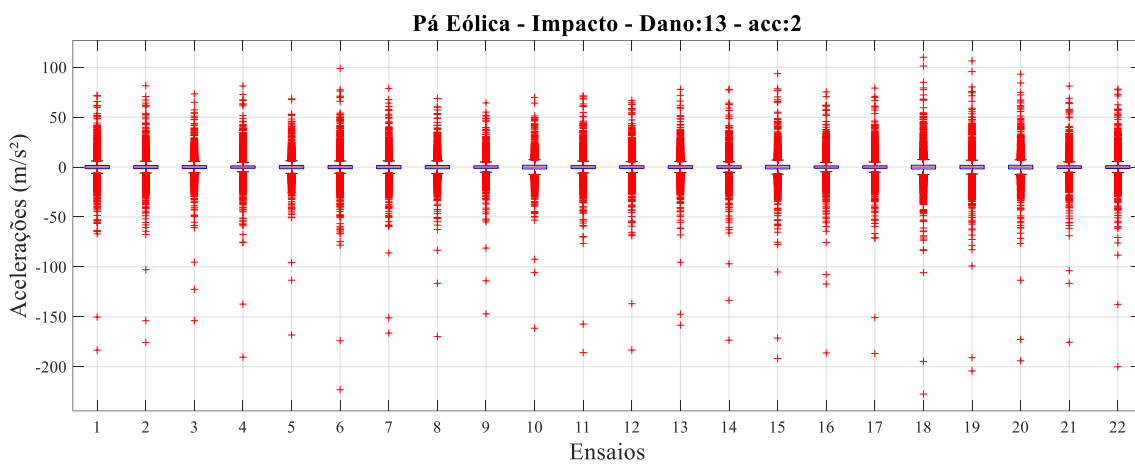
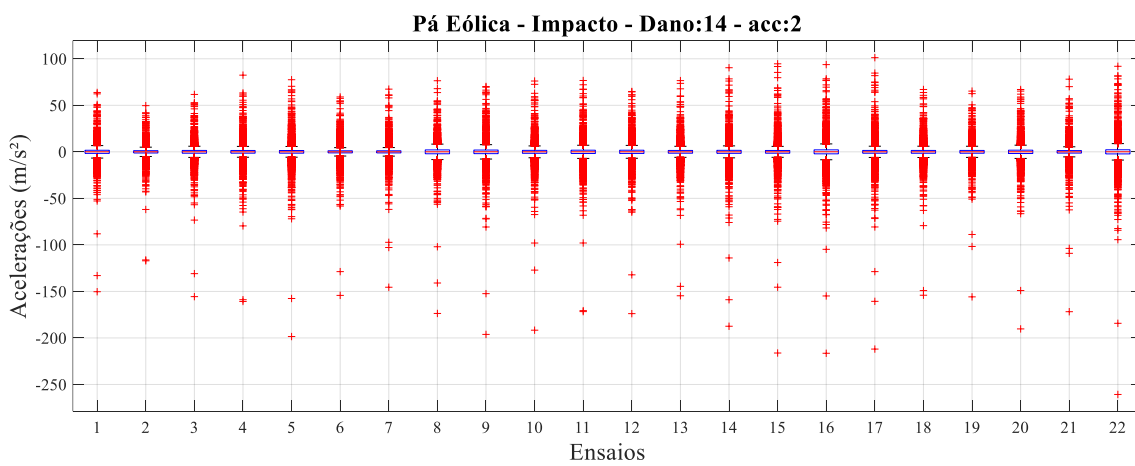


Figura B.58 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 30 g posicionada em L.



B.3.3. Impacto (10 s) – Variando local da massa (220 g)

Figura B.59 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em E.

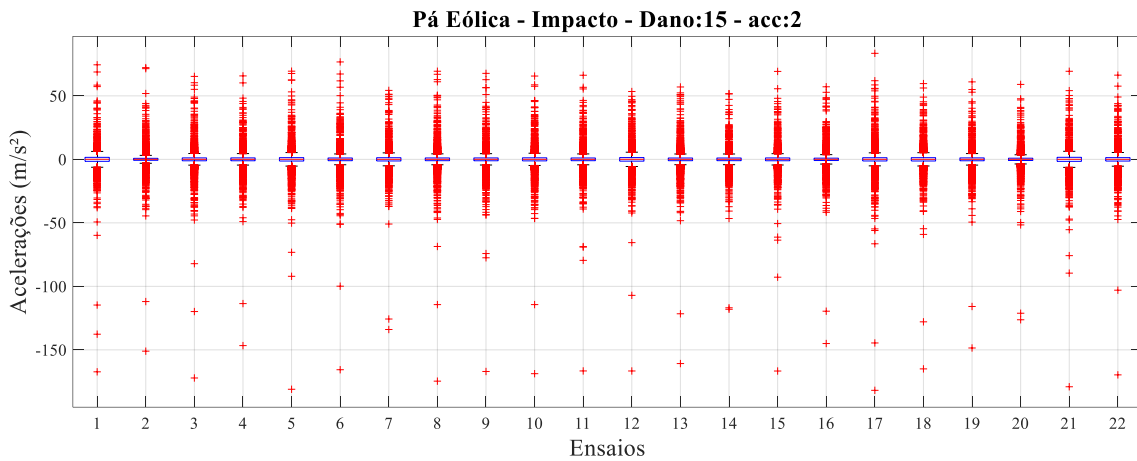


Figura B.60 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em G.

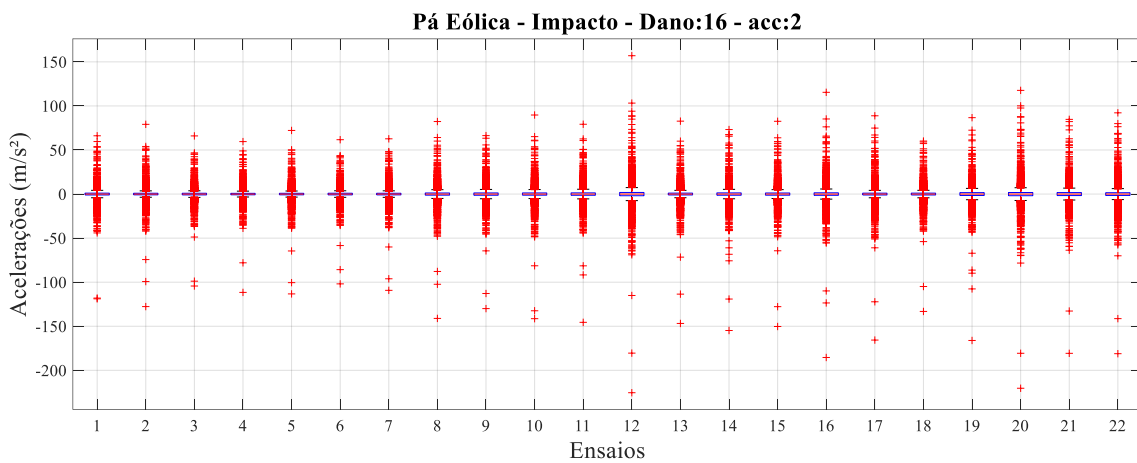


Figura B.61 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em H.

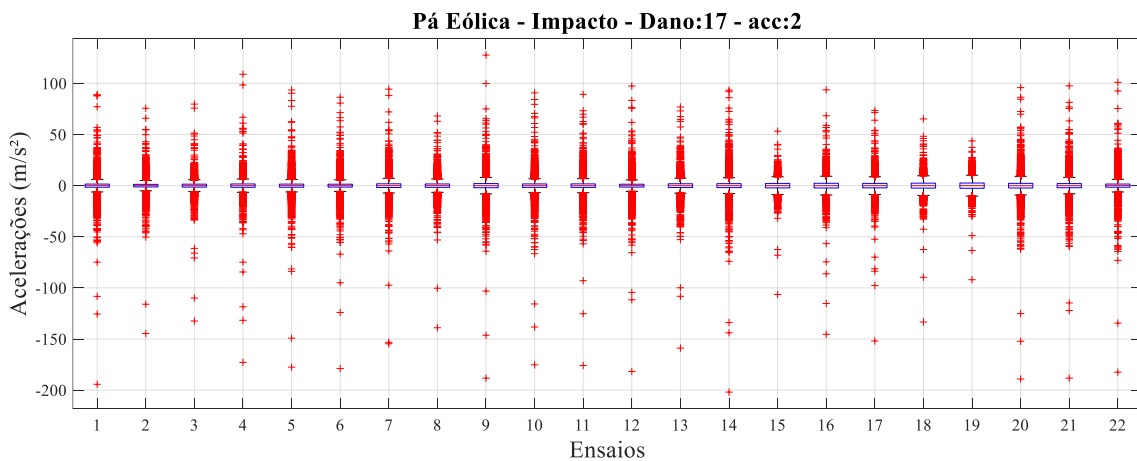


Figura B.62 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em J.

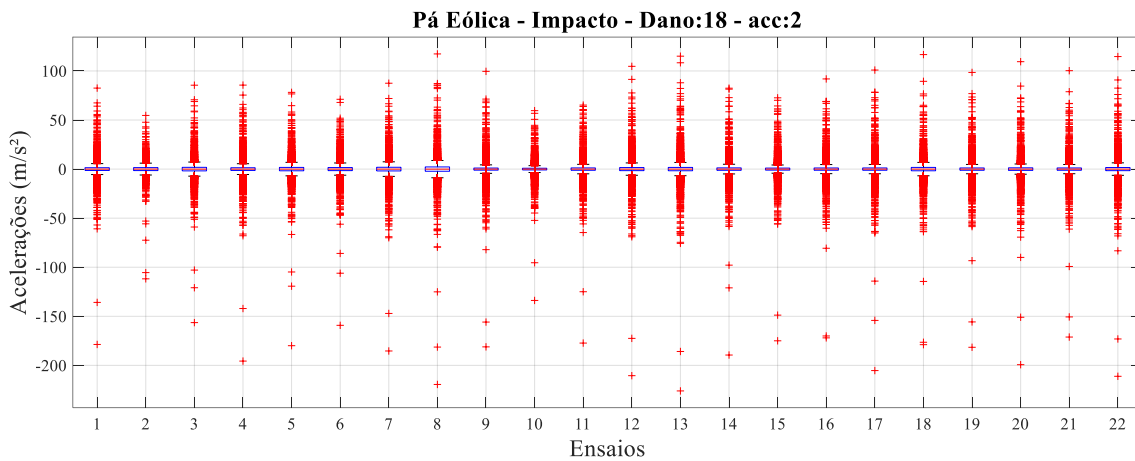
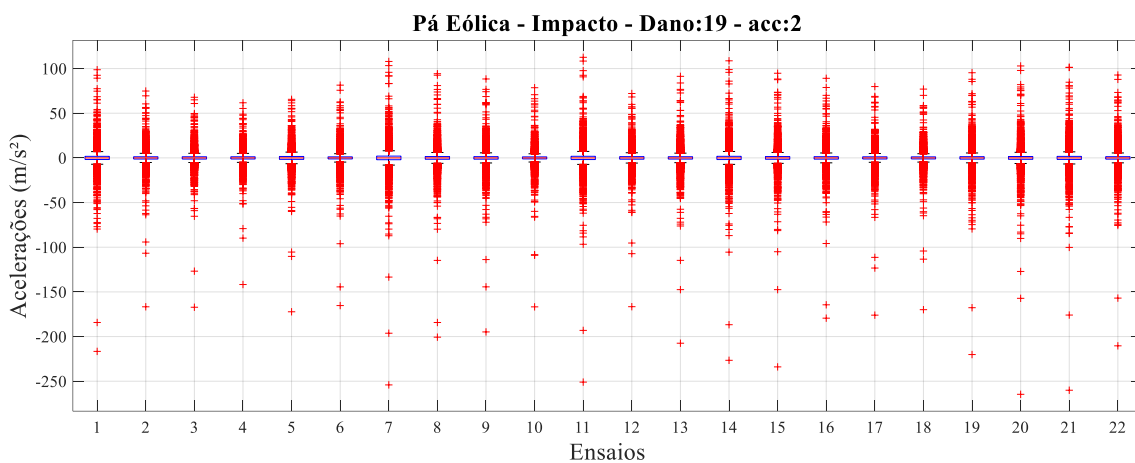


Figura B.63 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 10 s, e massa de 220 g posicionada em L.



B.3.4. Impacto (20 s) – Variando quantidade de massa (F)

Figura B.64 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e a estrutura intacta.

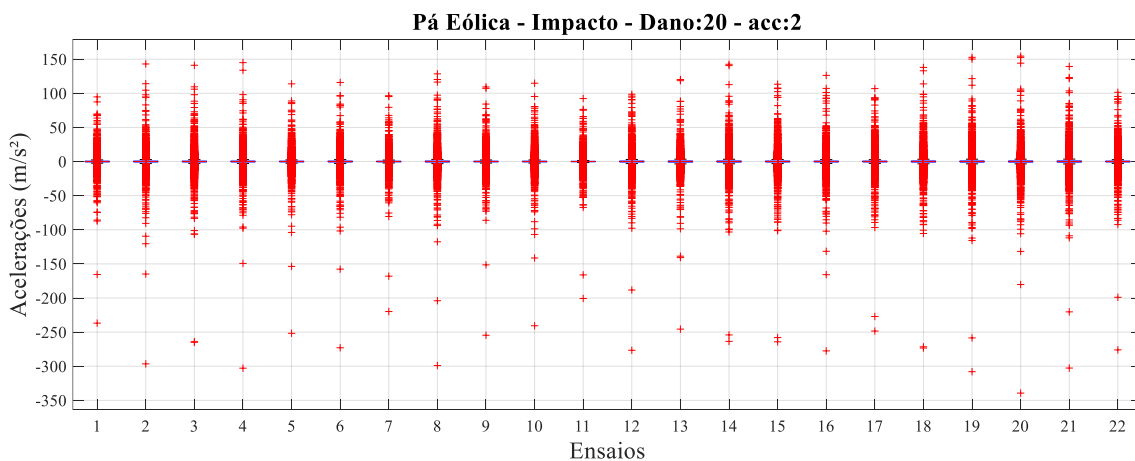


Figura B.65 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 10 g posicionada em F.

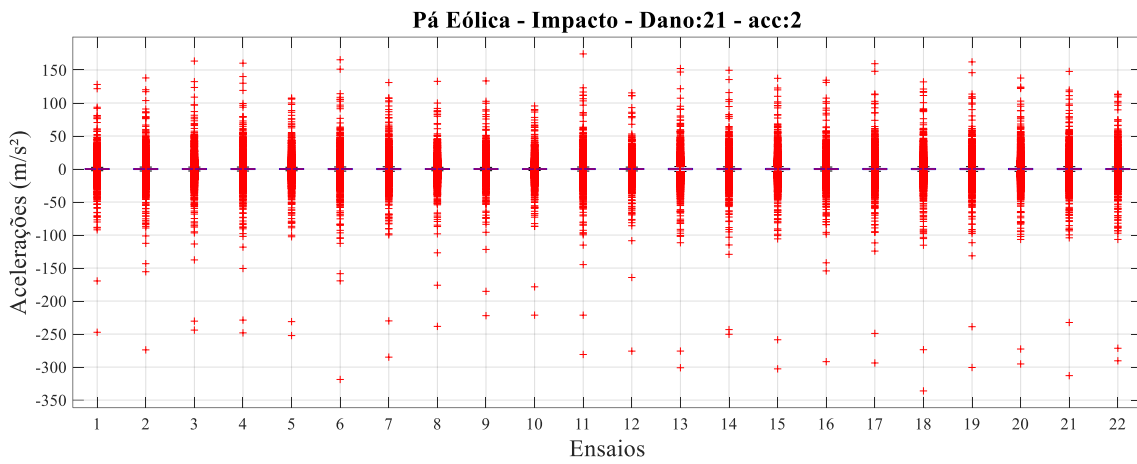


Figura B.66 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 15 g posicionada em F.

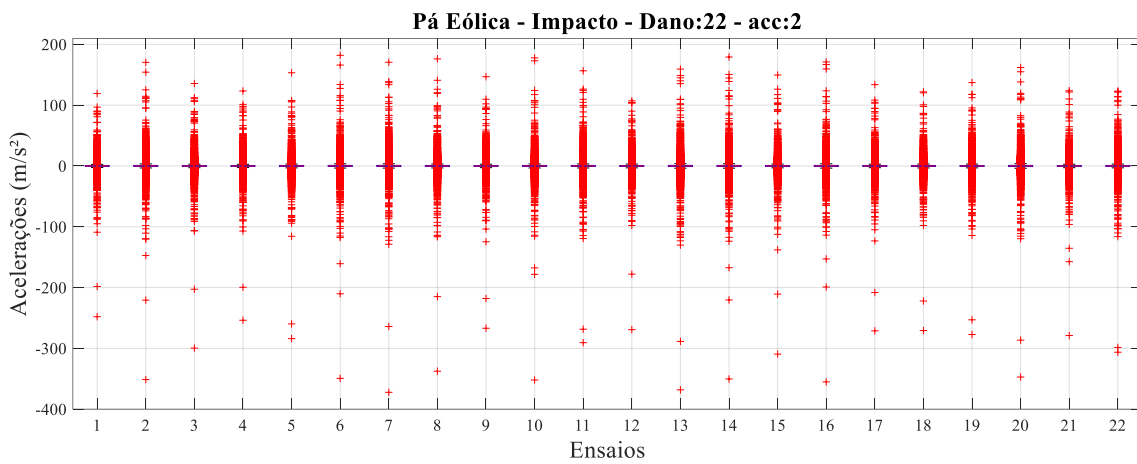


Figura B.67 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 30 g posicionada em F.

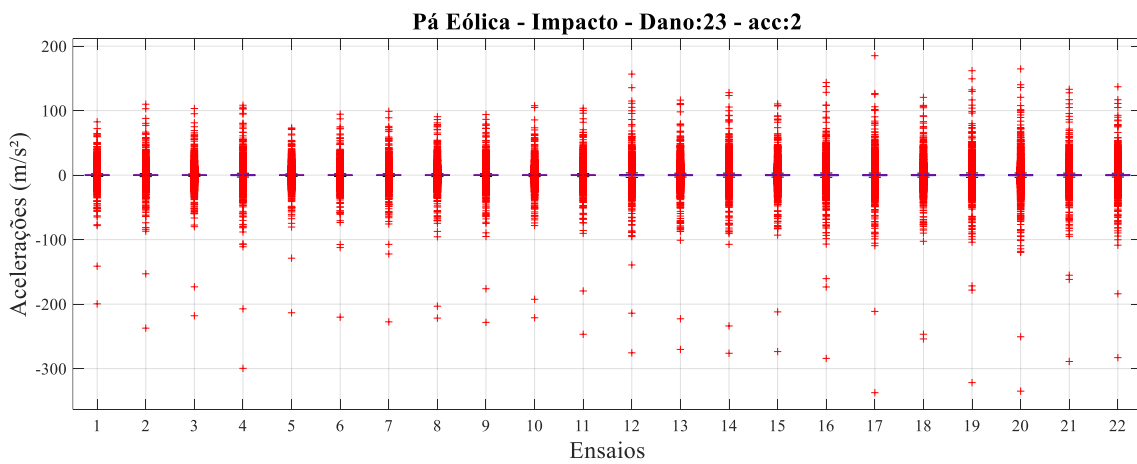


Figura B.68 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 70 g posicionada em F.

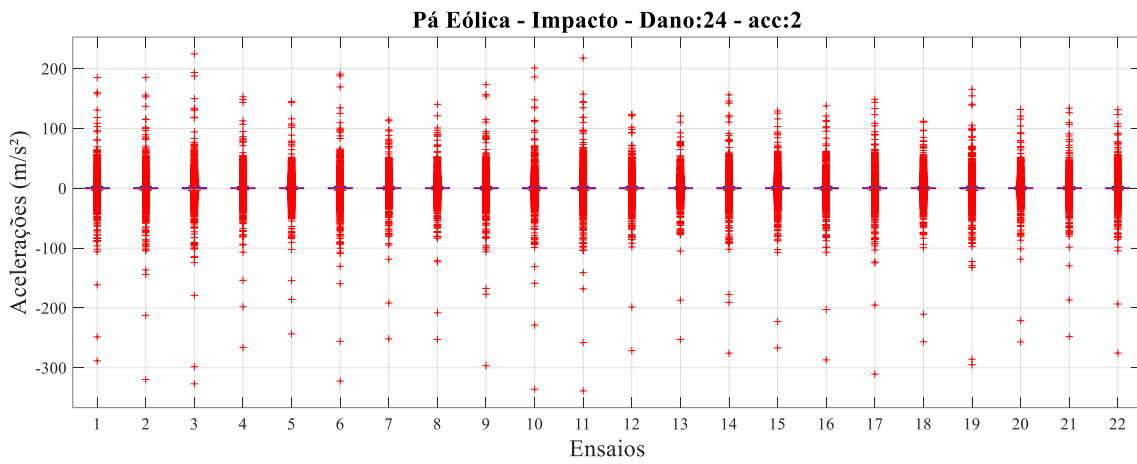


Figura B.69 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 130 g posicionada em F.

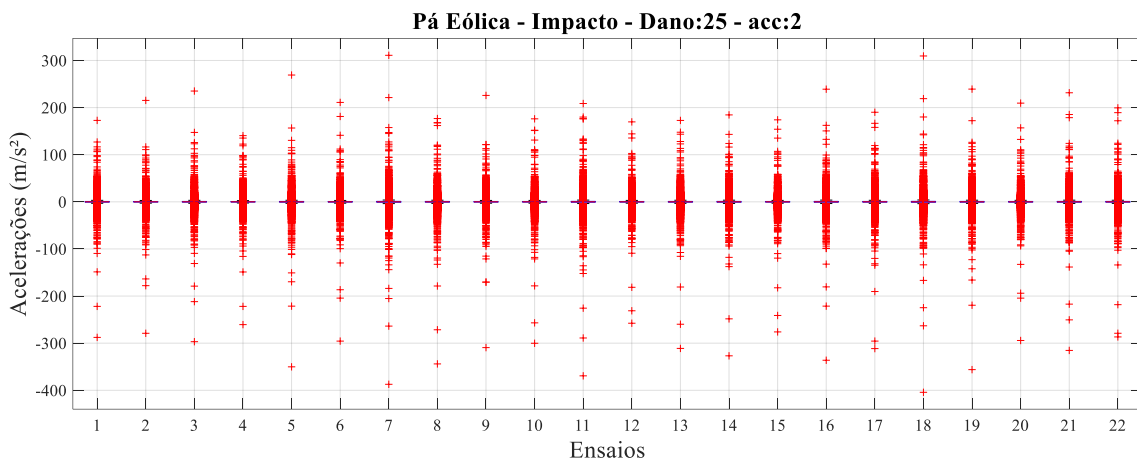


Figura B.70 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 220 g posicionada em F.

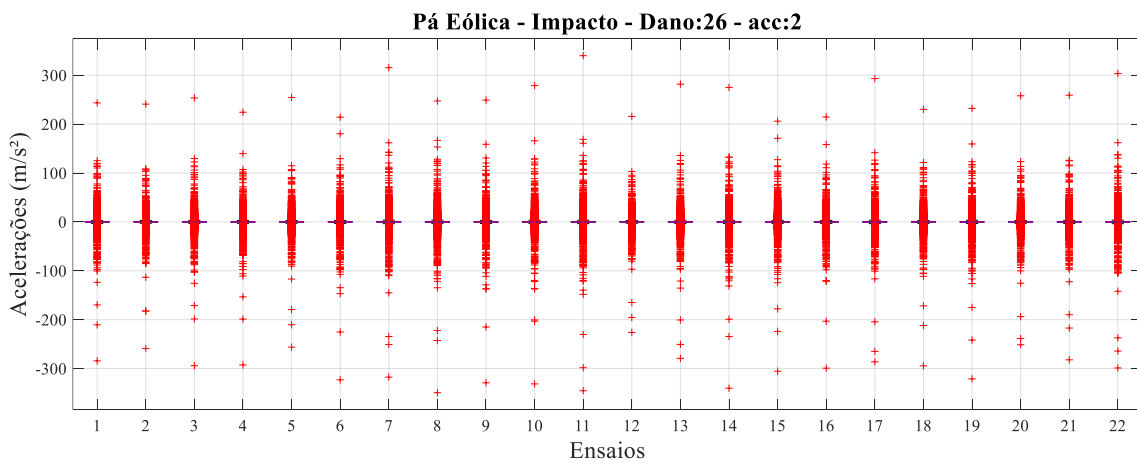
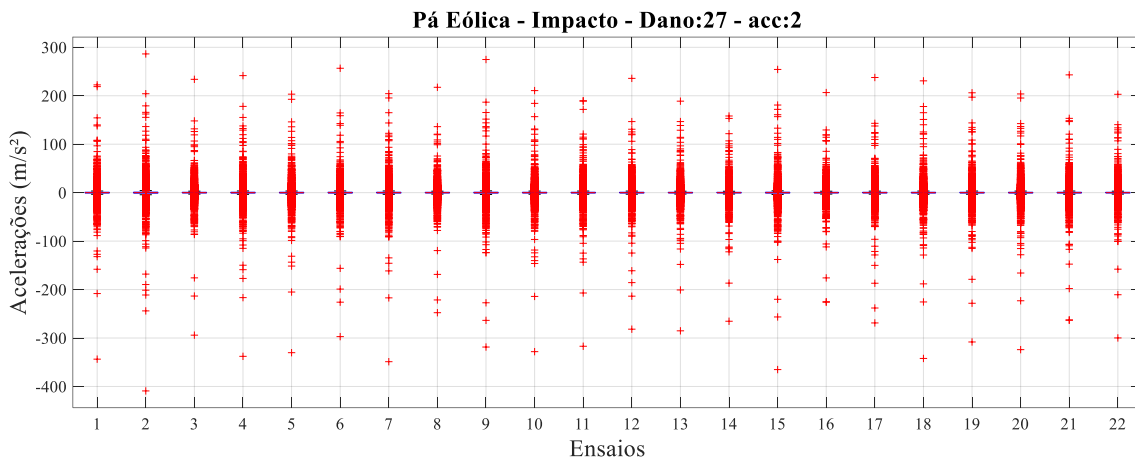


Figura B.71 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 2 nos 22 ensaios da Pá Eólica, com excitação por impacto a cada 20 s, e massa de 430 g posicionada em F.



B.4. VIGA BIPOIADA

Devido ao elevado número de ensaios, os *boxplots* dos dados da viga biapoçada foram divididos em três partes para cada estado de dano.

B.4.1. Impacto – Variando massa e furos

Figura B.72 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoçada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.

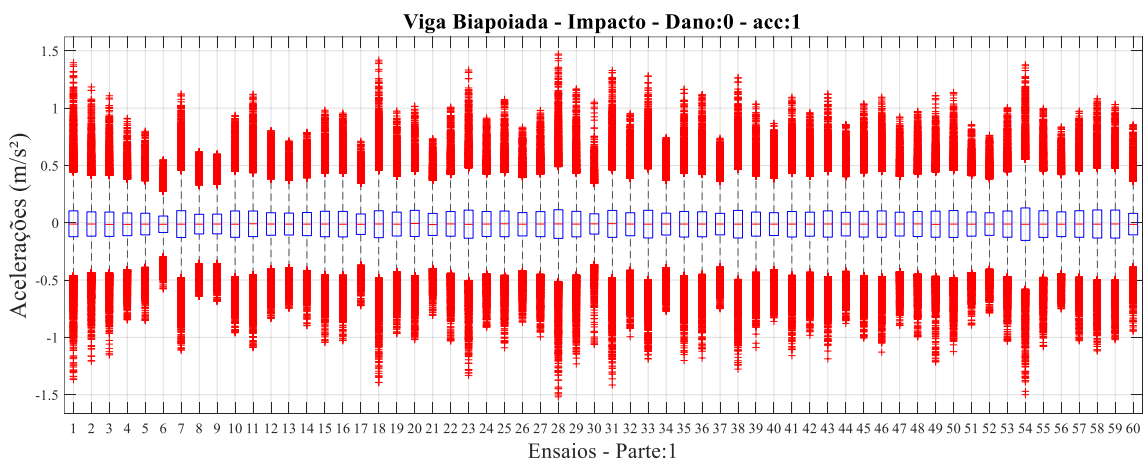


Figura B.73 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.

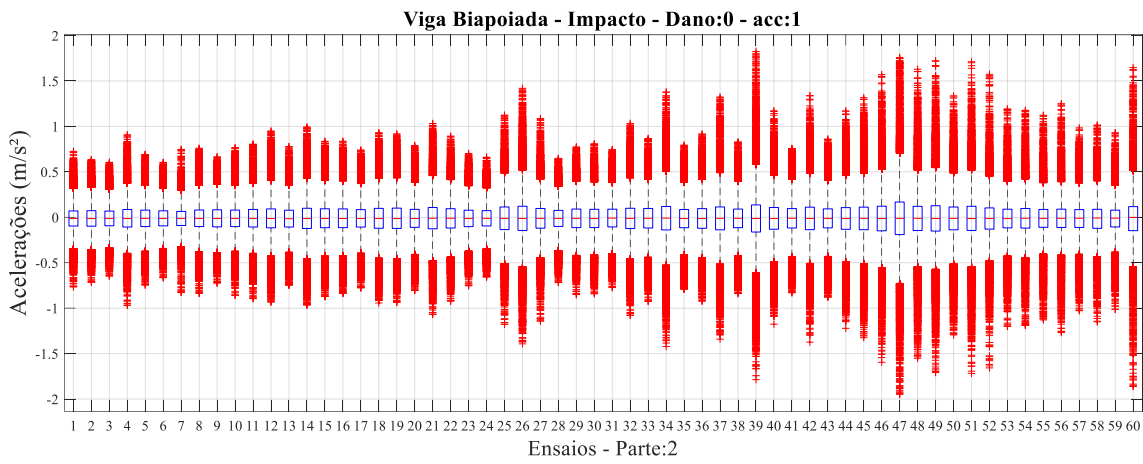


Figura B.74 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a estrutura intacta.

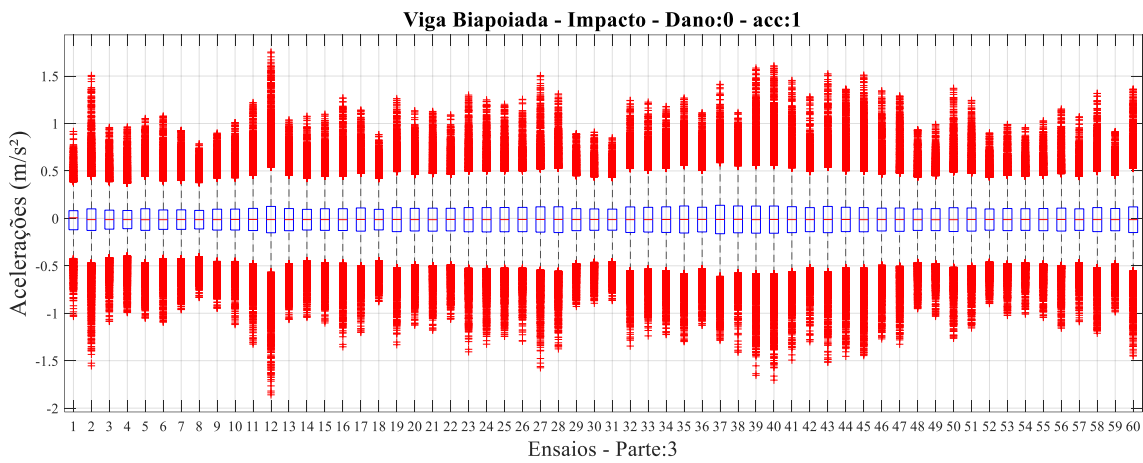


Figura B.75 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a massa de 500 g.

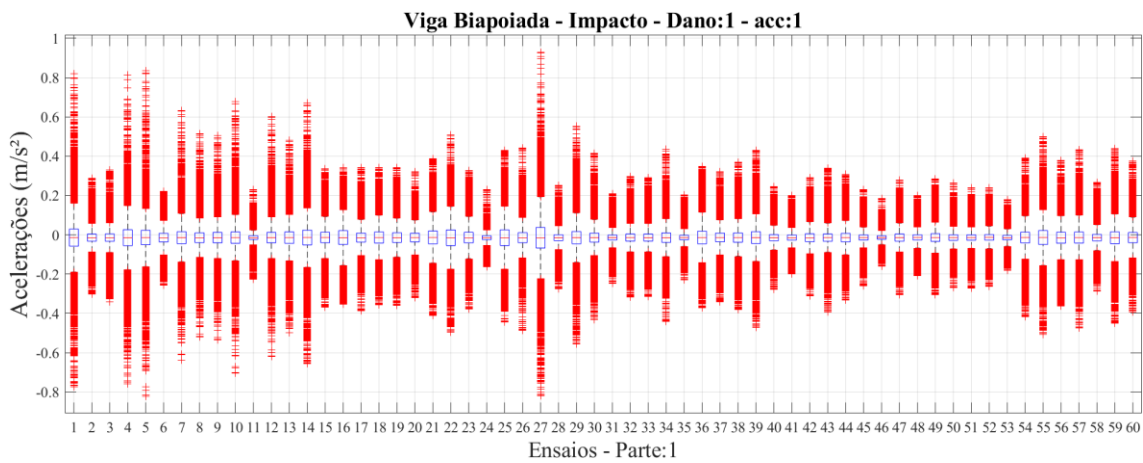


Figura B.76 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a massa de 500 g.

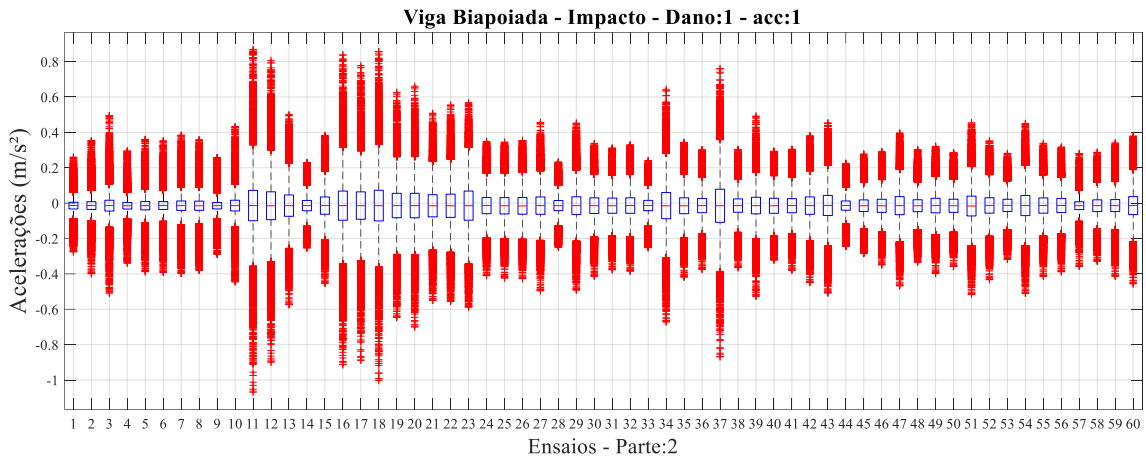


Figura B.77 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e a massa de 500 g.

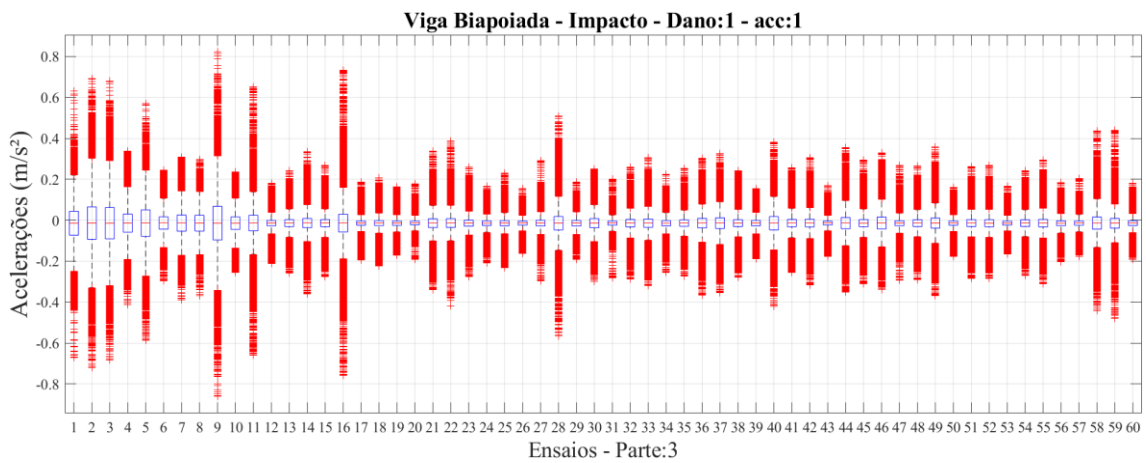


Figura B.78 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 12 mm.

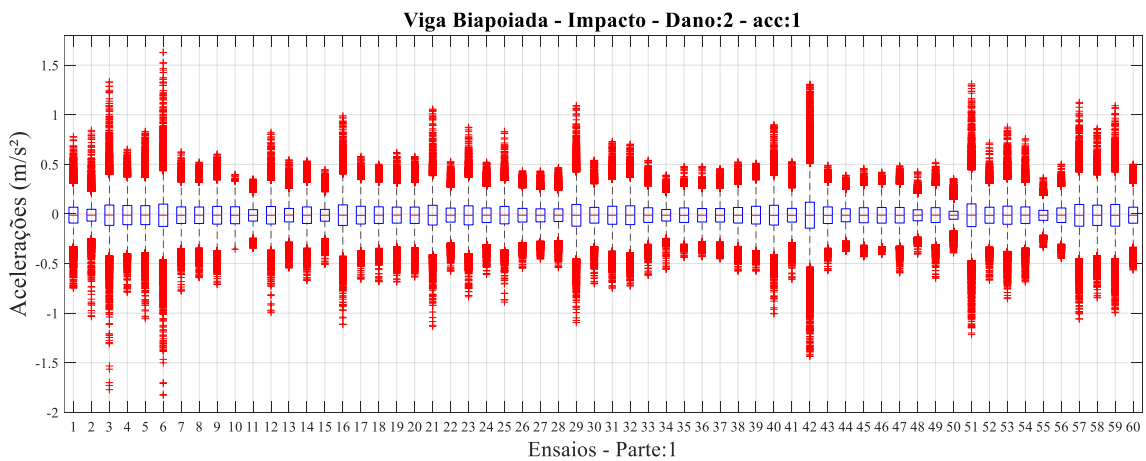


Figura B.79 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 12 mm.

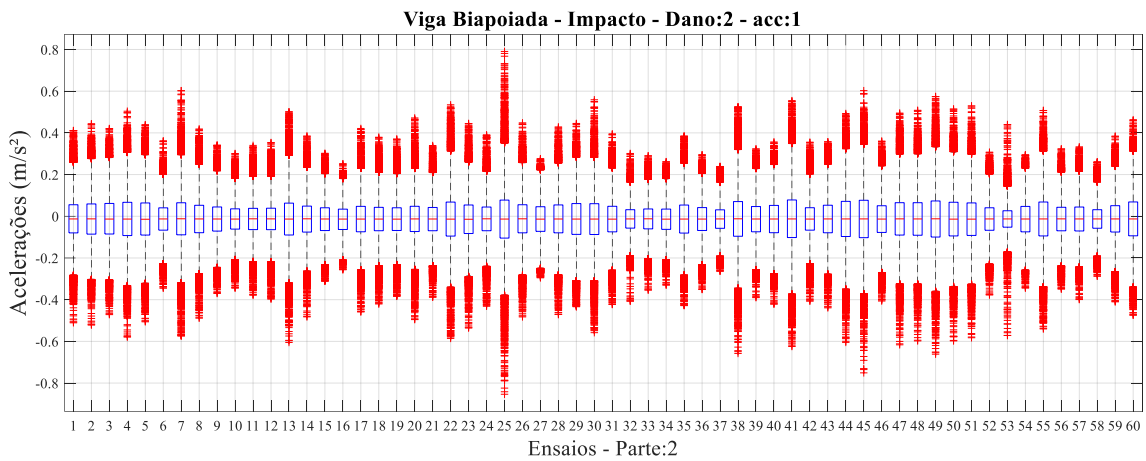


Figura B.80 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 12 mm.

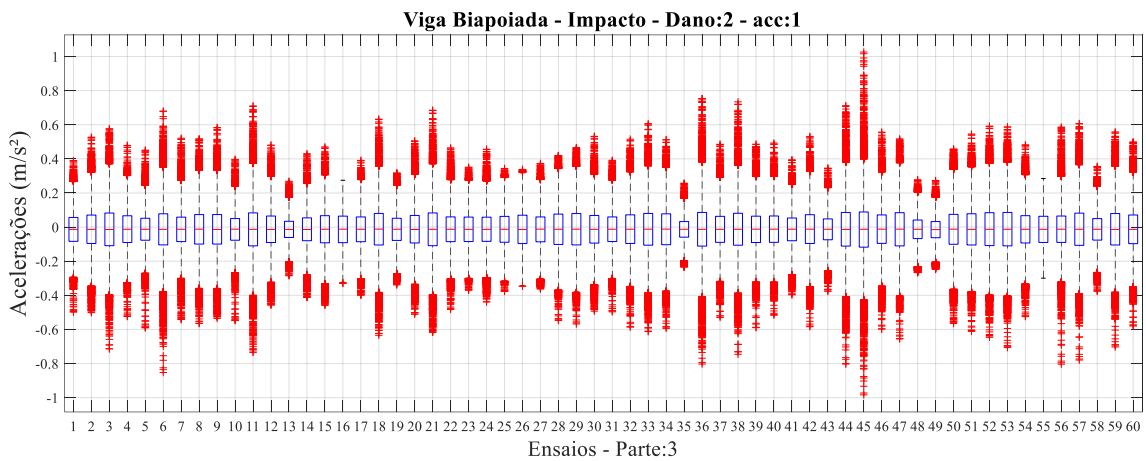


Figura B.81 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 16 mm.

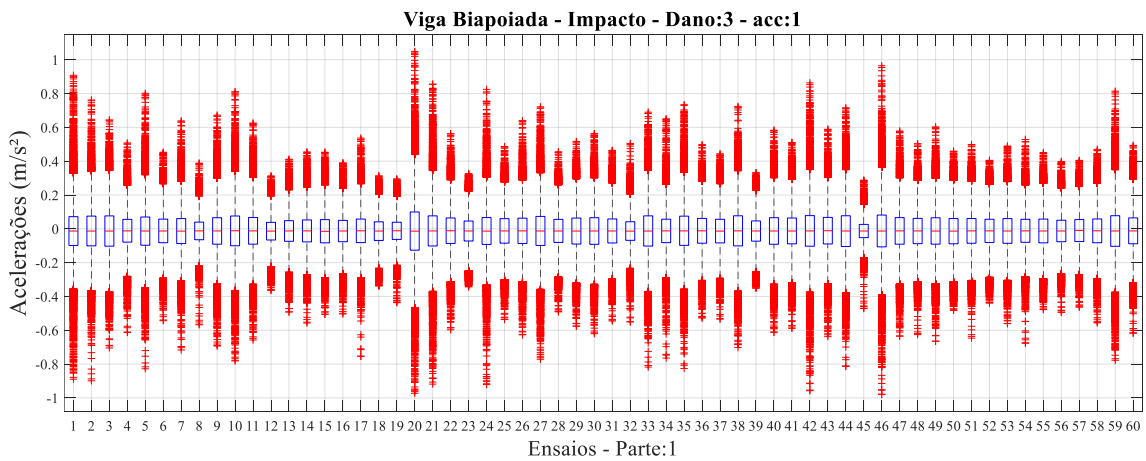


Figura B.82 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 16 mm.

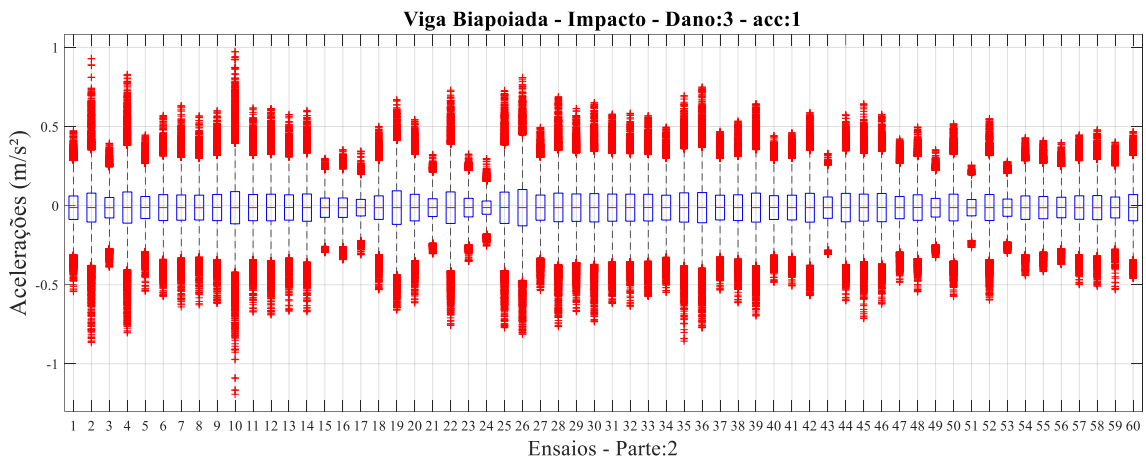


Figura B.83 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 16 mm.

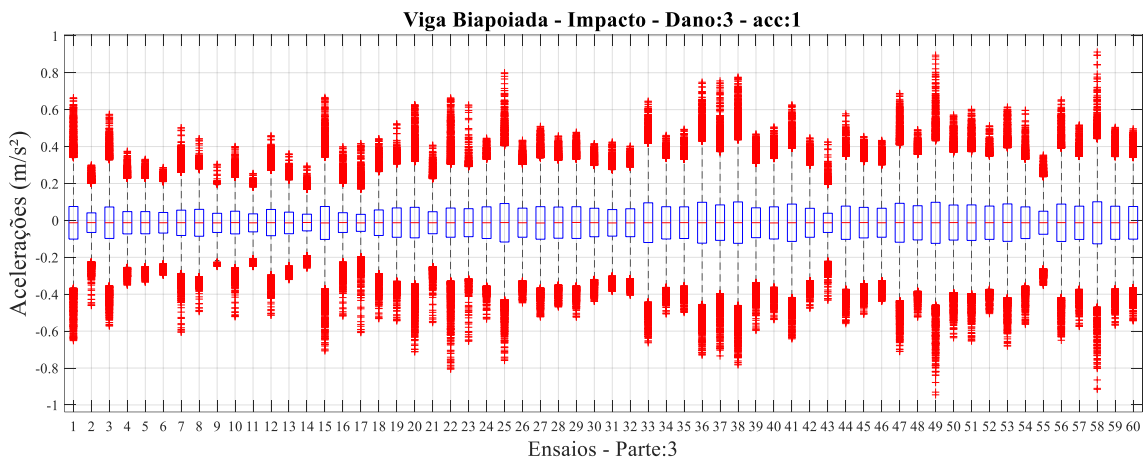


Figura B.84 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 22,5 mm.

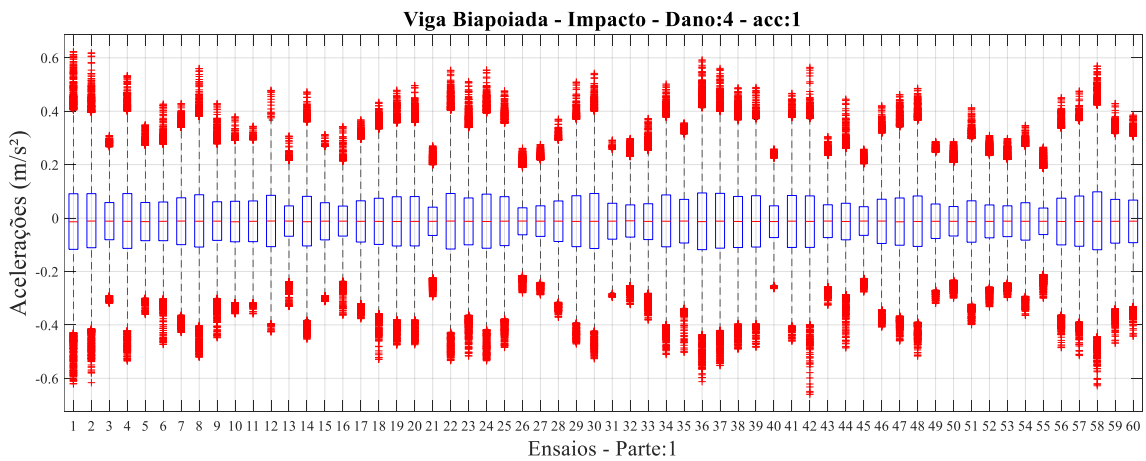


Figura B.85 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 22,5 mm.

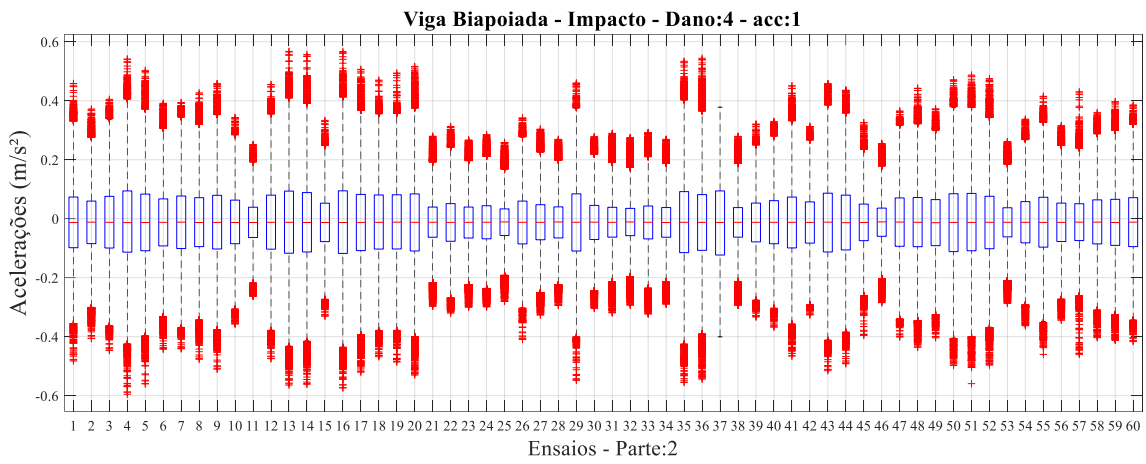


Figura B.86 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 22,5 mm.

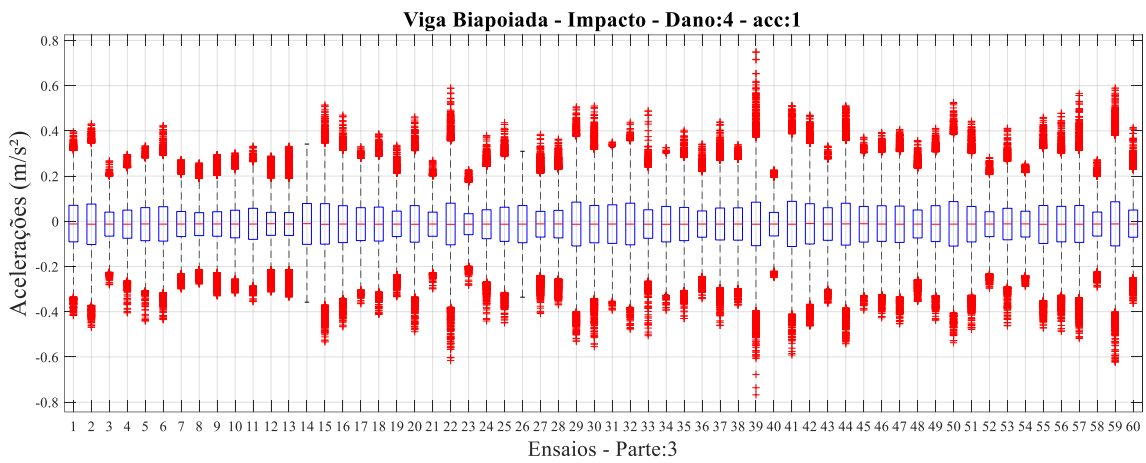


Figura B.87 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 32 mm.

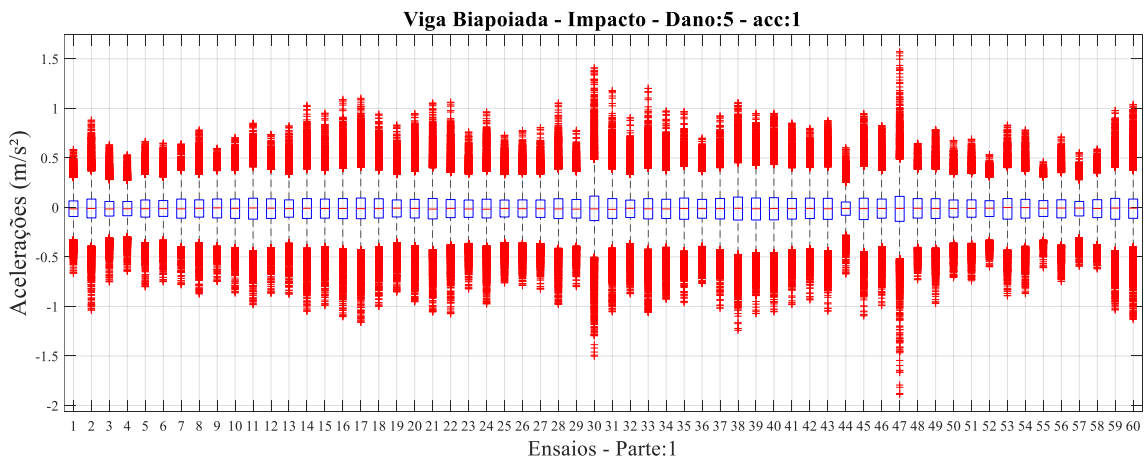


Figura B.88 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 32 mm.

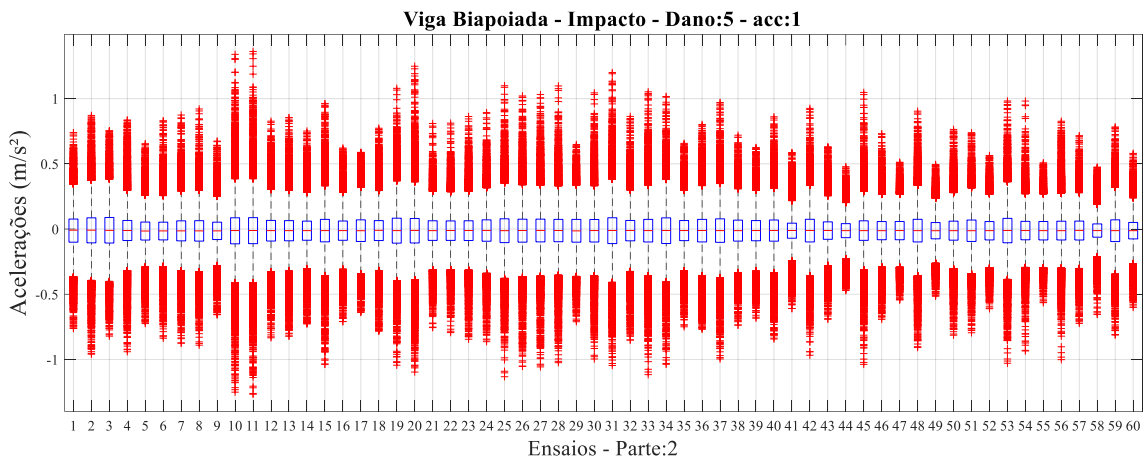
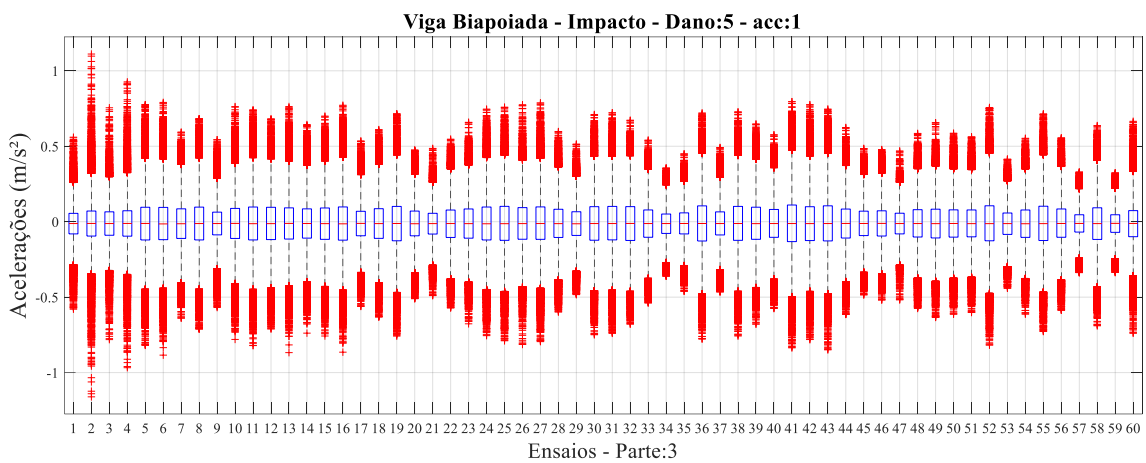


Figura B.89 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, com excitação por impacto, e o furo de 32 mm.



B.4.2. Shaker – Variando massa e furos

Figura B.90 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por shaker, e a estrutura intacta.

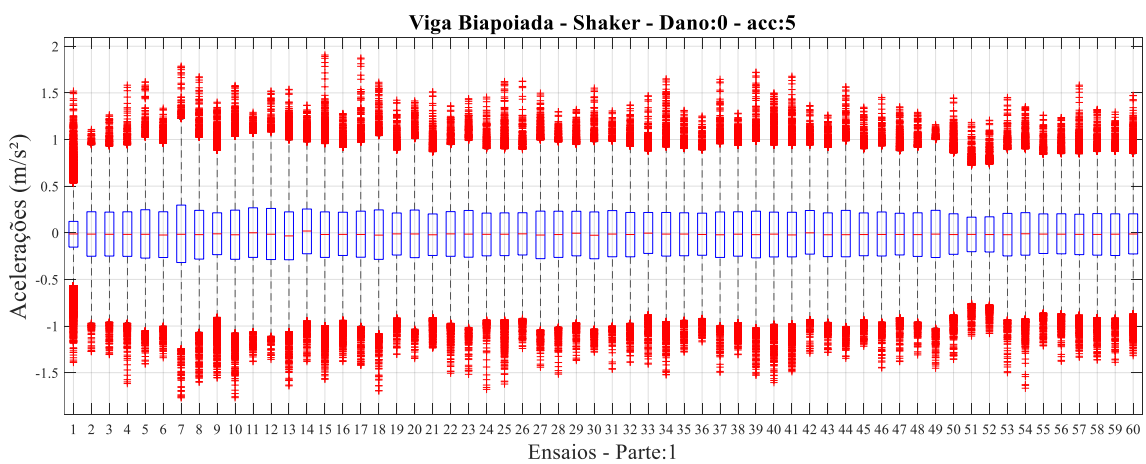


Figura B.91 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e a estrutura intacta.

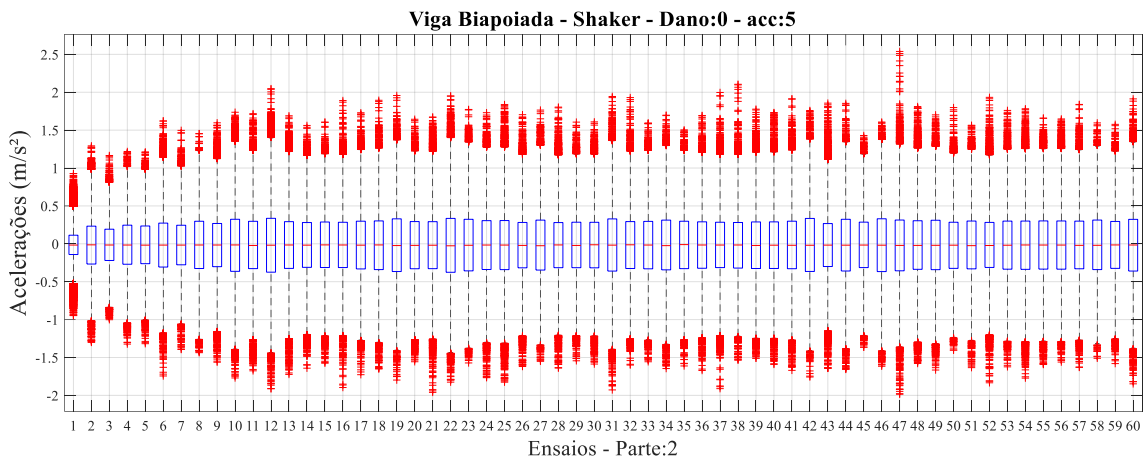


Figura B.92 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e a estrutura intacta.

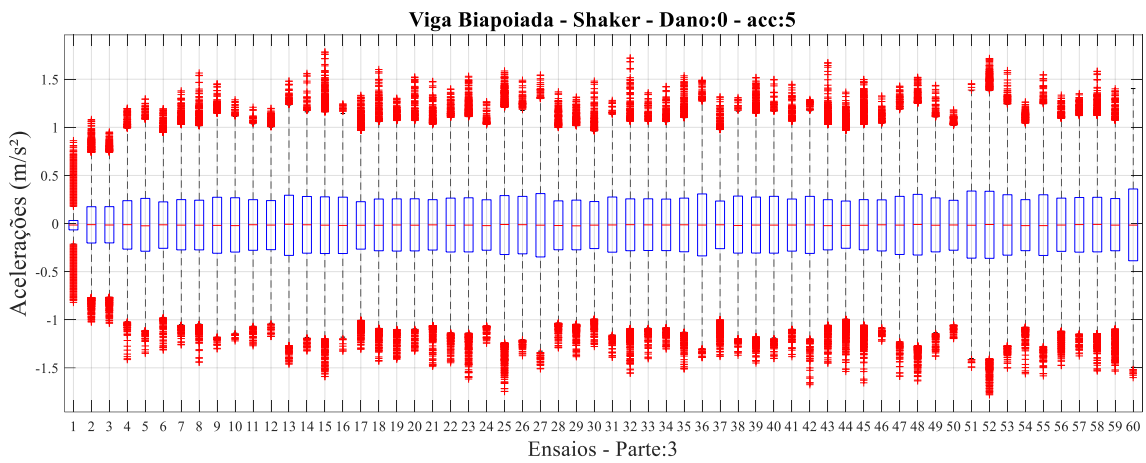


Figura B.93 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e a massa de 500 g.

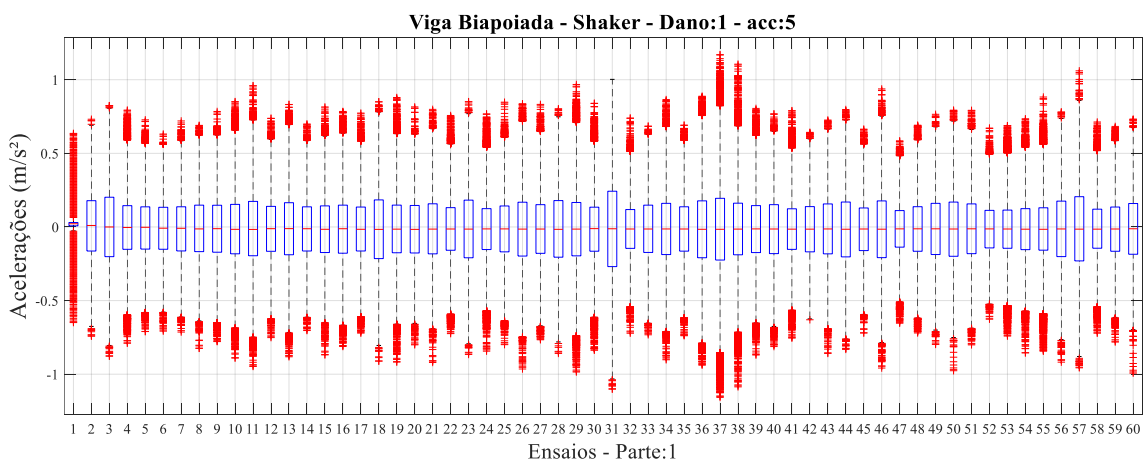


Figura B.94 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e a massa de 500 g.

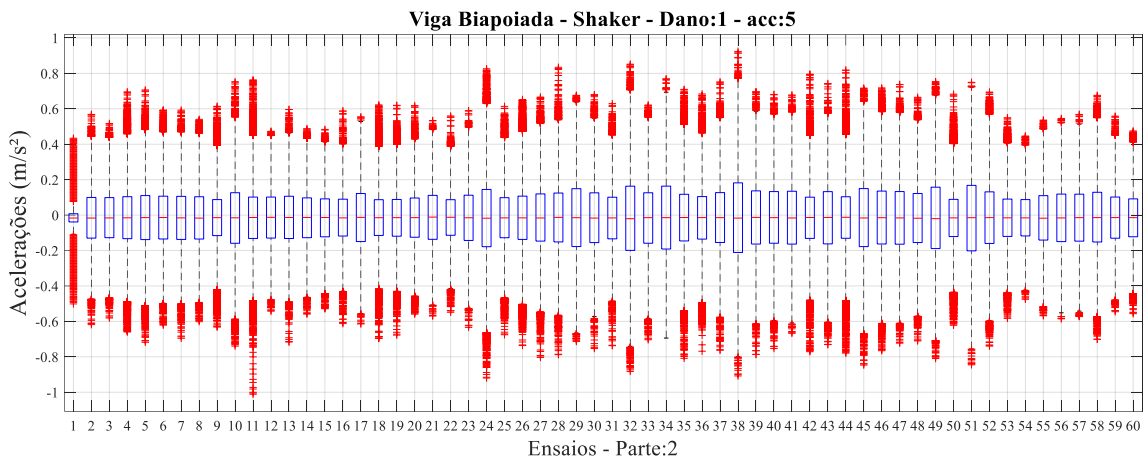


Figura B.95 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e a massa de 500 g.

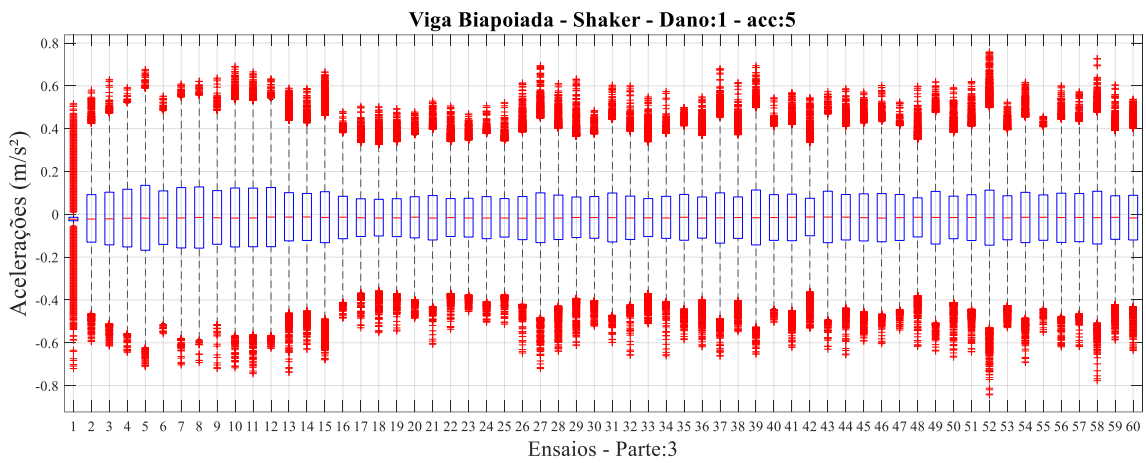


Figura B.96 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 12 mm.

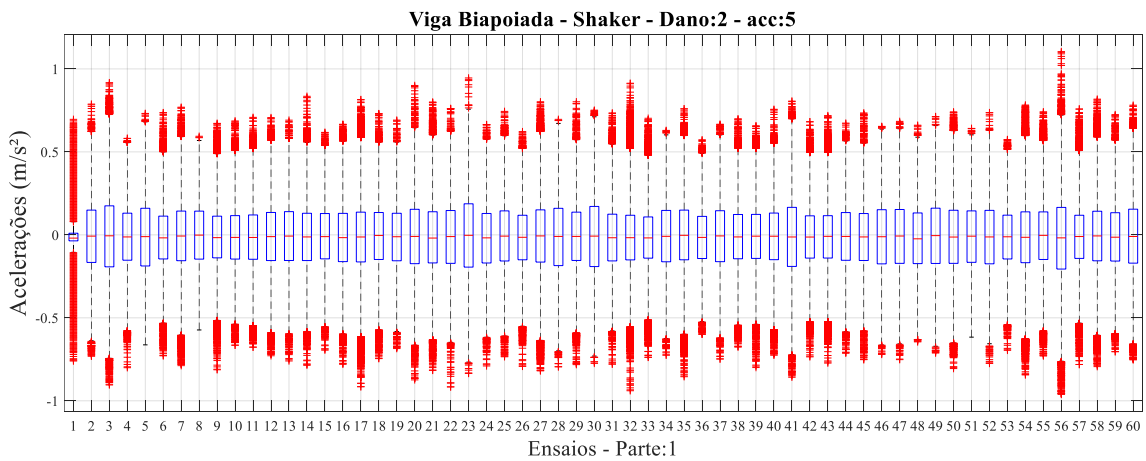


Figura B.97 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 12 mm.

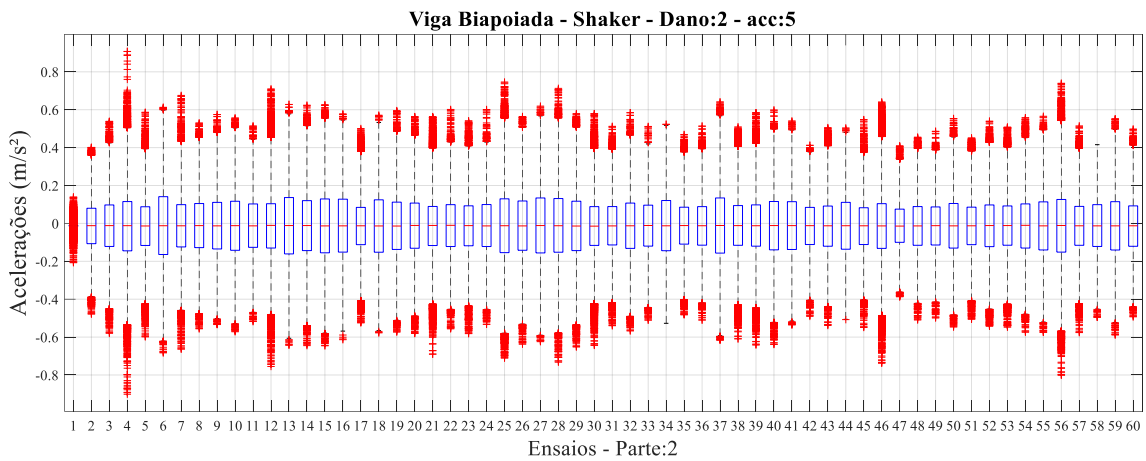


Figura B.98 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 12 mm.

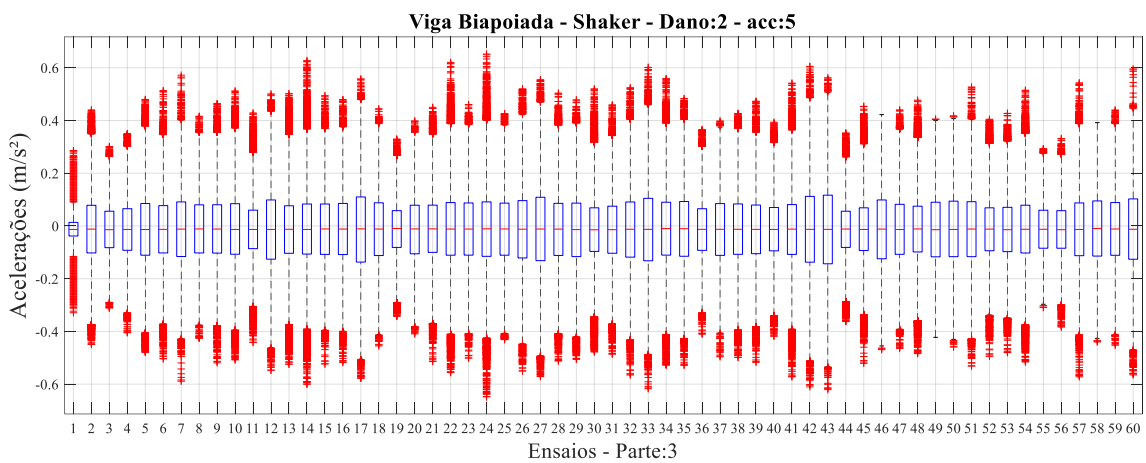


Figura B.99 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 16 mm.

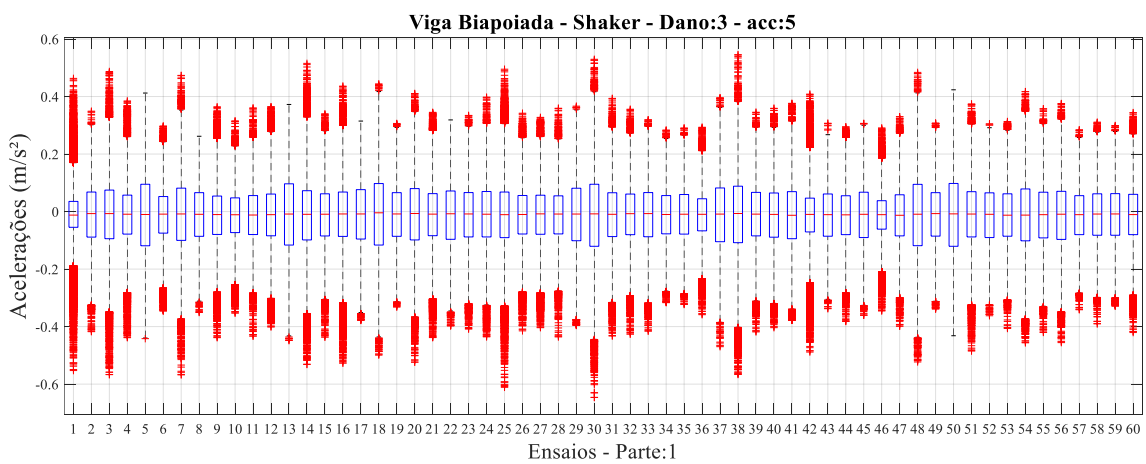


Figura B.100 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 16 mm.

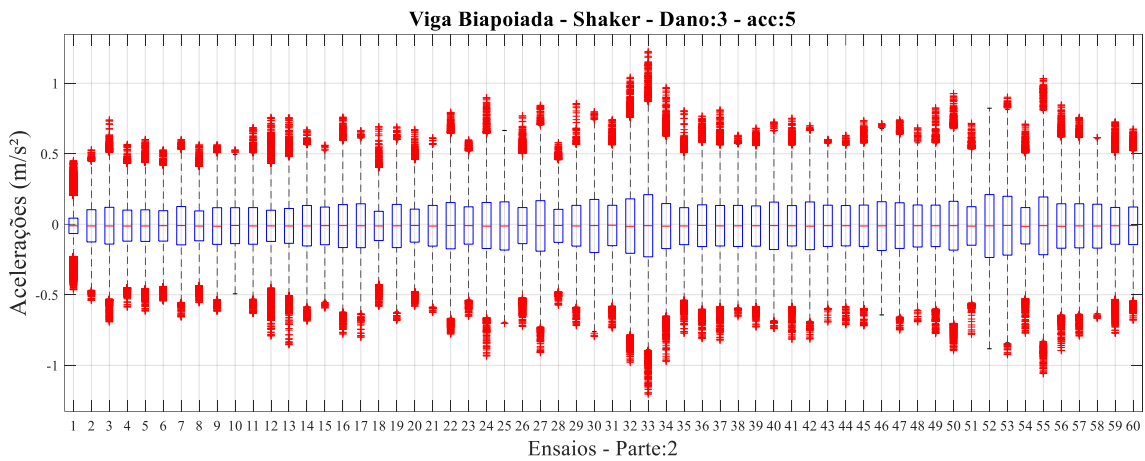


Figura B.101 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 16 mm.

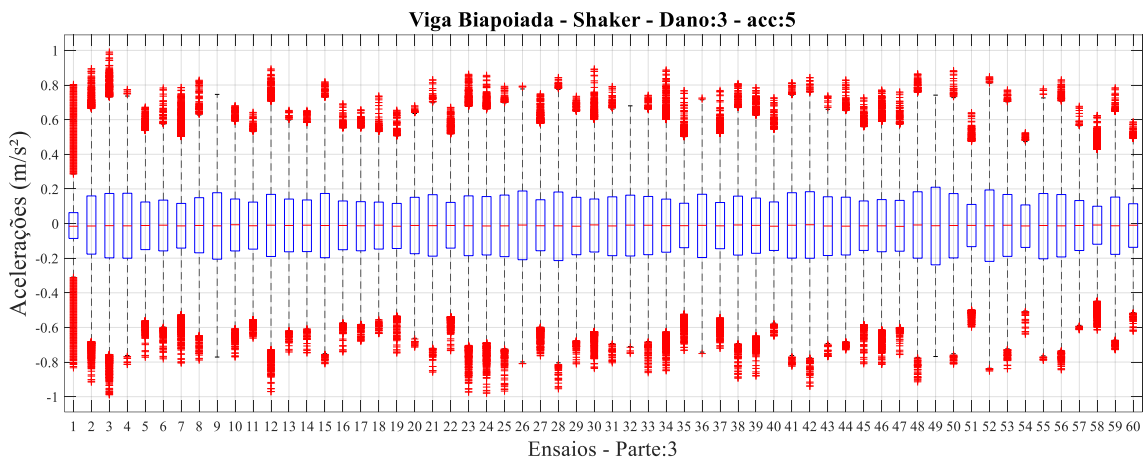


Figura B.102 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 22,5 mm.

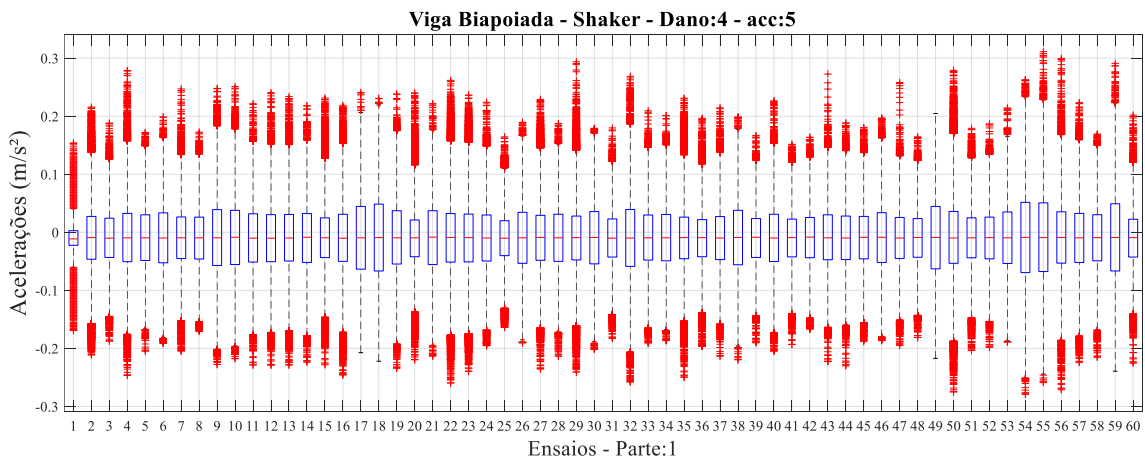


Figura B.103 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 22,5 mm.

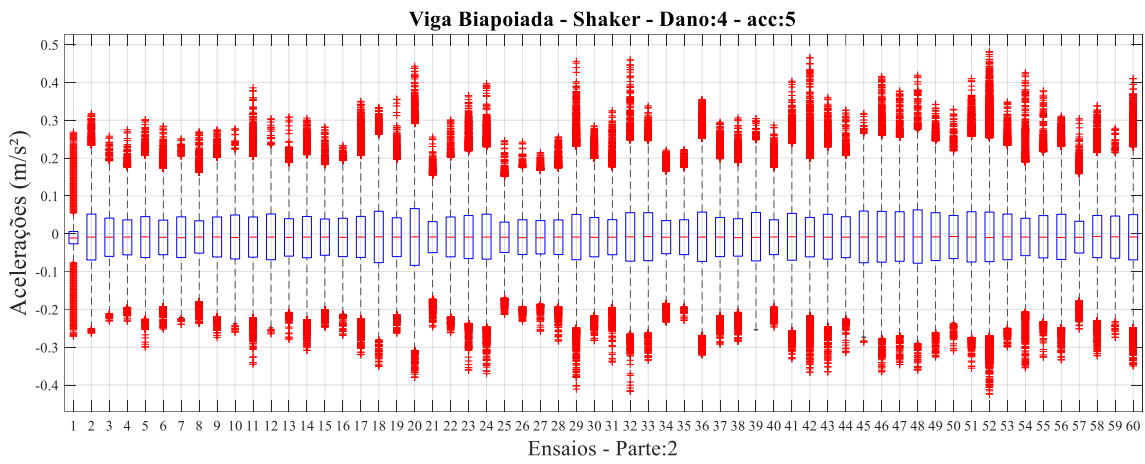


Figura B.104 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 22,5 mm.

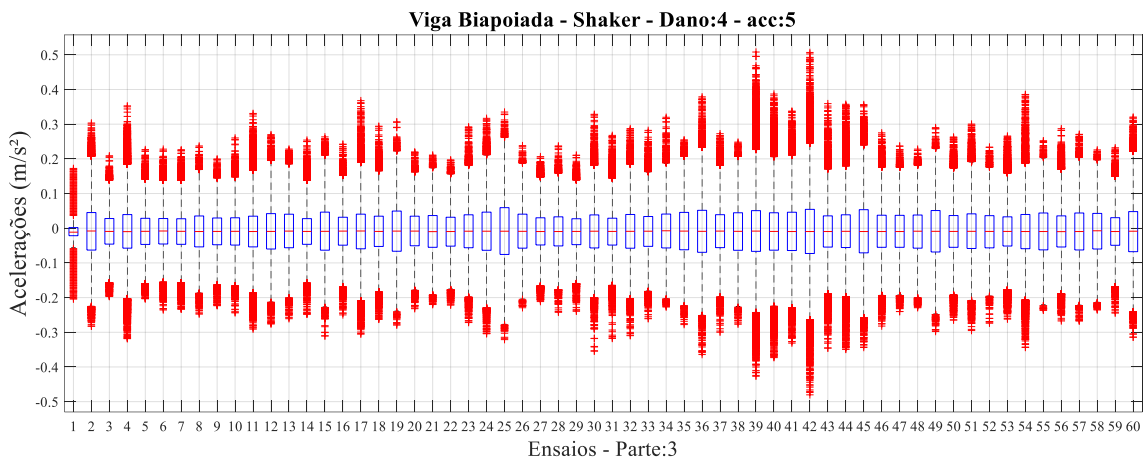


Figura B.105 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 1ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 32 mm.

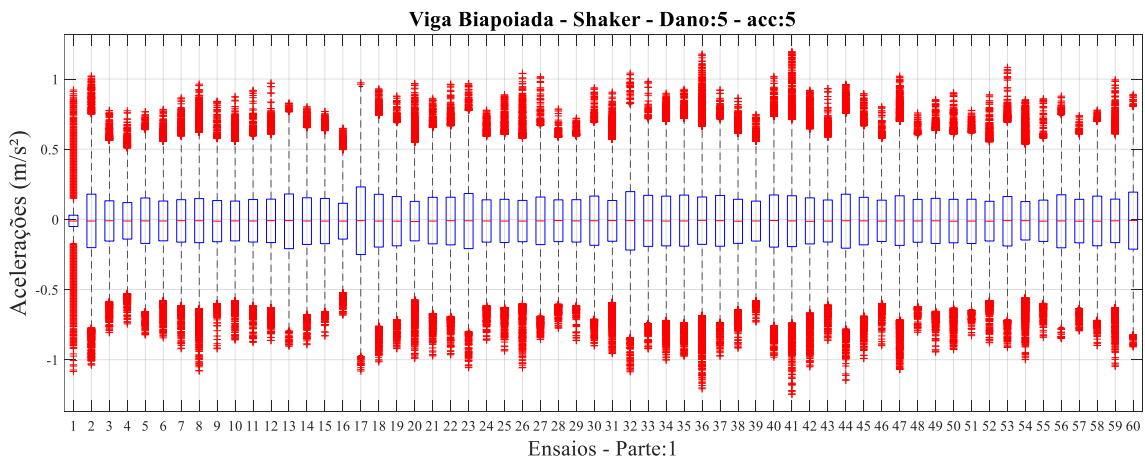


Figura B.106 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 2ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 32 mm.

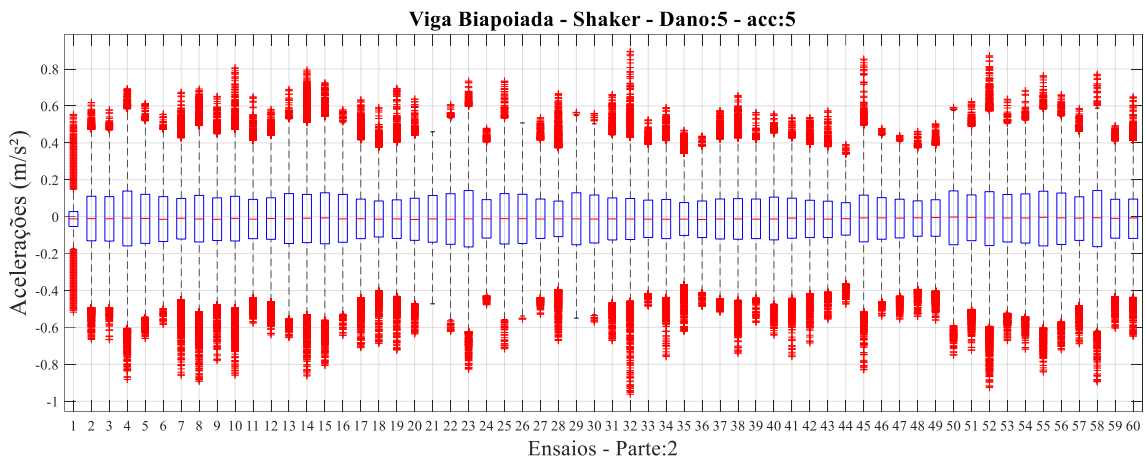
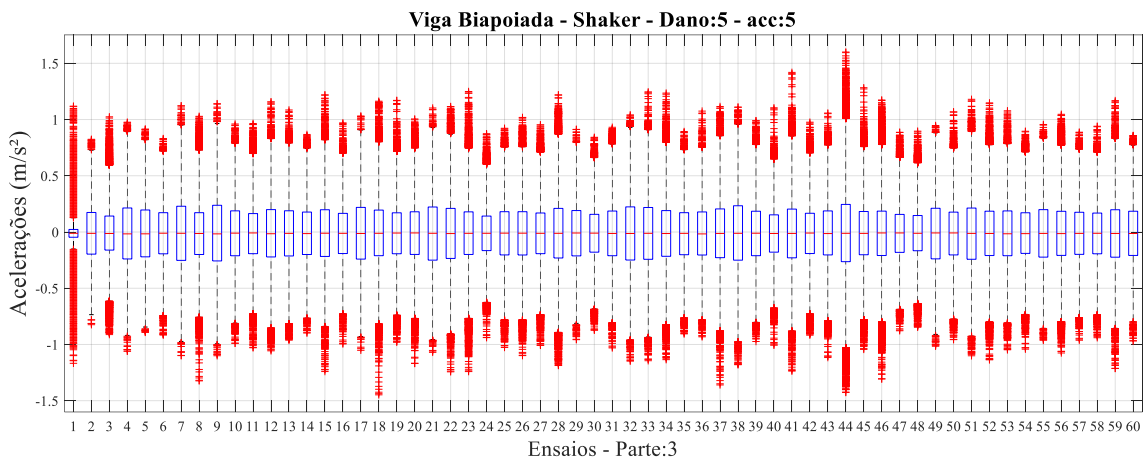


Figura B.107 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 1, referente a 3ª parte dos ensaios (60) da viga biapoiada, sob excitação por *shaker*, e o furo de 32 mm.



B.5. BENCHMARK

Figura B.108 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, para estrutura intacta.

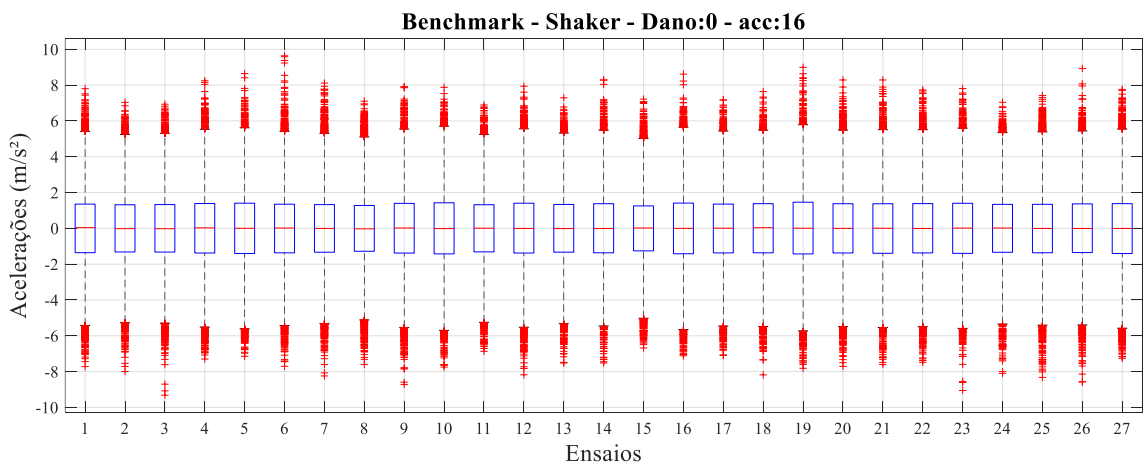


Figura B.109 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, e sem rigidez na diagonais do 1º andar.

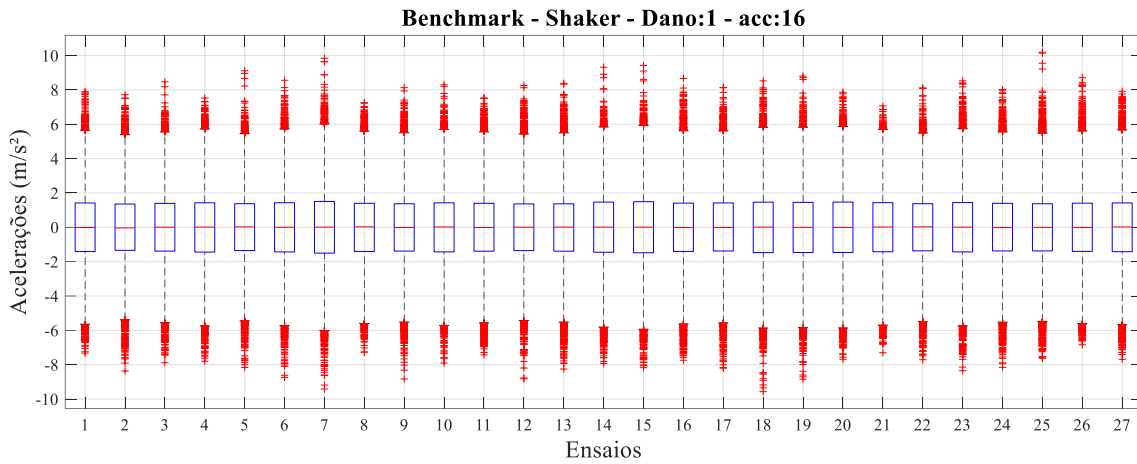


Figura B.110 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, e sem rigidez na diagonais do 1º andar e do 3º andar.

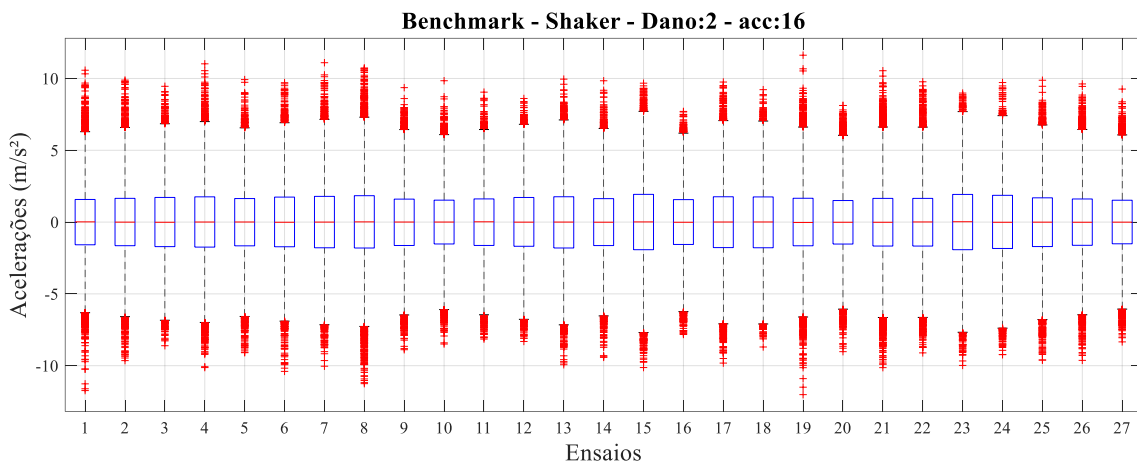


Figura B.111 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, e sem rigidez em uma diagonal do 1º andar.

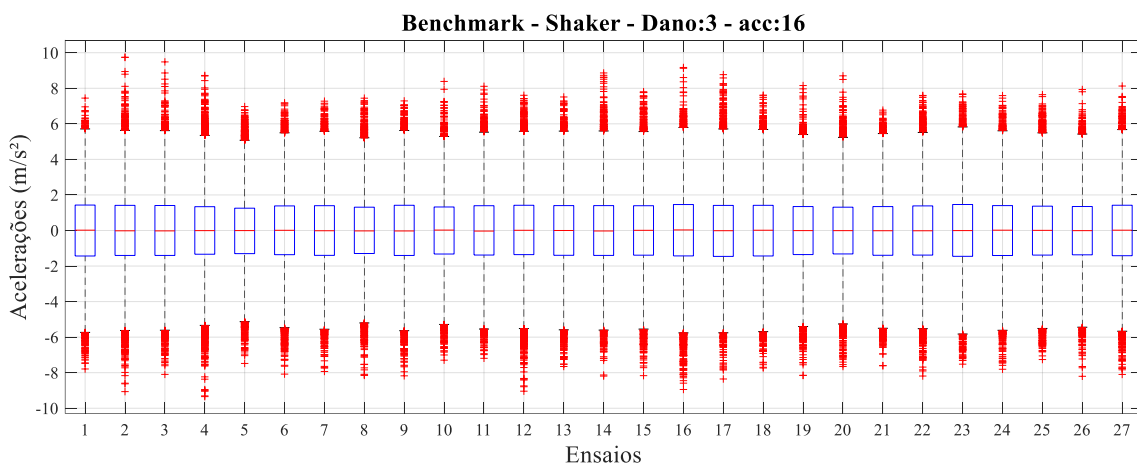


Figura B.112 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, e sem rigidez em uma diagonal do 1º andar e uma diagonal do 3º andar.

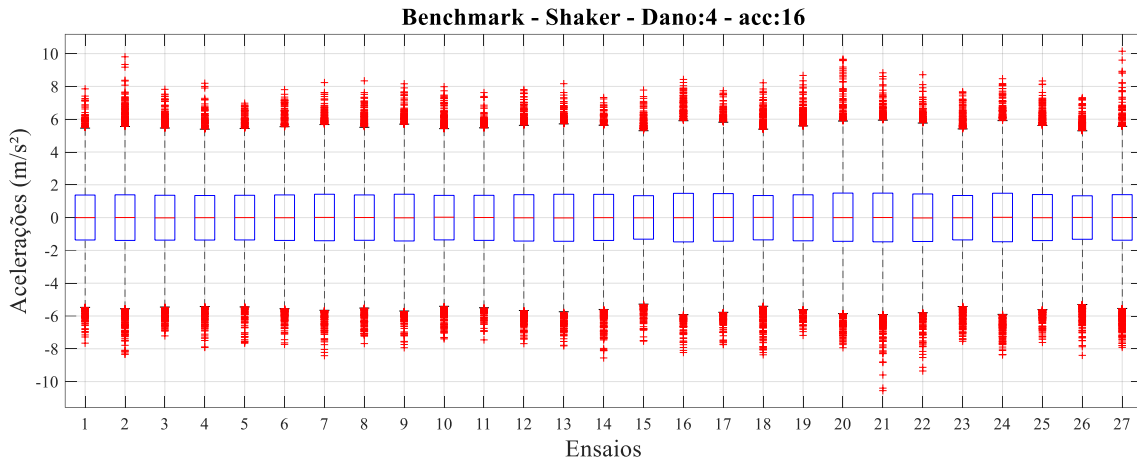


Figura B.113 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, e sem rigidez em uma diagonal do 1º andar, uma diagonal do 3º andar e enfraquecimento de uma conexão viga-coluna.

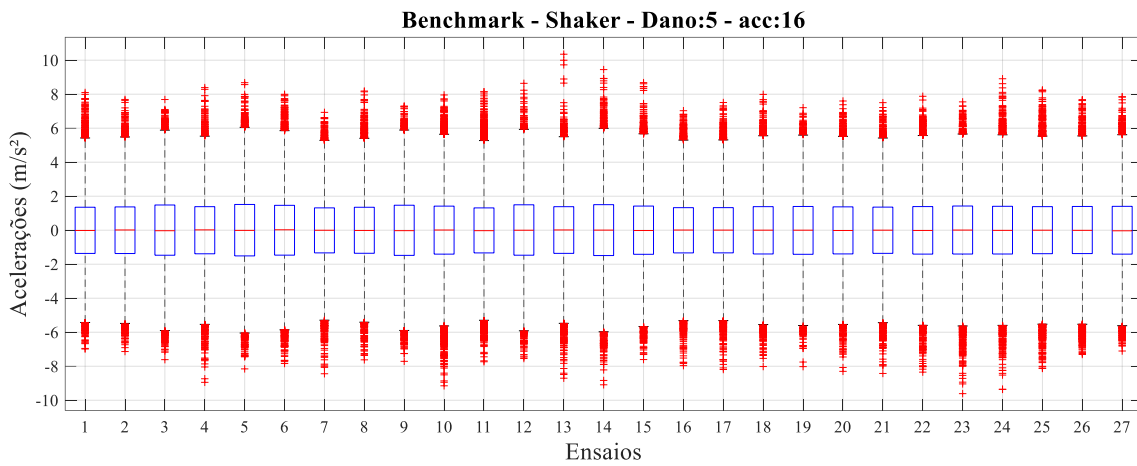
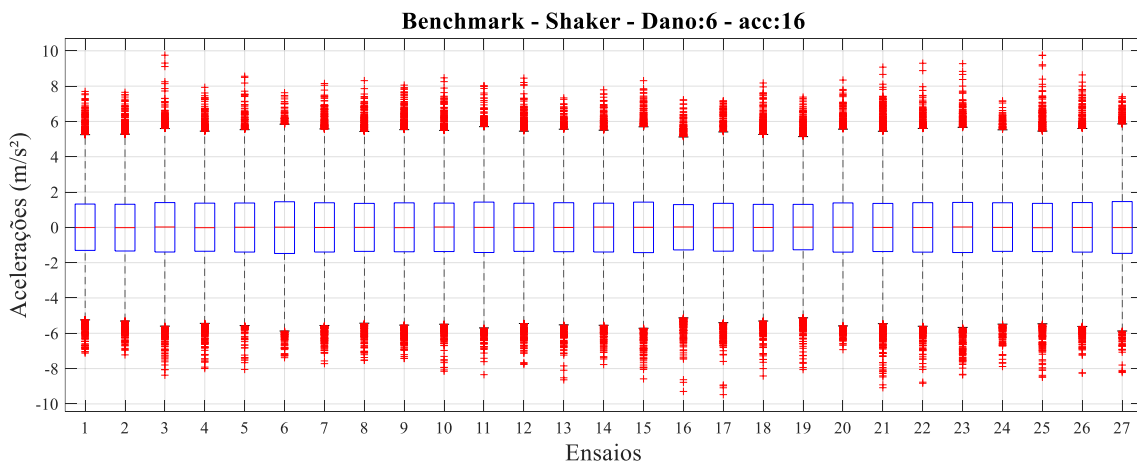


Figura B.114 – Boxplots das acelerações registradas pelo acelerômetro 16 nos 27 ensaios do *Benchmark*, com excitação por *shaker* utilizando ruído branco, e sem 2/3 da rigidez de uma diagonal do 1º andar.



B.6. PONTE FERROVIÁRIA KW51

Figura B.115 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, antes da realização dos reparos.

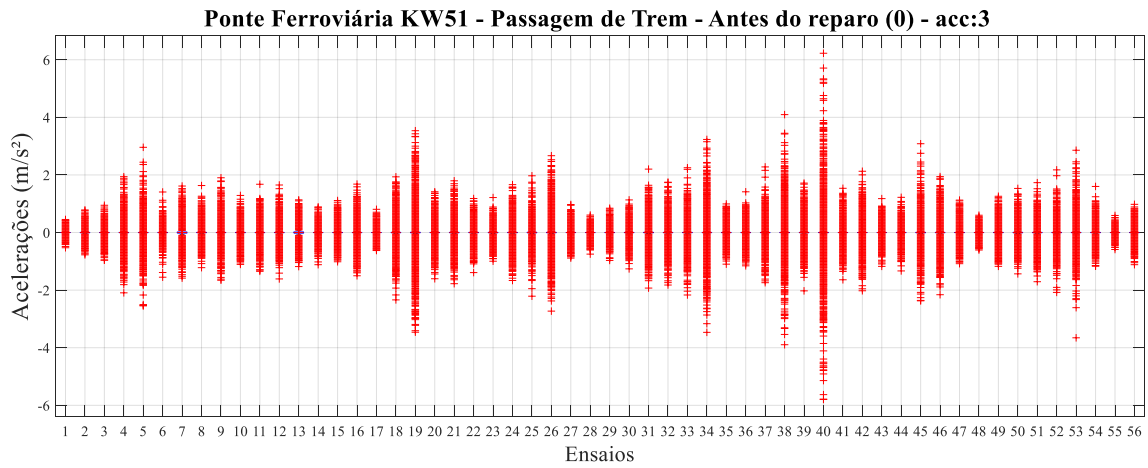
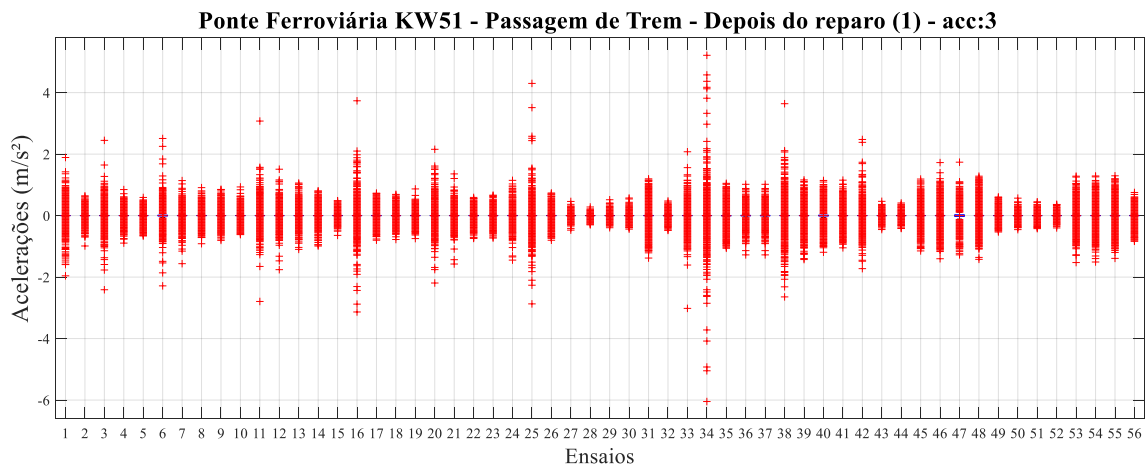


Figura B.116 – Boxplots das acelerações medidas pelo acelerômetro aBD17Az (acc 3), referentes aos 56 registros adquiridos na Ponte Ferroviária KW51 durante a excitação provocada pela passagem do trem, após os reparos.



APÊNDICE C

ANÁLISES REALIZADAS COM O *SCOTT-KNOTT*

Nesta seção, são apresentadas as tabelas contendo os resultados de classificação, por parâmetro, obtidos pelo método de agrupamento *Scott-Knott*, aplicados aos diferentes cenários analisados.

As linhas superiores das tabelas indicam o tipo da análise comparativa realizada, as estruturas avaliadas, o tipo de excitação empregado, as características variáveis entre os estados de dano, o número de repetições (ensaios) considerados para cada estado de dano conhecidos (ou número de períodos de aquisição de dados – nd) e a identificação da análise, conforme descrito nas Tabelas 5.1, 5.4, 5.8, 5.9 e 5.13.

À esquerda das tabelas, encontram-se listados os parâmetros analisados, organizados conforme o tipo descrito na Seção 3.1, além do domínio em que se situam os registros de aceleração utilizados para a extração desses parâmetros.

No corpo central das tabelas, são resumidos os resultados do teste de agrupamento *Scott-Knott*, expressos pelo número de grupos estatisticamente distintos identificados e pelos percentuais de acerto do teste em relação ao número real de estados de dano conhecidos. Os valores percentuais estão destacados por meio de um gradiente de cores, com tons que variam do verde, representando os melhores desempenhos, ao vermelho, para os piores. Os casos que obtiveram 100% de acerto estão evidenciados em azul.

Na extremidade direita das tabelas, estão as médias dos percentuais de acerto por parâmetro, seguidas das médias por tipo de medida estatística. Ao final da tabela encontram-se as médias por acerto por análise, sendo destacada à direita a média geral de classificação dos parâmetros para o conjunto de análises realizadas no domínio do tempo ou da frequência.

Tabela C.1 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo da Viga Biapoiada, sob excitação por impacto.

ANÁLISE COMPARATIVA DO NÚMERO DE REPETIÇÕES DE ENSAIOS														
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA BIAPOIADA											
		EXCITAÇÃO	IMPACTO											
		VARIACÃO	MASSA E FUIROS											
		REPETIÇÕES	180		90		44		22		11			
		nd / ANÁLISE	6	A	6	AI	6	A2	6	A3	6	A4	Média Par.	Média Tipo
PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)												
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	67%	3	50%	5	83%	3	50%	2	33%	57%	63%
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%	
		1º QUARTIL	4	67%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	70%	
		3º QUARTIL	4	67%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	70%	
		MÉDIA ARITMÉTICA	5	83%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	60%	
	POSICÃO	MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%	40%
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%	
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	73%	
		2º QUARTIL	5	83%	5	83%	3	50%	3	50%	2	33%	60%	
		MODA	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	17%	
		PONTO MÉDIO	3	50%	2	33%	2	33%	3	50%	2	33%	40%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	67%	3	50%	4	67%	3	50%	2	33%	53%	66%
		AMP. TOTAL	4	67%	4	67%	5	83%	3	50%	2	33%	60%	
		AMP. INTERQUARTIL	4	67%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	70%	
		AMP. DE PERCENTIS	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%	
		MIDHINGE	5	83%	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	60%	
		DESVIO MÉDIO	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%	
		VARIÂNCIA	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%	
		DESVIO PADRÃO	5	83%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	73%	
		COEF. DE VARIACÃO	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%	
	FORMA	ASSIMETRIA	3	50%	3	50%	2	33%	3	50%	2	33%	43%	46%
		CURTOSE	5	83%	5	83%	4	67%	4	67%	3	50%	70%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	43%	
		COEF. QUART. ASS.	2	33%	2	33%	1	17%	1	17%	1	17%	23%	
		COEF. PERC. CURTOSE	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%	
		FATOR DE CRISTA	4	67%	3	50%	4	67%	3	50%	3	50%	57%	
		FATOR K	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%	
		1º COEF. PEARSON	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	17%	
		2º COEF. PEARSON	2	33%	2	33%	1	17%	1	17%	1	17%	23%	
		DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	
	2ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%	
	3ª CAT. DA ADS		2	33%	2	33%	2	33%	1	17%	1	17%	27%	
	4ª CAT. DA ADS		2	33%	3	50%	3	50%	2	33%	2	33%	40%	
	5ª CAT. DA ADS		3	50%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	47%	
	6ª CAT. DA ADS		4	67%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	63%	
	7ª CAT. DA ADS		5	83%	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	77%	
	8ª CAT. DA ADS		2	33%	4	67%	3	50%	3	50%	2	33%	47%	
	9ª CAT. DA ADS		4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	73%	
	10ª CAT. DA ADS		5	83%	4	67%	5	83%	3	50%	3	50%	67%	
11ª CAT. DA ADS	5		83%	5	83%	5	83%	6	100%	3	50%	80%		
12ª CAT. DA ADS	3		50%	3	50%	4	67%	3	50%	1	17%	47%		
13ª CAT. DA ADS	2		33%	3	50%	3	50%	2	33%	2	33%	40%		
14ª CAT. DA ADS	2		33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%		
15ª CAT. DA ADS	2		33%	2	33%	2	33%	1	17%	0	0%	23%		
16ª CAT. DA ADS	0	0%	1	17%	1	17%	1	17%	0	0%	10%			
17ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
MÉDIA ANÁLISE			55%		52%		55%		49%		34%	49%		

Tabela C.2 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência da Viga Biapoiada, sob excitação por impacto.

ANÁLISE COMPARATIVA DO NÚMERO DE REPETIÇÕES DE ENSAIOS															
DOMÍNIO	TIPO	VIGA BIAPOIADA													
		IMPACTO						MASSA E FUIROS							
		ESTRUTURA		EXCITAÇÃO		VARIACÃO		REPETIÇÕES		nd / ANÁLISE		Média Par.		Média Tipo	
		180		90		44		22		11					
		6		6		6		6		6		6		6	
		A		A1		A2		A3		A4					
		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)													
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	67%	3	50%	2	33%	2	33%	1	17%	40%	57%	
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	73%		
		1º QUARTIL	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%		
		3º QUARTIL	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%		
		MÉDIA ARITMÉTICA	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%		
	POSIÇÃO	MÉDIA HARMÔNICA	4	67%	4	67%	4	67%	4	67%	2	33%	57%	62%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%		
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	73%		
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	73%		
		2º QUARTIL	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%		
		MODA	4	67%	3	50%	2	33%	2	33%	1	17%	40%		
		PONTO MÉDIO	4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	73%		
		AMP. DE PICO	4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	73%		66%
	AMP. TOTAL	4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	73%			
	AMP. INTERQUARTIL	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%			
	AMP. DE PERCENTIS	5	83%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	60%			
	MIDHINGE	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%			
	DESVIO MÉDIO	5	83%	4	67%	4	67%	3	50%	3	50%	63%			
	VARIÂNCIA	5	83%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	73%			
	DESVIO PADRÃO	5	83%	4	67%	5	83%	5	83%	3	50%	73%			
	COEF. DE VARIACÃO	5	83%	3	50%	4	67%	3	50%	3	50%	60%	57%		
	FORMA	ASSIMETRIA	4	67%	3	50%	4	67%	4	67%	4	67%		63%	
		CURTOSE	3	50%	4	67%	4	67%	4	67%	4	67%		63%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	3	50%	4	67%	3	50%	2	33%		47%	
		COEF. QUART. ASS.	3	50%	4	67%	2	33%	2	33%	1	17%		40%	
		COEF. PERC. CURTOSE	3	50%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%		47%	
		FATOR DE CRISTA	4	67%	4	67%	4	67%	2	33%	3	50%		57%	
		FATOR K	4	67%	4	67%	6	100%	5	83%	4	67%		77%	
		1º COEF. PEARSON	5	83%	3	50%	3	50%	3	50%	3	50%		57%	
		2º COEF. PEARSON	5	83%	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%		60%	
		DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	5	83%	5	83%	4	67%	4	67%	3	50%	70%	36%
	2ª CAT. DA ADS		4	67%	3	50%	4	67%	4	67%	3	50%	60%		
	3ª CAT. DA ADS		4	67%	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	57%		
	4ª CAT. DA ADS		3	50%	4	67%	4	67%	2	33%	2	33%	50%		
5ª CAT. DA ADS	2		33%	4	67%	3	50%	1	17%	1	17%	37%			
6ª CAT. DA ADS	3		50%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	47%			
7ª CAT. DA ADS	4		67%	2	33%	3	50%	2	33%	2	33%	43%			
8ª CAT. DA ADS	3		50%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	37%			
9ª CAT. DA ADS	3		50%	2	33%	2	33%	1	17%	1	17%	30%			
10ª CAT. DA ADS	2		33%	4	67%	2	33%	2	33%	1	17%	37%			
11ª CAT. DA ADS	0		0%	3	50%	2	33%	2	33%	1	17%	27%			
12ª CAT. DA ADS	0		0%	3	50%	2	33%	2	33%	1	17%	27%			
13ª CAT. DA ADS	0		0%	2	33%	2	33%	2	33%	1	17%	23%			
14ª CAT. DA ADS	0		0%	0	0%	2	33%	2	33%	1	17%	17%			
15ª CAT. DA ADS	0		0%	0	0%	2	33%	2	33%	2	33%	20%			
16ª CAT. DA ADS	0		0%	0	0%	0	0%	1	17%	0	0%	3%			
17ª CAT. DA ADS	-		-	-	-	3	-	-	-	-	-	-			
MÉDIA ANÁLISE		57%		57%		58%		51%		37%		52%			

Tabela C.3 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo da Viga Biapoiada, sob excitação por *shaker* (ruído branco).

ANÁLISE COMPARATIVA DO NÚMERO DE REPETIÇÕES DE ENSAIOS														
DOMÍNIO	TIPO	VIGA BIAPOIADA												
		SHAKER (RUÍDO BRANCO)												
		MASSA E FUIROS												
		180		90		44		22		11				
		nd / ANÁLISE		B1		B2		B3		B4		Média Par.	Média Tipo	
		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)												
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	6	100%	6	100%	6	100%	5	83%	5	83%	93%	85%
		EXTREMO MÁXIMO	5	83%	6	100%	6	100%	5	83%	5	83%	90%	
		1º QUARTIL	6	100%	5	83%	5	83%	4	67%	4	67%	80%	
		3º QUARTIL	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	4	67%	77%	
	POSICÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	3	50%	3	50%	2	33%	1	17%	2	33%	37%	39%
		MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%	
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	77%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	80%	
		2º QUARTIL	5	83%	4	67%	3	50%	2	33%	2	33%	53%	
		MODA	3	50%	2	33%	2	33%	1	17%	2	33%	33%	
		PONTO MÉDIO	3	50%	2	33%	2	33%	2	33%	1	17%	33%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	6	100%	6	100%	6	100%	5	83%	5	83%	93%	74%
		AMP. TOTAL	6	100%	6	100%	6	100%	5	83%	5	83%	93%	
		AMP. INTERQUARTIL	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	4	67%	77%	
		AMP. DE PERCENTIS	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	4	67%	77%	
		MIDHINGE	5	83%	4	67%	2	33%	1	17%	2	33%	47%	
		DESVIO MÉDIO	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	80%	
		VARIÂNCIA	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	3	50%	77%	
		DESVIO PADRÃO	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	80%	
	FORMA	COEF. DE VARIACÃO	5	83%	3	50%	2	33%	1	17%	1	17%	40%	43%
		ASSIMETRIA	6	100%	4	67%	4	67%	3	50%	3	50%	67%	
		CURTOSE	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	17%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	33%	3	50%	2	33%	2	33%	37%	
		COEF. QUART. ASS.	3	50%	2	33%	2	33%	2	33%	1	17%	33%	
		COEF. PERC. CURTOSE	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	1	17%	17%	
		FATOR DE CRISTA	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	1	17%	40%	
		FATOR K	5	83%	5	83%	6	100%	5	83%	3	50%	80%	
		1º COEF. PEARSON	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	2	33%	43%	
		2º COEF. PEARSON	5	83%	4	67%	3	50%	3	50%	2	33%	57%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	46%
		2ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	
		3ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	
		4ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	
		5ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	4	67%	3	50%	2	33%	47%	
		6ª CAT. DA ADS	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%	
		7ª CAT. DA ADS	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%	
		8ª CAT. DA ADS	5	83%	3	50%	4	67%	3	50%	3	50%	60%	
		9ª CAT. DA ADS	4	67%	4	67%	5	83%	4	67%	4	67%	70%	
		10ª CAT. DA ADS	5	83%	3	50%	3	50%	3	50%	4	67%	60%	
		11ª CAT. DA ADS	3	50%	5	83%	4	67%	4	67%	3	50%	63%	
		12ª CAT. DA ADS	2	33%	3	50%	5	83%	4	67%	3	50%	57%	
		13ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	
		14ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	
		15ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	33%	
	16ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	27%		
	17ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	27%		
MÉDIA ANÁLISE		60%		56%		57%		49%		44%		53%		

Tabela C.4 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência da Viga Biapoçada, sob excitação por *shaker* (ruído branco).

ANÁLISE COMPARATIVA DO NÚMERO DE REPETIÇÕES DE ENSAIOS															
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		VIGA BIAPOÇADA											
		EXCITAÇÃO		SHAKER (RUÍDO BRANCO)											
		VARIACÃO		MASSA E FUROS											
		REPETIÇÕES		180		90		44		22		11			
		nd / ANÁLISE		6	B	6	B1	6	B2	6	B3	6	B4	Média Par.	Média Tipo
		PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)											
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	67%	2	33%	3	50%	2	33%	2	33%	43%	55%	
		EXTREMO MÁXIMO	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%		
		1º QUARTIL	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	50%		
		3º QUARTIL	5	83%	5	83%	3	50%	3	50%	2	33%	60%		
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	5	83%	6	100%	6	100%	6	100%	6	100%	97%	63%	
		MÉDIA HARMÔNICA	4	67%	3	50%	3	50%	2	33%	2	33%	47%		
		MÉDIA GEOMÉTRICA	4	67%	5	83%	3	50%	3	50%	2	33%	57%		
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	2	33%	5	83%	5	83%	3	50%	67%		
		RAIZ QUAD. MÉDIA	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	80%		
		2º QUARTIL	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	50%		
		MODA	4	67%	2	33%	3	50%	2	33%	2	33%	43%		
	PONTO MÉDIO	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%			
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%	71%	
		AMP. TOTAL	5	83%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	67%		
		AMP. INTERQUARTIL	5	83%	4	67%	3	50%	3	50%	2	33%	57%		
		AMP. DE PERCENTIS	4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	77%		
		MIDHINGE	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	2	33%	50%		
		DESVIO MÉDIO	5	83%	6	100%	6	100%	6	100%	6	100%	97%		
		VARIÂNCIA	5	83%	2	33%	5	83%	5	83%	3	50%	67%		
		DESVIO PADRÃO	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	80%		
	COEF. DE VARIACÃO	4	67%	5	83%	5	83%	5	83%	4	67%	77%			
	FORMA	ASSIMETRIA	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	3	50%	60%	61%	
		CURTOSE	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%		
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	0	0%	2	33%	2	33%	2	33%	27%		
		COEF. QUART. ASS.	5	83%	4	67%	5	83%	4	67%	3	50%	70%		
		COEF. PERC. CURTOSE	3	50%	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	60%		
		FATOR DE CRISTA	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	2	33%	57%		
		FATOR K	5	83%	4	67%	5	83%	3	50%	3	50%	67%		
		1º COEF. PEARSON	3	50%	5	83%	5	83%	5	83%	5	83%	77%		
		2º COEF. PEARSON	3	50%	5	83%	5	83%	4	67%	5	83%	73%		
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	5	83%	5	83%	6	100%	6	100%	5	83%	90%	37%	
		2ª CAT. DA ADS	5	83%	5	83%	6	100%	5	83%	5	83%	87%		
		3ª CAT. DA ADS	4	67%	4	67%	5	83%	4	67%	4	67%	70%		
		4ª CAT. DA ADS	4	67%	4	67%	4	67%	3	50%	3	50%	60%		
		5ª CAT. DA ADS	4	67%	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	57%		
		6ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	3	50%	53%		
		7ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	3	50%	3	50%	3	50%	53%		
		8ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	2	33%	2	33%	2	33%	40%		
		9ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	2	33%	2	33%	27%		
		10ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	1	17%	2	33%	2	33%	33%		
11ª CAT. DA ADS		2	33%	1	17%	1	17%	2	33%	1	17%	23%			
12ª CAT. DA ADS		0	0%	1	17%	1	17%	2	33%	2	33%	20%			
13ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	1	17%	1	17%	7%			
14ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	1	17%	0	0%	3%			
15ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	1	17%	1	17%	7%			
16ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%			
17ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	1	17%	1	17%	7%			
MÉDIA ANÁLISE			59%		54%		57%		55%		46%	54%			

Tabela C.5 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo do *Shear Building* – Fase I, sob excitação por impacto.

		ANÁLISE POR ESTRUTURA										
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR BUILDING FASE I									
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (20s)			
		VARIACÃO	MASSA								LOCAL 5kg	
		REPETIÇÕES	11		22		11		11			
		nd / ANÁLISE	6	C	6	D	6	D1	5	E	Média Par.	Média Tipo
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)									
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	46%
		EXTREMO MÁXIMO	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	
		1º QUARTIL	3	50%	4	67%	4	67%	2	40%	56%	
		3º QUARTIL	3	50%	4	67%	4	67%	2	40%	56%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	33%	1	17%	1	17%	1	20%	22%	41%
		MÉDIA HARMÔNICA	1	17%	1	17%	1	17%	1	20%	18%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	33%	4	67%	2	33%	1	20%	38%	
		MÉDIA DOS QUAD.	4	67%	5	83%	3	50%	3	60%	65%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	4	67%	4	67%	3	60%	69%	
		2º QUARTIL	2	33%	4	67%	3	50%	2	40%	48%	
		MODA	1	17%	2	33%	1	17%	1	20%	22%	
		PONTO MÉDIO	3	50%	3	50%	1	17%	3	60%	44%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	53%
		AMP. TOTAL	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	
		AMP. INTERQUARTIL	3	50%	4	67%	4	67%	2	40%	56%	
		AMP. DE PERCENTIS	4	67%	5	83%	5	83%	4	80%	78%	
		MIDHINGE	1	17%	4	67%	2	33%	1	20%	34%	
		DESVIO MÉDIO	5	83%	5	83%	5	83%	4	80%	83%	
		VARIÂNCIA	4	67%	5	83%	3	50%	3	60%	65%	
		DESVIO PADRÃO	5	83%	4	67%	4	67%	3	60%	69%	
	COEF. DE VARIACÃO	1	17%	1	17%	1	17%	1	20%	18%		
	FORMA	ASSIMETRIA	3	50%	4	67%	4	67%	3	60%	61%	49%
		CURTOSE	6	100%	4	67%	4	67%	3	60%	73%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	33%	1	17%	1	20%	26%	
		COEF. QUART. ASS.	1	17%	4	67%	3	50%	1	20%	38%	
		COEF. PERC. CURTOSE	4	67%	6	100%	6	100%	3	60%	82%	
		FATOR DE CRISTA	4	67%	5	83%	4	67%	2	40%	64%	
		FATOR K	4	67%	3	50%	2	33%	2	40%	48%	
		1º COEF. PEARSON	1	17%	1	17%	1	17%	1	20%	18%	
		2º COEF. PEARSON	1	17%	3	50%	3	50%	1	20%	34%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	3	50%	0	0%	0	0%	1	20%	18%	31%
		2ª CAT. DA ADS	2	33%	0	0%	0	0%	2	40%	18%	
		3ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	
4ª CAT. DA ADS		4	67%	3	50%	2	33%	2	40%	48%		
5ª CAT. DA ADS		5	83%	3	50%	2	33%	4	80%	62%		
6ª CAT. DA ADS		5	83%	4	67%	4	67%	4	80%	74%		
7ª CAT. DA ADS		2	33%	4	67%	4	67%	1	20%	47%		
8ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	2	33%	1	20%	26%		
9ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	1	17%	2	40%	23%		
10ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	1	17%	2	40%	23%		
11ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	1	17%	1	20%	18%		
12ª CAT. DA ADS		2	33%	1	17%	1	17%	0	0%	17%		
13ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	2	33%	0	0%	21%		
14ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	0	0%	0	0%	13%		
15ª CAT. DA ADS		2	33%	-	-	-	-	1	20%	27%		
MÉDIA ANÁLISE			44%		48%		40%		38%	42%		

Tabela C.6 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência do *Shear Building* – Fase I, sob excitação por impacto.

		ANÁLISE POR ESTRUTURA										
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR BUILDING FASE I									
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (20s)			
		VARIACÃO	MASSA								LOCAL 5kg	
		REPETIÇÕES	11		22		11		11			
		nd / ANÁLISE	6	C	6	D	6	D1	5	E	Média Par.	Média Tipo
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)									
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	1	17%	2	33%	2	33%	2	40%	31%	44%
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	4	67%	4	67%	4	80%	70%	
		1º QUARTIL	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	
		3º QUARTIL	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	4	67%	2	33%	2	33%	2	40%	43%	50%
		MÉDIA HARMÔNICA	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	33%	2	33%	2	33%	3	60%	40%	
		MÉDIA DOS QUAD.	4	67%	5	83%	3	50%	3	60%	65%	
		RAIZ QUAD. MÉDIA	5	83%	4	67%	4	67%	3	60%	69%	
		2º QUARTIL	2	33%	2	33%	2	33%	3	60%	40%	
		MODA	1	17%	2	33%	2	33%	2	40%	31%	
		PONTO MÉDIO	4	67%	4	67%	4	67%	4	80%	70%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	67%	4	67%	4	67%	4	80%	70%	58%
		AMP. TOTAL	4	67%	4	67%	4	67%	4	80%	70%	
		AMP. INTERQUARTIL	3	50%	3	50%	1	17%	2	40%	39%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	33%	3	50%	4	67%	2	40%	48%	
		MIDHINGE	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	
		DESVIO MÉDIO	5	83%	4	67%	3	50%	2	40%	60%	
		VARIÂNCIA	4	67%	4	67%	4	67%	3	60%	65%	
		DESVIO PADRÃO	5	83%	4	67%	4	67%	3	60%	69%	
	COEF. DE VARIACÃO	4	67%	5	83%	3	50%	2	40%	60%		
	FORMA	ASSIMETRIA	3	50%	6	100%	5	83%	4	80%	78%	56%
		CURTOSE	3	50%	4	67%	4	67%	3	60%	61%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	
		COEF. QUART. ASS.	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	
		COEF. PERC. CURTOSE	4	67%	3	50%	3	50%	2	40%	52%	
		FATOR DE CRISTA	3	50%	4	67%	3	50%	4	80%	62%	
		FATOR K	4	67%	4	67%	4	67%	3	60%	65%	
		1º COEF. PEARSON	4	67%	4	67%	4	67%	2	40%	60%	
	2º COEF. PEARSON	4	67%	4	67%	3	50%	3	60%	61%		
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	3	50%	3	60%	57%	42%
		2ª CAT. DA ADS	3	50%	4	67%	3	50%	3	60%	57%	
		3ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	2	33%	3	60%	48%	
		4ª CAT. DA ADS	4	67%	5	83%	4	67%	3	60%	69%	
		5ª CAT. DA ADS	3	50%	4	67%	5	83%	2	40%	60%	
		6ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	3	60%	40%	
		7ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	2	33%	3	60%	48%	
		8ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	3	50%	2	40%	48%	
		9ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	2	33%	2	40%	39%	
		10ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	
		11ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	2	40%	35%	
		12ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	0	0%	25%	
		13ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	0	0%	25%	
		14ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	0	0%	25%	
15ª CAT. DA ADS		2	33%	-	-	-	-	0	0%	17%		
MÉDIA ANÁLISE			51%		52%		48%		48%	50%		

Tabela C.7 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo do *Shear Building* – Fase II.

ANÁLISE POR ESTRUTURA+A1:O52														
DOMÍNIO	TIPO	SHEAR BUILDING FASE II												
		ESTRUTURA	IMPACTO (10s)						SHAKER (CHIRP SENOIDAL)					
		EXCITAÇÃO												
		VARIACÃO	MASSA											
		REPETIÇÕES	44		44		22		45		45			
		nd / ANÁLISE	9	F	6	F1	6	F2	9	G	9	H	Média Par.	Média Tipo
PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)													
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	44%	3	50%	3	50%	6	67%	2	22%	47%	
		EXTREMO MÁXIMO	3	33%	2	33%	2	33%	5	56%	3	33%	38%	
		1º QUARTIL	2	22%	2	33%	2	33%	3	33%	3	33%	31%	
		3º QUARTIL	3	33%	2	33%	2	33%	4	44%	3	33%	36%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	22%	2	33%	2	33%	1	11%	1	11%	22%	
		MÉDIA HARMÔNICA	1	11%	1	17%	1	17%	1	11%	1	11%	13%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	1	11%	1	17%	1	17%	1	11%	1	11%	13%	
		MÉDIA DOS QUAD.	4	44%	2	33%	2	33%	9	100%	6	67%	56%	
		RAIZ QUAD. MÉDIA	4	44%	2	33%	2	33%	9	100%	6	67%	56%	
		2º QUARTIL	6	67%	4	67%	4	67%	2	22%	1	11%	47%	
		MODA	2	22%	2	33%	3	50%	2	22%	1	11%	28%	
		PONTO MÉDIO	2	22%	3	50%	2	33%	2	22%	2	22%	30%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	3	33%	2	33%	2	33%	6	67%	4	44%	42%	
		AMP. TOTAL	3	33%	2	33%	2	33%	6	67%	5	56%	44%	
AMP. INTERQUARTIL		2	22%	3	50%	2	33%	4	44%	3	33%	37%		
AMP. DE PERCENTIS		3	33%	3	50%	4	67%	8	89%	7	78%	63%		
MIDHINGE		4	44%	4	67%	3	50%	2	22%	1	11%	39%		
DESVIO MÉDIO		3	33%	3	50%	3	50%	9	100%	6	67%	60%		
VARIÂNCIA		4	44%	2	33%	2	33%	9	100%	6	67%	56%		
DESVIO PADRÃO		4	44%	2	33%	2	33%	9	100%	6	67%	56%		
COEF. DE VARIACÃO		1	11%	1	17%	1	17%	1	11%	1	11%	13%		
ASSIMETRIA		2	22%	2	33%	2	33%	3	33%	2	22%	29%		
FORMA	CURTOSE	2	22%	3	50%	3	50%	4	44%	8	89%	51%		
	M. DE 6ª ORDEM	4	44%	2	33%	2	33%	5	56%	6	67%	47%		
	COEF. QUART. ASS.	6	67%	4	67%	4	67%	2	22%	1	11%	47%		
	COEF. PERC. CURTOSE	3	33%	3	50%	2	33%	6	67%	4	44%	46%		
	FATOR DE CRISTA	3	33%	2	33%	2	33%	5	56%	2	22%	36%		
	FATOR K	3	33%	2	33%	2	33%	6	67%	4	44%	42%		
	1º COEF. PEARSON	2	22%	2	33%	2	33%	2	22%	1	11%	24%		
	2º COEF. PEARSON	5	56%	5	83%	3	50%	3	33%	1	11%	47%		
DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	2	22%	2	33%	2	33%	0	0%	3	33%	24%		
	2ª CAT. DA ADS	2	22%	2	33%	2	33%	0	0%	6	67%	31%		
	3ª CAT. DA ADS	4	44%	4	67%	2	33%	4	44%	4	44%	47%		
	4ª CAT. DA ADS	2	22%	2	33%	2	33%	5	56%	2	22%	33%		
	5ª CAT. DA ADS	3	33%	2	33%	2	33%	7	78%	6	67%	49%		
	6ª CAT. DA ADS	3	33%	3	50%	4	67%	2	22%	4	44%	43%		
	7ª CAT. DA ADS	3	33%	3	50%	3	50%	7	78%	3	33%	49%		
	8ª CAT. DA ADS	2	22%	3	50%	3	50%	3	33%	3	33%	38%		
	9ª CAT. DA ADS	4	44%	2	33%	2	33%	5	56%	4	44%	42%		
	10ª CAT. DA ADS	3	33%	3	50%	3	50%	3	33%	5	56%	44%		
	11ª CAT. DA ADS	2	22%	2	33%	1	17%	8	89%	3	33%	39%		
	12ª CAT. DA ADS	1	11%	1	17%	2	33%	4	44%	5	56%	32%		
	13ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	17%	2	22%	4	44%	17%		
	14ª CAT. DA ADS	4	44%	2	33%	2	33%	0	0%	4	44%	31%		
MÉDIA ANÁLISE			32%		39%		38%		47%		39%	39%		

Tabela C.8 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência do *Shear Building* – Fase II.

ANÁLISE POR ESTRUTURA+A1:O52															
DOMÍNIO	TIPO	SHEAR BUILDING FASE II													
		ESTRUTURA		IMPACTO (10s)						SHAKER (CHIRP SENOIDAL)					
		EXCITAÇÃO													
		VARIACÃO		MASSA											
		REPETIÇÕES		44		44		22		45		45			
		nd / ANÁLISE		9	F	6	F1	6	F2	9	G	9	H	Média Par.	Média Tipo
PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)													
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEMP.	EXTREMO MÍNIMO	3	33%	2	33%	2	33%	2	22%	3	33%	31%	49%	
		EXTREMO MÁXIMO	7	78%	5	83%	3	50%	5	56%	5	56%	64%		
		1º QUARTIL	4	44%	2	33%	2	33%	7	78%	6	67%	51%		
		3º QUARTIL	4	44%	3	50%	2	33%	5	56%	6	67%	50%		
		MÉDIA ARITMÉTICA	3	33%	2	33%	2	33%	9	100%	7	78%	56%		
	POSIÇÃO	MÉDIA HARMÔNICA	4	44%	2	33%	1	17%	2	22%	4	44%	32%	47%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	3	33%	2	33%	2	33%	5	56%	6	67%	44%		
		MÉDIA DOS QUAD.	4	44%	2	33%	2	33%	7	78%	4	44%	47%		
		RAIZ QUAD. MÉDIA	4	44%	2	33%	2	33%	9	100%	6	67%	56%		
		2º QUARTIL	3	33%	2	33%	2	33%	6	67%	7	78%	49%		
		MODA	3	33%	2	33%	2	33%	2	22%	3	33%	31%		
		PONTO MÉDIO	7	78%	5	83%	3	50%	5	56%	5	56%	64%		
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	7	78%	5	83%	3	50%	5	56%	5	56%	64%	56%	
		AMP. TOTAL	7	78%	5	83%	3	50%	5	56%	5	56%	64%		
		AMP. INTERQUARTIL	3	33%	3	50%	2	33%	7	78%	8	89%	57%		
		AMP. DE PERCENTIS	5	56%	4	67%	2	33%	9	100%	6	67%	64%		
		MIDHINGE	4	44%	2	33%	2	33%	5	56%	6	67%	47%		
		DESVIO MÉDIO	4	44%	2	33%	2	33%	8	89%	5	56%	51%		
		VARIÂNCIA	4	44%	3	50%	2	33%	4	44%	4	44%	43%		
		DESVIO PADRÃO	4	44%	3	50%	2	33%	9	100%	7	78%	61%		
	FORMA	COEF. DE VARIACÃO	3	33%	2	33%	2	33%	8	89%	7	78%	53%	55%	
		ASSIMETRIA	4	44%	4	67%	3	50%	4	44%	7	78%	57%		
		CURTOSE	4	44%	4	67%	3	50%	3	33%	4	44%	48%		
		M. DE 6º ORDEM	5	56%	4	67%	3	50%	6	67%	6	67%	61%		
		COEF. QUART. ASS.	2	22%	2	33%	2	33%	7	78%	7	78%	49%		
		COEF. PERC. CURTOSE	3	33%	3	50%	2	33%	6	67%	8	89%	54%		
		FATOR DE CRISTA	5	56%	4	67%	4	67%	5	56%	5	56%	60%		
		FATOR K	5	56%	4	67%	3	50%	7	78%	5	56%	61%		
		1º COEF. PEARSON	3	33%	3	50%	2	33%	8	89%	8	89%	59%		
		2º COEF. PEARSON	2	22%	2	33%	3	50%	7	78%	5	56%	48%		
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	3	33%	2	33%	2	33%	9	100%	6	67%	53%	42%	
		2ª CAT. DA ADS	3	33%	3	50%	2	33%	5	56%	4	44%	43%		
		3ª CAT. DA ADS	4	44%	4	67%	3	50%	4	44%	6	67%	54%		
		4ª CAT. DA ADS	4	44%	4	67%	3	50%	5	56%	4	44%	52%		
		5ª CAT. DA ADS	5	56%	4	67%	2	33%	4	44%	5	56%	51%		
		6ª CAT. DA ADS	4	44%	3	50%	4	67%	8	89%	8	89%	68%		
		7ª CAT. DA ADS	2	22%	1	17%	2	33%	6	67%	7	78%	43%		
		8ª CAT. DA ADS	4	44%	2	33%	1	17%	4	44%	4	44%	37%		
		9ª CAT. DA ADS	3	33%	3	50%	2	33%	5	56%	3	33%	41%		
		10ª CAT. DA ADS	3	33%	3	50%	2	33%	3	33%	3	33%	37%		
		11ª CAT. DA ADS	3	33%	2	33%	2	33%	2	22%	3	33%	31%		
		12ª CAT. DA ADS	4	44%	3	50%	1	17%	3	33%	3	33%	36%		
		13ª CAT. DA ADS	2	22%	2	33%	3	50%	0	0%	3	33%	28%		
		14ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	2	33%	0	0%	0	0%	7%		
	MÉDIA ANÁLISE			42%		48%		38%		59%		58%	49%		

Tabela C.9 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo da Pá Eólica, sob excitação por impacto.

ANÁLISE POR ESTRUTURA																			
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		PÁ EÓLICA										Média Par.	Média Tipo				
		EXCITAÇÃO		IMPACTO (10s)					IMPACTO (20s)							IMPACTO (10s)			
		VARIACÃO		MASSA												LOCAL 30g		LOCAL 220g	
		REPETIÇÕES		44		22		44		22		22				22			
nd / ANÁLISE		8	I	8	II	6	12	8	L	8	J	6	K						
PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)																	
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	50%	5	63%	3	50%	2	25%	2	25%	3	50%	44%	44%			
		EXTREMO MÁXIMO	5	63%	5	63%	5	83%	4	50%	3	38%	2	33%	55%				
		1º QUARTIL	3	38%	5	63%	2	33%	2	25%	2	25%	3	50%	39%				
	POSIÇÃO	3º QUARTIL	3	38%	5	63%	2	33%	2	25%	2	25%	3	50%	39%				
		MÉDIA ARITMÉTICA	2	25%	5	63%	1	17%	2	25%	4	50%	4	67%	41%				
		MÉDIA HARMÔNICA	1	13%	1	13%	1	17%	1	13%	1	13%	1	17%	14%				
		MÉDIA GEOMÉTRICA	3	38%	5	63%	2	33%	2	25%	2	25%	3	50%	39%				
		MÉDIA DOS QUAD.	4	50%	7	88%	3	50%	4	50%	3	38%	2	33%	51%				
		RAÍZ QUAD. DA MÉDIA	4	50%	6	75%	4	67%	4	50%	3	38%	3	50%	55%				
	DISPERSÃO	2º QUARTIL	5	63%	7	88%	5	83%	3	38%	4	50%	3	50%	62%				
		MODA	1	13%	1	13%	1	17%	1	13%	1	13%	1	17%	14%				
		PONTO MÉDIO	4	50%	4	50%	3	50%	5	63%	2	25%	4	67%	51%				
	FORMA	AMP. DE PICO	4	50%	5	63%	3	50%	2	25%	2	25%	3	50%	44%				
		AMP. TOTAL	4	50%	5	63%	4	67%	3	38%	3	38%	3	50%	51%				
		AMP. INTERQUARTIL	3	38%	5	63%	2	33%	2	25%	2	25%	3	50%	39%				
AMP. DE PERCENTIS		3	38%	4	50%	1	17%	2	25%	2	25%	4	67%	37%					
MIDHINGE		5	63%	4	50%	4	67%	4	50%	2	25%	4	67%	53%					
DESVIO MÉDIO		4	50%	6	75%	2	33%	3	38%	3	38%	4	67%	50%					
VARIÂNCIA		4	50%	7	88%	3	50%	4	50%	3	38%	2	33%	51%					
DESVIO PADRÃO		4	50%	6	75%	4	67%	4	50%	3	38%	3	50%	55%					
COEF. DE VARIACÃO		1	13%	1	13%	1	17%	1	13%	1	13%	1	17%	14%					
DADOS SIMBÓLICOS	ASSIMETRIA	3	38%	4	50%	3	50%	5	63%	2	25%	6	100%	54%					
	CURTOSE	3	38%	2	25%	2	33%	4	50%	3	38%	4	67%	42%					
	M. DE 6º ORDEM	2	25%	4	50%	2	33%	2	25%	2	25%	2	33%	32%					
	COEF. QUART. ASS.	4	50%	6	75%	3	50%	4	50%	3	38%	3	50%	52%					
	COEF. PERC. CURTOSE	4	50%	4	50%	3	50%	4	50%	4	50%	4	67%	53%					
	FATOR DE CRISTA	4	50%	4	50%	3	50%	3	38%	3	38%	4	67%	49%					
	FATOR K	3	38%	6	75%	3	50%	3	38%	3	38%	2	33%	45%					
	1º COEF. PEARSON	1	13%	1	13%	1	17%	1	13%	1	13%	1	17%	14%					
	2º COEF. PEARSON	6	75%	6	75%	4	67%	4	50%	5	63%	3	50%	63%					
	1ª CAT. DA ADS	0	0%	2	25%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	4%					
2ª CAT. DA ADS	0	0%	3	38%	0	0%	2	25%	2	25%	0	0%	15%						
3ª CAT. DA ADS	0	0%	2	25%	0	0%	1	13%	2	25%	0	0%	10%						
4ª CAT. DA ADS	3	38%	3	38%	3	50%	1	13%	3	38%	3	50%	38%						
5ª CAT. DA ADS	2	25%	2	25%	2	33%	2	25%	1	13%	2	33%	26%						
6ª CAT. DA ADS	3	38%	3	38%	2	33%	2	25%	1	13%	2	33%	30%						
7ª CAT. DA ADS	5	63%	5	63%	2	33%	3	38%	2	25%	3	50%	45%						
8ª CAT. DA ADS	4	50%	6	75%	3	50%	3	38%	3	38%	3	50%	50%						
9ª CAT. DA ADS	4	50%	7	88%	2	33%	4	50%	2	25%	3	50%	49%						
10ª CAT. DA ADS	4	50%	6	75%	3	50%	3	38%	2	25%	2	33%	45%						
11ª CAT. DA ADS	0	0%	7	88%	0	0%	4	50%	3	38%	2	33%	35%						
12ª CAT. DA ADS	0	0%	3	38%	0	0%	2	25%	3	38%	0	0%	17%						
13ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	25%	0	0%	4%						
14ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%						
15ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	-	-	0	0%	-	-	-	-	0%						
MÉDIA ANÁLISE			36%		53%		37%		32%		29%		41%	37%	24%				

Tabela C.10 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência da Pá Eólica, sob excitação por impacto.

ANÁLISE POR ESTRUTURA																
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		PÁ EÓLICA										Média Par.	Média Tipo	
		EXCITAÇÃO		IMPACTO (10s)				IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)						
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	VARIACÃO		MASSA						LOCAL 30g		LOCAL 220g		Média Par.	Média Tipo	
		REPETIÇÕES		44		22		44		22		22				
		nd / ANÁLISE	8	I	8	II	6	12	8	L	8	J	6			K
PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)												Média Par.	Média Tipo	
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	3	38%	5	63%	2	33%	1	13%	2	25%	2			33%
		EXTREMO MÁXIMO	3	38%	5	63%	1	17%	2	25%	3	38%	3	50%	38%	
		1º QUARTIL	4	50%	5	63%	3	50%	4	50%	3	38%	3	50%	50%	
	3º QUARTIL	5	63%	5	63%	3	50%	4	50%	3	38%	3	50%	52%		
	POSICÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	4	50%	5	63%	4	67%	3	38%	3	38%	3	50%	51%	
		MÉDIA HARMÔNICA	3	38%	5	63%	3	50%	3	38%	3	38%	3	50%	46%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	4	50%	6	75%	4	67%	3	38%	3	38%	3	50%	53%	
		MÉDIA DOS QUAD.	4	50%	7	88%	3	50%	4	50%	3	38%	2	33%	51%	
		RAIZ QUAD. MÉDIA	4	50%	6	75%	4	67%	4	50%	3	38%	3	50%	55%	
		2º QUARTIL	4	50%	5	63%	3	50%	4	50%	3	38%	2	33%	47%	
	DISPERSÃO	MODA	3	38%	3	38%	2	33%	1	13%	2	25%	2	33%	30%	
		PONTO MÉDIO	3	38%	5	63%	1	17%	2	25%	3	38%	3	50%	38%	
		AMP. DE PICO	3	38%	5	63%	1	17%	2	25%	3	38%	3	50%	38%	
		AMP. TOTAL	3	38%	5	63%	1	17%	2	25%	3	38%	3	50%	38%	
		AMP. INTERQUARTIL	5	63%	6	75%	4	67%	5	63%	3	38%	3	50%	59%	
AMP. DE PERCENTIS		4	50%	7	88%	4	67%	4	50%	2	25%	3	50%	55%		
FORMA	MIDHINGE	4	50%	6	75%	4	67%	4	50%	3	38%	3	50%	55%		
	DESVIO MÉDIO	5	63%	5	63%	4	67%	4	50%	2	25%	4	67%	56%		
	VARIÂNCIA	3	38%	7	88%	2	33%	3	38%	2	25%	3	50%	45%		
	DESVIO PADRÃO	4	50%	7	88%	3	50%	3	38%	2	25%	3	50%	50%		
	COEF. DE VARIACÃO	5	63%	3	38%	4	67%	5	63%	3	38%	4	67%	56%		
	ASSIMETRIA	4	50%	7	88%	4	67%	3	38%	3	38%	3	50%	55%		
	CURTOSE	4	50%	6	75%	3	50%	4	50%	3	38%	2	33%	49%		
	M. DE 6º ORDEM	3	38%	3	38%	2	33%	3	38%	2	25%	2	33%	34%		
	COEF. QUART. ASS.	3	38%	4	50%	3	50%	3	38%	4	50%	4	67%	49%		
	COEF. PERC. CURTOSE	4	50%	4	50%	4	67%	2	25%	3	38%	3	50%	47%		
DADOS SIMBÓLICOS	FATOR DE CRISTA	6	75%	6	75%	4	67%	4	50%	4	50%	3	50%	61%		
	FATOR K	3	38%	6	75%	2	33%	3	38%	2	25%	3	50%	43%		
	1º COEF. PEARSON	5	63%	4	50%	3	50%	5	63%	3	38%	4	67%	55%		
	2º COEF. PEARSON	4	50%	4	50%	4	67%	5	63%	3	38%	4	67%	56%		
	1ª CAT. DA ADS	4	50%	5	63%	3	50%	4	50%	4	50%	3	50%	52%		
	2ª CAT. DA ADS	4	50%	3	38%	3	50%	5	63%	4	50%	3	50%	50%		
	3ª CAT. DA ADS	4	50%	5	63%	3	50%	3	38%	2	25%	3	50%	46%		
	4ª CAT. DA ADS	4	50%	5	63%	4	67%	3	38%	3	38%	3	50%	51%		
	5ª CAT. DA ADS	3	38%	3	38%	3	50%	4	50%	2	25%	4	67%	44%		
	6ª CAT. DA ADS	3	38%	3	38%	3	50%	1	13%	2	25%	3	50%	35%		
	7ª CAT. DA ADS	3	38%	2	25%	2	33%	3	38%	2	25%	3	50%	35%		
	8ª CAT. DA ADS	2	25%	3	38%	2	33%	2	25%	1	13%	0	0%	22%		
	9ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	4	50%	2	25%	0	0%	13%		
	10ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	2	25%	2	25%	0	0%	8%		
	11ª CAT. DA ADS	3	38%	0	0%	1	17%	2	25%	2	25%	0	0%	17%		
12ª CAT. DA ADS	0	0%	2	25%	0	0%	2	25%	1	13%	0	0%	10%			
13ª CAT. DA ADS	0	0%	3	38%	0	0%	2	25%	0	0%	0	0%	10%			
14ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	2	25%	0	0%	0	0%	4%			
15ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	-	-	0	0%	-	-	-	-	0%			
MÉDIA ANÁLISE			41%		54%		43%		38%		32%		42%	41%		

Tabela C.11 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo e da frequência do Benchmark, sob excitação por *shaker* (ruído branco).

ANÁLISE POR ESTRUTURA													
TIPO	ESTRUTURA	BENCHMARK											
	EXCITAÇÃO	SHAKER (RUÍDO BRANCO)											
	VARIAÇÃO	RIGIDEZ											
	REPETIÇÕES	27		27		DOM. TEMPO		27		27		DOM. FREQUÊNCIA	
	nd / ANÁLISE	3	M	5	N	Média Par.	Média Tipo	3	M	5	N	Média Par.	Média Tipo
PARÂMETROS	CLASSIF. CORRETA (n° / %)				CLASSIF. CORRETA (n° / %)				CLASSIF. CORRETA (n° / %)				
SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	67%	1	20%	43%	61%	1	33%	1	20%	27%	49%
	EXTREMO MÁXIMO	3	100%	1	20%	60%		2	67%	1	20%	43%	
	1º QUARTIL	3	100%	2	40%	70%		2	67%	3	60%	63%	
	3º QUARTIL	3	100%	2	40%	70%		2	67%	3	60%	63%	
POSICÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	1	33%	2	40%	37%	46%	3	100%	3	60%	80%	58%
	MÉDIA HARMÔNICA	1	33%	1	20%	27%		2	67%	2	40%	53%	
	MÉDIA GEOMÉTRICA	3	100%	2	40%	70%		2	67%	3	60%	63%	
	MÉDIA DOS QUAD.	3	100%	2	40%	70%		3	100%	2	40%	70%	
	RAIZ QUAD. DA MÉDIA	3	100%	2	40%	70%		3	100%	2	40%	70%	
	2º QUARTIL	1	33%	1	20%	27%		2	67%	2	40%	53%	
	MODA	2	67%	1	20%	43%		1	33%	1	20%	27%	
	PONTO MÉDIO	1	33%	1	20%	27%		2	67%	1	20%	43%	
DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	67%	1	20%	43%	56%	2	67%	1	20%	43%	59%
	AMP. TOTAL	3	100%	1	20%	60%		2	67%	1	20%	43%	
	AMP. INTERQUARTIL	3	100%	2	40%	70%		2	67%	2	40%	53%	
	AMP. DE PERCENTIS	3	100%	2	40%	70%		2	67%	1	20%	43%	
	MIDHINGE	1	33%	1	20%	27%		2	67%	3	60%	63%	
	DESVIO MÉDIO	3	100%	2	40%	70%		3	100%	3	60%	80%	
	VARIÂNCIA	3	100%	2	40%	70%		3	100%	2	40%	70%	
	DESVIO PADRÃO	3	100%	2	40%	70%		3	100%	2	40%	70%	
	COEF. DE VARIAÇÃO	1	33%	1	20%	27%		3	100%	1	20%	60%	
	FORMA	ASSIMETRIA	1	33%	1	20%		27%	33%	2	67%	1	
CURTOSE		1	33%	1	20%	27%	2	67%		1	20%	43%	
M. DE 6ª ORDEM		2	67%	2	40%	53%	2	67%		1	20%	43%	
COEF. QUART. ASS.		1	33%	1	20%	27%	2	67%		1	20%	43%	
COEF. PERC. CURTOSE		1	33%	1	20%	27%	2	67%		2	40%	53%	
FATOR DE CRISTA		1	33%	1	20%	27%	2	67%		1	20%	43%	
FATOR K		3	100%	1	20%	60%	2	67%		2	40%	53%	
1º COEF. PEARSON		1	33%	1	20%	27%	3	100%		1	20%	60%	
2º COEF. PEARSON		1	33%	1	20%	27%	3	100%		1	20%	60%	
DADOS SIMBÓLICOS		1ª CAT. DA ADS	2	67%	1	20%	43%	53%		1	33%	3	60%
	2ª CAT. DA ADS	2	67%	1	20%	43%	2		67%	2	40%	53%	
	3ª CAT. DA ADS	2	67%	2	40%	53%	1		33%	1	20%	27%	
	4ª CAT. DA ADS	2	67%	2	40%	53%	2		67%	1	20%	43%	
	5ª CAT. DA ADS	3	100%	2	40%	70%	3		100%	1	20%	60%	
	6ª CAT. DA ADS	3	100%	2	40%	70%	2		67%	1	20%	43%	
	7ª CAT. DA ADS	2	67%	1	20%	43%	2		67%	1	20%	43%	
	8ª CAT. DA ADS	3	100%	1	20%	60%	0		0%	1	20%	10%	
	9ª CAT. DA ADS	3	100%	2	40%	70%	0		0%	1	20%	10%	
	10ª CAT. DA ADS	2	67%	1	20%	43%	0		0%	1	20%	10%	
	11ª CAT. DA ADS	3	100%	1	20%	60%	0		0%	1	20%	10%	
	12ª CAT. DA ADS	3	100%	2	40%	70%	0		0%	1	20%	10%	
	13ª CAT. DA ADS	2	67%	3	60%	63%	0		0%	0	0%	0%	
	14ª CAT. DA ADS	2	67%	2	40%	53%	0		0%	0	0%	0%	
	15ª CAT. DA ADS	2	67%	1	20%	43%	0		0%	0	0%	0%	
	16ª CAT. DA ADS	0	0%	1	20%	10%	0		0%	0	0%	0%	
MÉDIA ANÁLISE		70%		29%	49%		58%		29%	43%			

Tabela C.12 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo e da frequência da Ponte Ferroviária KW51, sob excitação pela passagem de trem.

ANÁLISE POR ESTRUTURA							
TIPO	ESTRUTURA	PONTE FERROVIÁRIA KW51					
	EXCITAÇÃO	TREM					
	VARIAÇÃO	REPARO					
	REPETIÇÕES	56					
	nd / ANÁLISE	2	O	Média	2	O	Média
	PARÂMETROS	DOM. TEMPO		Tipo	DOM. FREQUÊNCIA		Tipo
SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	75%	1	50%	75%
	EXTREMO MÁXIMO	2	100%		2	100%	
	1º QUARTIL	1	50%		1	50%	
	3º QUARTIL	1	50%		2	100%	
POSICÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	1	50%	75%	2	100%	75%
	MÉDIA HARMÔNICA	1	50%		1	50%	
	MÉDIA GEOMÉTRICA	2	100%		1	50%	
	MÉDIA DOS QUAD.	2	100%		2	100%	
	RAIZ QUAD. MÉDIA	2	100%		2	100%	
	2º QUARTIL	1	50%		1	50%	
	MODA	2	100%		1	50%	
	PONTO MÉDIO	1	50%		2	100%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	1		50%	72%	
AMP. TOTAL		2	100%	2	100%		
AMP. INTERQUARTIL		1	50%	2	100%		
AMP. DE PERCENTIS		1	50%	2	100%		
MIDHINGE		1	50%	1	50%		
DESVIO MÉDIO		2	100%	2	100%		
VARIÂNCIA		2	100%	2	100%		
DESVIO PADRÃO		2	100%	2	100%		
COEF. DE VARIAÇÃO	1	50%	2	100%			
FORMA	ASSIMETRIA	1	50%	61%	1	50%	78%
	CURTOSE	1	50%		1	50%	
	M. DE 6ª ORDEM	1	50%		1	50%	
	COEF. QUART. ASS.	1	50%		2	100%	
	COEF. PERC. CURTOSE	1	50%		2	100%	
	FATOR DE CRISTA	2	100%		1	50%	
	FATOR K	2	100%		2	100%	
	1º COEF. PEARSON	1	50%		2	100%	
	2º COEF. PEARSON	1	50%		2	100%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0		0%	53%	
2ª CAT. DA ADS		0	0%	2	100%		
3ª CAT. DA ADS		0	0%	2	100%		
4ª CAT. DA ADS		1	50%	2	100%		
5ª CAT. DA ADS		1	50%	2	100%		
6ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%		
7ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%		
8ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%		
9ª CAT. DA ADS		2	100%	1	50%		
10ª CAT. DA ADS		2	100%	1	50%		
11ª CAT. DA ADS		2	100%	1	50%		
12ª CAT. DA ADS		2	100%	1	50%		
13ª CAT. DA ADS		1	50%	1	50%		
14ª CAT. DA ADS		1	50%	0	0%		
15ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%		
16ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%		
17ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%		
MÉDIA ANÁLISE			64%		74%		

Tabela C.13 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo, nas principais análises de estruturas excitadas por impacto.

ANÁLISE POR TIPO DE EXCITAÇÃO															
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA		SHEAR I		SHEAR II		PÁ EÓLICA				Média Par.	Média Tipo	
		EXCITAÇÃO	IMPACTO		IMPACTO (20s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (20s)					
		VARIACÃO	MASSA E FUSOS		MASSA										
		REPETIÇÕES	180		11		22		44		22				
		nd / ANÁLISE	6	A	6	C	6	D	9	F	8	I			8
PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)													
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	67%	2	33%	2	33%	4	44%	4	50%	2	25%	42%
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	3	50%	2	33%	3	33%	5	63%	4	50%	49%
		1º QUARTIL	4	67%	3	50%	4	67%	2	22%	3	38%	2	25%	45%
		3º QUARTIL	4	67%	3	50%	4	67%	3	33%	3	38%	2	25%	47%
	POSICÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	5	83%	2	33%	1	17%	2	22%	2	25%	2	25%	34%
		MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	1	17%	1	17%	1	11%	1	13%	1	13%	12%
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	2	33%	4	67%	1	11%	3	38%	2	25%	29%
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	4	67%	5	83%	4	44%	4	50%	4	50%	63%
		RAIZ QUAD. MÉDIA	5	83%	5	83%	4	67%	4	44%	4	50%	4	50%	63%
		2º QUARTIL	5	83%	2	33%	4	67%	6	67%	5	63%	3	38%	58%
		MODA	1	17%	1	17%	2	33%	2	22%	1	13%	1	13%	19%
		PONTO MÉDIO	3	50%	3	50%	3	50%	2	22%	4	50%	5	63%	47%
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	67%	3	50%	2	33%	3	33%	4	50%	2	25%	43%
		AMP. TOTAL	4	67%	3	50%	2	33%	3	33%	4	50%	3	38%	45%
		AMP. INTERQUARTIL	4	67%	3	50%	4	67%	2	22%	3	38%	2	25%	45%
		AMP. DE PERCENTIS	5	83%	4	67%	5	83%	3	33%	3	38%	2	25%	55%
		MIDHINGE	5	83%	1	17%	4	67%	4	44%	5	63%	4	50%	54%
		DESVIO MÉDIO	5	83%	5	83%	5	83%	3	33%	4	50%	3	38%	62%
		VARIÂNCIA	5	83%	4	67%	5	83%	4	44%	4	50%	4	50%	63%
		DESVIO PADRÃO	5	83%	5	83%	4	67%	4	44%	4	50%	4	50%	63%
		COEF. DE VARIACÃO	5	83%	1	17%	1	17%	1	11%	1	13%	1	13%	25%
		FORMA	ASSIMETRIA	3	50%	3	50%	4	67%	2	22%	3	38%	5	63%
	CURTOSE		5	83%	6	100%	4	67%	2	22%	3	38%	4	50%	60%
	M. DE 6º ORDEM		2	33%	2	33%	2	33%	4	44%	2	25%	2	25%	32%
	COEF. QUART. ASS.		2	33%	1	17%	4	67%	6	67%	4	50%	4	50%	47%
	COEF. PERC. CURTOSE		5	83%	4	67%	6	100%	3	33%	4	50%	4	50%	64%
	FATOR DE CRISTA		4	67%	4	67%	5	83%	3	33%	4	50%	3	38%	56%
	FATOR K		5	83%	4	67%	3	50%	3	33%	3	38%	3	38%	51%
	1º COEF. PEARSON		1	17%	1	17%	1	17%	2	22%	1	13%	1	13%	16%
	2º COEF. PEARSON		2	33%	1	17%	3	50%	5	56%	6	75%	4	50%	47%
	DADOS SIMBÓLICOS		1ª CAT. DA ADS	0	0%	3	50%	0	0%	2	22%	0	0%	0	0%
		2ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	0	0%	2	22%	0	0%	2	25%	13%
		3ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	4	44%	0	0%	1	13%	26%
		4ª CAT. DA ADS	2	33%	4	67%	3	50%	2	22%	3	38%	1	13%	37%
		5ª CAT. DA ADS	3	50%	5	83%	3	50%	3	33%	2	25%	2	25%	44%
		6ª CAT. DA ADS	4	67%	5	83%	4	67%	3	33%	3	38%	2	25%	52%
		7ª CAT. DA ADS	5	83%	2	33%	4	67%	3	33%	5	63%	3	38%	53%
		8ª CAT. DA ADS	2	33%	1	17%	2	33%	2	22%	4	50%	3	38%	32%
		9ª CAT. DA ADS	4	67%	1	17%	1	17%	4	44%	4	50%	4	50%	41%
		10ª CAT. DA ADS	5	83%	1	17%	1	17%	3	33%	4	50%	3	38%	40%
		11ª CAT. DA ADS	5	83%	1	17%	1	17%	2	22%	0	0%	4	50%	31%
		12ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	1	17%	1	11%	0	0%	2	25%	23%
		13ª CAT. DA ADS	2	33%	1	17%	2	33%	0	0%	0	0%	0	0%	14%
		14ª CAT. DA ADS	2	33%	1	17%	2	33%	4	44%	0	0%	0	0%	21%
		15ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	-	-	-	-	-	-	0	0%	22%
		16ª CAT. DA ADS	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
	MÉDIA ANÁLISE			55%		44%		48%		32%		36%		32%	40%

Tabela C.14 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência, nas principais análises de estruturas excitadas por impacto.

ANÁLISE POR TIPO DE EXCITAÇÃO															
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA	SHEAR I				SHEAR II		PÁ EÓLICA				Média Par.	Média Tipo
		EXCITAÇÃO	IMPACTO	IMPACTO (20s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (20s)					
		VARIACÃO	MASSA E FUSOS	MASSA											
		REPETIÇÕES	180	11	22	44	22								
nd / ANÁLISE	6	A	6	C	6	D	9	F	8	I	8	L			
PARÂMETROS															
CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)															
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	67%	1	17%	2	33%	3	33%	3	38%	1	13%	33%
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	4	67%	4	67%	7	78%	3	38%	2	25%	57%
		1º QUARTIL	4	67%	2	33%	2	33%	4	44%	4	50%	4	50%	46%
		3º QUARTIL	4	67%	3	50%	2	33%	4	44%	5	63%	4	50%	51%
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	5	83%	4	67%	2	33%	3	33%	4	50%	3	38%	51%
		MÉDIA HARMÔNICA	4	67%	3	50%	2	33%	4	44%	3	38%	3	38%	45%
		MÉDIA GEOMÉTRICA	4	67%	2	33%	2	33%	3	33%	4	50%	3	38%	42%
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	4	67%	5	83%	4	44%	4	50%	4	50%	63%
		RAIZ QUAD. MÉDIA	5	83%	5	83%	4	67%	4	44%	4	50%	4	50%	63%
		2º QUARTIL	4	67%	2	33%	2	33%	3	33%	4	50%	4	50%	44%
		MODA	4	67%	1	17%	2	33%	3	33%	3	38%	1	13%	33%
		PONTO MÉDIO	4	67%	4	67%	4	67%	7	78%	3	38%	2	25%	57%
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	67%	4	67%	4	67%	7	78%	3	38%	2	25%	57%
		AMP. TOTAL	4	67%	4	67%	4	67%	7	78%	3	38%	2	25%	57%
		AMP. INTERQUARTIL	4	67%	3	50%	3	50%	3	33%	5	63%	5	63%	54%
		AMP. DE PERCENTIS	5	83%	2	33%	3	50%	5	56%	4	50%	4	50%	54%
		MIDHINGE	4	67%	3	50%	2	33%	4	44%	4	50%	4	50%	49%
		DESVIO MÉDIO	5	83%	5	83%	4	67%	4	44%	5	63%	4	50%	65%
		VARIÂNCIA	5	83%	4	67%	4	67%	4	44%	3	38%	3	38%	56%
		DESVIO PADRÃO	5	83%	5	83%	4	67%	4	44%	4	50%	3	38%	61%
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	FORMA	COEF. DE VARIACÃO	5	83%	4	67%	5	83%	3	33%	5	63%	5	63%	58%
		ASSIMETRIA	4	67%	3	50%	6	100%	4	44%	4	50%	3	38%	58%
		CURTOSE	3	50%	3	50%	4	67%	4	44%	4	50%	4	50%	52%
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	33%	2	33%	5	56%	3	38%	3	38%	38%
		COEF. QUART. ASS.	3	50%	2	33%	2	33%	2	22%	3	38%	3	38%	36%
		COEF. PERC. CURTOSE	3	50%	4	67%	3	50%	3	33%	4	50%	2	25%	46%
		FATOR DE CRISTA	4	67%	3	50%	4	67%	5	56%	6	75%	4	50%	61%
		FATOR K	4	67%	4	67%	4	67%	5	56%	3	38%	3	38%	55%
		1º COEF. PEARSON	5	83%	4	67%	4	67%	3	33%	5	63%	5	63%	63%
		2º COEF. PEARSON	5	83%	4	67%	4	67%	2	22%	4	50%	5	63%	59%
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	5	83%	4	67%	3	50%	3	33%	4	50%	4	50%	56%
		2ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	4	67%	3	33%	4	50%	5	63%	55%
		3ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	3	50%	4	44%	4	50%	3	38%	50%
		4ª CAT. DA ADS	3	50%	4	67%	5	83%	4	44%	4	50%	3	38%	55%
		5ª CAT. DA ADS	2	33%	3	50%	4	67%	5	56%	3	38%	4	50%	49%
		6ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	2	33%	4	44%	3	38%	1	13%	35%
		7ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	3	50%	2	22%	3	38%	3	38%	44%
		8ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	3	50%	4	44%	2	25%	2	25%	41%
		9ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	2	33%	3	33%	0	0%	4	50%	36%
		10ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	0	0%	2	25%	26%
		11ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	3	33%	3	38%	2	25%	27%
		12ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	4	44%	0	0%	2	25%	23%
		13ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	2	22%	0	0%	2	25%	19%
		14ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	0	0%	0	0%	2	25%	15%
		15ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	-	-	-	-	-	-	0	0%	11%
		16ª CAT. DA ADS	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
MÉDIA ANÁLISE			57%		51%		52%		42%		41%		38%	46%	

Tabela C.15 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo, nas principais análises de estruturas excitadas por *shaker*.

ANÁLISE POR TIPO DE EXCITAÇÃO																
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA		BENCHMARK			SHEAR II				Média Par.	Média Tipo			
		SINAL	RÚIDO BRANCO					CHIRP SENOIDAL								
		EXCITAÇÃO	SHAKER						SHAKER X		SHAKER DIAG.					
		VARIACÃO	MASSA E FURO		RIGIDEZ			MASSA								
		REPETIÇÕES	180		27			27			45			45		
		nd / ANÁLISE	6	B	3	M	5	N	9	G	9			H		
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)													
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	6	100%	2	67%	1	20%	6	67%	2	22%	55%	44%		
		EXTREMO MÁXIMO	5	83%	3	100%	1	20%	5	56%	3	33%	58%			
		1º QUARTIL	6	100%	3	100%	2	40%	3	33%	3	33%	61%			
	POSIÇÃO	3º QUARTIL	5	83%	3	100%	2	40%	4	44%	3	33%	60%			
		MÉDIA ARITMÉTICA	3	50%	1	33%	2	40%	1	11%	1	11%	29%			
		MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	1	33%	1	20%	1	11%	1	11%	15%			
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	3	100%	2	40%	1	11%	1	11%	32%			
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	3	100%	2	40%	9	100%	6	67%	78%			
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	3	100%	2	40%	9	100%	6	67%	78%			
		2º QUARTIL	5	83%	1	33%	1	20%	2	22%	1	11%	34%			
		MODA	3	50%	2	67%	1	20%	2	22%	1	11%	34%			
		PONTO MÉDIO	3	50%	1	33%	1	20%	2	22%	2	22%	30%			
		DISPERSÃO	AMP. DE PICO	6	100%	2	67%	1	20%	6	67%	4	44%		60%	
	AMP. TOTAL		6	100%	3	100%	1	20%	6	67%	5	56%	68%			
	AMP. INTERQUARTIL		5	83%	3	100%	2	40%	4	44%	3	33%	60%			
	AMP. DE PERCENTIS		5	83%	3	100%	2	40%	8	89%	7	78%	78%			
	MIDHINGE		5	83%	1	33%	1	20%	2	22%	1	11%	34%			
DESVIO MÉDIO	5		83%	3	100%	2	40%	9	100%	6	67%	78%				
VARIÂNCIA	5		83%	3	100%	2	40%	9	100%	6	67%	78%				
DESVIO PADRÃO	5		83%	3	100%	2	40%	9	100%	6	67%	78%				
COEF. DE VARIACÃO	5		83%	1	33%	1	20%	1	11%	1	11%	32%				
FORMA	ASSIMETRIA		6	100%	1	33%	1	20%	3	33%	2	22%	42%			
	CURTOSE	1	17%	1	33%	1	20%	4	44%	8	89%	41%				
	M. DE 6º ORDEM	2	33%	2	67%	2	40%	5	56%	6	67%	52%				
	COEF. QUART. ASS.	3	50%	1	33%	1	20%	2	22%	1	11%	27%				
	COEF. PERC. CURTOSE	1	17%	1	33%	1	20%	6	67%	4	44%	36%				
	FATOR DE CRISTA	3	50%	1	33%	1	20%	5	56%	2	22%	36%				
	FATOR K	5	83%	3	100%	1	20%	6	67%	4	44%	63%				
	1º COEF. PEARSON	3	50%	1	33%	1	20%	2	22%	1	11%	27%				
	2º COEF. PEARSON	5	83%	1	33%	1	20%	3	33%	1	11%	36%				
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	2	33%	2	67%	1	20%	0	0%	3	33%	31%			
2ª CAT. DA ADS		2	33%	2	67%	1	20%	0	0%	6	67%	37%				
3ª CAT. DA ADS		2	33%	2	67%	2	40%	4	44%	4	44%	46%				
4ª CAT. DA ADS		2	33%	2	67%	2	40%	5	56%	2	22%	44%				
5ª CAT. DA ADS		3	50%	3	100%	2	40%	7	78%	6	67%	67%				
6ª CAT. DA ADS		5	83%	3	100%	2	40%	2	22%	4	44%	58%				
7ª CAT. DA ADS		5	83%	2	67%	1	20%	7	78%	3	33%	56%				
8ª CAT. DA ADS		5	83%	3	100%	1	20%	3	33%	3	33%	54%				
9ª CAT. DA ADS		4	67%	3	100%	2	40%	5	56%	4	44%	61%				
10ª CAT. DA ADS		5	83%	2	67%	1	20%	3	33%	5	56%	52%				
11ª CAT. DA ADS		3	50%	3	100%	1	20%	8	89%	3	33%	58%				
12ª CAT. DA ADS		2	33%	3	100%	2	40%	4	44%	5	56%	55%				
13ª CAT. DA ADS		2	33%	2	67%	3	60%	2	22%	4	44%	45%				
14ª CAT. DA ADS		2	33%	2	67%	2	40%	0	0%	4	44%	37%				
15ª CAT. DA ADS	2	33%	2	67%	1	20%	-	-	-	-	40%					
16ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	20%	-	-	-	-	7%					
17ª CAT. DA ADS	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	0%					
MÉDIA ANÁLISE			60%		70%		29%		47%		39%	48%				

Tabela C.16 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência, nas principais análises de estruturas excitadas por *shaker*.

ANÁLISE POR TIPO DE EXCITAÇÃO															
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA		BENCHMARK			SHEAR II				Média Par.	Média Tipo		
		SINAL	RÚIDO BRANCO				CHIRP SENOIDAL								
		EXCITAÇÃO	SHAKER						SHAKER X		SHAKER DIAG.				
		VARIÇÃO	MASSA E FURO		RIGIDEZ			MASSA							
		REPETIÇÕES	180		27			27		45		45			
		nd / ANÁLISE	6	B	3	M	5	N	9	G	9	H			
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)												
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	67%	1	33%	1	20%	2	22%	3	33%	35%	56%	
		EXTREMO MÁXIMO	5	83%	2	67%	1	20%	5	56%	5	56%	56%		
		1º QUARTIL	4	67%	2	67%	3	60%	7	78%	6	67%	68%		
	POSIÇÃO	3º QUARTIL	5	83%	2	67%	3	60%	5	56%	6	67%	66%	62%	
		MÉDIA ARITMÉTICA	5	83%	3	100%	3	60%	9	100%	7	78%	84%		
		MÉDIA HARMÔNICA	4	67%	2	67%	2	40%	2	22%	4	44%	48%		
		MÉDIA GEOMÉTRICA	4	67%	2	67%	3	60%	5	56%	6	67%	63%		
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	3	100%	2	40%	7	78%	4	44%	69%		
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	3	100%	2	40%	9	100%	6	67%	78%		
		2º QUARTIL	4	67%	2	67%	2	40%	6	67%	7	78%	64%		
		MODA	4	67%	1	33%	1	20%	2	22%	3	33%	35%		
	DISPERSÃO	PONTO MÉDIO	5	83%	2	67%	1	20%	5	56%	5	56%	56%	67%	
		AMP. DE PICO	5	83%	2	67%	1	20%	5	56%	5	56%	56%		
		AMP. TOTAL	5	83%	2	67%	1	20%	5	56%	5	56%	56%		
		AMP. INTERQUARTIL	5	83%	2	67%	2	40%	7	78%	8	89%	71%		
		AMP. DE PERCENTIS	4	67%	2	67%	1	20%	9	100%	6	67%	64%		
		MIDHINGE	4	67%	2	67%	3	60%	5	56%	6	67%	63%		
DESVIO MÉDIO		5	83%	3	100%	3	60%	8	89%	5	56%	78%			
VARIÂNCIA		5	83%	3	100%	2	40%	4	44%	4	44%	62%			
FORMA	DESVIO PADRÃO	5	83%	3	100%	2	40%	9	100%	7	78%	80%	59%		
	COEF. DE VARIÇÃO	4	67%	3	100%	1	20%	8	89%	7	78%	71%			
	ASSIMETRIA	4	67%	2	67%	1	20%	4	44%	7	78%	55%			
	CURTOSE	4	67%	2	67%	1	20%	3	33%	4	44%	46%			
	M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	67%	1	20%	6	67%	6	67%	51%			
	COEF. QUART. ASS.	5	83%	2	67%	1	20%	7	78%	7	78%	65%			
	COEF. PERC. CURTOSE	3	50%	2	67%	2	40%	6	67%	8	89%	62%			
	FATOR DE CRISTA	4	67%	2	67%	1	20%	5	56%	5	56%	53%			
	FATOR K	5	83%	2	67%	2	40%	7	78%	5	56%	65%			
	1º COEF. PEARSON	3	50%	3	100%	1	20%	8	89%	8	89%	70%			
DADOS SIMBÓLICOS	2º COEF. PEARSON	3	50%	3	100%	1	20%	7	78%	5	56%	61%	31%		
	1ª CAT. DA ADS	5	83%	1	33%	3	60%	9	100%	6	67%	69%			
	2ª CAT. DA ADS	5	83%	2	67%	2	40%	5	56%	4	44%	58%			
	3ª CAT. DA ADS	4	67%	1	33%	1	20%	4	44%	6	67%	46%			
	4ª CAT. DA ADS	4	67%	2	67%	1	20%	5	56%	4	44%	51%			
	5ª CAT. DA ADS	4	67%	3	100%	1	20%	4	44%	5	56%	57%			
	6ª CAT. DA ADS	4	67%	2	67%	1	20%	8	89%	8	89%	66%			
	7ª CAT. DA ADS	4	67%	2	67%	1	20%	6	67%	7	78%	60%			
	8ª CAT. DA ADS	3	50%	0	0%	1	20%	4	44%	4	44%	32%			
	9ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	20%	5	56%	3	33%	22%			
	10ª CAT. DA ADS	3	50%	0	0%	1	20%	3	33%	3	33%	27%			
	11ª CAT. DA ADS	2	33%	0	0%	1	20%	2	22%	3	33%	22%			
	12ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	20%	3	33%	3	33%	17%			
	13ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	33%	7%			
14ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%				
15ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	-	-	-	-	0%				
16ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	-	-	-	-	0%				
17ª CAT. DA ADS	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%			
MÉDIA ANÁLISE			59%		58%		29%		59%		58%	51%			

Tabela C.17 – Comparativo dos resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo, quanto ao tempo entre impactos.

ANÁLISE COMPARATIVA DE TEMPO ENTRE IMPACTOS												
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR I				PÁ EÓLICA				Média Par.	Média Tipo
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)			
		VARIACÃO	MASSA									
		REPETIÇÕES	11		11		22		22			
		nd / ANÁLISE	6	C	6	D1	8	L	8	11		
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (nº / %)									
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	33%	2	33%	2	25%	5	63%	39%	47%
		EXTREMO MÁXIMO	3	50%	2	33%	4	50%	5	63%	49%	
		1º QUARTIL	3	50%	4	67%	2	25%	5	63%	51%	
		3º QUARTIL	3	50%	4	67%	2	25%	5	63%	51%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	33%	1	17%	2	25%	5	63%	34%	41%
		MÉDIA HARMÔNICA	1	17%	1	17%	1	13%	1	13%	15%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	33%	2	33%	2	25%	5	63%	39%	
		MÉDIA DOS QUAD.	4	67%	3	50%	4	50%	7	88%	64%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	4	67%	4	50%	6	75%	69%	
		2º QUARTIL	2	33%	3	50%	3	38%	7	88%	52%	
		MODA	1	17%	1	17%	1	13%	1	13%	15%	
		PONTO MÉDIO	3	50%	1	17%	5	63%	4	50%	45%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	3	50%	2	33%	2	25%	5	63%	43%	50%
		AMP. TOTAL	3	50%	2	33%	3	38%	5	63%	46%	
		AMP. INTERQUARTIL	3	50%	4	67%	2	25%	5	63%	51%	
		AMP. DE PERCENTIS	4	67%	5	83%	2	25%	4	50%	56%	
		MIDHINGE	1	17%	2	33%	4	50%	4	50%	38%	
		DESVIO MÉDIO	5	83%	5	83%	3	38%	6	75%	70%	
		VARIÂNCIA	4	67%	3	50%	4	50%	7	88%	64%	
		DESVIO PADRÃO	5	83%	4	67%	4	50%	6	75%	69%	
	COEF. DE VARIACÃO	1	17%	1	17%	1	13%	1	13%	15%		
	FORMA	ASSIMETRIA	3	50%	4	67%	5	63%	4	50%	57%	48%
		CURTOSE	6	100%	4	67%	4	50%	2	25%	60%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	1	17%	2	25%	4	50%	31%	
		COEF. QUART. ASS.	1	17%	3	50%	4	50%	6	75%	48%	
		COEF. PERC. CURTOSE	4	67%	6	100%	4	50%	4	50%	67%	
		FATOR DE CRISTA	4	67%	4	67%	3	38%	4	50%	55%	
		FATOR K	4	67%	2	33%	3	38%	6	75%	53%	
		1º COEF. PEARSON	1	17%	1	17%	1	13%	1	13%	15%	
		2º COEF. PEARSON	1	17%	3	50%	4	50%	6	75%	48%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	3	50%	0	0%	0	0%	2	25%	19%	32%
		2ª CAT. DA ADS	2	33%	0	0%	2	25%	3	38%	24%	
		3ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	1	13%	2	25%	26%	
		4ª CAT. DA ADS	4	67%	2	33%	1	13%	3	38%	38%	
		5ª CAT. DA ADS	5	83%	2	33%	2	25%	2	25%	42%	
		6ª CAT. DA ADS	5	83%	4	67%	2	25%	3	38%	53%	
7ª CAT. DA ADS		2	33%	4	67%	3	38%	5	63%	50%		
8ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	3	38%	6	75%	41%		
9ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	4	50%	7	88%	43%		
10ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	3	38%	6	75%	36%		
11ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	4	50%	7	88%	43%		
12ª CAT. DA ADS		2	33%	1	17%	2	25%	3	38%	28%		
13ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	0	0%	0	0%	13%		
14ª CAT. DA ADS		1	17%	0	0%	0	0%	0	0%	4%		
15ª CAT. DA ADS		2	33%	-	-	0	0%	-	-	17%		
16ª CAT. DA ADS		-	-	-	-	-	-	-	-	-		
17ª CAT. DA ADS		-	-	-	-	-	-	-	-	-		
MÉDIA ANÁLISE			44%		40%		32%		53%	42%		

Tabela C.18 – Comparativo dos resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência, quanto ao tempo entre impactos.

ANÁLISE COMPARATIVA DE TEMPO ENTRE IMPACTOS												
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR I				PÁ EÓLICA				Média Par.	Média Tipo
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)			
		VARIACÃO	MASSA									
		REPETIÇÕES	11		11		22		22			
		nd / ANÁLISE	6	C	6	D1	8	L	8	11		
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)									
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	1	17%	2	33%	1	13%	5	63%	31%	45%
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	4	67%	2	25%	5	63%	55%	
		1º QUARTIL	2	33%	2	33%	4	50%	5	63%	45%	
		3º QUARTIL	3	50%	2	33%	4	50%	5	63%	49%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	4	67%	2	33%	3	38%	5	63%	50%	50%
		MÉDIA HARMÔNICA	3	50%	2	33%	3	38%	5	63%	46%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	33%	2	33%	3	38%	6	75%	45%	
		MÉDIA DOS QUAD.	4	67%	3	50%	4	50%	7	88%	64%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	5	83%	4	67%	4	50%	6	75%	69%	
		2º QUARTIL	2	33%	2	33%	4	50%	5	63%	45%	
		MODA	1	17%	2	33%	1	13%	3	38%	25%	
		PONTO MÉDIO	4	67%	4	67%	2	25%	5	63%	55%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	67%	4	67%	2	25%	5	63%	55%	58%
		AMP. TOTAL	4	67%	4	67%	2	25%	5	63%	55%	
		AMP. INTERQUARTIL	3	50%	1	17%	5	63%	6	75%	51%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	33%	4	67%	4	50%	7	88%	59%	
		MIDHINGE	3	50%	2	33%	4	50%	6	75%	52%	
		DESVIO MÉDIO	5	83%	3	50%	4	50%	5	63%	61%	
		VARIÂNCIA	4	67%	4	67%	3	38%	7	88%	65%	
		DESVIO PADRÃO	5	83%	4	67%	3	38%	7	88%	69%	
	FORMA	COEF. DE VARIACÃO	4	67%	3	50%	5	63%	3	38%	54%	54%
		ASSIMETRIA	3	50%	5	83%	3	38%	7	88%	65%	
		CURTOSE	3	50%	4	67%	4	50%	6	75%	60%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	33%	3	38%	3	38%	35%	
		COEF. QUART. ASS.	2	33%	2	33%	3	38%	4	50%	39%	
		COEF. PERC. CURTOSE	4	67%	3	50%	2	25%	4	50%	48%	
		FATOR DE CRISTA	3	50%	3	50%	4	50%	6	75%	56%	
		FATOR K	4	67%	4	67%	3	38%	6	75%	61%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1º COEF. PEARSON	4	67%	4	67%	5	63%	4	50%	61%	37%
		2º COEF. PEARSON	4	67%	3	50%	5	63%	4	50%	57%	
		1ª CAT. DA ADS	4	67%	3	50%	4	50%	5	63%	57%	
		2ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	5	63%	3	38%	50%	
		3ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	3	38%	5	63%	46%	
		4ª CAT. DA ADS	4	67%	4	67%	3	38%	5	63%	58%	
		5ª CAT. DA ADS	3	50%	5	83%	4	50%	3	38%	55%	
		6ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	1	13%	3	38%	29%	
		7ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	3	38%	2	25%	36%	
		8ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	2	25%	3	38%	41%	
		9ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	4	50%	0	0%	33%	
		10ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	25%	0	0%	23%	
11ª CAT. DA ADS		2	33%	2	33%	2	25%	0	0%	23%		
12ª CAT. DA ADS		2	33%	2	33%	2	25%	2	25%	29%		
13ª CAT. DA ADS		2	33%	2	33%	2	25%	3	38%	32%		
14ª CAT. DA ADS		2	33%	2	33%	2	25%	0	0%	23%		
15ª CAT. DA ADS		2	33%	-	-	0	0%	-	-	17%		
16ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
17ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
MÉDIA ANÁLISE			51%		48%		38%		54%	47%		

Tabela C.19 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo, considerando estados de dano associados à variação da posição das massas.

ANÁLISE DE VARIAÇÃO DO LOCAL DA MASSA										
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR I		PÁ EÓLICA			Média Par.	Média Tipo	
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)					
		VARIACÃO	LOCAL 5kg		LOCAL 30g	LOCAL 220g				
		REPETIÇÕES	11		22		22			
		nd / ANÁLISE	5	E	8	J	6	K		
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)							
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	40%	2	25%	3	50%	38%	38%
		EXTREMO MÁXIMO	2	40%	3	38%	2	33%	37%	
		1º QUARTIL	2	40%	2	25%	3	50%	38%	
		3º QUARTIL	2	40%	2	25%	3	50%	38%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	1	20%	4	50%	4	67%	46%	38%
		MÉDIA HARMÔNICA	1	20%	1	13%	1	17%	16%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	1	20%	2	25%	3	50%	32%	
		MÉDIA DOS QUAD.	3	60%	3	38%	2	33%	44%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	3	60%	3	38%	3	50%	49%	
		2º QUARTIL	2	40%	4	50%	3	50%	47%	
		MODA	1	20%	1	13%	1	17%	16%	
		PONTO MÉDIO	3	60%	2	25%	4	67%	51%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	40%	2	25%	3	50%	38%	43%
		AMP. TOTAL	2	40%	3	38%	3	50%	43%	
		AMP. INTERQUARTIL	2	40%	2	25%	3	50%	38%	
		AMP. DE PERCENTIS	4	80%	2	25%	4	67%	57%	
		MIDHINGE	1	20%	2	25%	4	67%	37%	
		DESVIO MÉDIO	4	80%	3	38%	4	67%	61%	
		VARIÂNCIA	3	60%	3	38%	2	33%	44%	
		DESVIO PADRÃO	3	60%	3	38%	3	50%	49%	
	COEF. DE VARIAÇÃO	1	20%	1	13%	1	17%	16%		
	FORMA	ASSIMETRIA	3	60%	2	25%	6	100%	62%	43%
		CURTOSE	3	60%	3	38%	4	67%	55%	
		M. DE 6ª ORDEM	1	20%	2	25%	2	33%	26%	
		COEF. QUART. ASS.	1	20%	3	38%	3	50%	36%	
		COEF. PERC. CURTOSE	3	60%	4	50%	4	67%	59%	
		FATOR DE CRISTA	2	40%	3	38%	4	67%	48%	
		FATOR K	2	40%	3	38%	2	33%	37%	
		1º COEF. PEARSON	1	20%	1	13%	1	17%	16%	
		2º COEF. PEARSON	1	20%	5	63%	3	50%	44%	
		DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	1	20%	0	0%	0	0%	
	2ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	0	0%	22%	
	3ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	0	0%	22%	
	4ª CAT. DA ADS		2	40%	3	38%	3	50%	43%	
	5ª CAT. DA ADS		4	80%	1	13%	2	33%	42%	
	6ª CAT. DA ADS		4	80%	1	13%	2	33%	42%	
	7ª CAT. DA ADS		1	20%	2	25%	3	50%	32%	
	8ª CAT. DA ADS		1	20%	3	38%	3	50%	36%	
	9ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	3	50%	38%	
	10ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	2	33%	33%	
11ª CAT. DA ADS	1		20%	3	38%	2	33%	30%		
12ª CAT. DA ADS	0		0%	3	38%	0	0%	13%		
13ª CAT. DA ADS	0		0%	2	25%	0	0%	8%		
14ª CAT. DA ADS	0		0%	0	0%	0	0%	0%		
15ª CAT. DA ADS	1		20%	-	-	-	-	20%		
MÉDIA ANÁLISE			38%		29%		41%	36%		

Tabela C.20 – Resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência, considerando estados de dano associados à variação da posição das massas.

ANÁLISE DE VARIAÇÃO DO LOCAL DA MASSA										
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR I		PÁ EÓLICA			Média Par.	Média Tipo	
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (20s)		IMPACTO (10s)					
		VARIAÇÃO	LOCAL 5kg		LOCAL 30g	LOCAL 220g				
		REPETIÇÕES	11		22		22			
		nd / ANÁLISE	5	E	8	J	6			K
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)							
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	40%	2	25%	2	33%	43%	
		EXTREMO MÁXIMO	4	80%	3	38%	3	50%		56%
		1º QUARTIL	2	40%	3	38%	3	50%		43%
		3º QUARTIL	2	40%	3	38%	3	50%		43%
	POSICÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	40%	3	38%	3	50%	43%	45%
		MÉDIA HARMÔNICA	2	40%	3	38%	3	50%	43%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	3	60%	3	38%	3	50%	49%	
		MÉDIA DOS QUAD.	3	60%	3	38%	2	33%	44%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	3	60%	3	38%	3	50%	49%	
		2º QUARTIL	3	60%	3	38%	2	33%	44%	
		MODA	2	40%	2	25%	2	33%	33%	
		PONTO MÉDIO	4	80%	3	38%	3	50%	56%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	80%	3	38%	3	50%	56%	46%
		AMP. TOTAL	4	80%	3	38%	3	50%	56%	
		AMP. INTERQUARTIL	2	40%	3	38%	3	50%	43%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	40%	2	25%	3	50%	38%	
		MIDHINGE	2	40%	3	38%	3	50%	43%	
		DESVIO MÉDIO	2	40%	2	25%	4	67%	44%	
		VARIÂNCIA	3	60%	2	25%	3	50%	45%	
		DESVIO PADRÃO	3	60%	2	25%	3	50%	45%	
	COEF. DE VARIAÇÃO	2	40%	3	38%	4	67%	48%		
	FORMA	ASSIMETRIA	4	80%	3	38%	3	50%	56%	48%
		CURTOSE	3	60%	3	38%	2	33%	44%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	40%	2	25%	2	33%	33%	
		COEF. QUART. ASS.	2	40%	4	50%	4	67%	52%	
		COEF. PERC. CURTOSE	2	40%	3	38%	3	50%	43%	
		FATOR DE CRISTA	4	80%	4	50%	3	50%	60%	
		FATOR K	3	60%	2	25%	3	50%	45%	
		1º COEF. PEARSON	2	40%	3	38%	4	67%	48%	
	2º COEF. PEARSON	3	60%	3	38%	4	67%	55%		
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	3	60%	4	50%	3	50%	53%	28%
		2ª CAT. DA ADS	3	60%	4	50%	3	50%	53%	
		3ª CAT. DA ADS	3	60%	2	25%	3	50%	45%	
		4ª CAT. DA ADS	3	60%	3	38%	3	50%	49%	
		5ª CAT. DA ADS	2	40%	2	25%	4	67%	44%	
6ª CAT. DA ADS		3	60%	2	25%	3	50%	45%		
7ª CAT. DA ADS		3	60%	2	25%	3	50%	45%		
8ª CAT. DA ADS		2	40%	1	13%	0	0%	18%		
9ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	0	0%	22%		
10ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	0	0%	22%		
11ª CAT. DA ADS		2	40%	2	25%	0	0%	22%		
12ª CAT. DA ADS		0	0%	1	13%	0	0%	4%		
13ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0%		
14ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0%		
15ª CAT. DA ADS		0	0%	-	-	-	-	0%		
	MÉDIA ANÁLISE		48%		32%		42%	40%		

Tabela C.21 – Comparativo dos resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo, quanto as janelas de recortes dos dados do *Benchmark*.

ANÁLISE COMPARATIVA DE JANELA DE RECORTES DOS DADOS													
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		BENCHMARK									
		EXCITAÇÃO		SHAKER (RUÍDO BRANCO)									
		VARIACÃO		10s		15s		30s		45s			
		REPETIÇÕES		18		18		18		18			
		nd / ANÁLISE	3	MJ1	3	MJ2	3	MJ3	3	MJ4	Média	Média	
		PARÂMETROS		CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)								Par.	Tipo
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	79%	
		EXTREMO MÁXIMO	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		1º QUARTIL	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		3º QUARTIL	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%	56%	
		MÉDIA HARMÔNICA	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		MÉDIA DOS QUAD.	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		2º QUARTIL	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		MODA	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%		
		PONTO MÉDIO	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	70%	
		AMP. TOTAL	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		AMP. INTERQUARTIL	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		AMP. DE PERCENTIS	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		MIDHINGE	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		DESVIO MÉDIO	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		VARIÂNCIA	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		DESVIO PADRÃO	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
	COEF. DE VARIACÃO	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%			
	FORMA	ASSIMETRIA	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%	43%	
		CURTOSE	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		M. DE 6ª ORDEM	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%		
		COEF. QUART. ASS.	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		COEF. PERC. CURTOSE	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		FATOR DE CRISTA	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
		FATOR K	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		1º COEF. PEARSON	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
	2º COEF. PEARSON	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%			
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%	65%	
		2ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%		
		3ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%		
		4ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%		
		5ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	2	67%	3	100%	75%		
		6ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		7ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		8ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		9ª CAT. DA ADS	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%		
		10ª CAT. DA ADS	3	100%	2	67%	2	67%	3	100%	83%		
11ª CAT. DA ADS		2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%			
12ª CAT. DA ADS		2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%			
13ª CAT. DA ADS		2	67%	2	67%	2	67%	3	100%	75%			
14ª CAT. DA ADS		2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%			
15ª CAT. DA ADS		2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%			
16ª CAT. DA ADS			-		-	0	0%	2	67%	33%			
17ª CAT. DA ADS			-		-		-	0	0%	0%			
MÉDIA ANÁLISE			56%		56%		68%		70%	61%			

Tabela C.22 – Comparativo dos resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência, quanto as janelas de recortes dos dados do *Benchmark*.

ANÁLISE COMPARATIVA DE JANELA DE RECORTES DOS DADOS												
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		BENCHMARK								
		EXCITAÇÃO		SHAKER (RUÍDO BRANCO)								
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	TIPO	VARIACÃO		10s		15s		30s		45s		
		REPETIÇÕES		18		18		18		18		
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	TIPO	nd / ANÁLISE	3	MJ1	3	MJ2	3	MJ3	3	MJ4	Média	Média
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)								Par.	Tipo
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%	58%
		EXTREMO MÁXIMO	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		1º QUARTIL	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		3º QUARTIL	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	69%
		MÉDIA HARMÔNICA	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		MÉDIA DOS QUAD.	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	
		2º QUARTIL	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		MODA	1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%	
	DISPERSÃO	PONTO MÉDIO	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	75%
		AMP. DE PICO	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		AMP. TOTAL	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		AMP. INTERQUARTIL	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		MIDHINTE	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		DESVIO MÉDIO	2	67%	3	100%	3	100%	3	100%	92%	
		VARIÂNCIA	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	
	FORMA	DESVIO PADRÃO	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	70%
		COEF. DE VARIACÃO	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	
		ASSIMETRIA	2	67%	2	67%	3	100%	2	67%	75%	
		CURTOSE	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		COEF. QUART. ASS.	2	67%	1	33%	2	67%	2	67%	58%	
		COEF. PERC. CURTOSE	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		FATOR DE CRISTA	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
		FATOR K	2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1º COEF. PEARSON	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	28%
		2º COEF. PEARSON	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	83%	
		1ª CAT. DA ADS	1	33%	1	33%	2	67%	1	33%	42%	
		2ª CAT. DA ADS	2	67%	1	33%	2	67%	2	67%	58%	
		3ª CAT. DA ADS	1	33%	1	33%	2	67%	1	33%	42%	
4ª CAT. DA ADS		1	33%	1	33%	1	33%	1	33%	33%		
5ª CAT. DA ADS		1	33%	1	33%	3	100%	3	100%	67%		
6ª CAT. DA ADS		2	67%	1	33%	2	67%	2	67%	58%		
7ª CAT. DA ADS		1	33%	2	67%	2	67%	2	67%	58%		
8ª CAT. DA ADS		2	67%	2	67%	2	67%	2	67%	67%		
9ª CAT. DA ADS		0	0%	1	33%	2	67%	0	0%	25%		
10ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	2	67%	0	0%	17%		
11ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	2	67%	17%		
12ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%		
13ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%		
14ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%		
15ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0%		
16ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	0	0%	0	0%	0%			
17ª CAT. DA ADS	-	-	-	-	-	-	0	0%	0%			
MÉDIA ANÁLISE			51%		51%		64%		59%	55%		

Tabela C.23 – Comparativo entre resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo, das fases I e II do *Shear Building*.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O SHEAR BUILDING NAS FASES I E II													
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR I				SHEAR II				Média Par. / Média Tipo		
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (10s)										
		VARIAÇÃO	MASSA										
		REPETIÇÕES	22		22		44		44				
		nd / ANÁLISE	6	D	6	F2	6	F1	9	F			
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)										
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	33%	3	50%	3	50%	4	44%	44%	40%	
		EXTREMO MÁXIMO	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%		
		1º QUARTIL	4	67%	2	33%	2	33%	2	22%	39%		
		3º QUARTIL	4	67%	2	33%	2	33%	3	33%	42%		
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	1	17%	2	33%	2	33%	2	22%	26%	38%	
		MÉDIA HARMÔNICA	1	17%	1	17%	1	17%	1	11%	15%		
		MÉDIA GEOMÉTRICA	4	67%	1	17%	1	17%	1	11%	28%		
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	2	33%	2	33%	4	44%	49%		
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	4	67%	2	33%	2	33%	4	44%	44%		
		2º QUARTIL	4	67%	4	67%	4	67%	6	67%	67%		
		MODA	2	33%	3	50%	2	33%	2	22%	35%		
		PONTO MÉDIO	3	50%	2	33%	3	50%	2	22%	39%		
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	43%	
		AMP. TOTAL	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%		
		AMP. INTERQUARTIL	4	67%	2	33%	3	50%	2	22%	43%		
		AMP. DE PERCENTIS	5	83%	4	67%	3	50%	3	33%	58%		
		MIDHINGE	4	67%	3	50%	4	67%	4	44%	57%		
		DESVIO MÉDIO	5	83%	3	50%	3	50%	3	33%	54%		
		VARIÂNCIA	5	83%	2	33%	2	33%	4	44%	49%		
		DESVIO PADRÃO	4	67%	2	33%	2	33%	4	44%	44%		
	FORMA	COEF. DE VARIAÇÃO	1	17%	1	17%	1	17%	1	11%	15%	46%	
		ASSIMETRIA	4	67%	2	33%	2	33%	2	22%	39%		
		CURTOSE	4	67%	3	50%	3	50%	2	22%	47%		
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	2	33%	2	33%	4	44%	36%		
		COEF. QUART. ASS.	4	67%	4	67%	4	67%	6	67%	67%		
		COEF. PERC. CURTOSE	6	100%	2	33%	3	50%	3	33%	54%		
		FATOR DE CRISTA	5	83%	2	33%	2	33%	3	33%	46%		
		FATOR K	3	50%	2	33%	2	33%	3	33%	38%		
	DADOS SIMBÓLICOS	1º COEF. PEARSON	1	17%	2	33%	2	33%	2	22%	26%	33%	
		2º COEF. PEARSON	3	50%	3	50%	5	83%	5	56%	60%		
		1ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	2	22%	22%		
		2ª CAT. DA ADS	0	0%	2	33%	2	33%	2	22%	22%		
		3ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	4	67%	4	44%	44%		
		4ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	2	33%	2	22%	35%		
5ª CAT. DA ADS		3	50%	2	33%	2	33%	3	33%	38%			
6ª CAT. DA ADS		4	67%	4	67%	3	50%	3	33%	54%			
7ª CAT. DA ADS		4	67%	3	50%	3	50%	3	33%	50%			
8ª CAT. DA ADS		2	33%	3	50%	3	50%	2	22%	39%			
9ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	2	33%	4	44%	32%			
10ª CAT. DA ADS		1	17%	3	50%	3	50%	3	33%	38%			
11ª CAT. DA ADS		1	17%	1	17%	2	33%	2	22%	22%			
12ª CAT. DA ADS		1	17%	2	33%	1	17%	1	11%	19%			
13ª CAT. DA ADS	2	33%	1	17%	0	0%	0	0%	13%				
14ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	4	44%	36%				
MÉDIA ANÁLISE			48%		38%		39%		32%	39%			

Tabela C.24 – Comparativo entre resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio da frequência, das fases I e II do *Shear Building*.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O SHEAR BUILDING NAS FASES I E II												
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	SHEAR I				SHEAR II				Média Par. Média Tipo	
		EXCITAÇÃO	IMPACTO (10s)									
		VARIACÃO	MASSA									
		REPETIÇÕES	22		22		44		44			
		nd / ANÁLISE	6	D	6	F2	6	F1	9	F		
		PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO CORRETA (n° / %)									
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	45%
		EXTREMO MÁXIMO	4	67%	3	50%	5	83%	7	78%	69%	
		1º QUARTIL	2	33%	2	33%	2	33%	4	44%	36%	
		3º QUARTIL	2	33%	2	33%	3	50%	4	44%	40%	
	POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	41%
		MÉDIA HARMÔNICA	2	33%	1	17%	2	33%	4	44%	32%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	
		MÉDIA DOS QUAD.	5	83%	2	33%	2	33%	4	44%	49%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	4	67%	2	33%	2	33%	4	44%	44%	
		2º QUARTIL	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	
		MODA	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	
		PONTO MÉDIO	4	67%	3	50%	5	83%	7	78%	69%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	67%	3	50%	5	83%	7	78%	69%	51%
		AMP. TOTAL	4	67%	3	50%	5	83%	7	78%	69%	
		AMP. INTERQUARTIL	3	50%	2	33%	3	50%	3	33%	42%	
		AMP. DE PERCENTIS	3	50%	2	33%	4	67%	5	56%	51%	
		MIDHINGE	2	33%	2	33%	2	33%	4	44%	36%	
		DESVIO MÉDIO	4	67%	2	33%	2	33%	4	44%	44%	
		VARIÂNCIA	4	67%	2	33%	3	50%	4	44%	49%	
		DESVIO PADRÃO	4	67%	2	33%	3	50%	4	44%	49%	
	COEF. DE VARIACÃO	5	83%	2	33%	2	33%	3	33%	46%		
	FORMA	ASSIMETRIA	6	100%	3	50%	4	67%	4	44%	65%	51%
		CURTOSE	4	67%	3	50%	4	67%	4	44%	57%	
		M. DE 6ª ORDEM	2	33%	3	50%	4	67%	5	56%	51%	
		COEF. QUART. ASS.	2	33%	2	33%	2	33%	2	22%	31%	
		COEF. PERC. CURTOSE	3	50%	2	33%	3	50%	3	33%	42%	
		FATOR DE CRISTA	4	67%	4	67%	4	67%	5	56%	64%	
		FATOR K	4	67%	3	50%	4	67%	5	56%	60%	
		1º COEF. PEARSON	4	67%	2	33%	3	50%	3	33%	46%	
	2º COEF. PEARSON	4	67%	3	50%	2	33%	2	22%	43%		
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	2	33%	3	33%	38%	40%
		2ª CAT. DA ADS	4	67%	2	33%	3	50%	3	33%	46%	
		3ª CAT. DA ADS	3	50%	3	50%	4	67%	4	44%	53%	
		4ª CAT. DA ADS	5	83%	3	50%	4	67%	4	44%	61%	
		5ª CAT. DA ADS	4	67%	2	33%	4	67%	5	56%	56%	
		6ª CAT. DA ADS	2	33%	4	67%	3	50%	4	44%	49%	
		7ª CAT. DA ADS	3	50%	2	33%	1	17%	2	22%	31%	
		8ª CAT. DA ADS	3	50%	1	17%	2	33%	4	44%	36%	
		9ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	3	50%	3	33%	38%	
		10ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	3	50%	3	33%	38%	
		11ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	2	33%	3	33%	33%	
		12ª CAT. DA ADS	2	33%	1	17%	3	50%	4	44%	36%	
		13ª CAT. DA ADS	2	33%	3	50%	2	33%	2	22%	35%	
		14ª CAT. DA ADS	2	33%	2	33%	0	0%	0	0%	17%	
		15 ADS CAT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16 ADS CAT		-	-	-	-	-	-	-	-	-		
17 ADS CAT		-	-	-	-	-	-	-	-	-		
MÉDIA ANÁLISE			52%		38%		48%		42%	45%		

Tabela C.25 – Comparativo dos resultados do teste *Scott-Knott* para os parâmetros no domínio do tempo e da frequência, da Pá Eólica com e sem as menores massas.

ANÁLISE COMPARATIVA REMOVENDO OS DANOS MENORES NA PÁ EÓLICA																
TIPO	ESTRUTURA	PÁ EÓLICA														
	EXCITAÇÃO	IMPACTO (10s)														
	VARIAÇÃO	MASSA														
	REPETIÇÕES	44				DOM. TEMPO		44				DOM. FREQUÊNCIA				
	nd / ANÁLISE	8	1	6	12	Média Par.	Média Tipo	8	1	6	12	Média Par.	Média Tipo			
	PARÂMETROS	CLASSIF. CORRETA (n° / %)						CLASSIF. CORRETA (n° / %)								
SEP.	EXTREMO MÍNIMO	4	50%	3	50%	50%	48%	3	38%	2	33%	35%	42%			
	EXTREMO MÁXIMO	5	63%	5	83%	73%		3	38%	1	17%	27%				
	1º QUARTIL	3	38%	2	33%	35%		4	50%	3	50%	50%				
	3º QUARTIL	3	38%	2	33%	35%		5	63%	3	50%	56%				
POSIÇÃO	MÉDIA ARITMÉTICA	2	25%	1	17%	21%	40%	4	50%	4	67%	58%	48%			
	MÉDIA HARMÔNICA	1	13%	1	17%	15%		3	38%	3	50%	44%				
	MÉDIA GEOMÉTRICA	3	38%	2	33%	35%		4	50%	4	67%	58%				
	MÉDIA DOS QUAD.	4	50%	3	50%	50%		4	50%	3	50%	50%				
	RAIZ QUAD. DA MÉDIA	4	50%	4	67%	58%		4	50%	4	67%	58%				
	2º QUARTIL	5	63%	5	83%	73%		4	50%	3	50%	50%				
	MODA	1	13%	1	17%	15%		3	38%	2	33%	35%				
	PONTO MÉDIO	4	50%	3	50%	50%		3	38%	1	17%	27%				
DISPERSÃO	AMP. DE PICO	4	50%	3	50%	50%	44%	3	38%	1	17%	27%	50%			
	AMP. TOTAL	4	50%	4	67%	58%		3	38%	1	17%	27%				
	AMP. INTERQUARTIL	3	38%	2	33%	35%		5	63%	4	67%	65%				
	AMP. DE PERCENTIS	3	38%	1	17%	27%		4	50%	4	67%	58%				
	MIDHINGE	5	63%	4	67%	65%		4	50%	4	67%	58%				
	DESVIO MÉDIO	4	50%	2	33%	42%		5	63%	4	67%	65%				
	VARIÂNCIA	4	50%	3	50%	50%		3	38%	2	33%	35%				
	DESVIO PADRÃO	4	50%	4	67%	58%		4	50%	3	50%	50%				
	COEF. DE VARIAÇÃO	1	13%	1	17%	15%		5	63%	4	67%	65%				
	ASSIMETRIA	3	38%	3	50%	44%		4	50%	4	67%	58%				
FORMA	CURTOSE	3	38%	2	33%	35%	43%	4	50%	3	50%	50%	52%			
	M. DE 6ª ORDEM	2	25%	2	33%	29%		3	38%	2	33%	35%				
	COEF. QUART. ASS.	4	50%	3	50%	50%		3	38%	3	50%	44%				
	COEF. PERC. CURTOSE	4	50%	3	50%	50%		4	50%	4	67%	58%				
	FATOR DE CRISTA	4	50%	3	50%	50%		6	75%	4	67%	71%				
	FATOR K	3	38%	3	50%	44%		3	38%	2	33%	35%				
	1º COEF. PEARSON	1	13%	1	17%	15%		5	63%	3	50%	56%				
	2º COEF. PEARSON	6	75%	4	67%	71%		4	50%	4	67%	58%				
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%		0%	19%	4	50%	3		50%	50%	28%
		2ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%		0%		4	50%	3		50%	50%	
3ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0%	4	50%		3	50%	50%				
4ª CAT. DA ADS		3	38%	3	50%	44%	4	50%		4	67%	58%				
5ª CAT. DA ADS		2	25%	2	33%	29%	3	38%		3	50%	44%				
6ª CAT. DA ADS		3	38%	2	33%	35%	3	38%		3	50%	44%				
7ª CAT. DA ADS		5	63%	2	33%	48%	3	38%		2	33%	35%				
8ª CAT. DA ADS		4	50%	3	50%	50%	2	25%		2	33%	29%				
9ª CAT. DA ADS		4	50%	2	33%	42%	0	0%		0	0%	0%				
10ª CAT. DA ADS		4	50%	3	50%	-	0	0%		0	0%	0%				
11ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0%	3	38%		1	17%	27%				
12ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0%	0	0%		0	0%	0%				
13ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0%	0	0%		0	0%	0%				
14ª CAT. DA ADS		0	0%	0	0%	0%	0	0%		0	0%	0%				
MÉDIA ANÁLISE		36%		37%	36%		41%		43%	42%						

Tabela C.26 – Resultados do teste *Scott-Knott* para identificação de pequenas variações em estados com danos leves, considerando parâmetros no domínio do tempo.

ANÁLISE DE IDENTIFICAÇÃO DE PEQUENAS VARIAÇÕES ENTRE ESTADOS DE DANOS LEVES																	
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA		VIGA		SHEAR I		SHEAR II		SHEAR II		PÁ EÓLICA		BENCHMARK		
		EXCITAÇÃO	IMPACTO	SHAKER (RB)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		SHAKER X (SEN)		IMPACTO (10s)		SHAKER (RB)			
		VARIACÃO	0 - 12 mm		0 - 12 mm		0 - 0,5 kg		0 - 130 g		0 - 130 g		0 - 10 g		0 - 2/3.1°		
		REPETIÇÕES	180		180		22		44		45		44		27		
		nd/ANÁLISE	2	PA	2	PB	2	PD	2	PF	2	PG	2	PI	2	PN	
		PARÂMETROS	ACERTOS (n° / %)													Média Par.	Média Tipo
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	79%
		EXTREMO MÁXIMO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%
		1º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%
	POSIÇÃO	3º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	79%
		MÉDIA ARITMÉTICA	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	71%
		MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	0	0%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	36%
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	0	0%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	50%
		MÉDIA DOS QUAD.	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%
		2º QUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	64%
	DISPERSÃO	MODA	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	57%
		PONTO MÉDIO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	79%
		AMP. DE PICO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%
		AMP. TOTAL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	93%
		AMP. INTERQUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%
		AMP. DE PERCENTIS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%
		MIDHINGE	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%
DESVIO MÉDIO		2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%	
VARIÂNCIA		2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
DESVIO PADRÃO		2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
FORMA	COEF. DE VARIAÇÃO	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	64%	
	ASSIMETRIA	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	71%	
	CURTOSE	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	86%	
	M. DE 6º ORDEM	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	93%	
	COEF. QUART. ASS.	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	57%	
	COEF. PERC. CURTOSE	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	79%	
	FATOR DE CRISTA	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
	FATOR K	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	93%	
	1º COEF. PEARSON	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	57%	
	2º COEF. PEARSON	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	64%	
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	50%
2ª CAT. DA ADS		0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	57%	
3ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	0	0%	1	50%	71%	
4ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	86%	
5ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	79%	
6ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
7ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
8ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
9ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
10ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
11ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	79%	
12ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
13ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	0	0%	1	50%	64%	
14ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	2	100%	71%	
15ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	2	100%	100%	
16ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	1	50%	17%		
17ª CAT. DA ADS	-	-	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%		
MÉDIA ANÁLISE			84%		88%		82%		77%		64%		81%		63%	75%	

Tabela C.27 – Resultados do teste *Scott-Knott* para identificação de pequenas variações em estados com danos leves, considerando parâmetros no domínio da frequência.

ANÁLISE DE IDENTIFICAÇÃO DE PEQUENAS VARIAÇÕES ENTRE ESTADOS DE DANOS LEVES																		
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA		VIGA		SHEAR I		SHEAR II		SHEAR II		PÁ EÓLICA		BENCHMARK			
		EXCITAÇÃO	IMPACTO	SHAKER (RB)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		SHAKER X (SEN)		IMPACTO (10s)		SHAKER (RB)				
		VARIACÃO	0 - 12 mm		0 - 12 mm		0 - 0,5 kg		0 - 130 g		0 - 130 g		0 - 10 g		0 - 2/3.1°			
		REPETIÇÕES	180		180		22		44		45		44		27			
		nd / ANÁLISE	2	PA	2	PB	2	PD	2	PF	2	PG	2	PI	2	PN		
		PARÂMETROS	ACERTOS (n° / %)													Média Par.	Média Tipo	
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
		EXTREMO MÁXIMO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		1º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
	POSICÃO	3º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
		MÉDIA ARITMÉTICA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%	
		MÉDIA HARMÔNICA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	93%	
		MÉDIA DOS QUAD.	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%	2	100%	2	100%	86%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
		2º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
		MODA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
		PONTO MÉDIO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%	
	DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		AMP. TOTAL	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		AMP. INTERQUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		MIDHINGE	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	93%	
		DESVIO MÉDIO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
		VARIÂNCIA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%	2	100%	1	50%	79%	
	DESVIO PADRÃO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%		
	FORMA	COEF. DE VARIAÇÃO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
		ASSIMETRIA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
		CURTOSE	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
		M. DE 6º ORDEM	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%	
		COEF. QUART. ASS.	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		COEF. PERC. CURTOSE	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	79%	
		FATOR DE CRISTA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
		FATOR K	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%	
		1º COEF. PEARSON	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	86%	
		2º COEF. PEARSON	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%
			2ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%
	3ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
	4ª CAT. DA ADS		2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	5ª CAT. DA ADS		1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	79%	
6ª CAT. DA ADS	1		50%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	79%		
7ª CAT. DA ADS	2		100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%		
8ª CAT. DA ADS	2		100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	79%		
9ª CAT. DA ADS	2		100%	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	0	0%	1	50%	57%		
10ª CAT. DA ADS	2		100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	71%		
11ª CAT. DA ADS	0		0%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	57%		
12ª CAT. DA ADS	0		0%	0	0%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	57%		
13ª CAT. DA ADS	0		0%	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	0	0%	1	50%	43%		
14ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	36%			
15ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	1	50%	17%			
16ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	0%			
17ª CAT. DA ADS	-	-	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%	0%			
MÉDIA ANÁLISE			85%		85%		91%		88%		81%		86%		62%	79%		

Tabela C.28 – Resultados do teste *Scott-Knott* para identificação de pequenas variações em estados com danos severos, considerando parâmetros no domínio do tempo.

ANÁLISE DE IDENTIFICAÇÃO DE PEQUENAS VARIAÇÕES ENTRE ESTADOS DE DANOS SEVEROS																				
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA	VIGA	SHEAR I	SHEAR II	SHEAR II	PÁ EÓLICA	BENCHMARK	BENCHMARK						Média Par.	Média Tipo			
		EXCITAÇÃO	IMPACTO	SHAKER (RB)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	SHAKER X (SEN)	IMPACTO (10s)	SHAKER (RB)	SHAKER (RB)										
		VARIAÇÃO	16 - 32 mm	16 - 32 mm	5 - 6 kg	5 - 6 kg	5 - 6 kg	220 - 430 g	1.1 ⁺ +3 ⁺ - 1.1 ⁺ +3 ⁺ +vg	1.1 ⁺ - 2/3.1 ⁺										
		REPETIÇÕES	180	180	22	44	45	44	27	27										
nd / ANÁLISE PARÂMETROS		2	GA	2	GB	2	GD	2	GF	2	GG	2	GI	2	GN1	2	GN2			
ACERTOS (n° / %)																				
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		EXTREMO MÁXIMO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		1° QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	81%	
	FORMA	POSICÃO	3° QUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	69%
			MÉDIA ARITMÉTICA	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	69%
			MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	0	0%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	38%
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	44%	
		MÉDIA DOS QUAD.	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		2° QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	75%	
		MODA	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	63%	
		PONTO MÉDIO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	69%	
		DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	75%
			AMP. TOTAL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%
			AMP. INTERQUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	81%
			AMP. DE PERCENTIS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	81%
			MIDHNGE	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	75%
DESVIO MÉDIO	2		100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	81%		
VARIANCIA	2		100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	75%		
DESVIO PADRÃO	2		100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
COEF. DE VARIAÇÃO	2		100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	69%		
ASSIMETRIA	2		100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	69%		
DADOS SIMBÓLICOS	CURTOSE		1. M. DE 6° ORDEM	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	63%
		COEF. QUART. ASS.	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		COEF. PERC. CURTOSE	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	63%	
	DADOS SIMBÓLICOS	FATOR DE CRISTA	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	69%	
		FATOR K	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		1° COEF. PEARSON	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	75%	
		2° COEF. PEARSON	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	69%	
		1° CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	31%	
		2° CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	38%	
		3° CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	50%	
		4° CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	63%	
		5° CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	69%	
		6° CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	88%	
		7° CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	69%	
		8° CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	75%	
		9° CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	75%	
		10° CAT. DA ADS	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	69%	
11° CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	69%			
12° CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	69%			
13° CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	0	0%	1	50%	2	100%	0	0%	1	50%	1	50%	44%			
14° CAT. DA ADS	0	0%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	0	0%	1	50%	1	50%	50%			
15° CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	1	50%	1	50%	25%			
16° CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	1	50%	1	50%	25%			
17° CAT. DA ADS	-	-	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	0%			
MÉDIA ANÁLISE			70%		80%		61%		86%		77%		67%		51%		50%	66%		

Tabela C.29 – Resultados do teste *Scott-Knott* para identificação de pequenas variações em estados com danos severos, considerando parâmetros no domínio da frequência.

ANÁLISE DE IDENTIFICAÇÃO DE PEQUENAS VARIAÇÕES ENTRE ESTADOS DE DANOS SEVEROS																				
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		VIGA		VIGA		SHEAR I		SHEAR II		SHEAR II		PÁ EÓLICA		BENCHMARK		BENCHMARK		
		EXCITAÇÃO		IMPACTO		SHAKER (RB)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		SHAKER X (SEN)		IMPACTO (10s)		SHAKER (RB)		SHAKER (RB)		
		VARIAÇÃO		16 - 32 mm		16 - 32 mm		5 - 6 kg		5 - 6 kg		5 - 6 kg		220 - 430 g		1.1 ⁺ +3 ⁺ - 1.1 ⁺ +3 ⁺ +vg		1.1 ⁺ - 2/3.1 ⁺		
REPETIÇÕES		180		180		22		44		45		44		27		27		Média Par.	Média Tipo	
nd / ANÁLISE		GA		GB		GD		GE		GG		GI		GNI		GN2				
PARÂMETROS																				
ACERTOS (n° / %)																				
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	69%	80%
		EXTREMO MÁXIMO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		1º QUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	88%	
	POSICÃO	3º QUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	81%	
		MÉDIA ARITMÉTICA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	81%	
		MÉDIA HARMÔNICA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	81%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	81%	
		MÉDIA DOS QUAD.	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		2º QUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	81%	
	DISPERSÃO	MODA	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	69%	
		PONTO MÉDIO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		AMP. DE PICO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		AMP. TOTAL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		AMP. INTERQUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	94%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%	
		MIDHINJE	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	81%	
FORMA	DESVIO MÉDIO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	75%		
	VARIÂNCIA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	DESVIO PADRÃO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	88%		
	COEF. DE VARIAÇÃO	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	75%		
	ASSIMETRIA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	CURTÓSE	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	75%		
	M. DE 6º ORDEM	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
DADOS SIMBÓLICOS	COEF. QUART. ASS.	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	88%		
	COEF. PERC. CURTOSE	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	81%		
	FATOR DE CRISTA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	69%		
	FATOR K	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	1º COEF. PEARSON	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	2º COEF. PEARSON	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	1º CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	88%		
	2º CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	94%		
	3º CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	75%		
	4º CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	5º CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	81%		
	6º CAT. DA ADS	1	50%	0	0%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	56%		
	7º CAT. DA ADS	1	50%	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	63%		
	8º CAT. DA ADS	2	100%	0	0%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	63%		
	9º CAT. DA ADS	1	50%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	44%		
	10º CAT. DA ADS	2	100%	0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	75%		
	11º CAT. DA ADS	2	100%	0	0%	2	100%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	56%		
12º CAT. DA ADS	2	100%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	50%			
13º CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	38%			
14º CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	2	100%	1	50%	0	0%	1	50%	1	50%	31%			
15º CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	1	50%	13%			
16º CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	1	50%	13%			
17º CAT. DA ADS	-	-	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%			
MÉDIA ANÁLISE		88%		71%		67%		97%		82%		76%		47%		62%		71%		

Tabela C.30 – Resultados do teste *Scott-Knott* para identificação de grandes variações entre estados danos, considerando parâmetros no domínio do tempo.

ANÁLISE DE GRANDES VARIAÇÕES ENTRE ESTADOS DE DANO																		
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA		VIGA		SHEAR I		SHEAR II		SHEAR II		PÁ EÓLICA		BENCHMARK			
		EXCITAÇÃO	IMPACTO		SHAKER (RB)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		SHAKER X (SEN)		IMPACTO (10s)		SHAKER (RB)			
		VARIACÃO	0 - 32 mm		0 - 32 mm		0 - 6 kg		0 - 6 kg		0 - 6 kg		0 - 430 g		0 - 1.1 ³ +3 ³ +vg			
		REPETIÇÕES	180		180		22		44		45		44		27			
nd / ANÁLISE		2	IA	2	IB	2	ID	2	IF	2	IG	2	II	2	IN	Média Par.	Média Tipo	
PARÂMETROS		ACERTOS (n° / %)																
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	79%	91%
		EXTREMO MÁXIMO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		1º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
	POSICÃO	3º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	70%
		MÉDIA ARITMÉTICA	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	64%	
		MÉDIA HARMÔNICA	0	0%	0	0%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	36%	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0%	0	0%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	57%	
		MÉDIA DOS QUAD.	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
		2º QUARTIL	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	DISPERSÃO	MODA	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	57%	88%
		PONTO MÉDIO	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	71%	
		AMP. DE PICO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
		AMP. TOTAL	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	86%	
		AMP. INTERQUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%	
		AMP. DE PERCENTIS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	93%	
		MIDHINGE	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	79%	
DESVIO MÉDIO		2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	100%		
VARIÂNCIA		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%		
DESVIO PADRÃO		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%		
FORMA	COEF. DE VARIAÇÃO	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	64%	81%	
	ASSIMETRIA	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%		
	CURTOSE	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%		
	M. DE 6º ORDEM	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%		
	COEF. QUART. ASS.	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	79%		
	COEF. PERC. CURTOSE	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%		
	FATOR DE CRISTA	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	71%		
	FATOR K	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%		
	1º COEF. PEARSON	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	1	50%	50%		
	2º COEF. PEARSON	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%		
DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	0	0%	0	0%	1	50%	43%	67%	
	2ª CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	2	100%	1	50%	0	0%	0	0%	2	100%	50%		
	3ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%	2	100%	86%		
	4ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%		
	5ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%		
	6ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	86%		
	7ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%		
	8ª CAT. DA ADS	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	71%		
	9ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	86%		
	10ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	1	50%	71%		
	11ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%		
	12ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	79%		
	13ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	1	50%	0	0%	2	100%	64%		
14ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	0	0%	0	0%	2	100%	57%			
15ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%		0%	-	-	-	-	-	-	1	50%	63%			
16ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%		0%	-	-	-	-	-	-	1	50%	13%			
17ª CAT. DA ADS	-	-	0	0%		0%	-	-	-	-	-	-		0%	0%			
MÉDIA ANÁLISE			78%		87%		79%		67%		81%		80%		72%	76%		

Tabela C.31 – Resultados do teste *Scott-Knott* para identificação de grandes variações entre estados danos, considerando parâmetros no domínio da frequência.

ANÁLISE DE GRANDES VARIAÇÕES ENTRE ESTADOS DE DANO																	
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA	VIGA	VIGA	SHEAR I	SHEAR II	SHEAR II	PÁ EÓLICA	BENCHMARK					Média Par.	Média Tipo		
		EXCITAÇÃO	IMPACTO	SHAKER (RB)	IMPACTO (10s)	IMPACTO (10s)	SHAKER X (SEN)	IMPACTO (10s)	SHAKER (RB)								
		VARIAÇÃO	0 - 32 mm	0 - 32 mm	0 - 6 kg	0 - 6 kg	0 - 6 kg	0 - 430 g	0 - 1.1 ^o +3 ^o +vg								
		REPETIÇÕES	180	180	22	44	45	44	27								
		nd / ANÁLISE	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
		PARÂMETROS	IA	IB	ID	IF	IG	II	IN								
ACERTOS (n° / %)																	
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%
		EXTREMO MÁXIMO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	93%
		1º QUARTIL	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	86%
	POSICÃO	3º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
		MÉDIA ARITMÉTICA	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
		MÉDIA HARMÔNICA	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	86%
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
		MÉDIAS DOS QUAD.	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
	DISPERSÃO	2º QUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
		MODA	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%
		PONTO MÉDIO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	93%
		AMP. DE PICO	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	93%
		AMP. TOTAL	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	93%
		AMP. INTERQUARTIL	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
		AMP. DE PERCENTIS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%
		MIDHINGE	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%
DESVIO MÉDIO		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
VARIÂNCIA		2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
FORMA	DESVIO PADRÃO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	93%	
	COEF. DE VARIAÇÃO	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	ASSIMETRIA	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	79%	
	CURTOSE	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	M. DE 6º ORDEM	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	86%	
	COEF. QUART. ASS.	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	71%	
	COEF. PERC. CURTOSE	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	FATOR DE CRISTA	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	86%	
	FATOR K	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	93%	
	1º COEF. PEARSON	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	2º COEF. PEARSON	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	79%	
DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	86%	
	2ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	2	100%	86%	
	3ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	79%	
	4ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	1	50%	86%	
	5ª CAT. DA ADS	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	6ª CAT. DA ADS	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	7ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	93%	
	8ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	2	100%	1	50%	86%	
	9ª CAT. DA ADS	2	100%	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	0	0%	1	50%	57%	
	10ª CAT. DA ADS	2	100%	2	100%	2	100%	1	50%	2	100%	0	0%	1	50%	71%	
	11ª CAT. DA ADS	0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%	1	50%	64%	
12ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	2	100%	1	50%	2	100%	1	50%	1	50%	50%		
13ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%	0	0%	43%		
14ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	1	50%	1	50%	0	0%	0	0%	0	0%	14%		
15ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	0%		
16ª CAT. DA ADS	0	0%	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%		
17ª CAT. DA ADS	-	-	0	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%		
MÉDIA ANÁLISE			80%	85%	94%	70%	97%	73%	69%	78%							

Tabela C.32 – Avaliação da taxa de falsos positivos do teste *Scott-Knott*, considerando parâmetros no domínio do tempo.

ANÁLISE DE FALSOS POSITIVOS																			
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		VIGA		PÁEÓLICA		SHEAR I		SHEAR II		SHEAR II		BENCHMARK		PONTE			
		EXCITAÇÃO		IMPACTO	SHAKER	IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		SHAKER X (SEN)	SHAKER (RB)		TREM				
		VARIACÃO		MASSA E FURO		MASSA		MASSA		MASSA		RIGIDEZ		REPARO					
		REPETIÇÕES		90	90	22		11		22		22		13		30			
nd / ANÁLISE		1	AFP5	1	BFP5	1	IFP2	1	DFP10	1	FFP4	1	GFP2	1	MFP1	1	OFF0		
PARÂMETROS		ACERTOS (n° / %)																	
DOMÍNIO DO TEMPO	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		EXTREMO MÁXIMO	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		1º QUARTIL	1	OK	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	POSICÃO	3º QUARTIL	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
		MÉDIA ARITMÉTICA	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
		MÉDIA HARMÔNICA	0	0	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0
		MÉDIA GEOMÉTRICA	0	0	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0
		MÉDIA DOS QUAD.	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		2º QUARTIL	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0
		MODA	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0
		PONTO MÉDIO	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
		DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK
	AMP. TOTAL		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	AMP. INTERQUARTIL		1	OK	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	AMP. DE PERCENTIS		1	OK	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	MIDHINGE		2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
	DESVIO MÉDIO		1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
	VARIÂNCIA		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	DESVIO PADRÃO		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	COEF. DE VARIACÃO	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	
	FORMA	ASSIMETRIA	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		CURTOSE	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		M. DE 6º ORDEM	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		COEF. QUART. ASS.	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	2
		COEF. PERC. CURTOSE	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		FATOR DE CRISTA	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
		FATOR K	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
		1º COEF. PEARSON	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0
		2º COEF. PEARSON	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
		DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	2	FP	1	OK	0	0	0	0	1	OK	0	0	1
	3ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0	0	0
	4ª CAT. DA ADS		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	5ª CAT. DA ADS		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	6ª CAT. DA ADS		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	7ª CAT. DA ADS		1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
	8ª CAT. DA ADS		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
	9ª CAT. DA ADS		1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0
	10ª CAT. DA ADS		2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
11ª CAT. DA ADS	1		OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
12ª CAT. DA ADS	2		FP	2	FP	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	
13ª CAT. DA ADS	2		FP	0	0	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
14ª CAT. DA ADS	0		0	0	0	0	0	1	OK	0	0	0	0	1	OK	1	OK	0	
15ª CAT. DA ADS	0		0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	1	OK	0	0	0	
16ª CAT. DA ADS	0		0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	
17ª CAT. DA ADS	-		-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	
QUANT. FP / ESTRUTURA		25		24		6		3		1		0		0		0		59	
% FP / ESTRUTURA		42%		41%		10%		5%		2%		0%		0%		0%			

Tabela C.33 – Avaliação da taxa de falsos positivos do teste *Scott-Knott*, considerando parâmetros no domínio da frequência.

ANÁLISE DE FALSOS POSITIVOS																				
DOMÍNIO	TIPO	ESTRUTURA		VIGA		PÁEÓLICA		SHEAR I		SHEAR II		SHEAR II		BENCHMARK		PONTE				
		EXCITAÇÃO		IMPACTO	SHAKER	IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		IMPACTO (10s)		SHAKER X (SEN)	SHAKER (RB)	RIGIDEZ		TREMO				
		VARIACÃO		MASSA E FURO		MASSA										REPARO				
		REPETIÇÕES		90	90	22	11	22	22	13	30									
nd / ANÁLISE		1	AFP5	1	BFP5	1	IFP2	1	DFP10	1	FFP4	1	GFP2	1	MFP1	1	OFF0			
PARÂMETROS		ACERTOS (n° / %)																		
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	SEP.	EXTREMO MÍNIMO	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	2	FP	1	OK	3	
		EXTREMO MÁXIMO	2	FP	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	3	
		1º QUARTIL	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
	POSICÃO	3º QUARTIL	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
		MÉDIA ARITMÉTICA	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
		MÉDIA HARMÓNICA	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	2	
		MÉDIA GEOMÉTRICA	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
		MÉDIA DOS QUAD.	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	1	
		RAIZ QUAD. DA MÉDIA	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	
		2º QUARTIL	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	
		MODA	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	2	FP	1	OK	3	
		PONTO MÉDIO	2	FP	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	3	
		DISPERSÃO	AMP. DE PICO	2	FP	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	3
			AMP. TOTAL	2	FP	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	3
			AMP. INTERQUARTIL	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
			AMP. DE PERCENTIS	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2
			MIDHINGE	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1
DESVIO MÉDIO	2		FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	2		
VARIÂNCIA	1		OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
DESVIO PADRÃO	2		FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2		
COEF. DE VARIACÃO	2		FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	3		
COEF. DE VARIACÃO	2		FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	3		
FORMA	ASSIMETRIA	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	3		
	CURTOSE	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
	M. DE 6º ORDEM	2	FP	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	3		
	COEF. QUART. ASS.	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	3		
	COEF. PERC. CURTOSE	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2		
	FATOR DE CRISTA	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2		
	FATOR K	2	FP	2	FP	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	3		
	1º COEF. PEARSON	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	2	FP	4		
	2º COEF. PEARSON	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
	DADOS SIMBÓLICOS	1ª CAT. DA ADS	2	FP	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2	
2ª CAT. DA ADS		1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
3ª CAT. DA ADS		1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
4ª CAT. DA ADS		2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	2	FP	1	OK	1	OK	1	OK	2		
5ª CAT. DA ADS		1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0		
6ª CAT. DA ADS		1	OK	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	0		
7ª CAT. DA ADS		2	FP	2	FP	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	2		
8ª CAT. DA ADS		1	OK	2	FP	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
9ª CAT. DA ADS		0	0	2	FP	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	1	OK	1	OK	1		
10ª CAT. DA ADS		0	0	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	0		
11ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	0		
12ª CAT. DA ADS		0	0	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	0		
13ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	0	0	0	0	1	OK	1	OK	0	0	1	OK	0		
14ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0		
16ª CAT. DA ADS		0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0		
17ª CAT. DA ADS		-	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0		
QUANT. FP / ESTRUTURA		30		23		1		6		1		5		2		4		72		
% FP / ESTRUTURA		42%		32%		1%		8%		1%		7%		3%		6%				

APÊNDICE D

ANÁLISES REALIZADAS COM O *K-MEANS*

Neste apêndice, são apresentadas as tabelas com os resultados comparativos entre os diferentes grupos de parâmetros analisados neste trabalho, obtidos por meio da aplicação do algoritmo *k-means*.

Tabela D.1 – Resultados dos grupos de parâmetros por *k-means* – parte 1.

K-MEANS	AUTOR												SANTOS et al., 2017			
	CHOI; SWEETMANS, 2010				FARRAR; WORDEN, 2012				IQR							
	ESTRUTURA	DANO	PAR 12	F-DP	PAR 4	PAR 10	PAR 10	PAR 10	PAR 10	PAR 10	PAR 10	PAR 10				
	0	a1	26	96%	a2	26	96%	a1	20	74%	a1	27	100%	a2	26	96%
BENCHMARK	1	a1	8	30%	a2	9	33%	a3	14	52%	a1	5	19%	a2	9	33%
	2	a2	22	81%	a1	23	85%	a2	23	85%	a2a3	13	48%	a3	22	81%
ACC 16	MÉDIA			69%			72%			70%						70%
	0	a1	17	63%	a2	17	63%	a2	7	26%	a1	22	81%	a1	20	74%
BENCHMARK	1	a2	26	96%	a3	25	93%	a2	20	74%	a2	16	59%	a2	23	85%
	2	a3	27	100%	a1	27	100%	a1	27	100%	a3	22	81%	a3	26	96%
ACC 1	MÉDIA			86%			85%			67%						85%
	6	a1a5	9	41%	a6	14	64%	a5	22	100%	a1	22	100%	a1a2	9	41%
SHEAR	7	a4	18	82%	a4	17	77%	a5	0	0%	a1	0	0%	a3	14	64%
BUILDING 1	8	a3	14	64%	a3	7	32%	a3	16	73%	a4	15	68%	a6	8	36%
Impacto 10s	9	a6	15	68%	a3	10	45%	a1	11	50%	a5	14	64%	a6	12	55%
	10	a2	0	0%	a5	4	18%	a6	11	50%	a2	14	64%	a4	0	0%
	11	a2	22	100%	a5	20	91%	a4	10	45%	a3	12	55%	a4	15	68%
ACC 1	MÉDIA			59%			55%			53%						44%
	0	a2	33	59%	a1	37	66%	a2	55	98%	a1	55	98%	a2	30	54%
PONTE	56	a1	41	73%	a2	38	68%	a2	5	9%	a1	5	9%	a1	32	57%
ACC 3	MÉDIA			66%			67%			54%						55%

Tabela D.2 - Resultados dos grupos de parâmetros por *k-means* – parte 2.

K-MEANS		CARDOSO, 2019b		CARDOSO, 2019a		CURY, 2010		ALVES, 2012		ALVES, 2016		VASCONCELOS et al., 2024	
ESTRUTURA	DANO	IRQM		TF-IRQM		ADS 20		ADS 12		ADS 10		ADS S	
BENCHMARK	0	a3	26	a3	26	a3	26	a1	26	a2	26	a1	26
	1	a3	9	a3	9	a3	7	a1	8	a2	7	a1	7
	2	a1	22	a1	22	a2	22	a3	22	a1	22	a2	22
ACC 16	MÉDIA		70%		70%		68%		69%		68%		68%
BENCHMARK	0	a2	20	a3	20	a1	20	a1	19	a2	19	a1	21
	1	a3	23	a2	23	a3	22	a3	22	a3	22	a3	21
	2	a1	26	a1	26	a2	26	a2	26	a1	26	a2	26
ACC 1	MÉDIA		85%		85%		84%		83%		83%		84%
SHEAR BUILDING I Impacto 10s	6	a2a5	9	a1a4	9	a4	11	a5	16	a3	18	a1a4	10
	7	a6	15	a6	16	a1	20	a6	21	a6	18	a6	20
	8	a4	8	a3	20	a3	15	a4	17	a4	16	a2	15
	9	a4	11	a5	15	a2	21	a2	17	a2	21	a5	13
	10	a1	0	a2	0	a6	0	a3	18	a5	0	a3	0
ACC 1	MÉDIA		44%		57%		67%		79%		71%		59%
PONTE 56	0	a1	54	a2	54	a1	33	a2	34	a2	34	a1	32
	1	a1	3	a2	3	a2	34	a2	27	a2	27	a2	40
	ACC 3	MÉDIA			51%		60%		54%		54%		64%

APÊNDICE E

MASSAS ADICIONADAS ÀS ESTRUTURAS NOS ENSAIOS

A seguir, são apresentadas imagens das massas utilizadas nos ensaios da pá eólica e do *Shear Building*. As massas são descritas pela sua massa real e a massa aproximada adotada nas tabelas dos dados e resultados.

Figura E.1 – Massa com 9,63 g \approx 10 g.



Figura E.2 – Massa com 14,93 g \approx 15 g.



Figura E.3 – Massa com 29,74 g \approx 30 g.



Figura E.4 – Massa com 69,17 g \approx 70 g.



Figura E.5 – Massa com 130,74 g \approx 130 g.



Figura E.6 – Massa com 220,12 g \approx 220 g.



Figura E.7 – Massa com 428,99 g \approx 430 g.



Figura E.8 – Massa com 0,468 kg \approx 0,5 kg.



Figura E.9 – Massa com 0,998 kg \approx 1 kg.



Figura E.10 – Massa com 2,002 kg \approx 2 kg.



Figura E.11 – Massa com 4,992 kg \approx 5 kg.



Figura E.12 – Massa do shaker e dos sargentos utilizados (4,598 kg).



APÊNDICE F

ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS NO DOMÍNIO DO TEMPO

A seguir, são apresentados gráficos com os valores encontrados para cada um dos parâmetros extraídos dos registros de aceleração no domínio do tempo, por ensaio, para cada estado estrutural, de cada uma das principais estruturas analisadas. O gráfico inclui ainda, a linha de tendência que demonstra o comportamento do parâmetro analisado conforme ocorre o aumento de “dano”, “massa” ou o reparo da estrutura.

F.1. PARÂMETROS SEPARATRIZES

F.1.1. Extremo Mínimo

Figura F.1 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

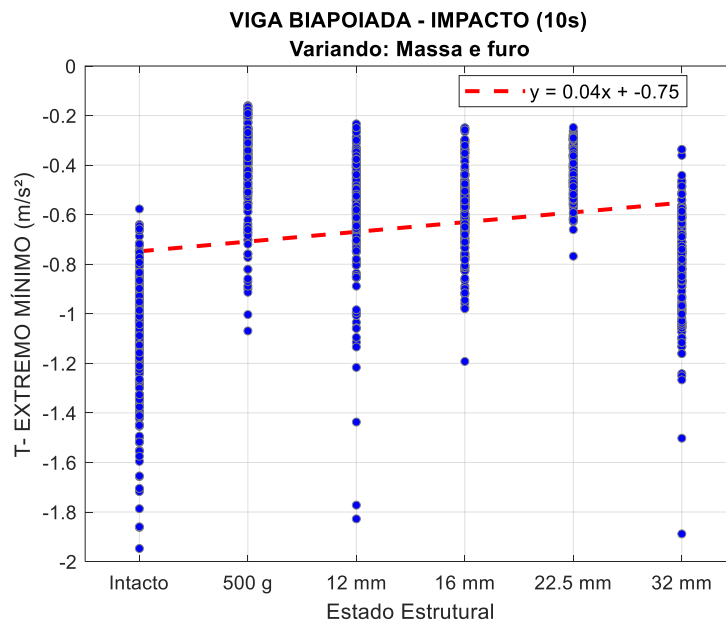


Figura F.2 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

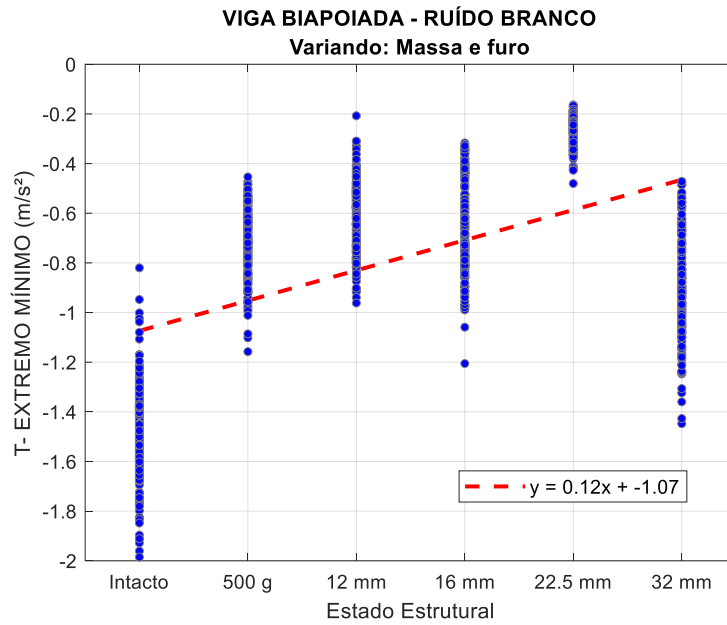


Figura F.3 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

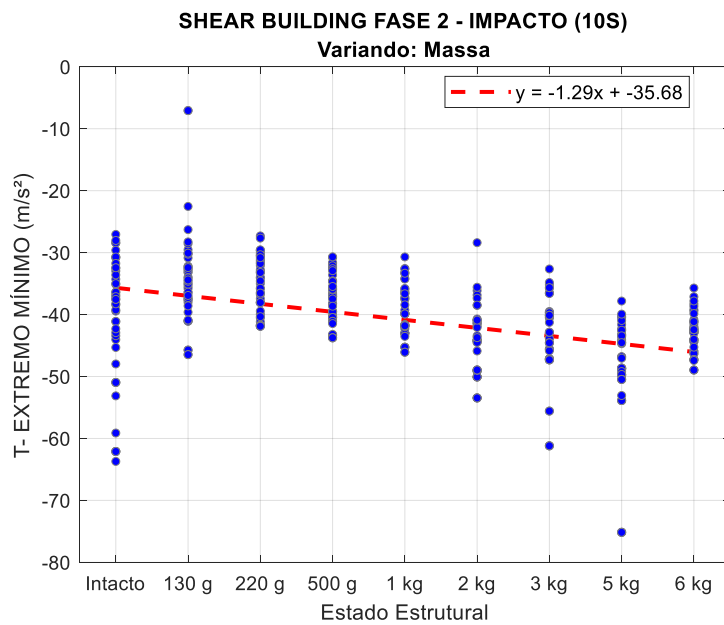


Figura F.4 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

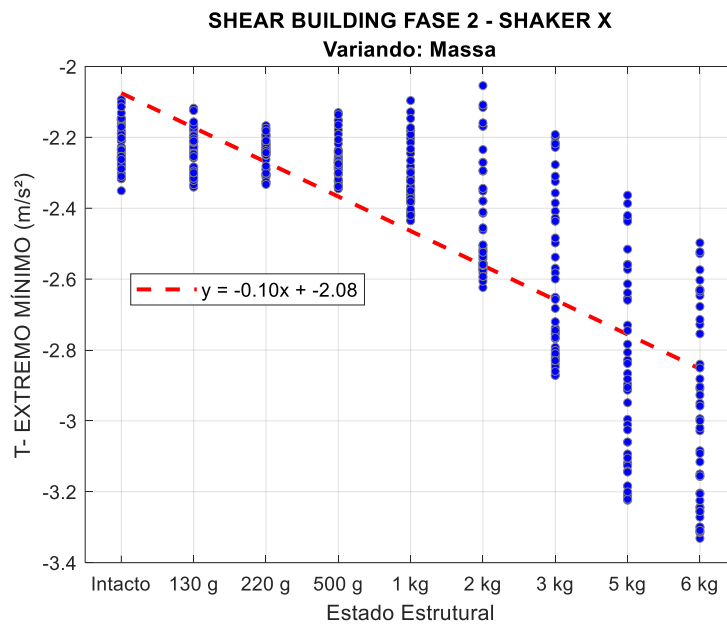


Figura F.5 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

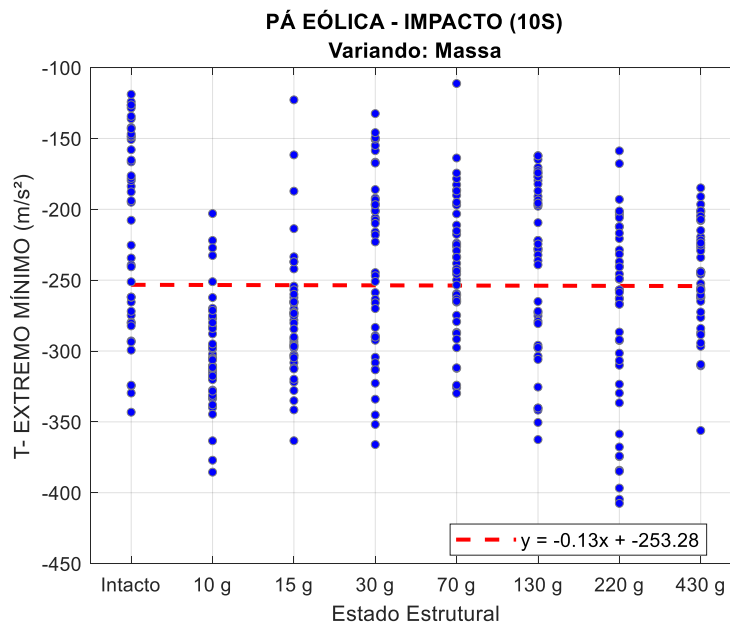


Figura F.6 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

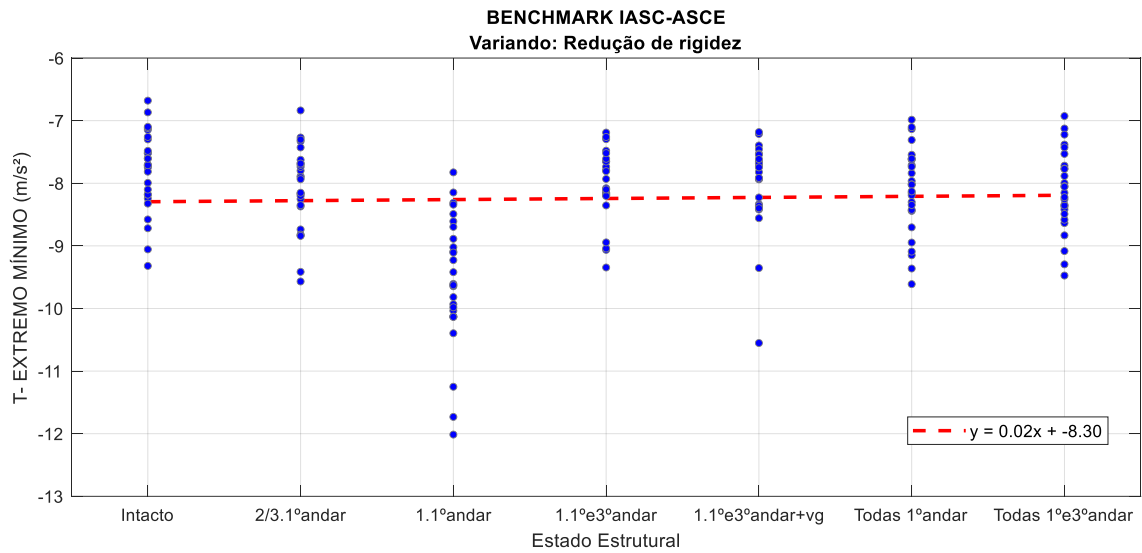
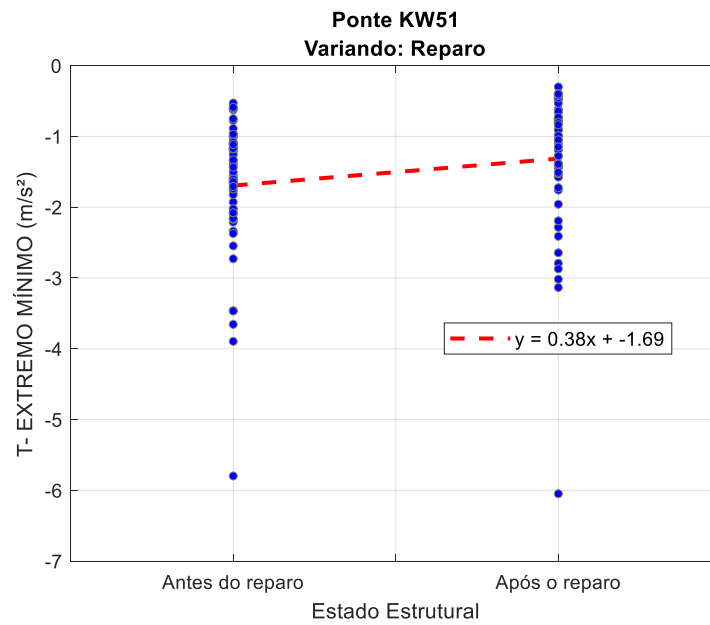


Figura F.7 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.1.2. Extremo Máximo

Figura F.8 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.0

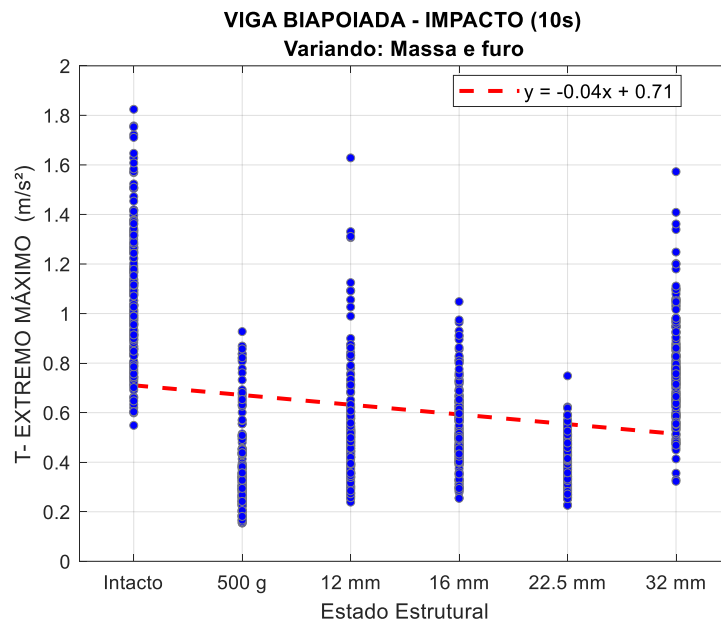


Figura F.9 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

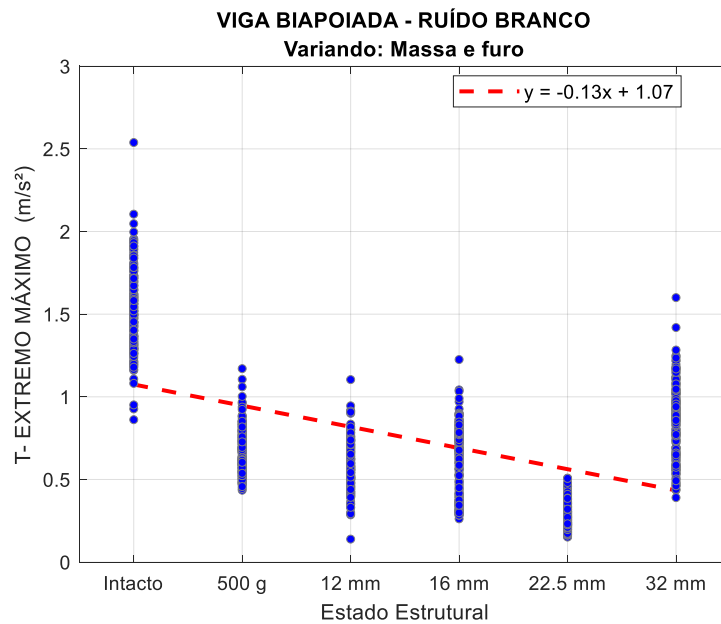


Figura F.10 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s.

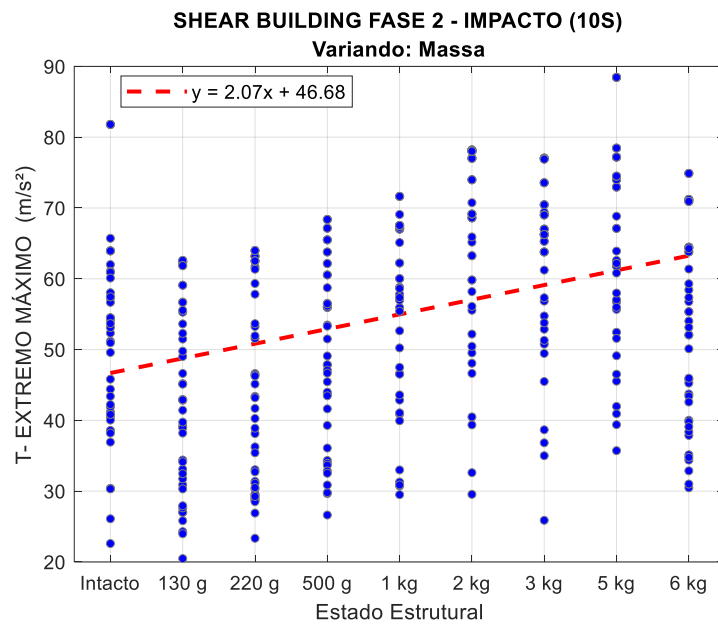


Figura F.11 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s.

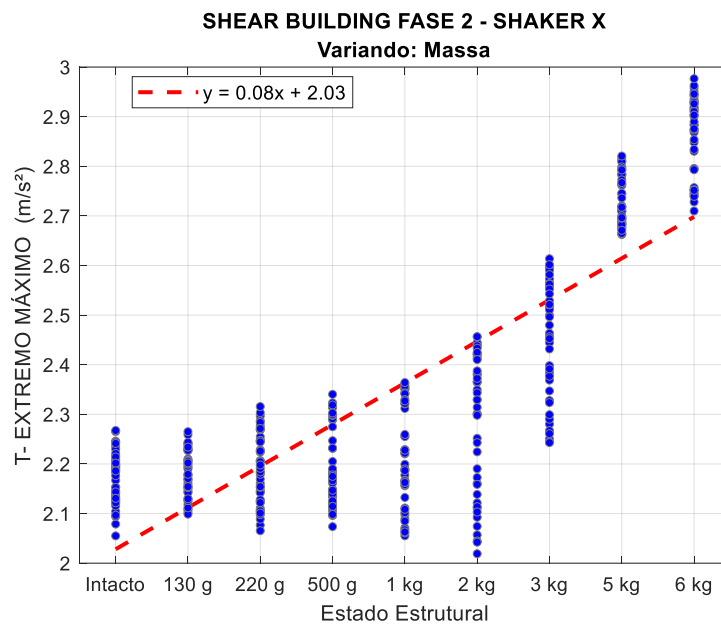


Figura F.12 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

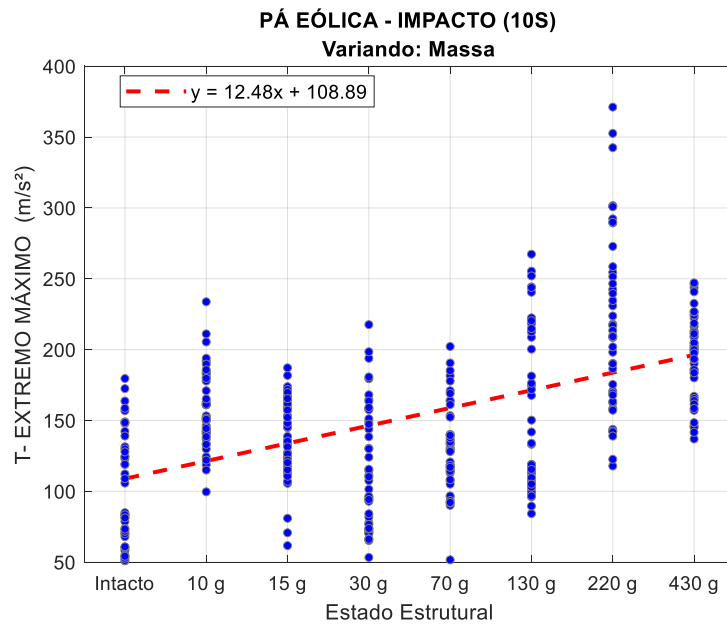


Figura F.13 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

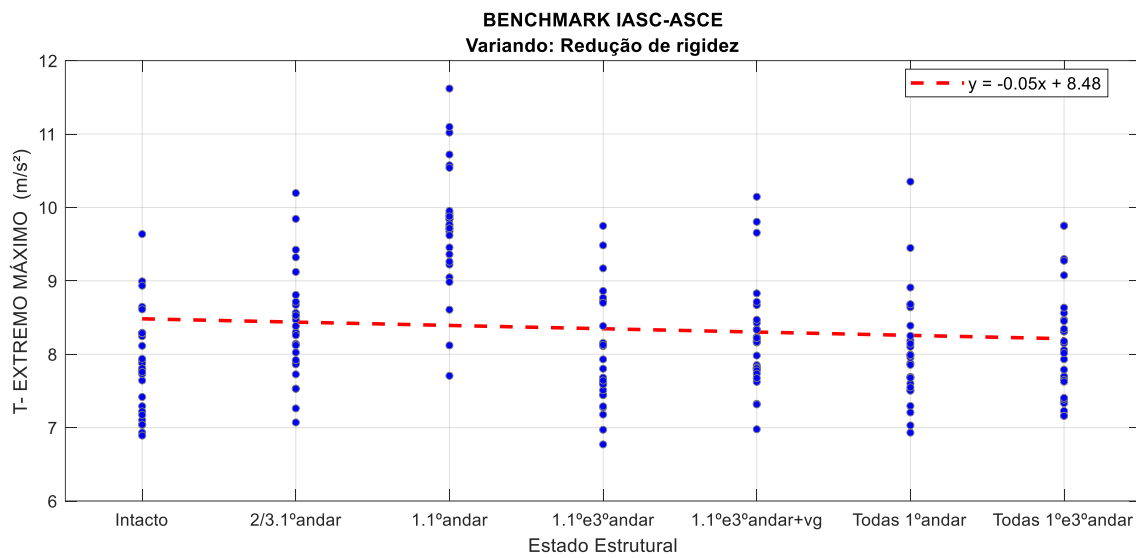
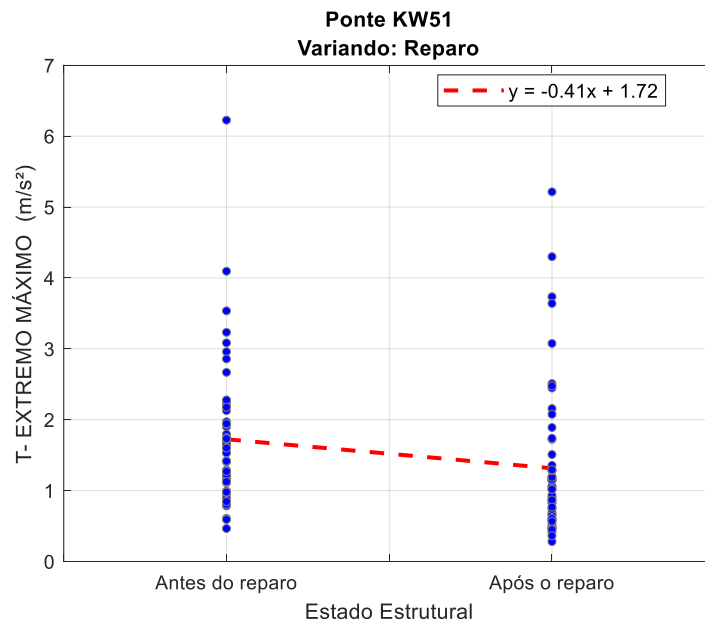


Figura F.14 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.1.3. Primeiro Quartil

Figura F.15 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

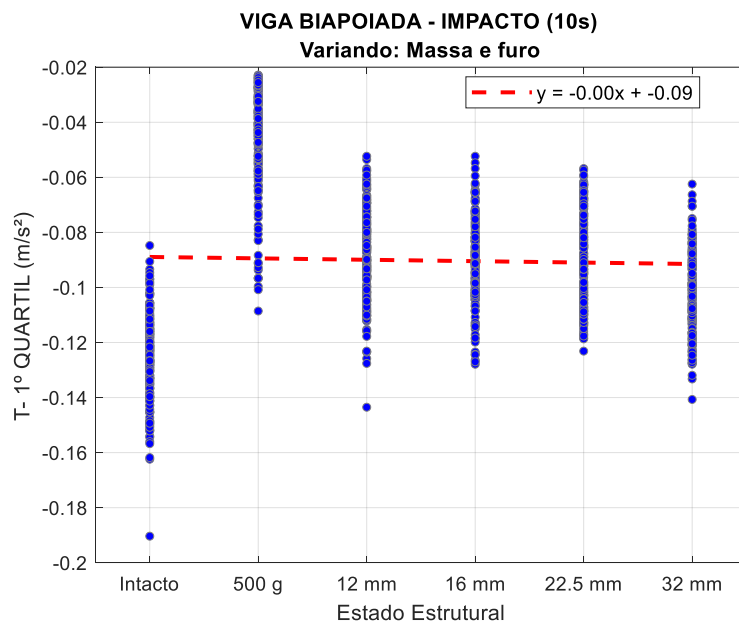


Figura F.16 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

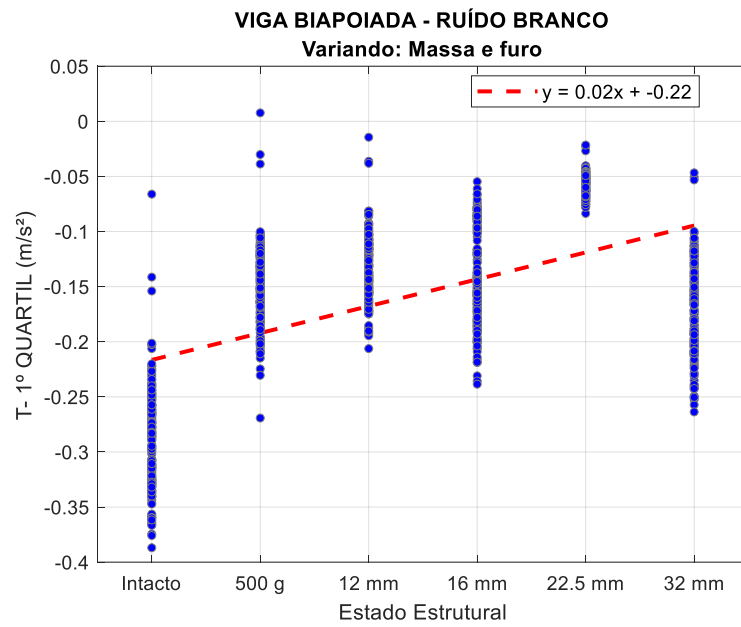


Figura F.17 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

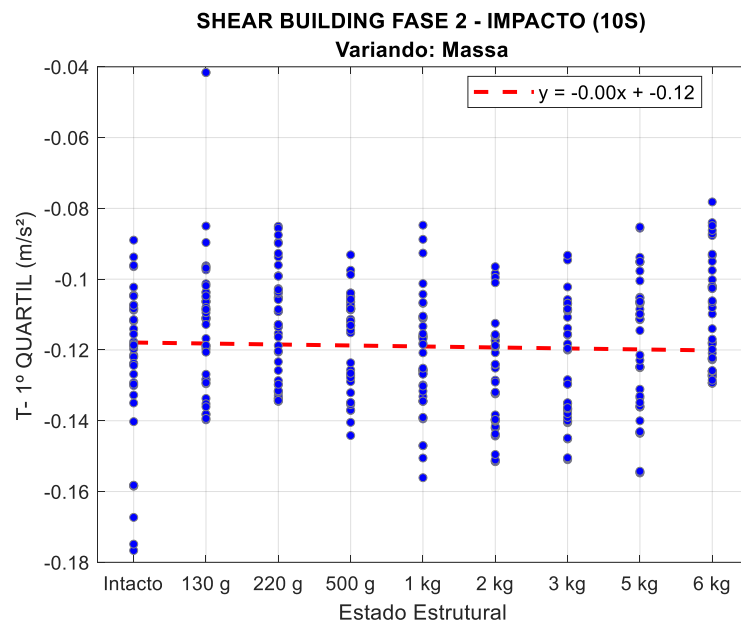


Figura F.18 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase II), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

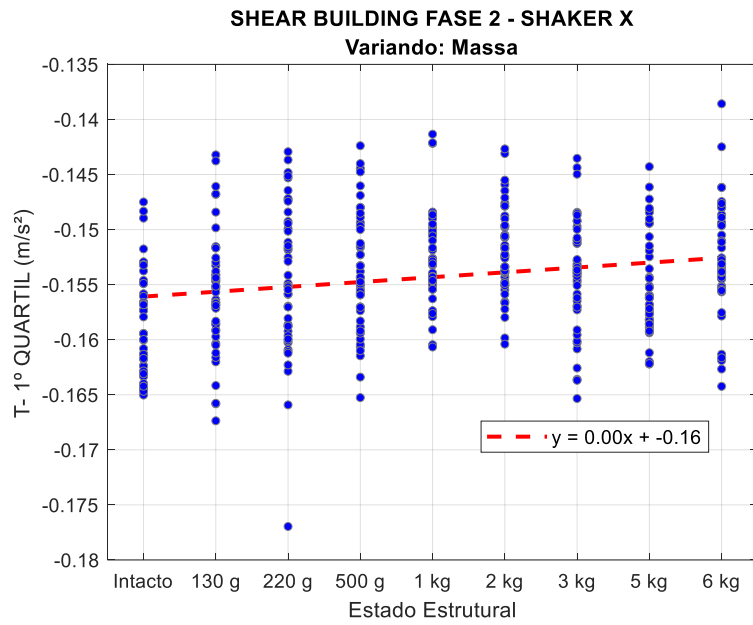


Figura F.19 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

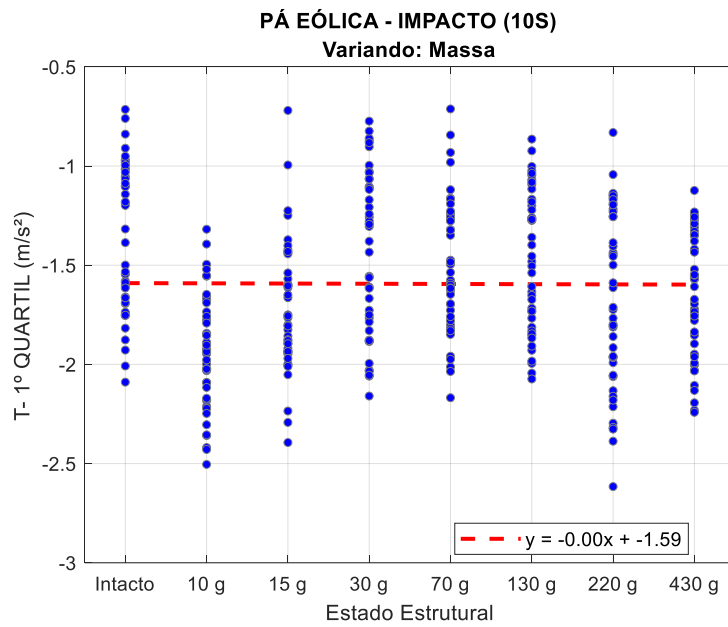


Figura F.20 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

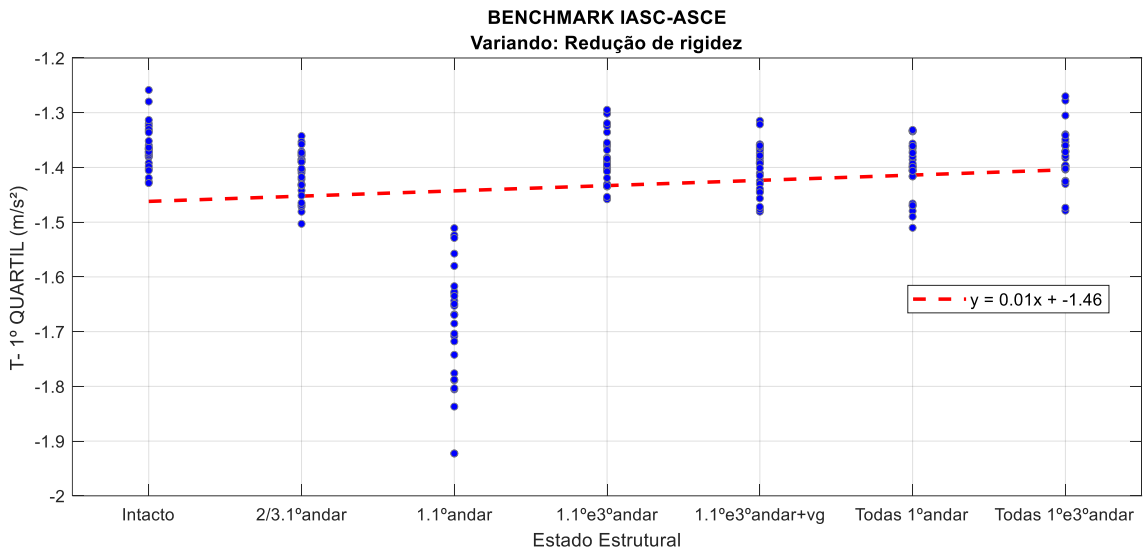
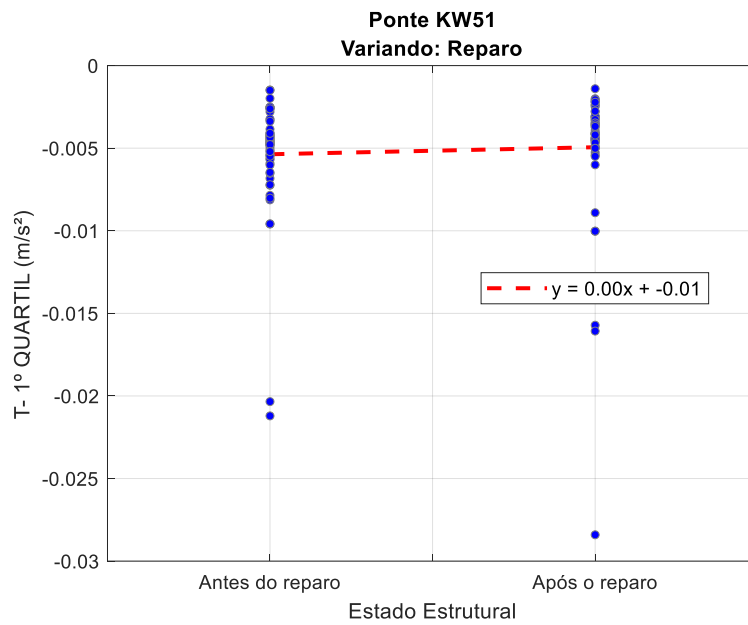


Figura F.21 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.1.4. Terceiro Quartil

Figura F.22 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoçada, sob excitação de impacto a cada 10s.

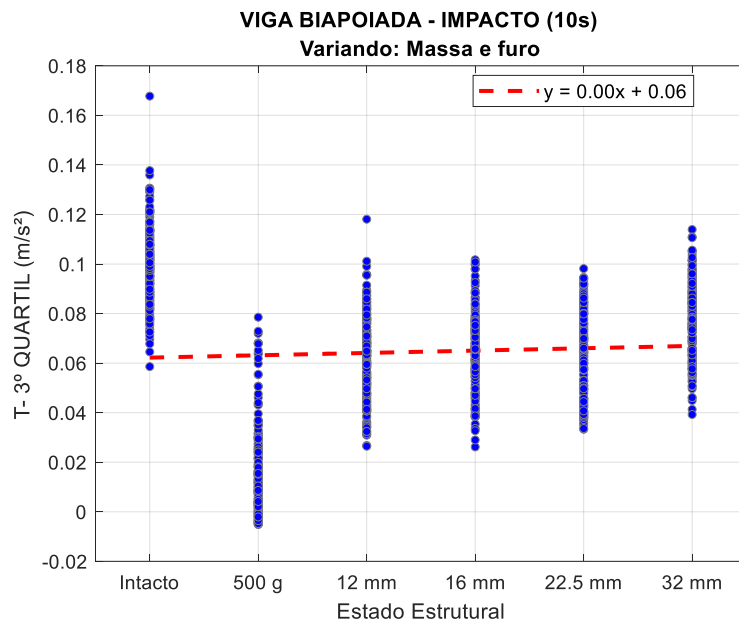


Figura F.23 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoçada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

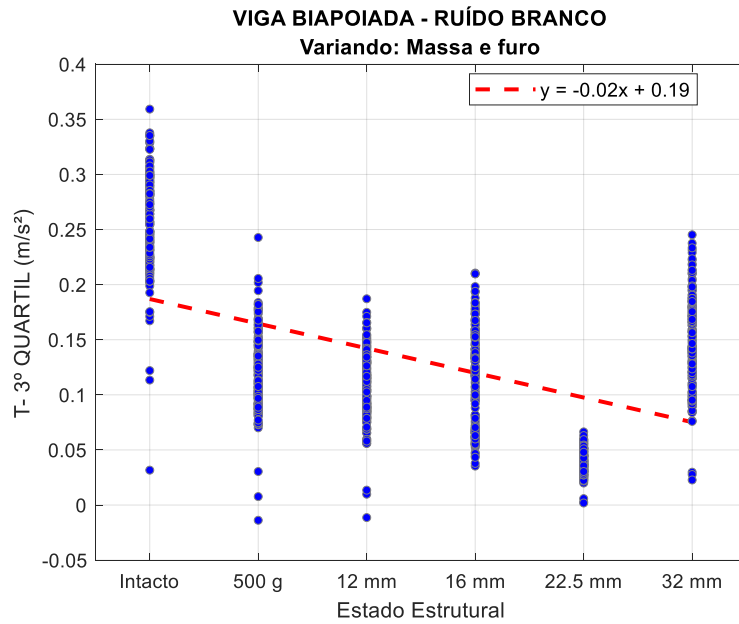


Figura F.24 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

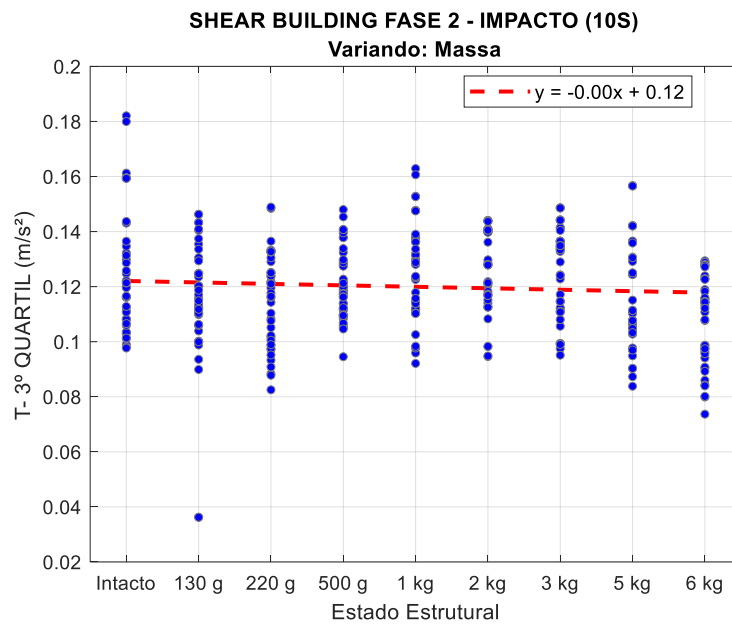


Figura F.25 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building, (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

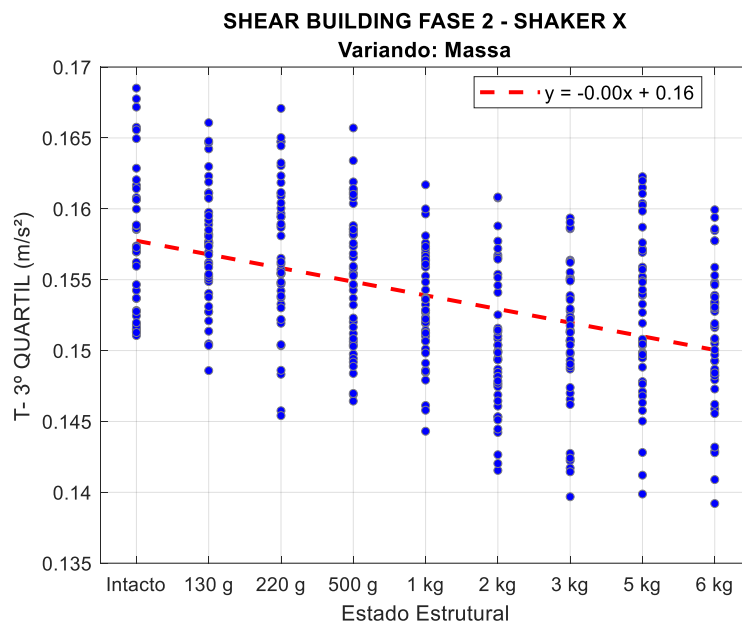


Figura F.26 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

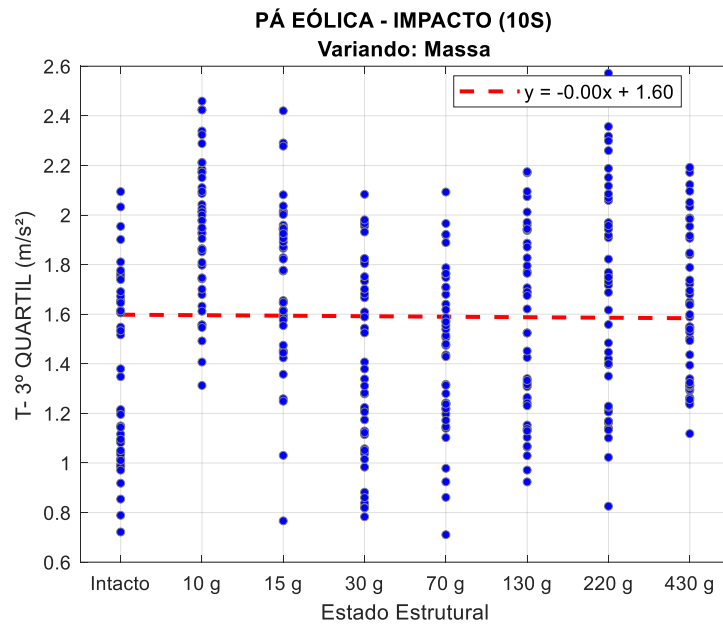


Figura F.27 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

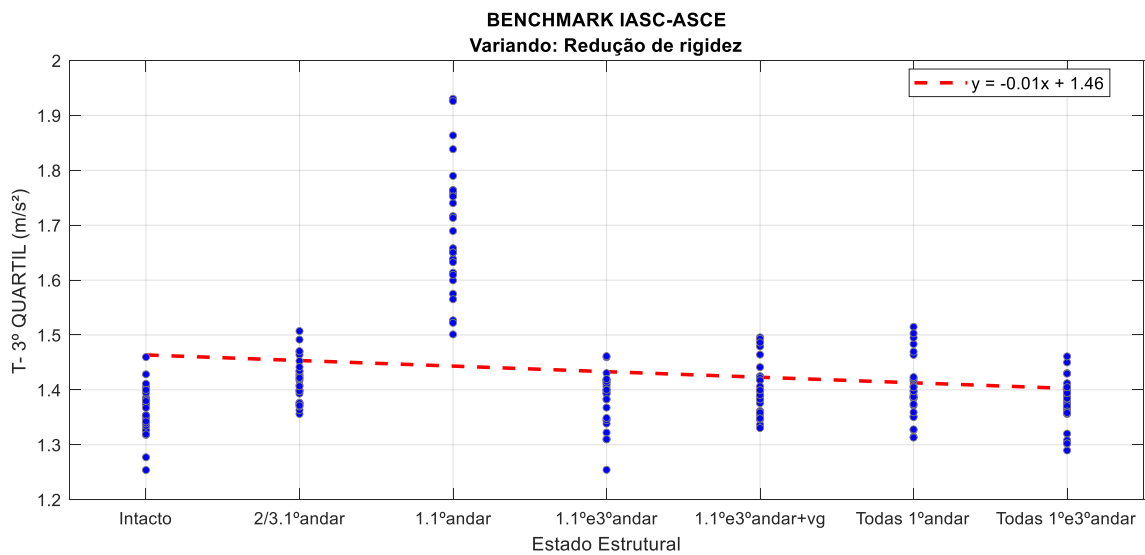
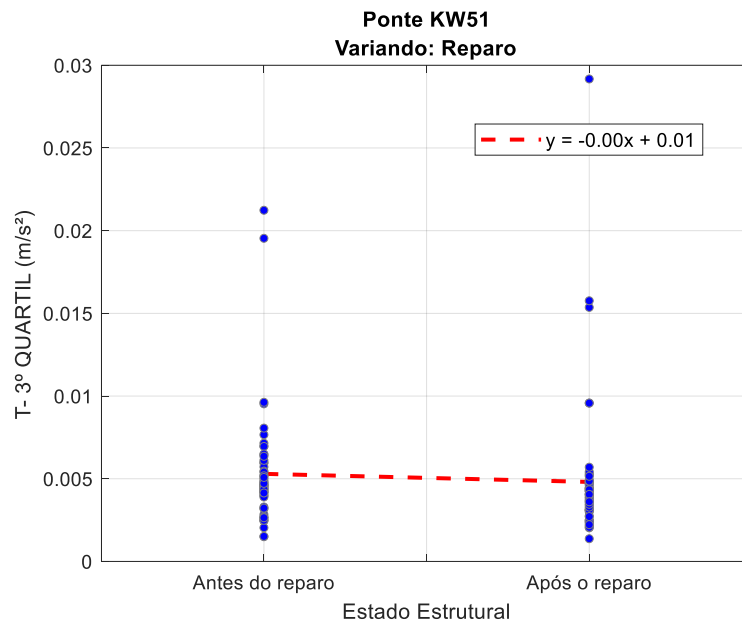


Figura F.28 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2. PARÂMETROS DE POSIÇÕES OU TENDÊNCIA CENTRAL

F.2.1. Média Aritmética

Figura F.29 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

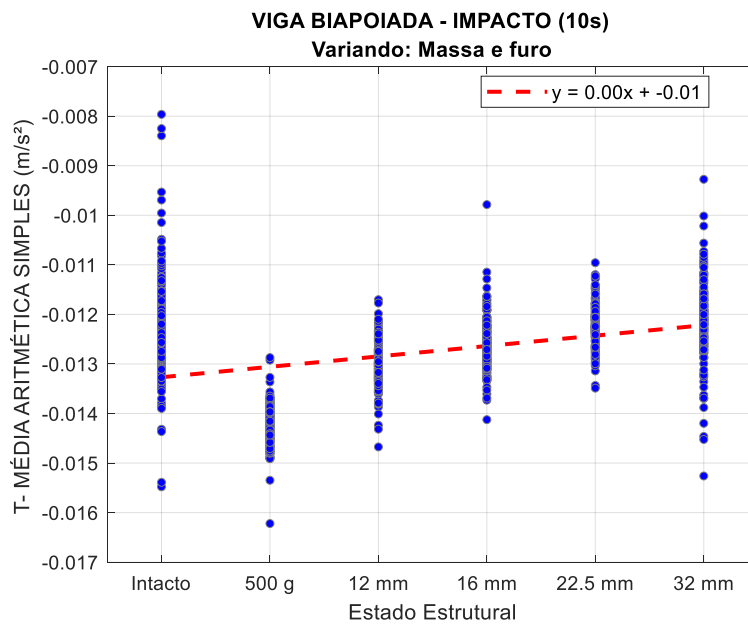


Figura F.30 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

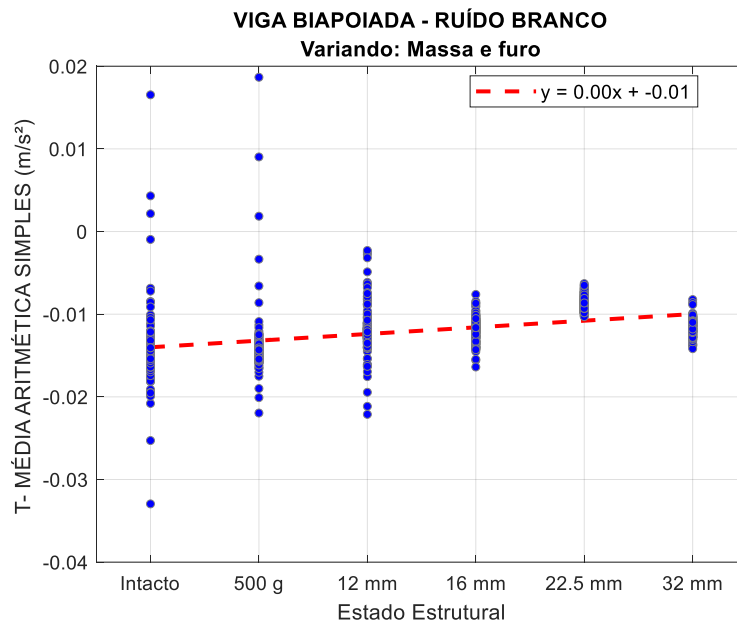


Figura F.31 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

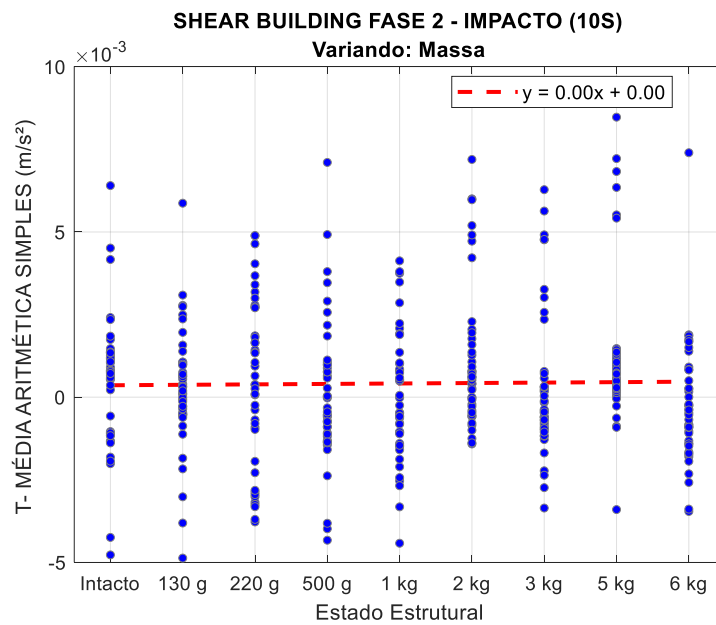


Figura F.32 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

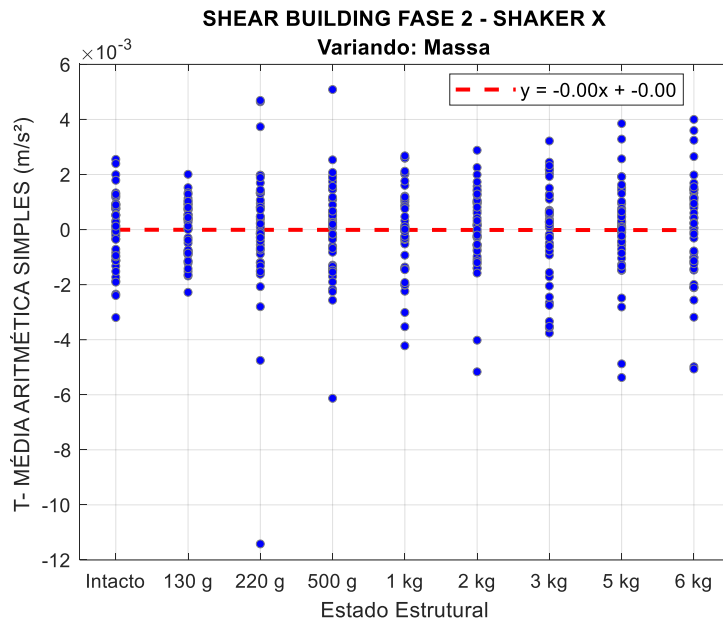


Figura F.33 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

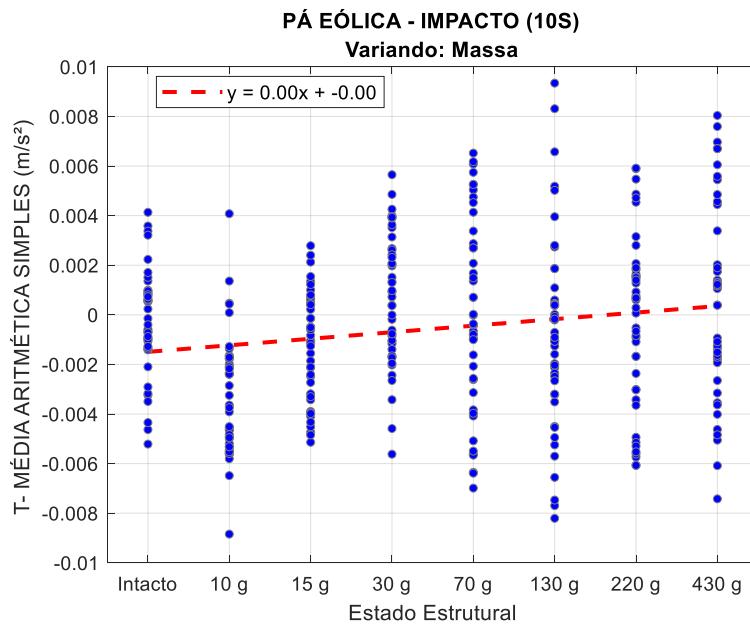


Figura F.34 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

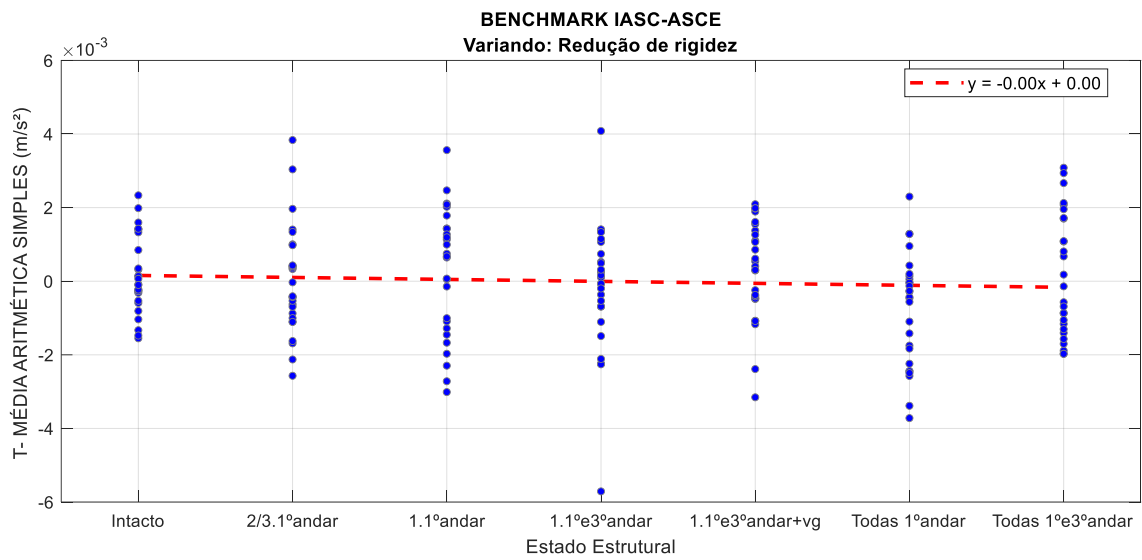
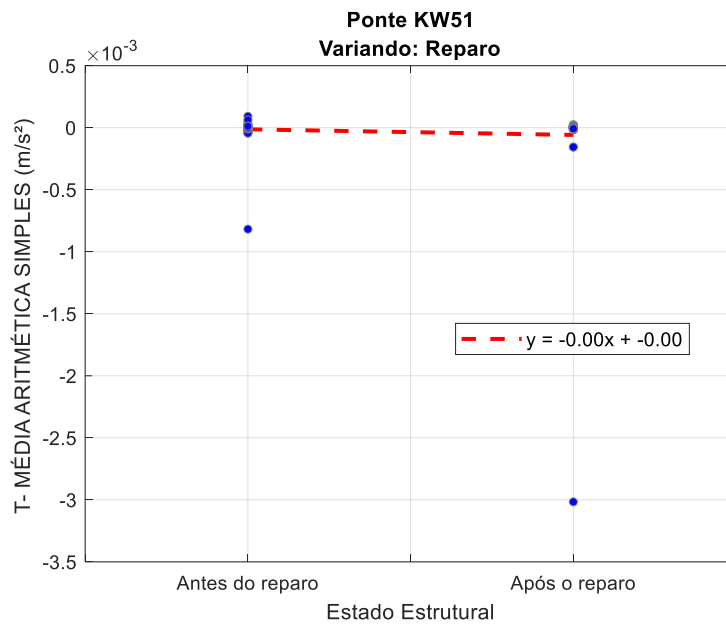


Figura F.35 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.2. Média Harmônica

Figura F.36 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

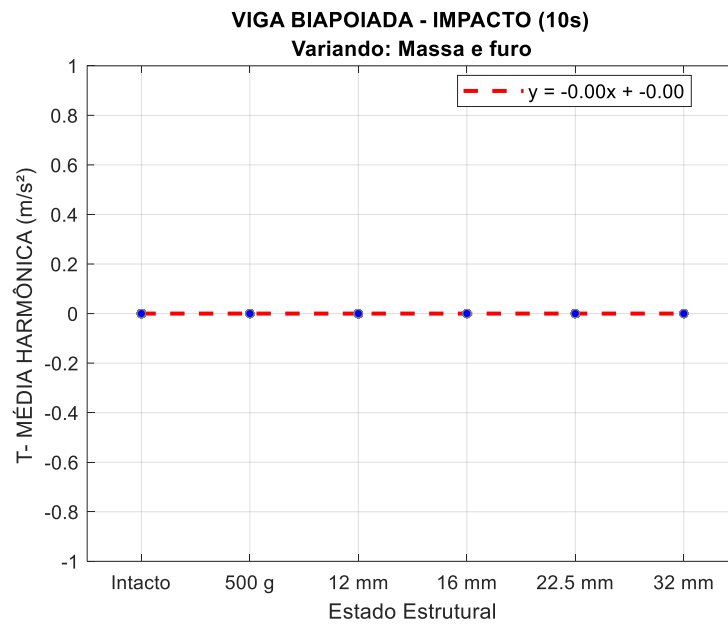


Figura F.37 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

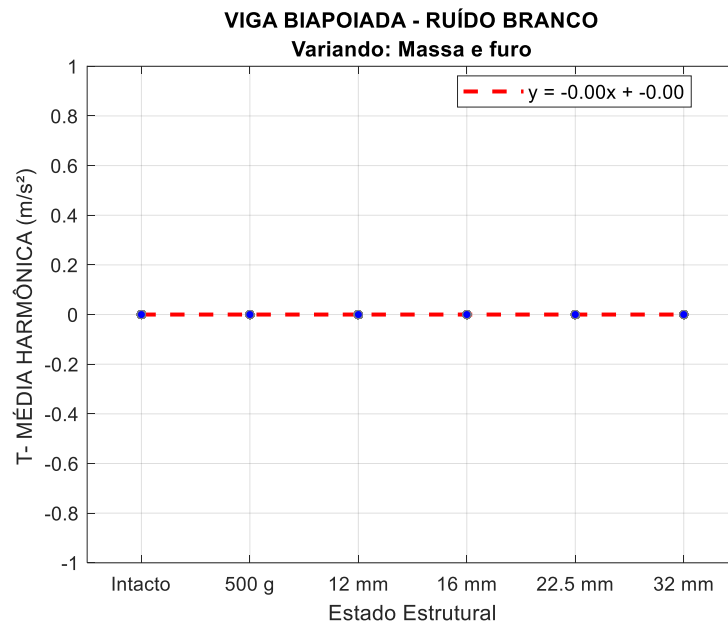


Figura F.38 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

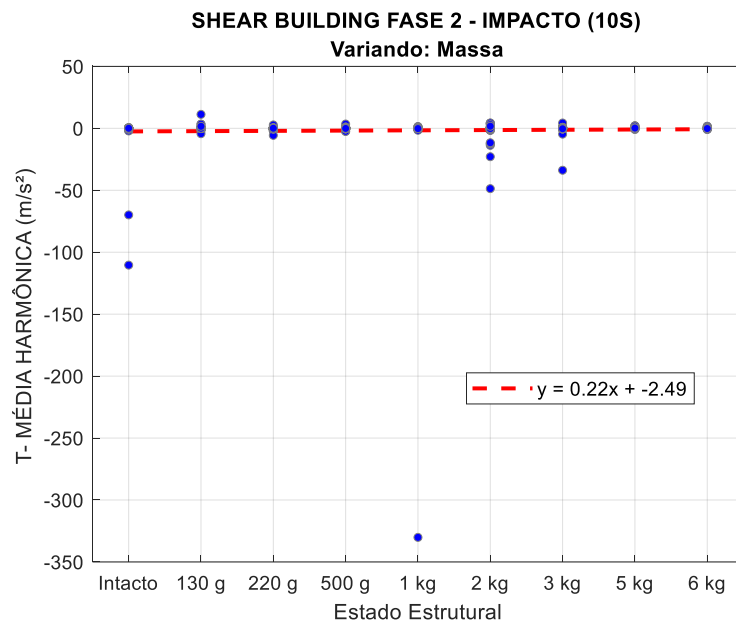


Figura F.39 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

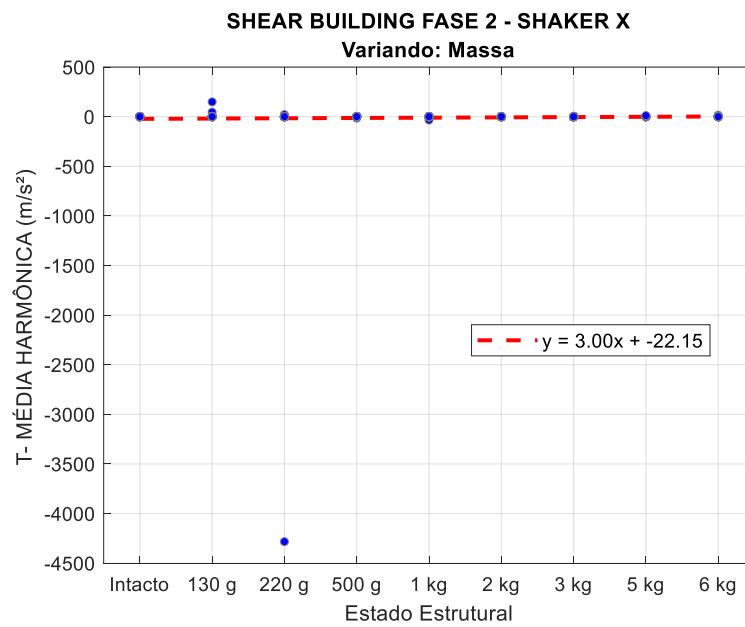


Figura F.40 – Gráfico de tendência do da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

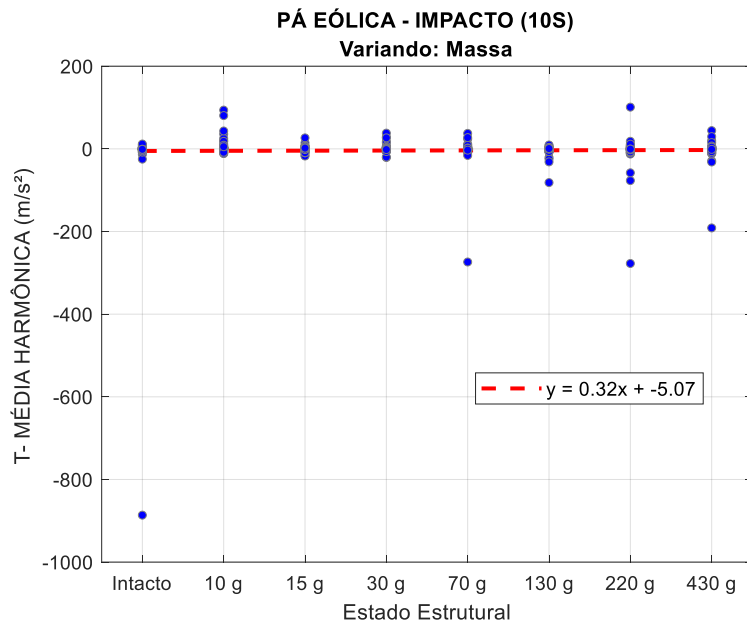


Figura F.41 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

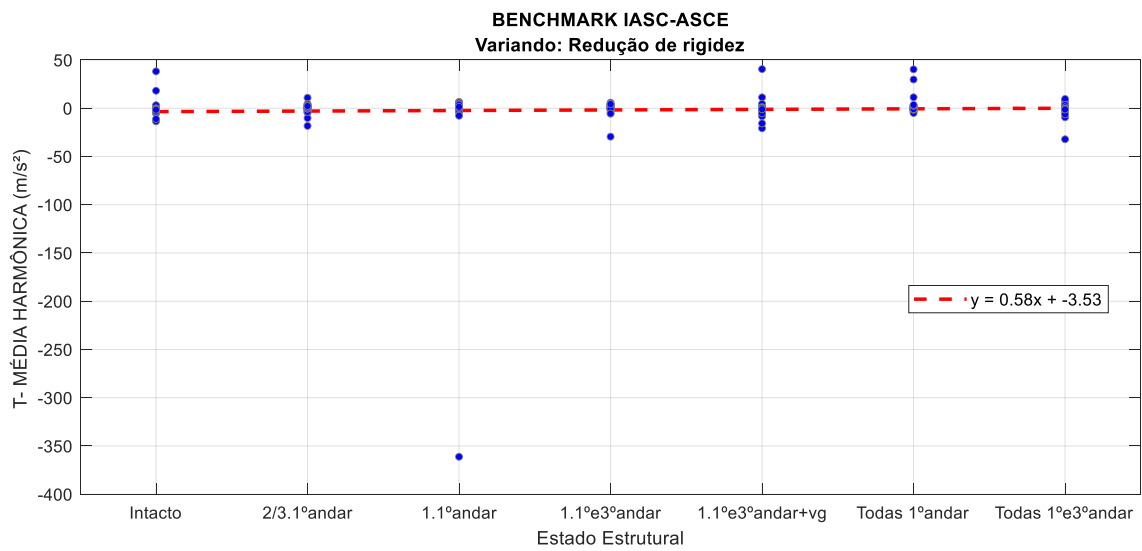
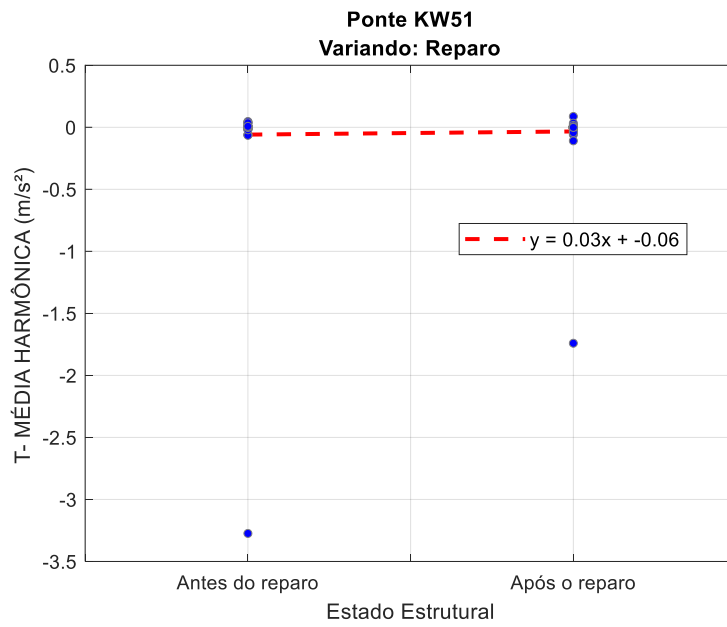


Figura F.42 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.3. Média Geométrica

Figura F.43 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

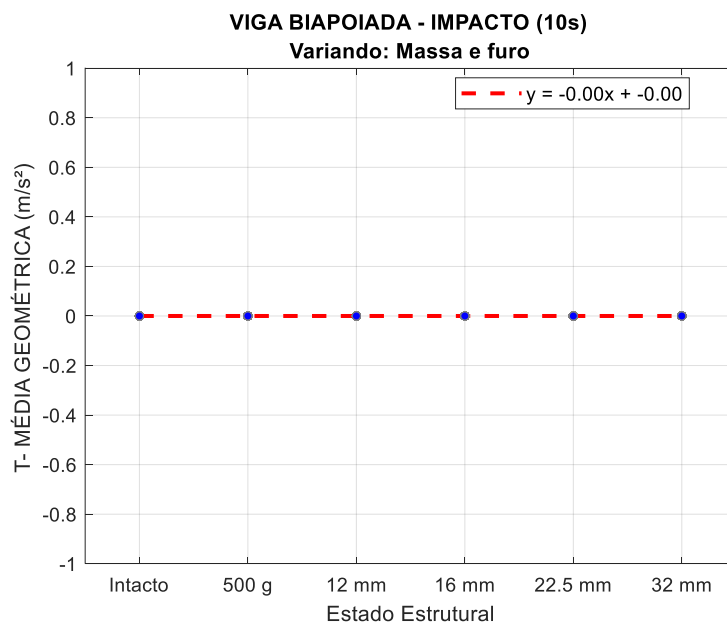


Figura F.44 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

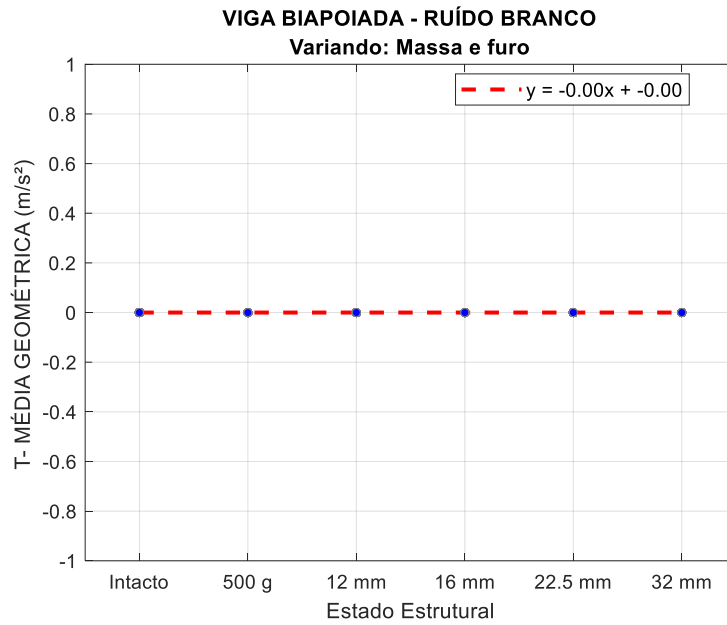


Figura F.45 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

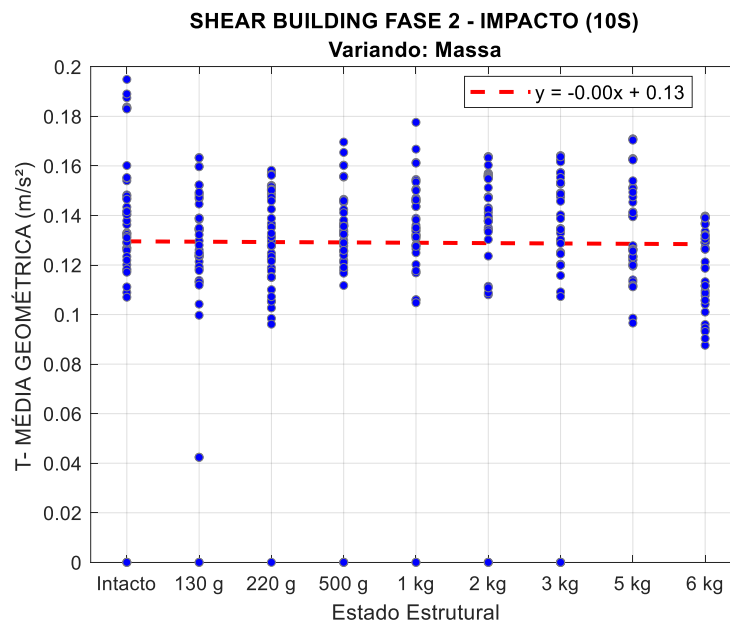


Figura F.46 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

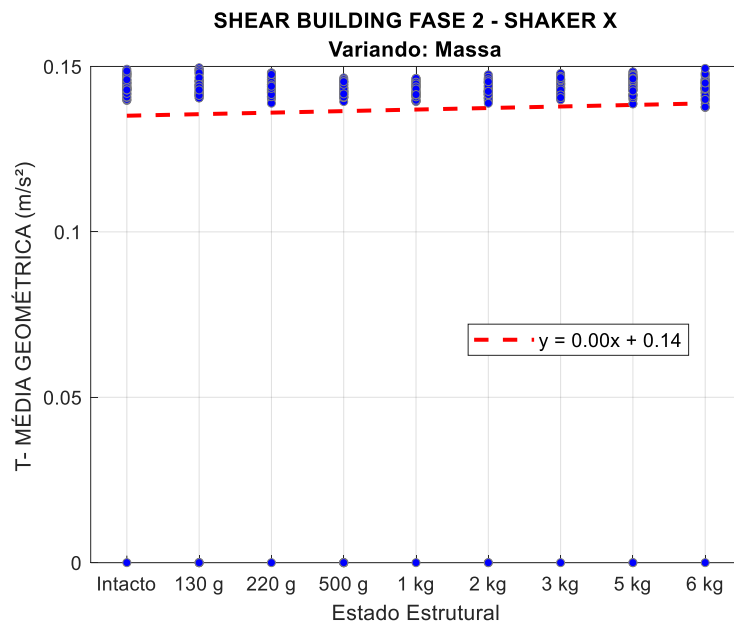


Figura F.47 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

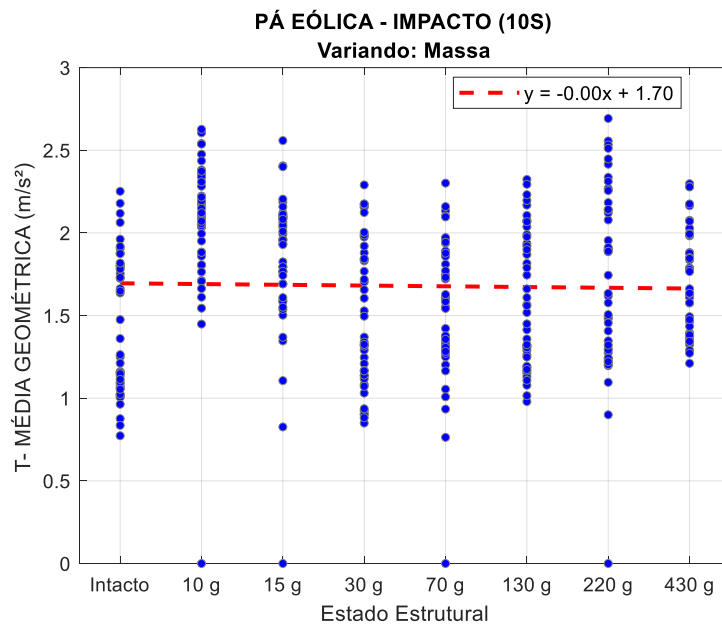


Figura F.48 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

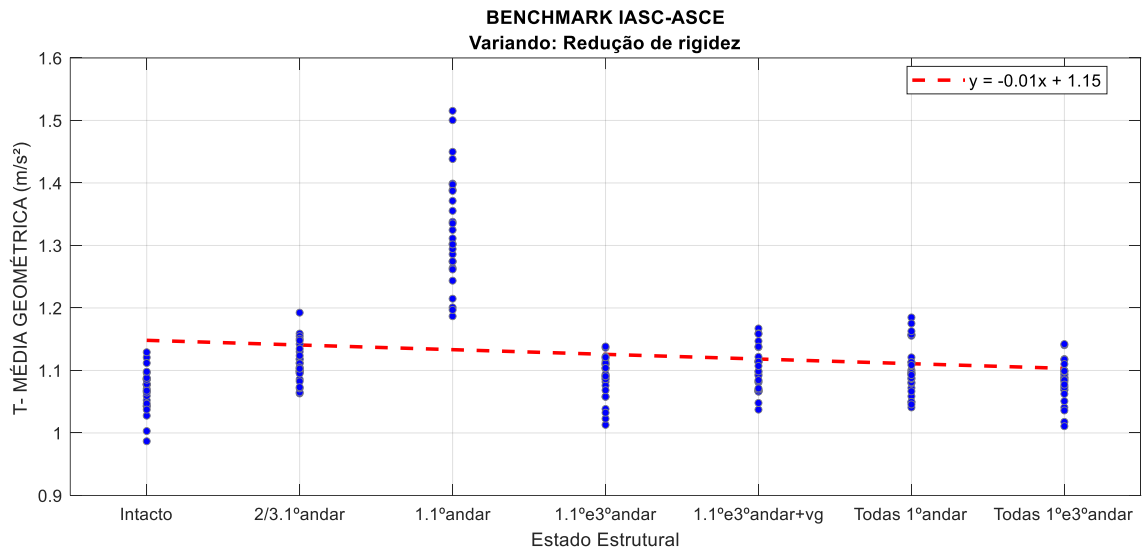
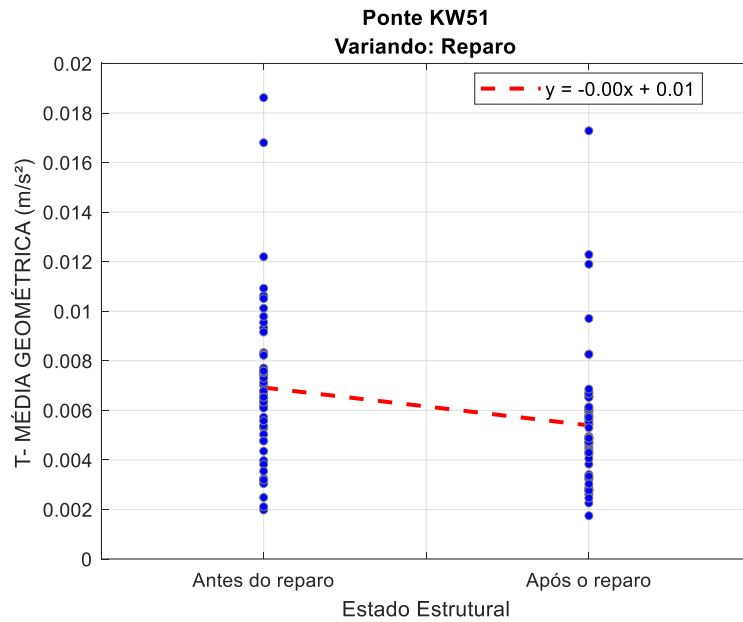


Figura F.49 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.4. Média dos Quadrados dos Valores

Figura F.50 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

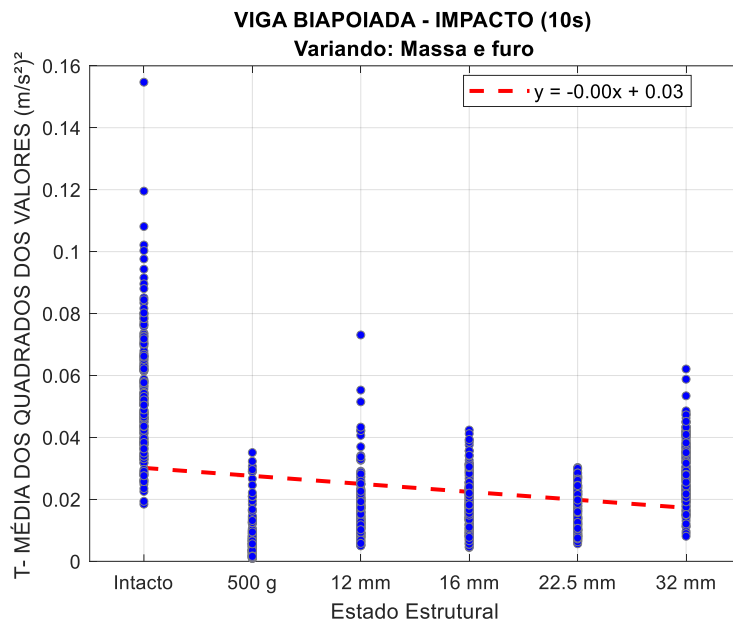


Figura F.51 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

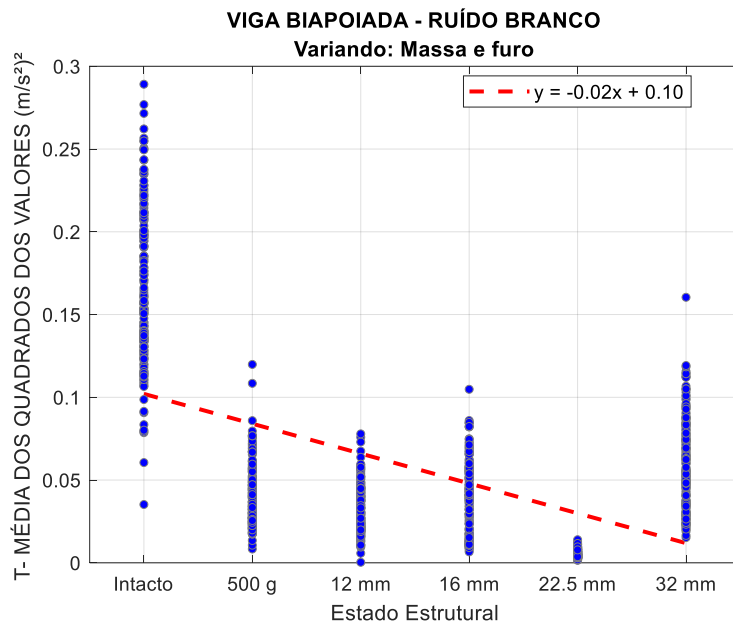


Figura F.52 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

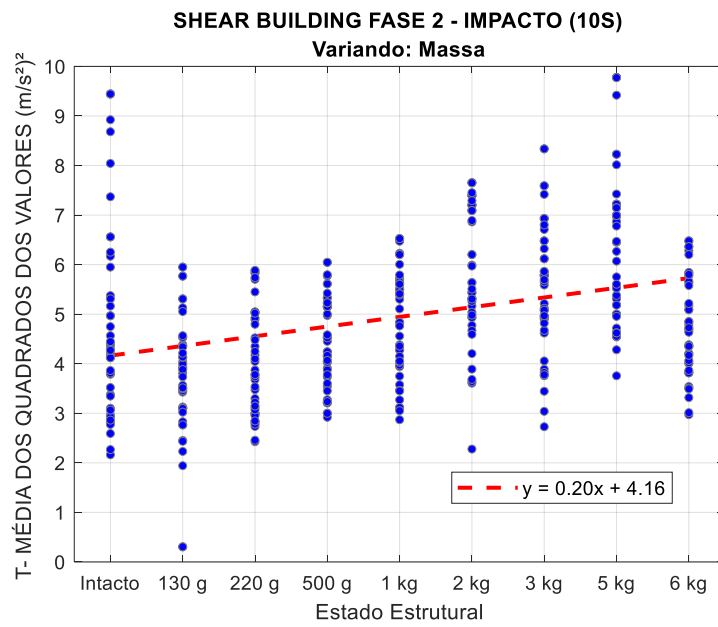


Figura F.53 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

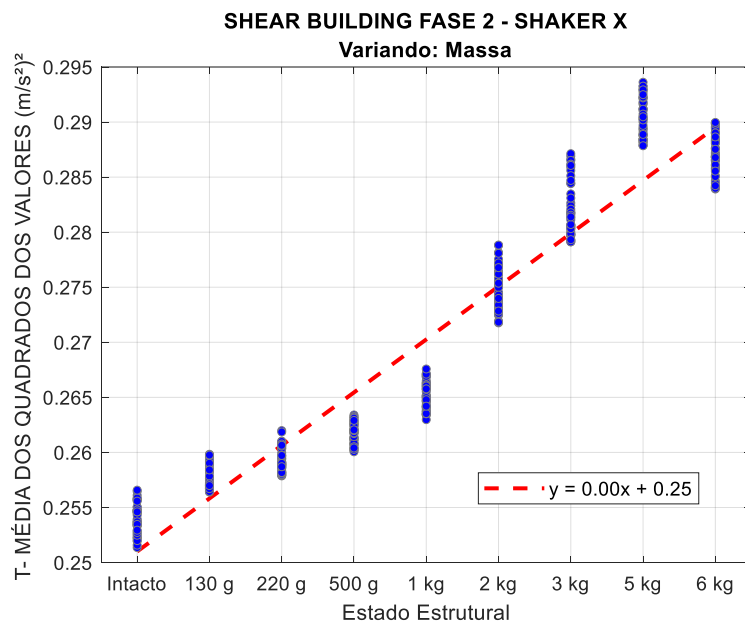


Figura F.54 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

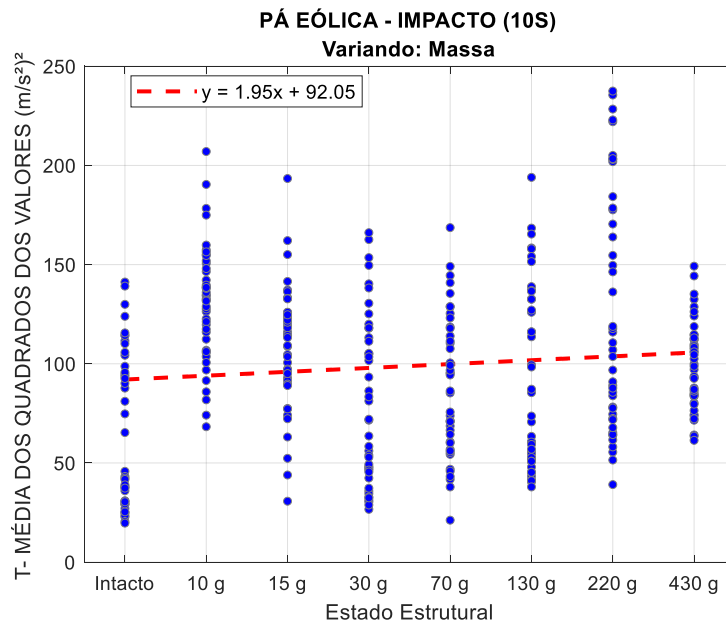


Figura F.55 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

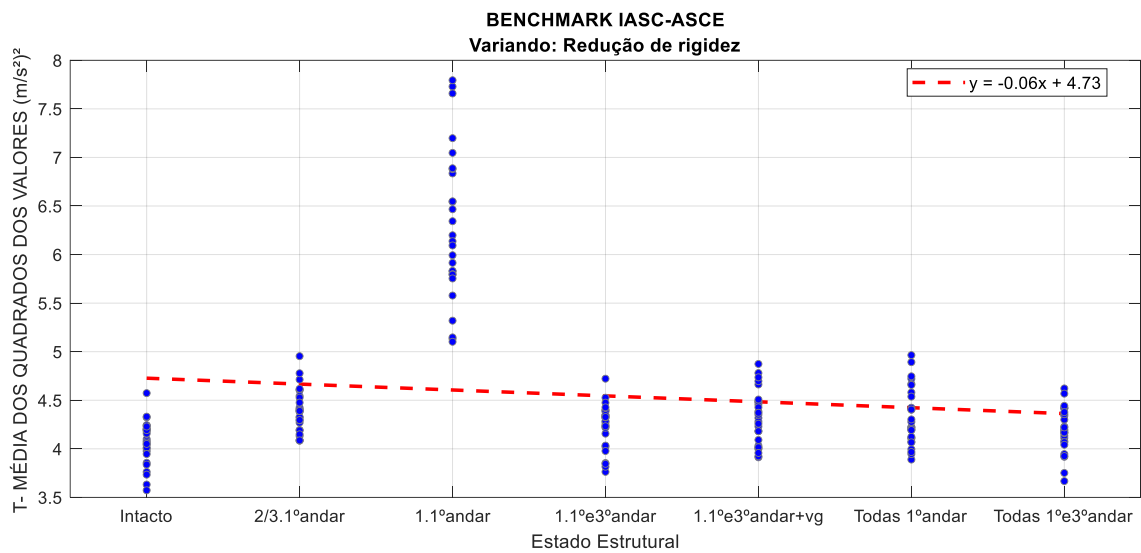
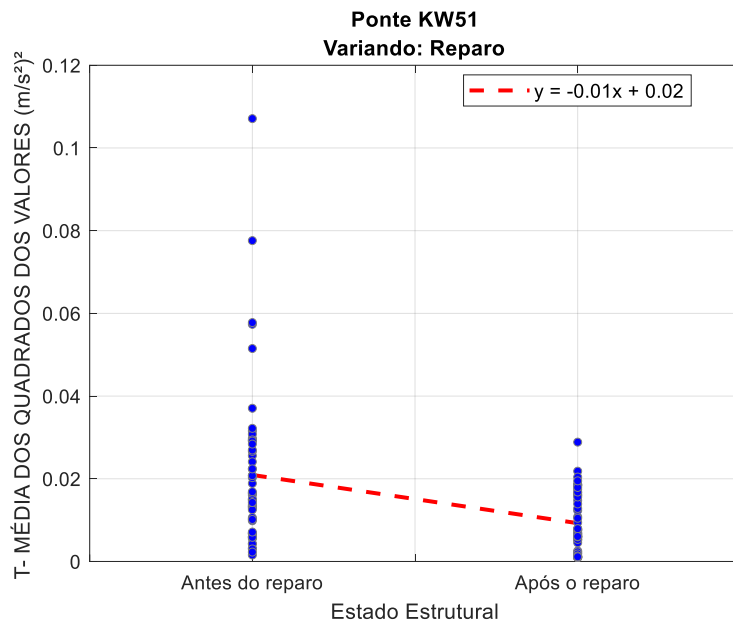


Figura F.56 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.5. Raiz Quadrada da Média

Figura F.57 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

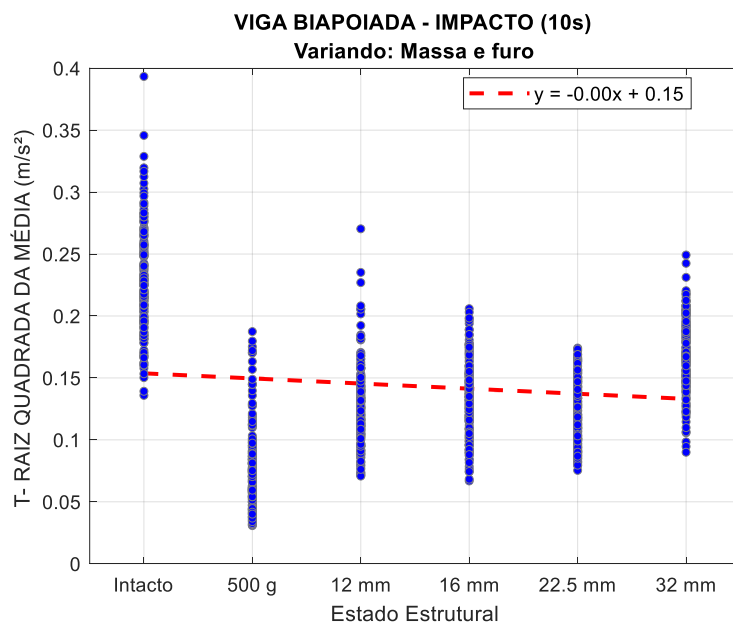


Figura F.58 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

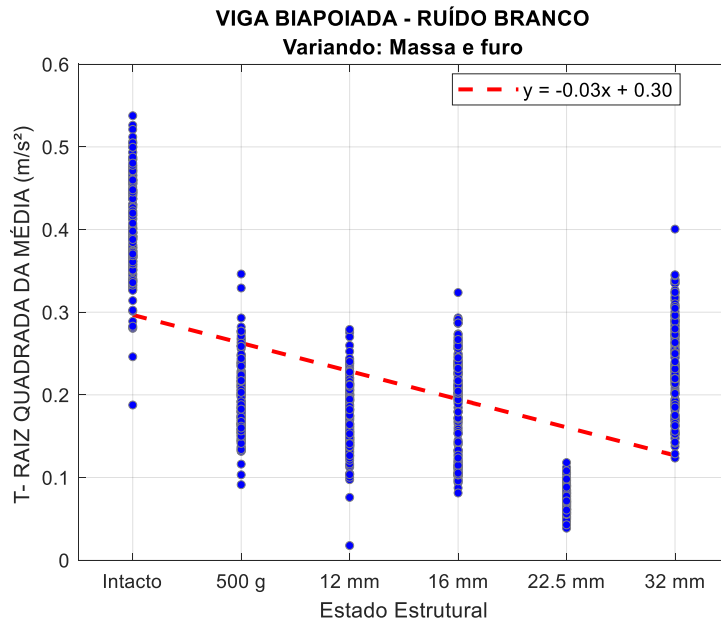


Figura F.59 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

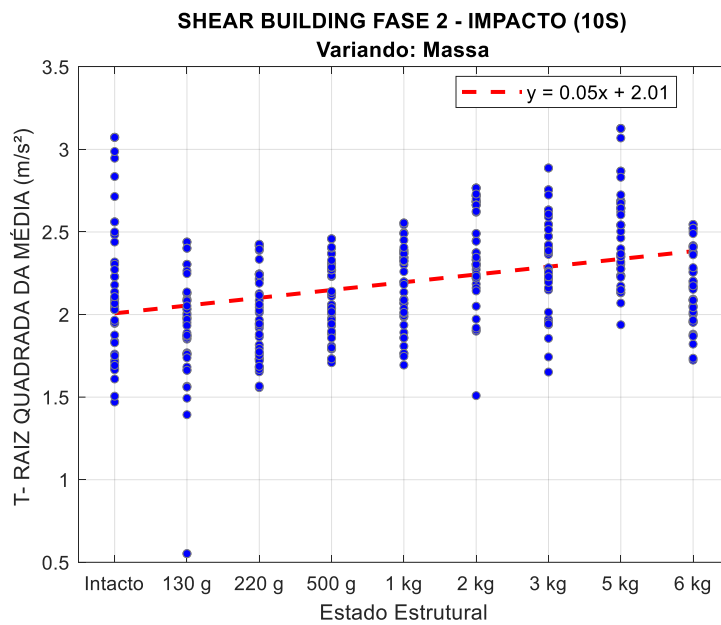


Figura F.60 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

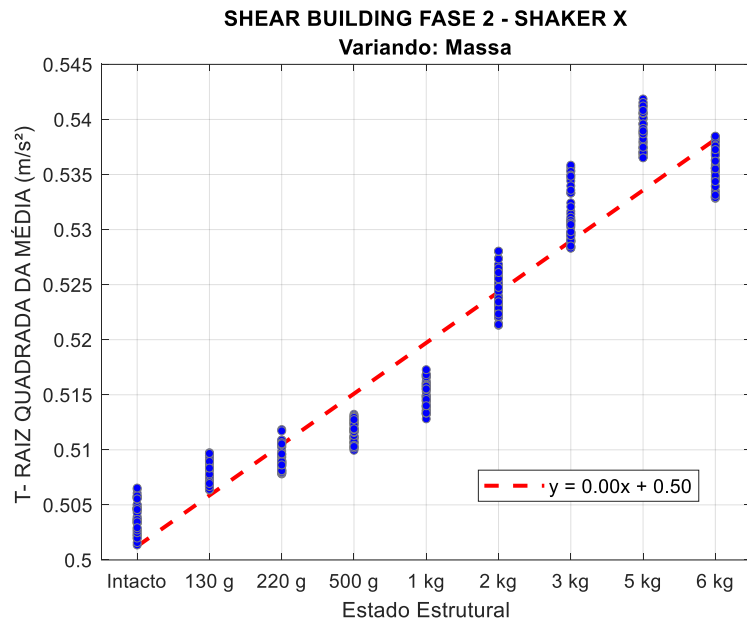


Figura F.61 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

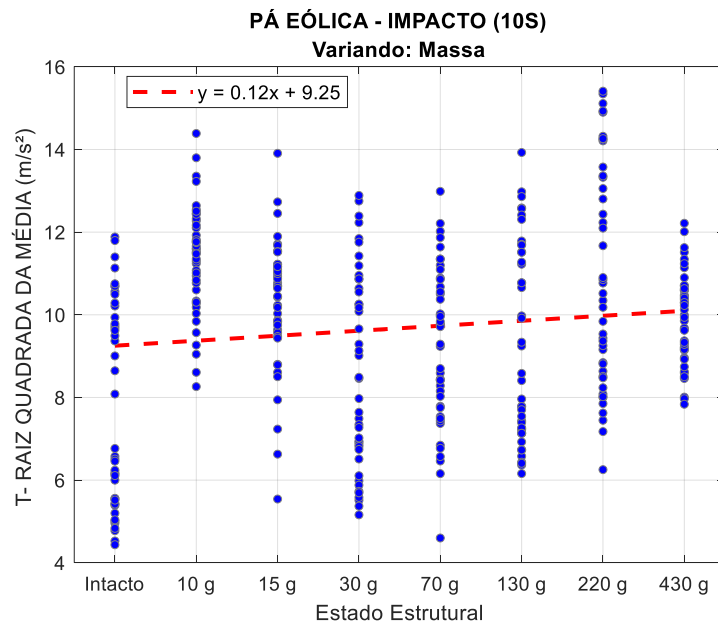


Figura F.62 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

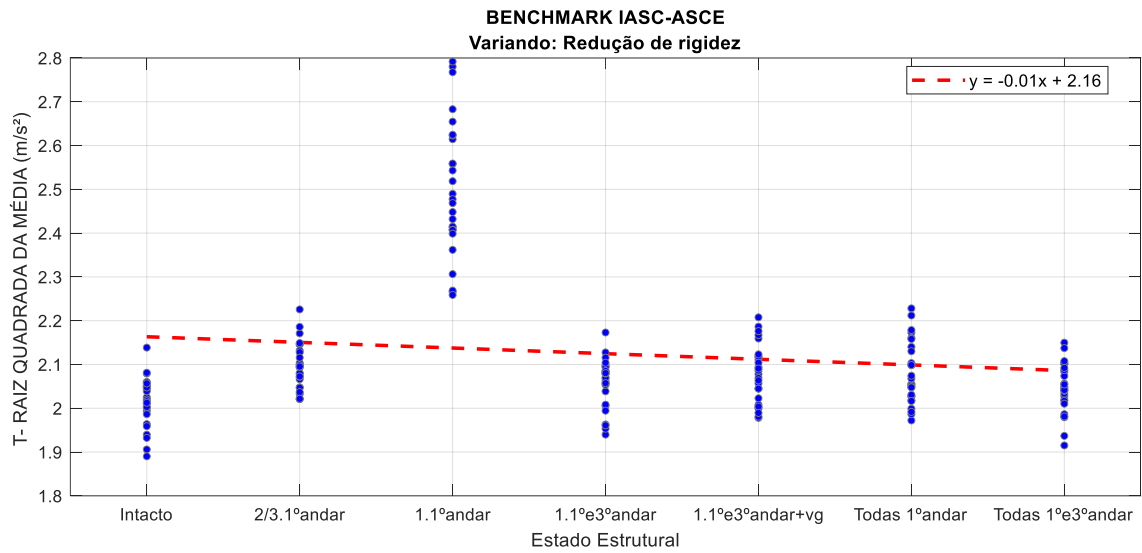
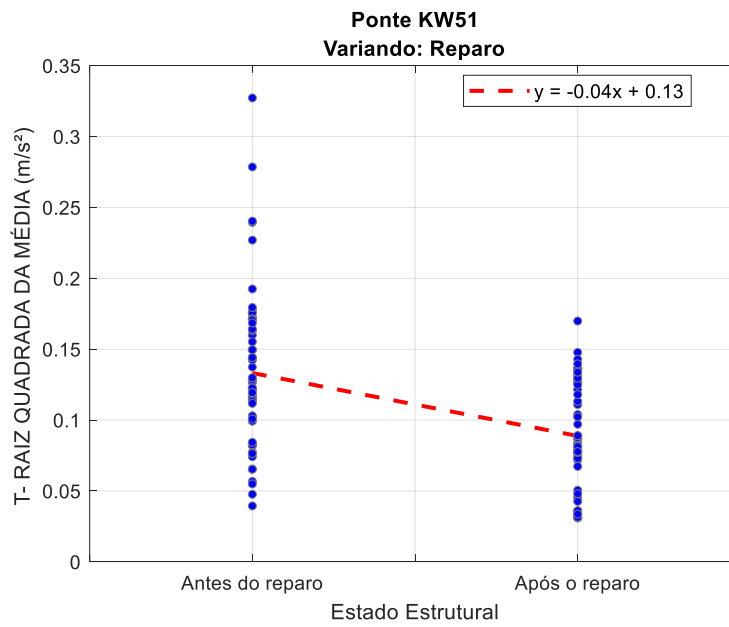


Figura F.63 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.6. Mediana ou Segundo Quartil

Figura F.64 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

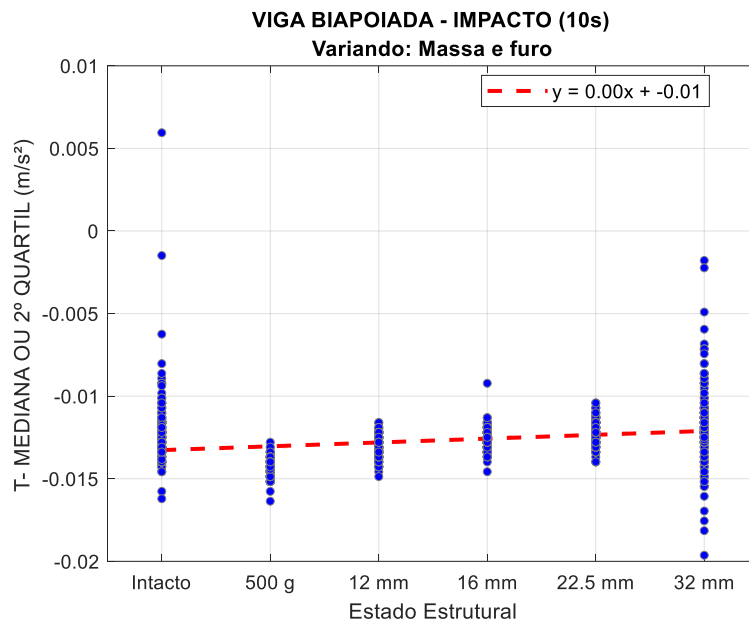


Figura F.65 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

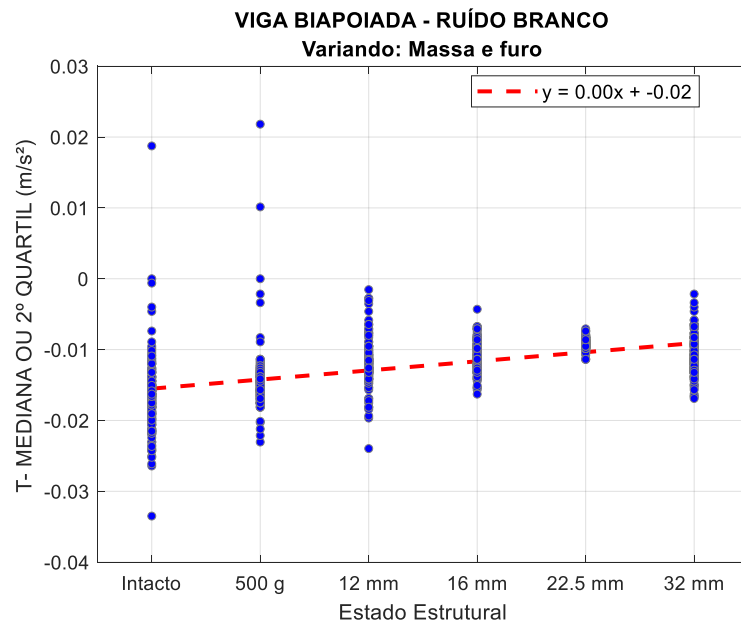


Figura F.66 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

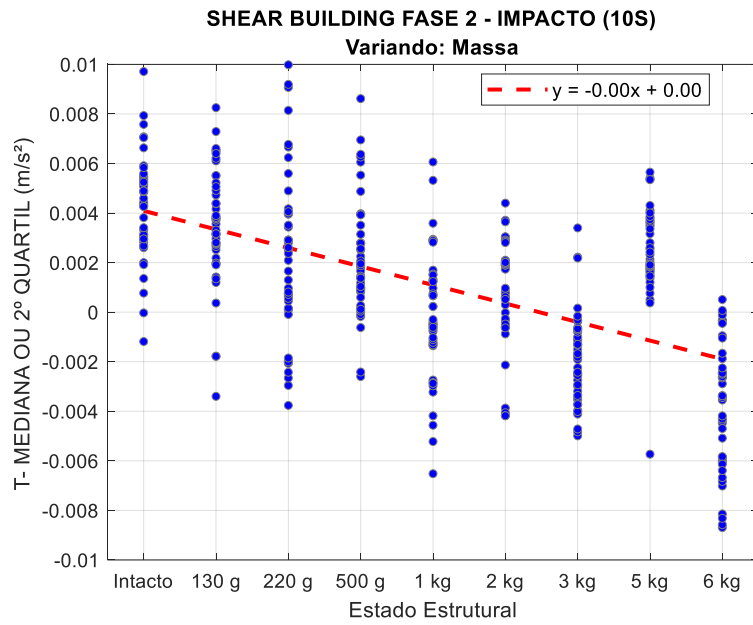


Figura F.67 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

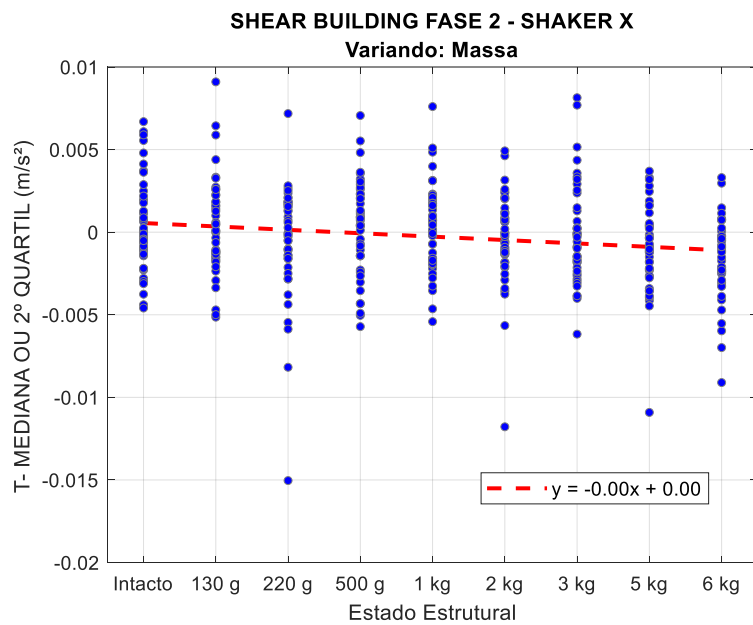


Figura F.68 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

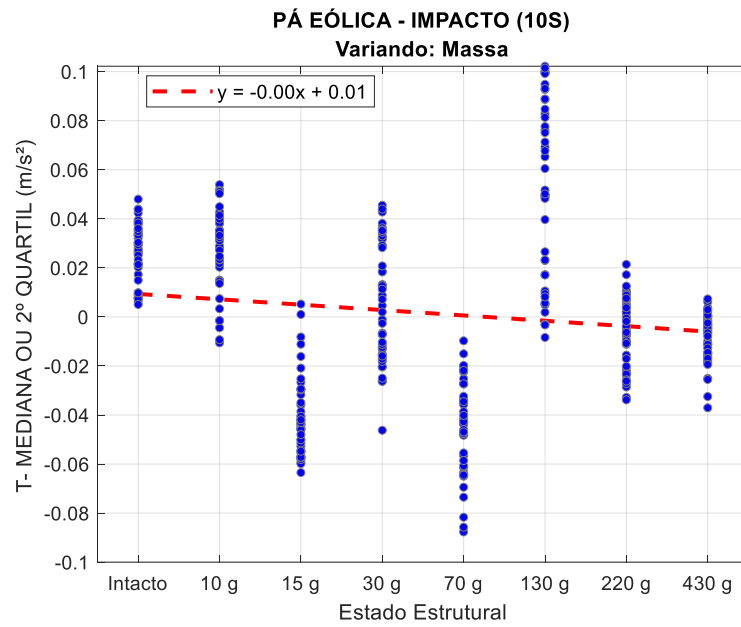


Figura F.69 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

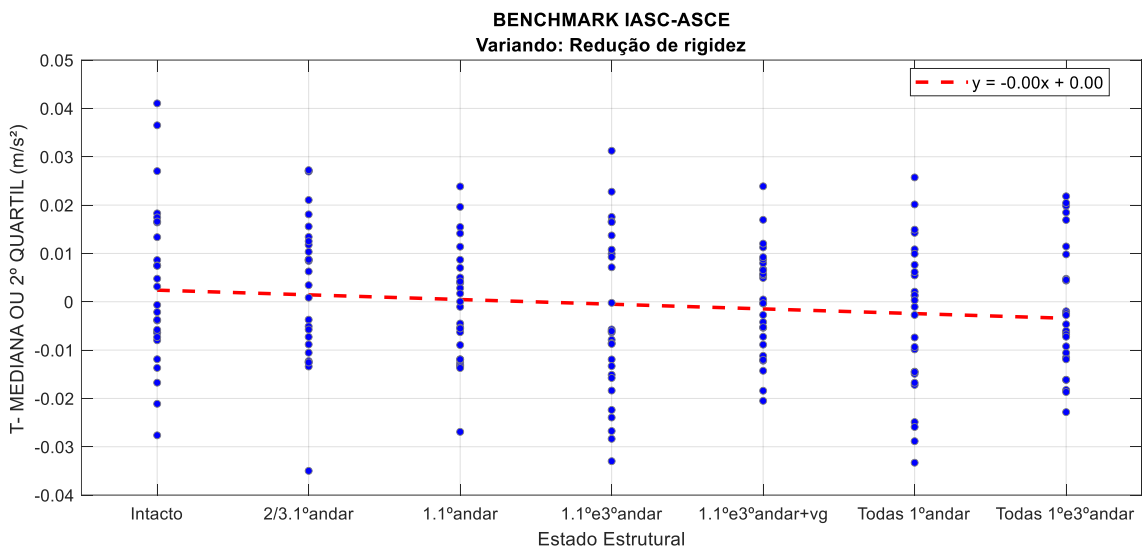
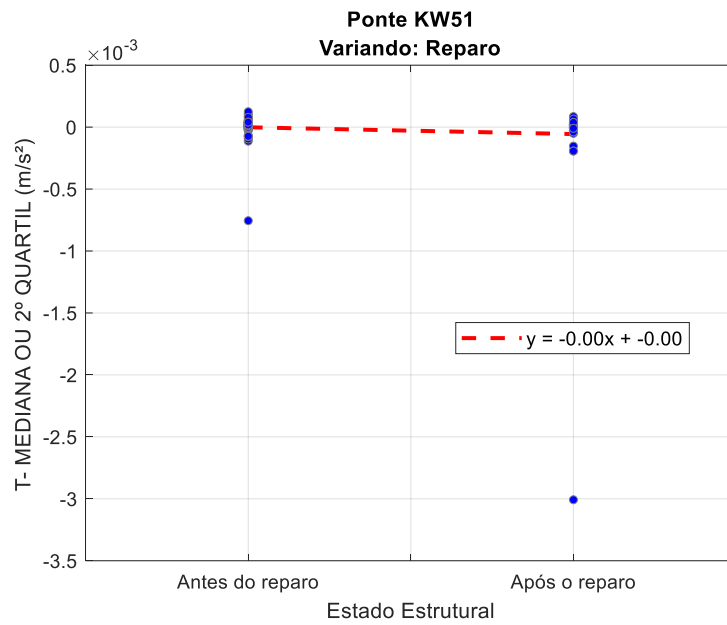


Figura F.70 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.7. Moda

Figura F.71 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

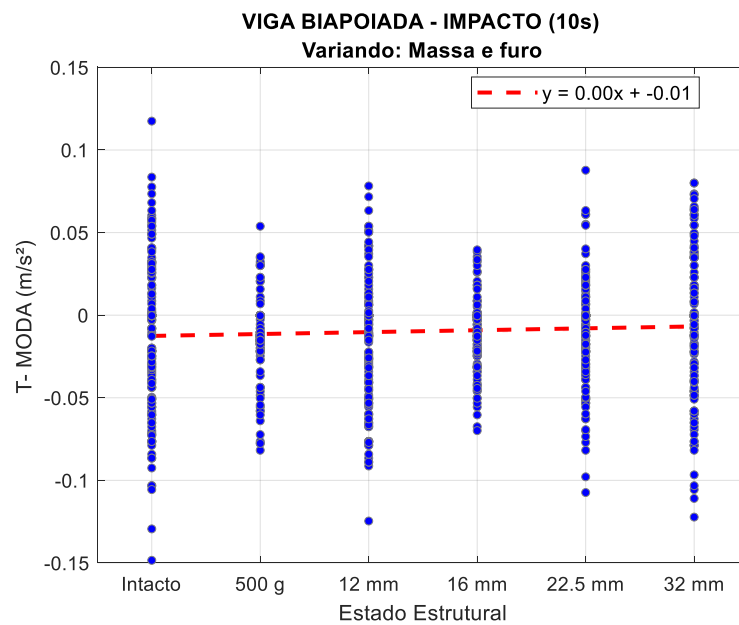


Figura F.72 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

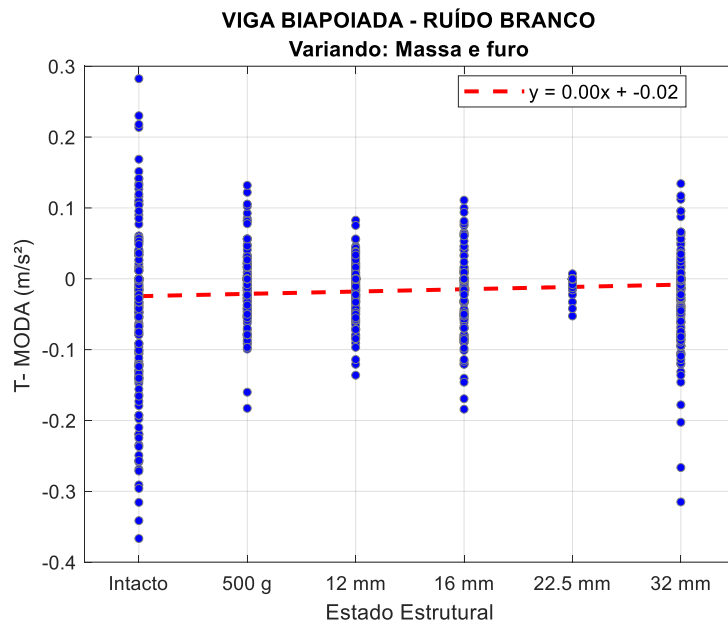


Figura F.73 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

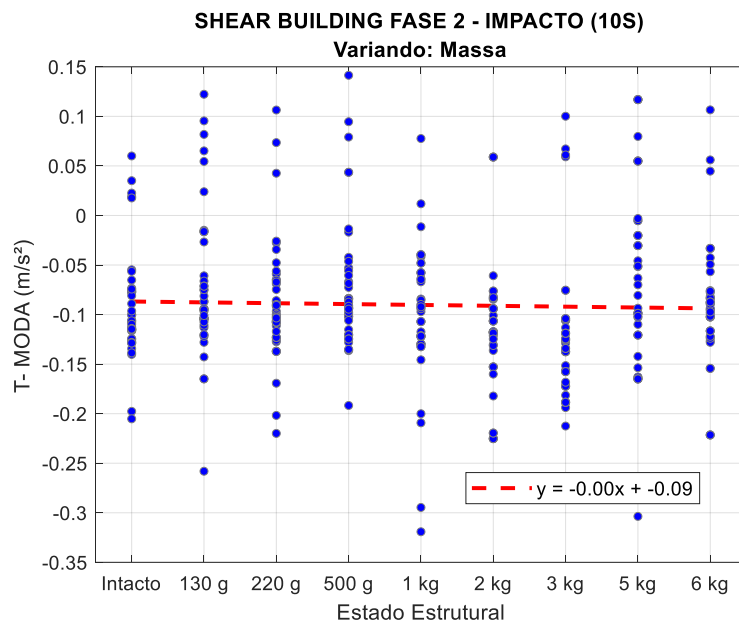


Figura F.74 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

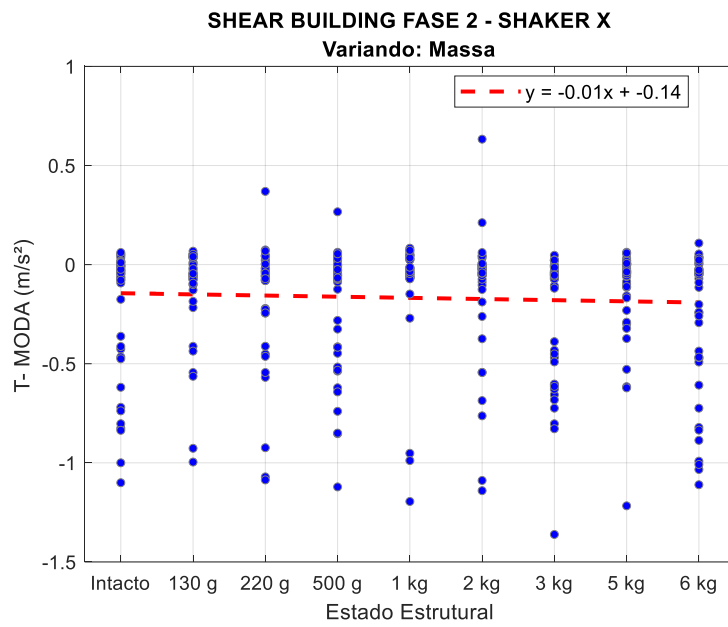


Figura F.75 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

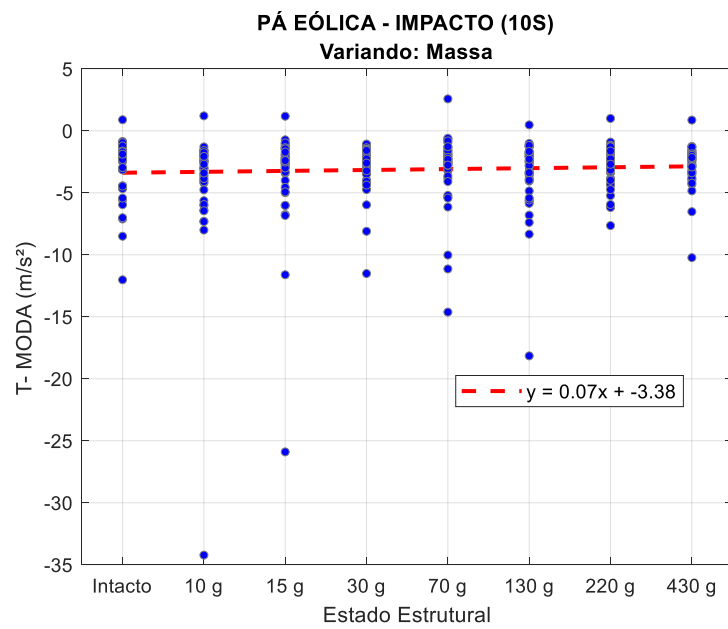


Figura F.76 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

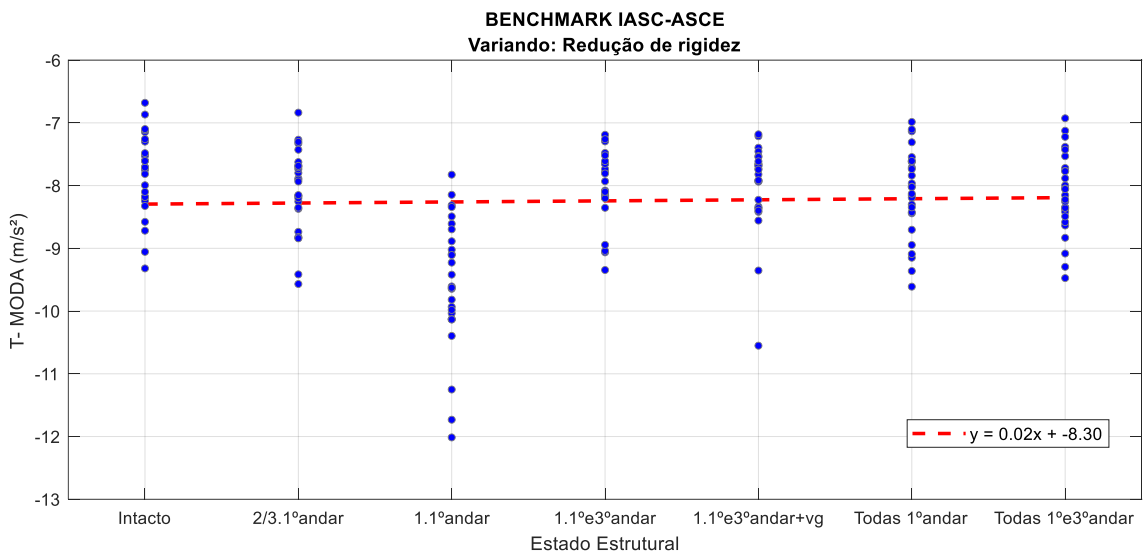
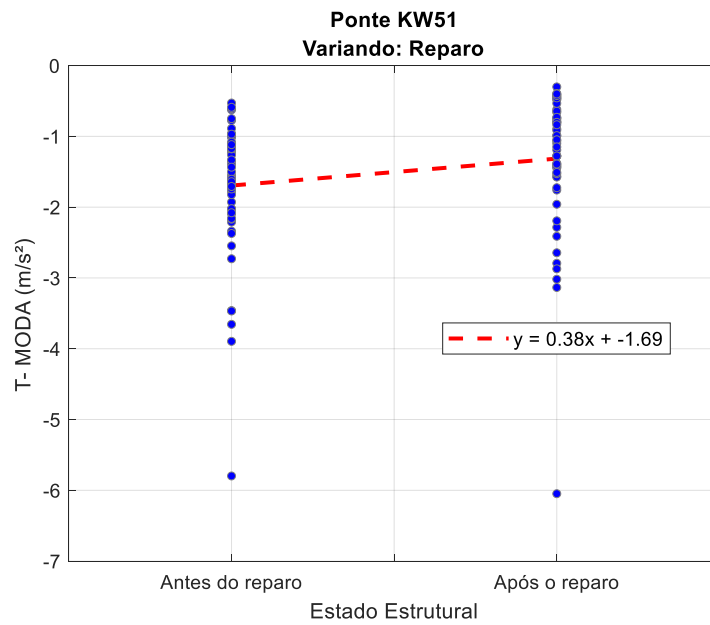


Figura F.77 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.2.8. Ponto Médio

Figura F.78 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

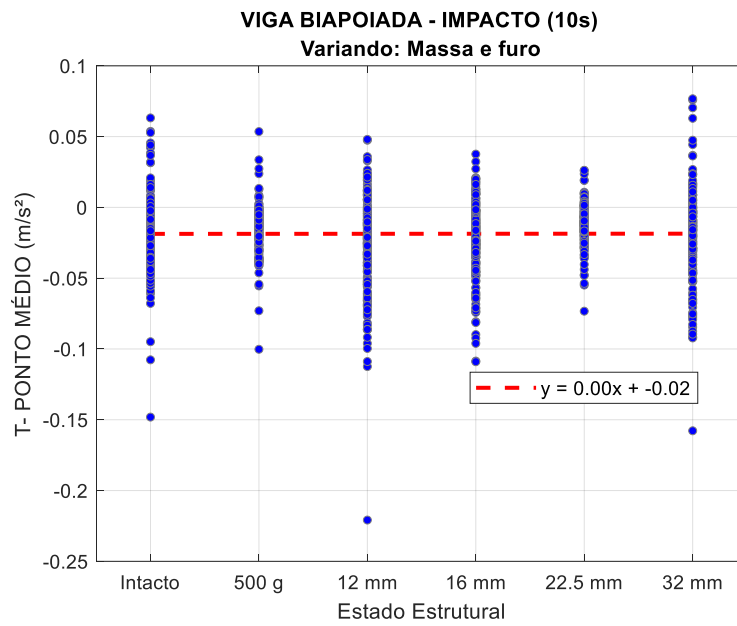


Figura F.79 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

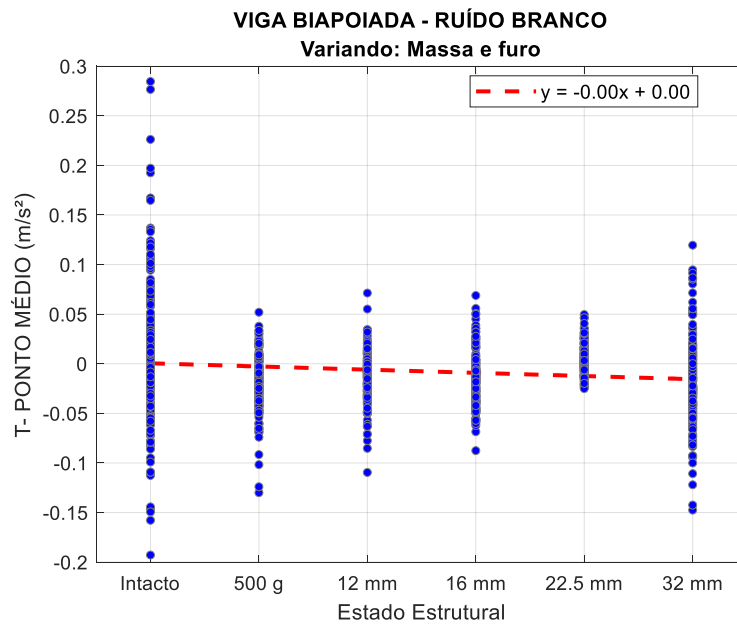


Figura F.80 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

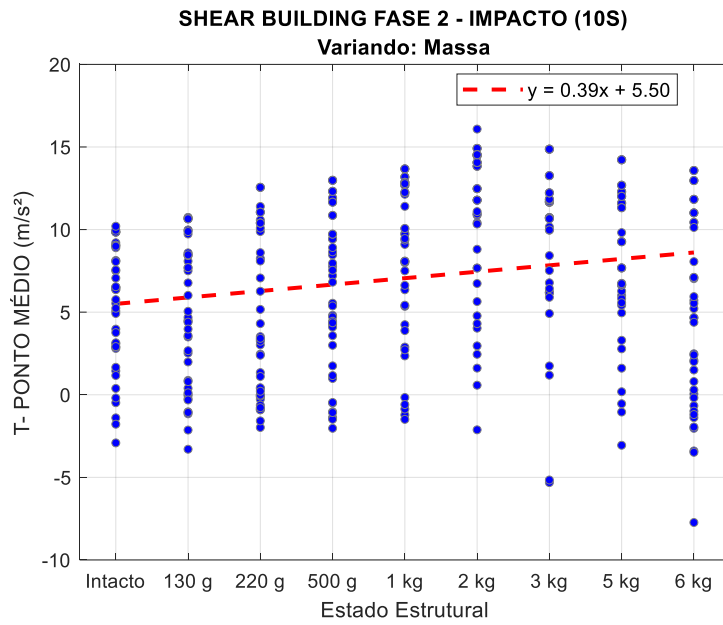


Figura F.81 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

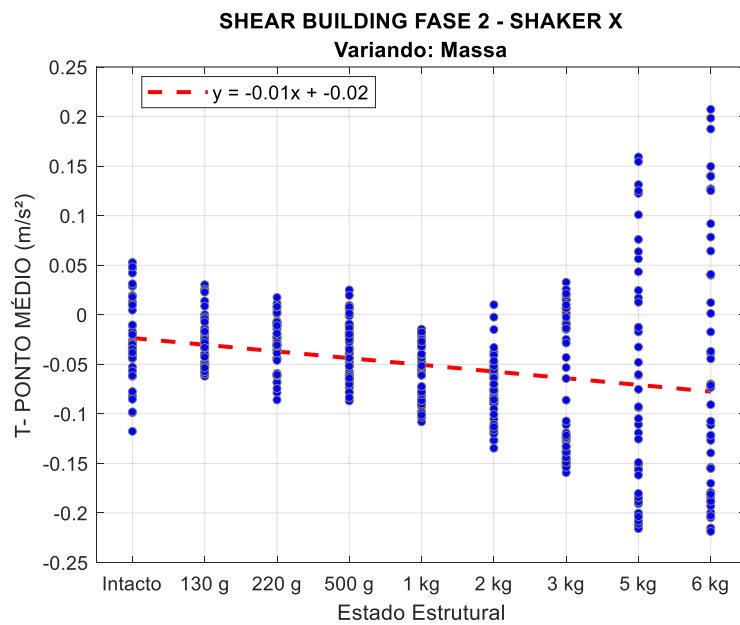


Figura F.82 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

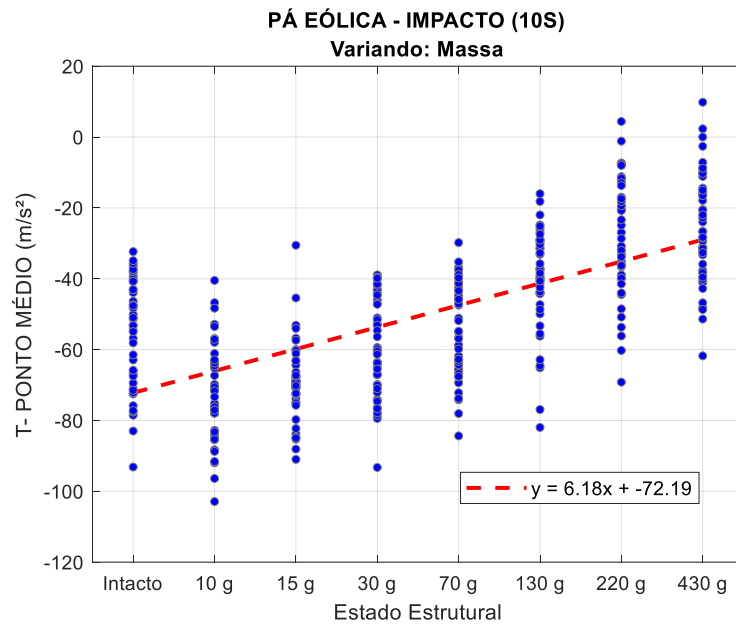


Figura F.83 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

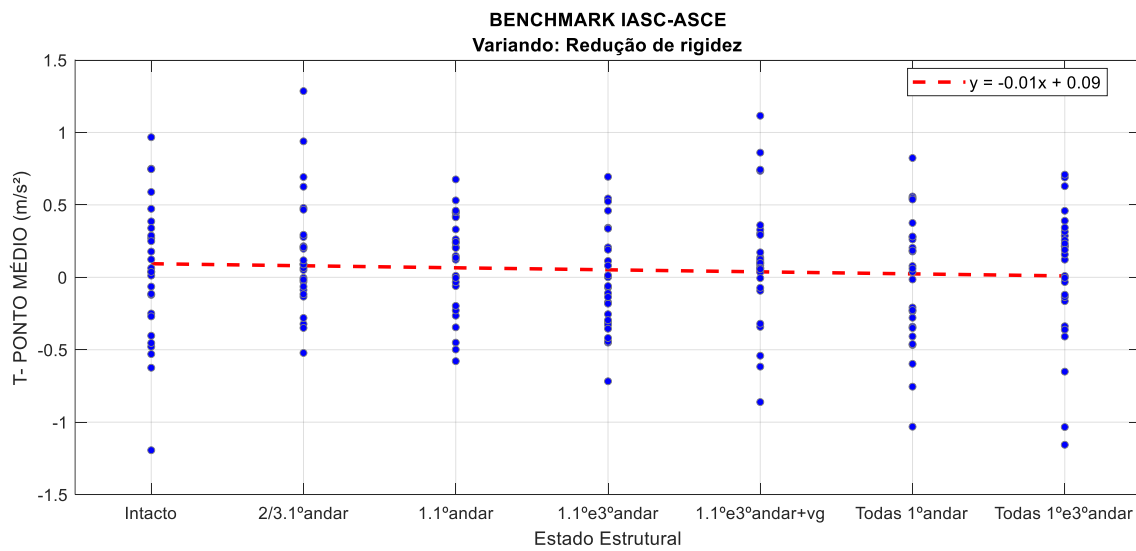
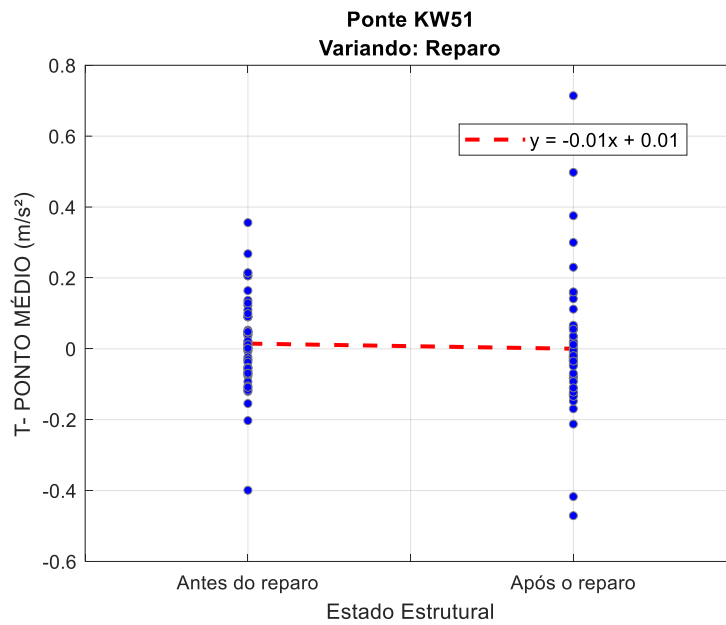


Figura F.84 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3. PARÂMETROS DE DISPERSÃO

F.3.1. Amplitude de Pico

Figura F.85 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

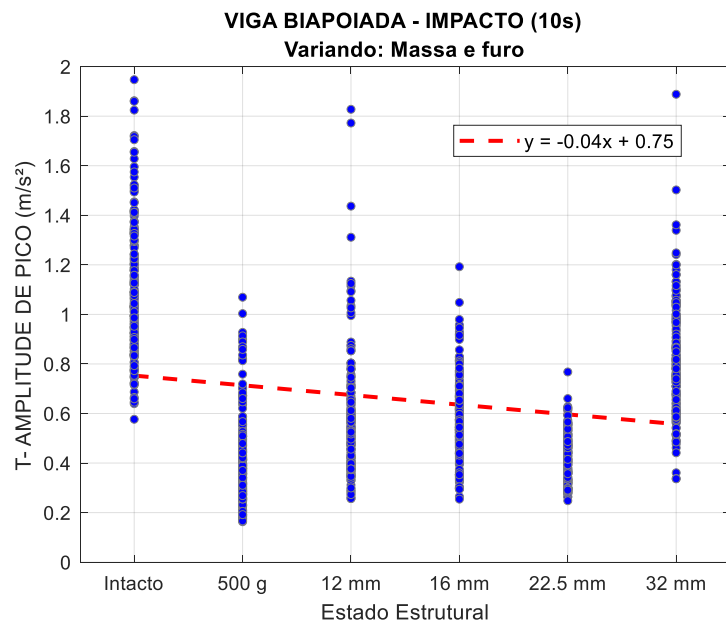


Figura F.86 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

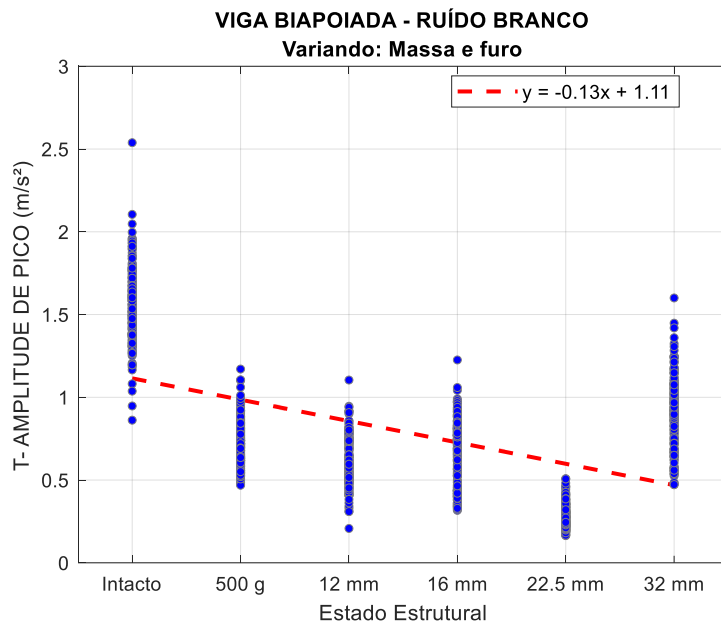


Figura F.87 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

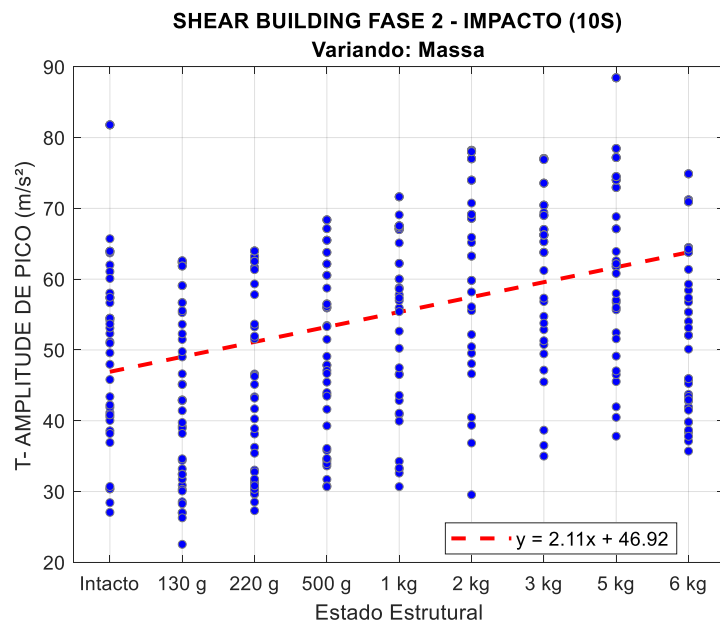


Figura F.88 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

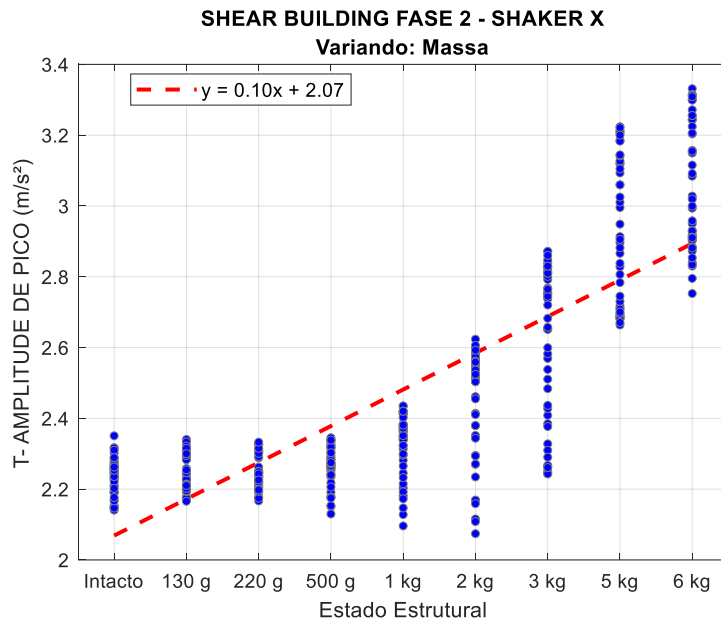


Figura F.89 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

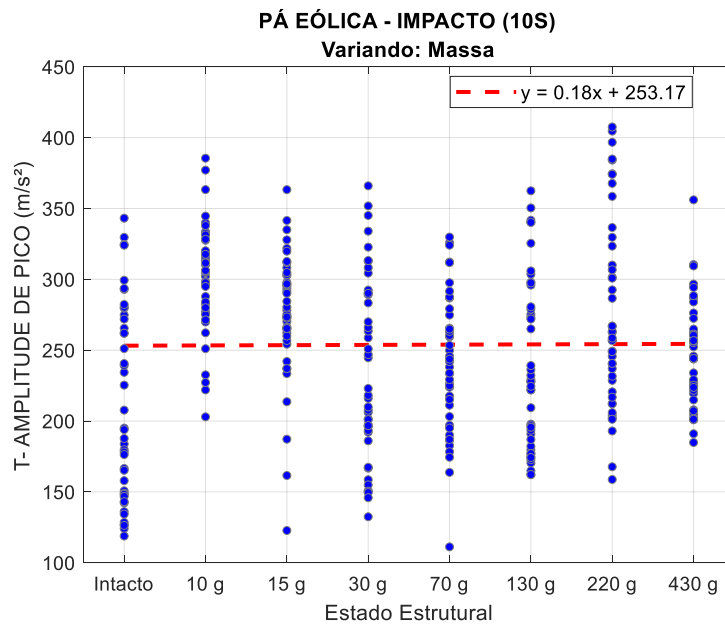


Figura F.90 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

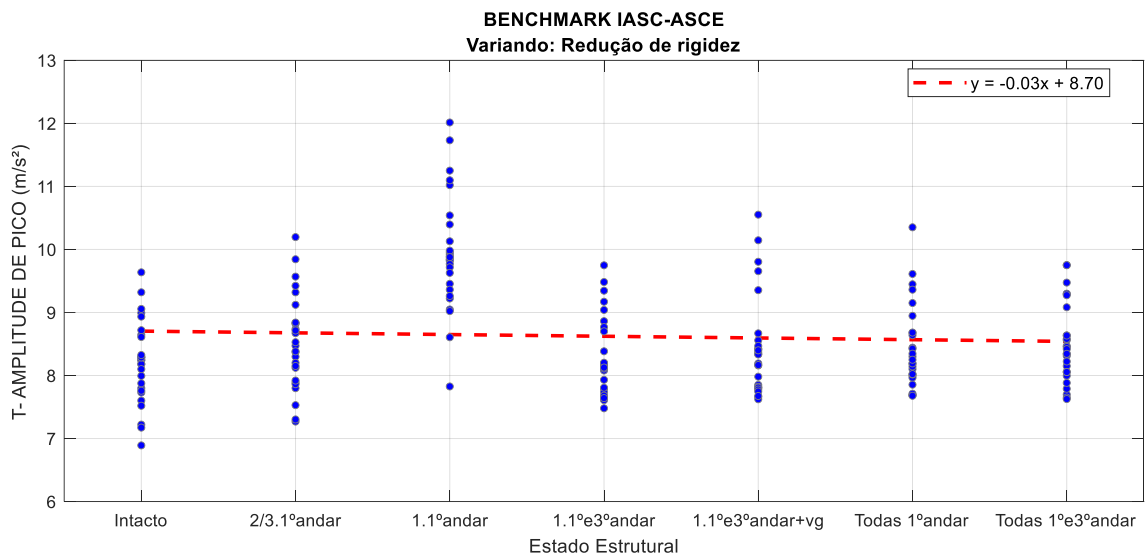
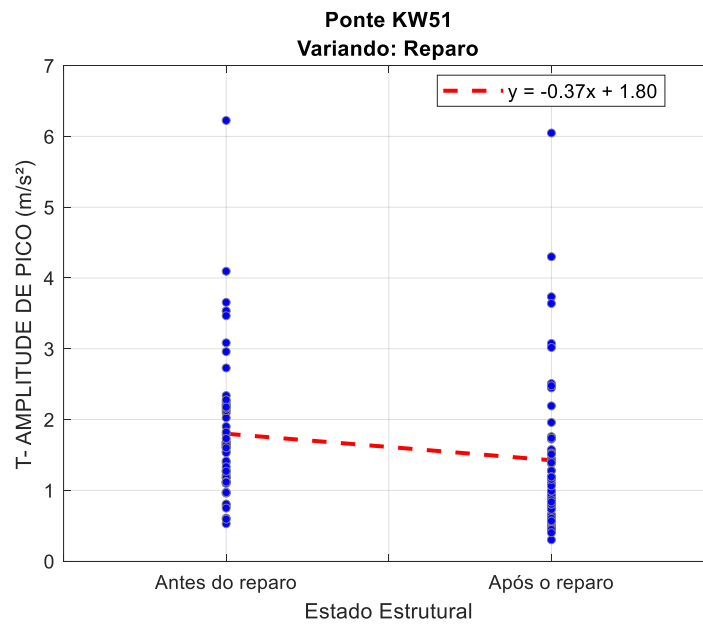


Figura F.91 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3.2. Amplitude Total

Figura F.92 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

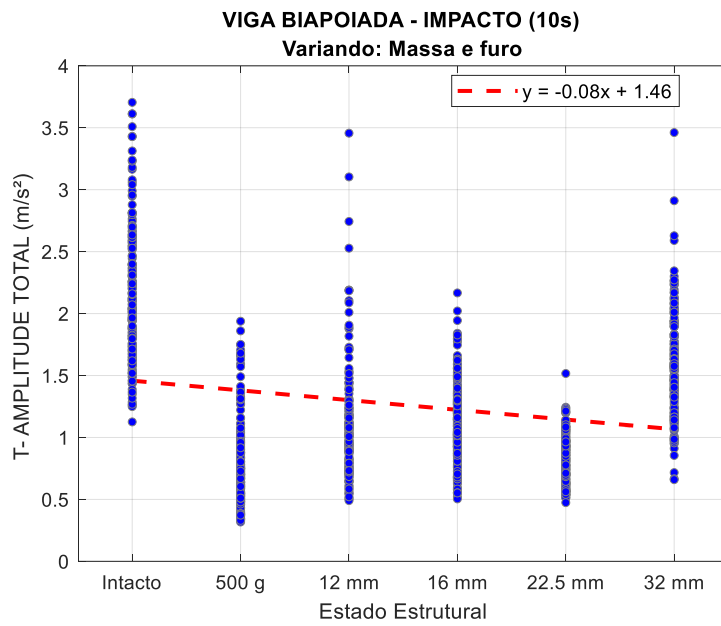


Figura F.93 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

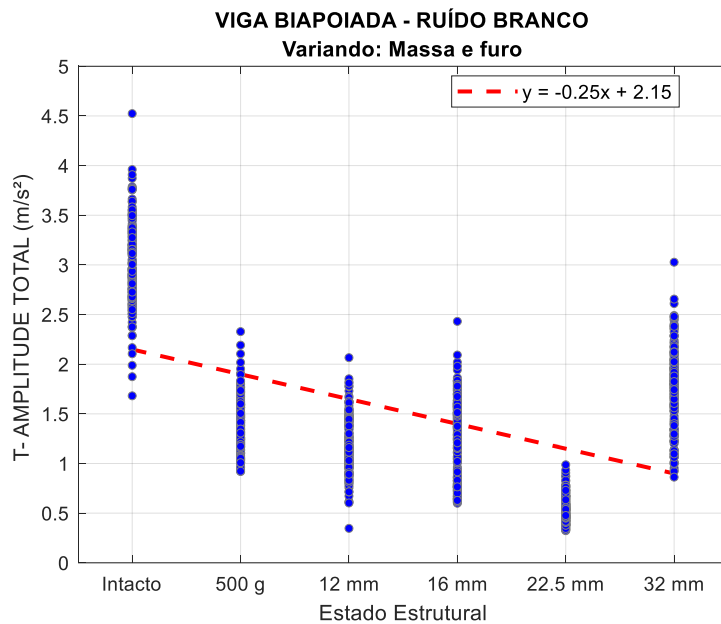


Figura F.94 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

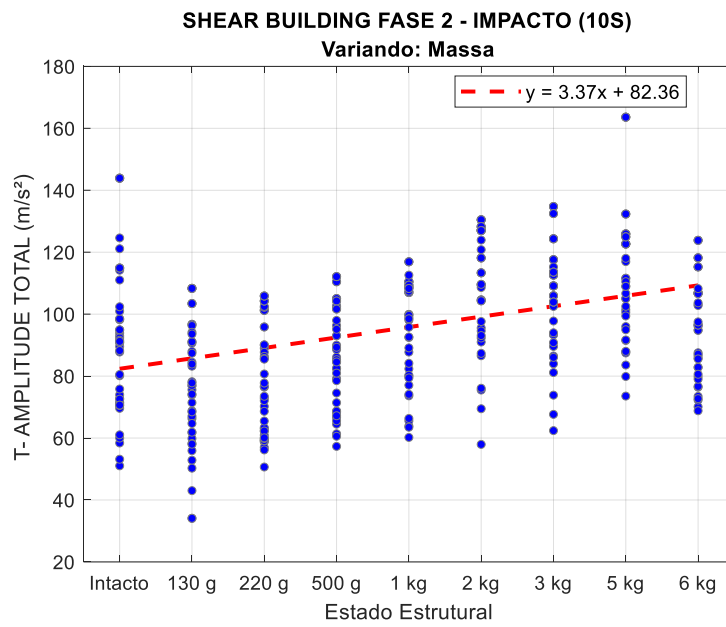


Figura F.95 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

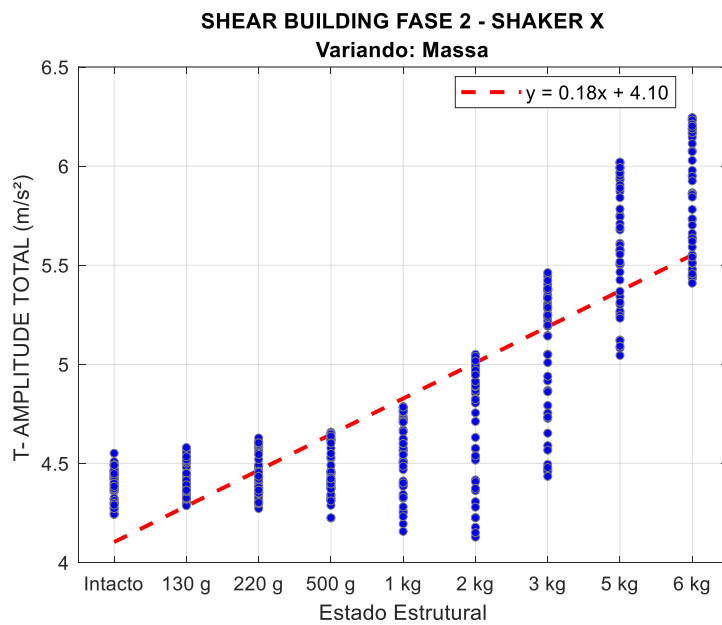


Figura F.96 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

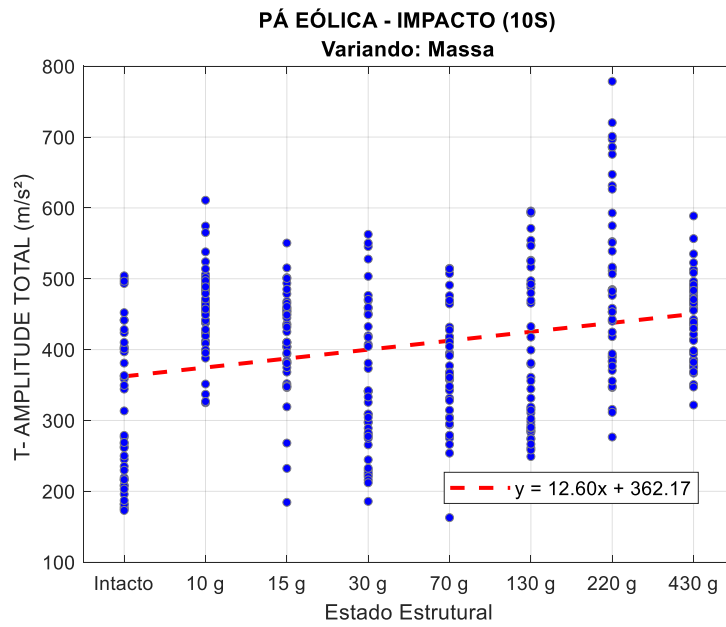


Figura F.97 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

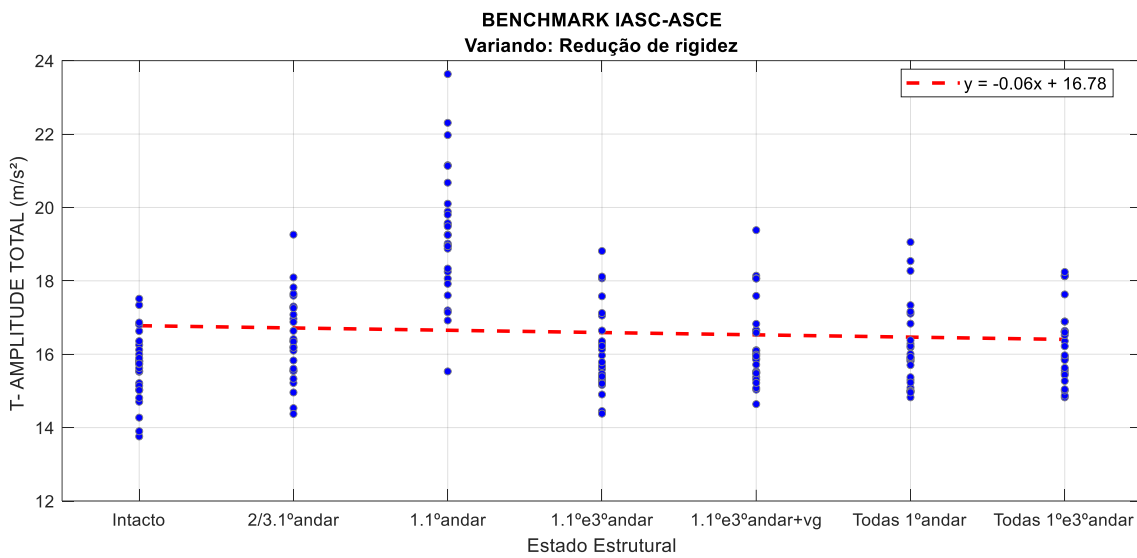
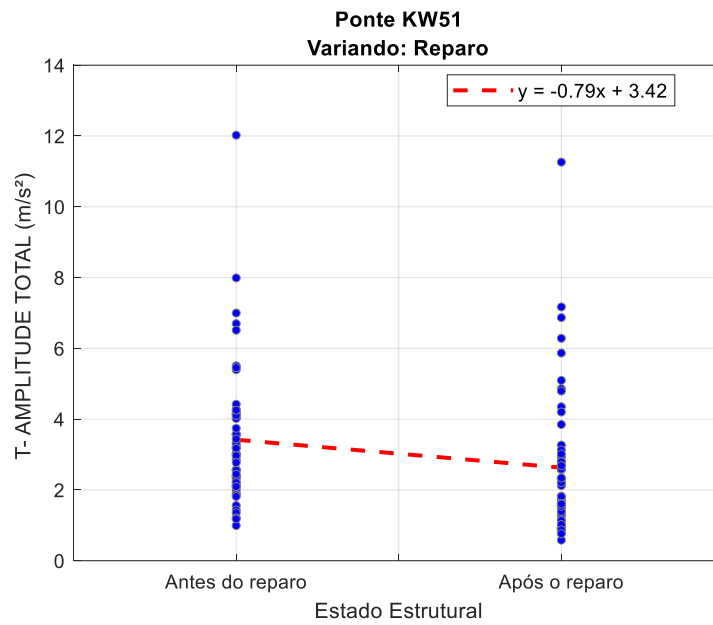


Figura F.98 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3.3. Amplitude Interquartil

Figura F.99 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

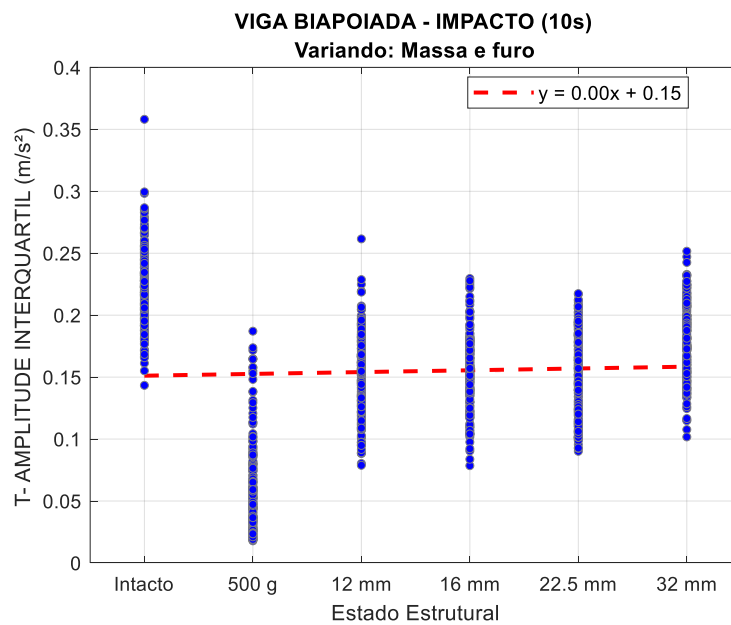


Figura F.100 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

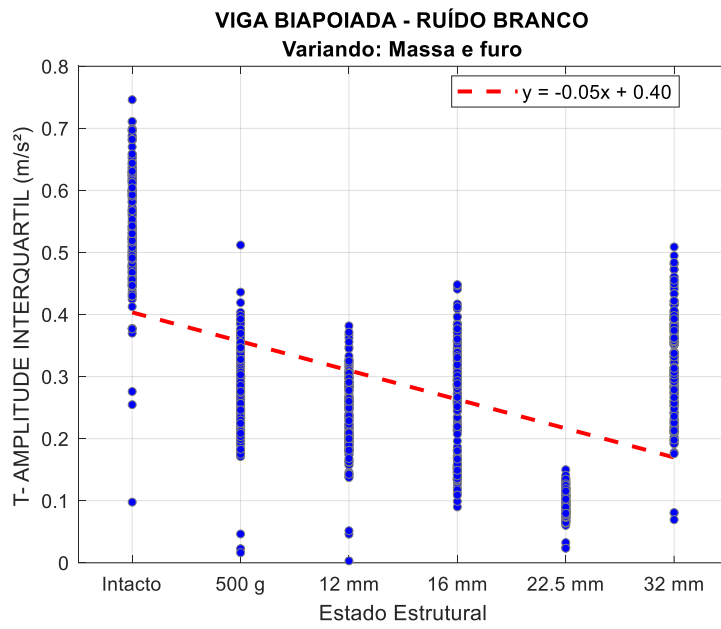


Figura F.101 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

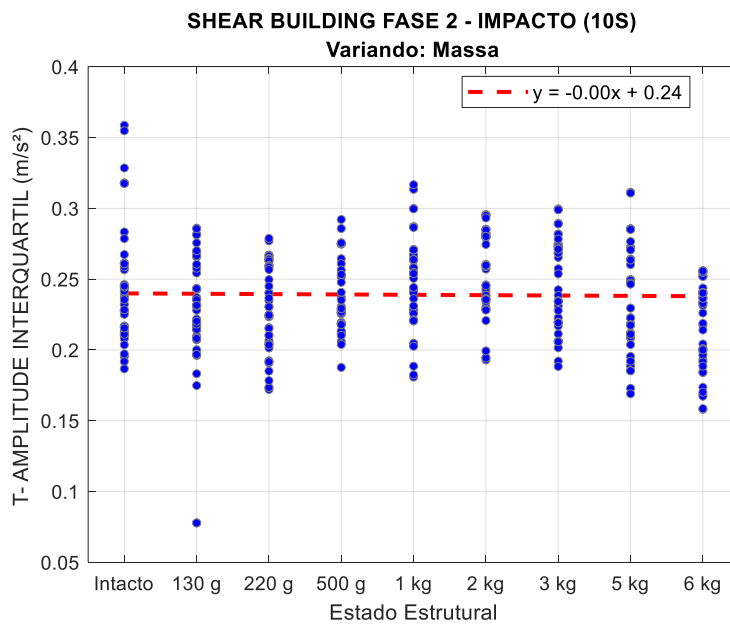


Figura F.102 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

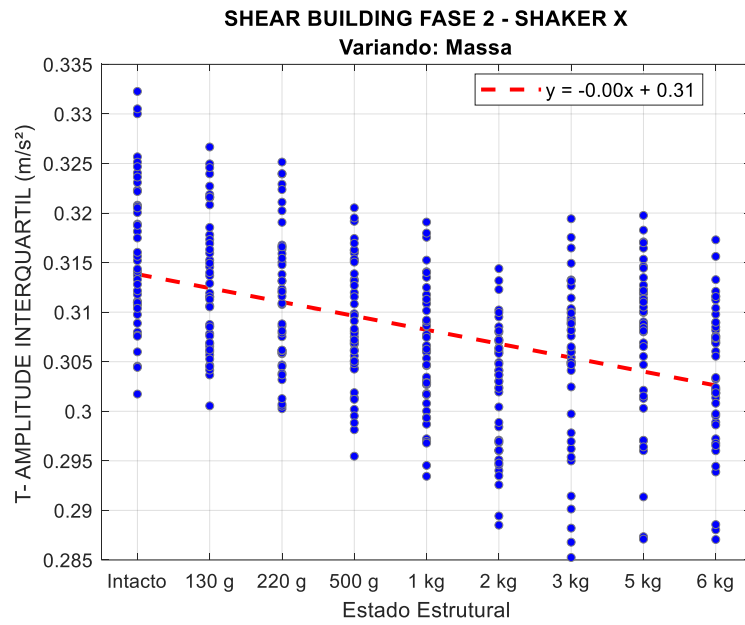


Figura F.103 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

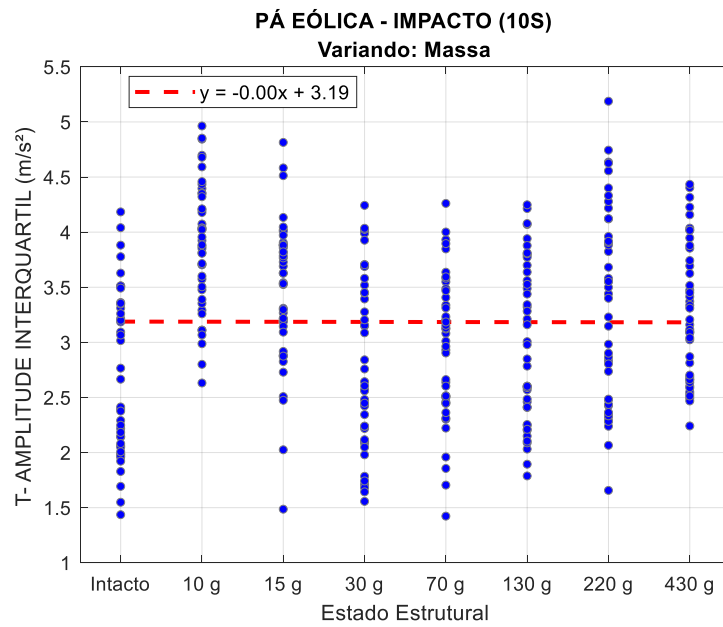


Figura F.104 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

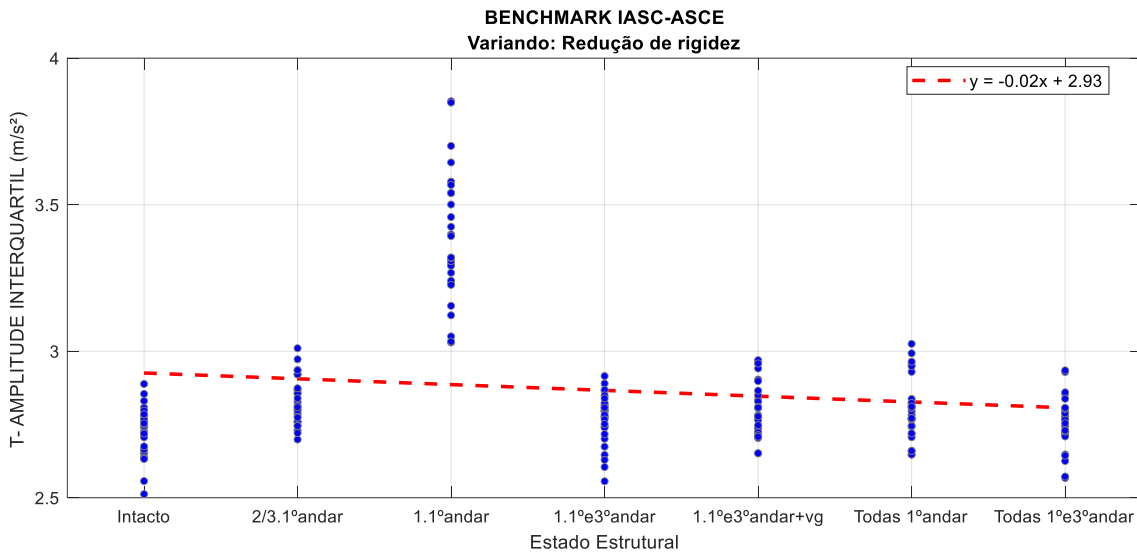
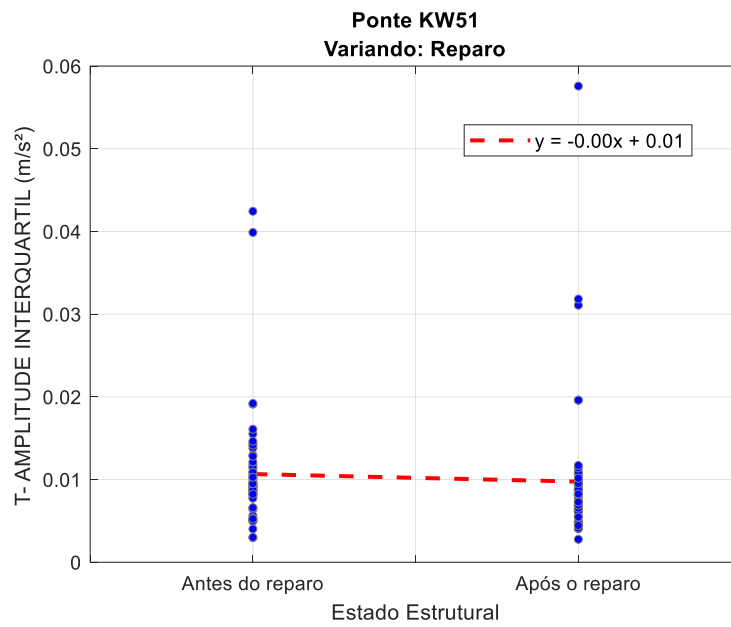


Figura F.105 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.



F.3.4. Amplitude de Percentis

Figura F.106 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

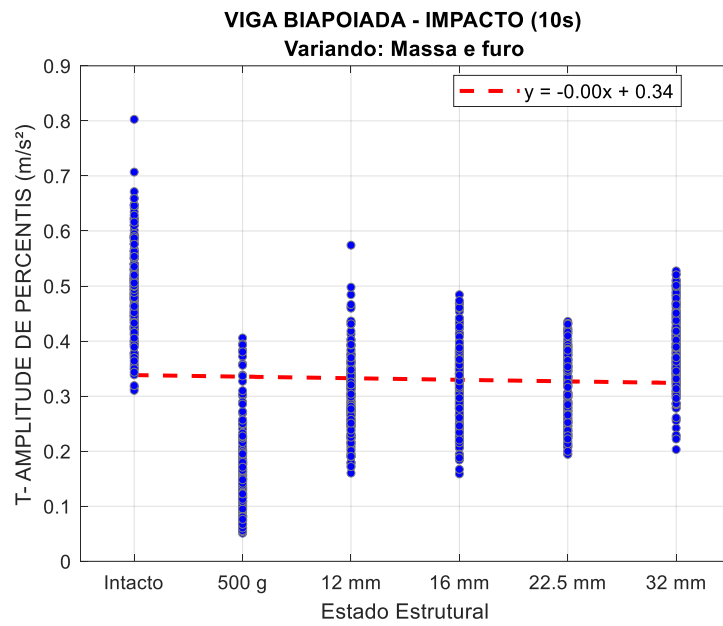


Figura F.107 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

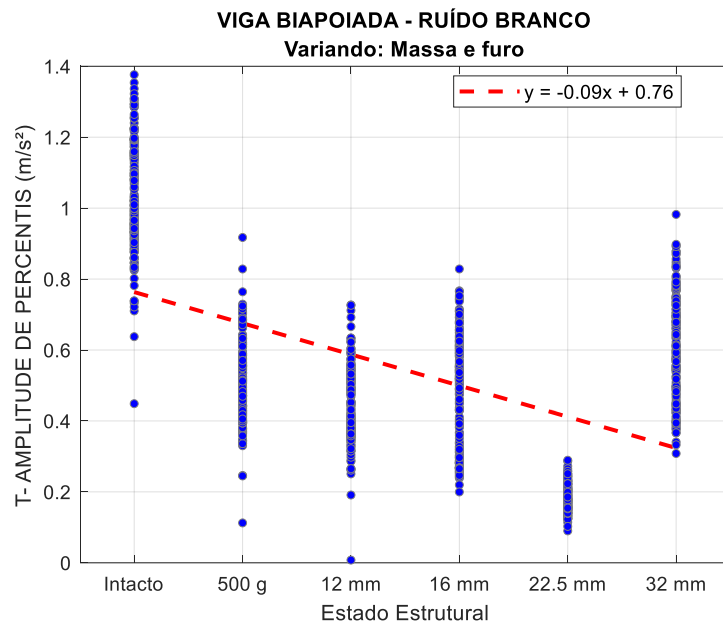


Figura F.108 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

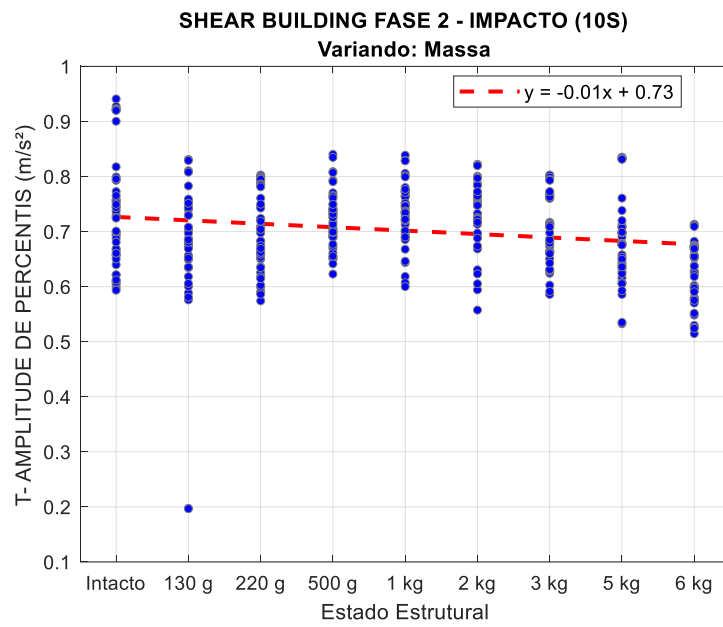


Figura F.109 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

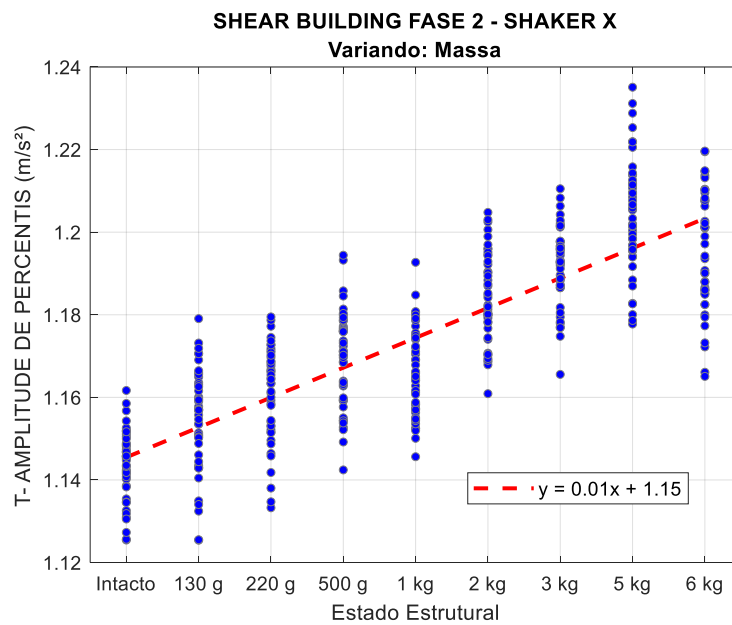


Figura F.110 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

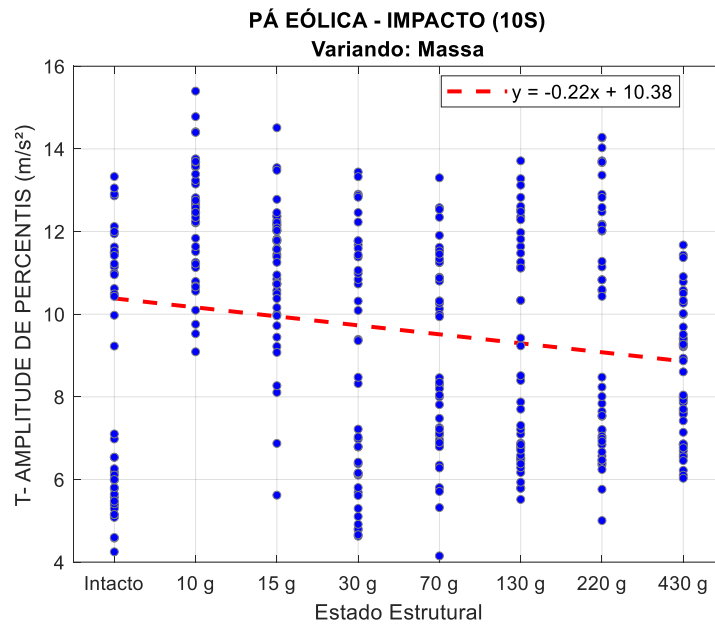


Figura F.111 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

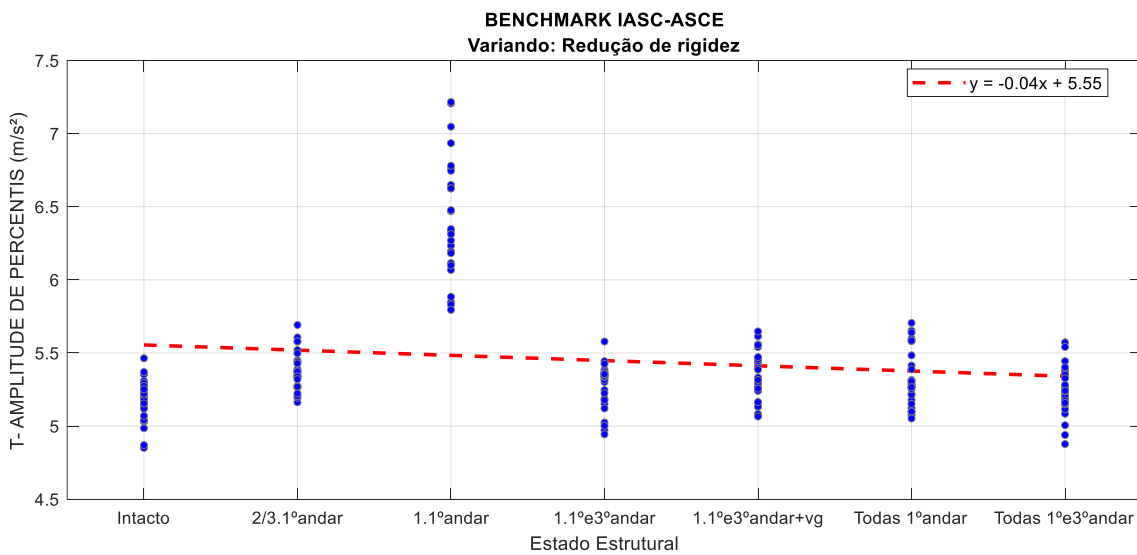
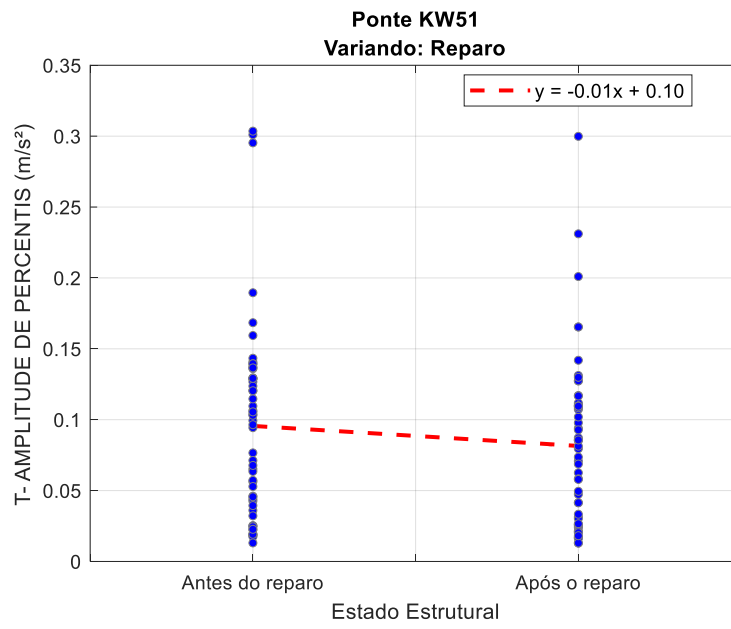


Figura F.112 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.



F.3.5. Intervalo Semi Quartílico ou Midhinge

Figura F.113 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

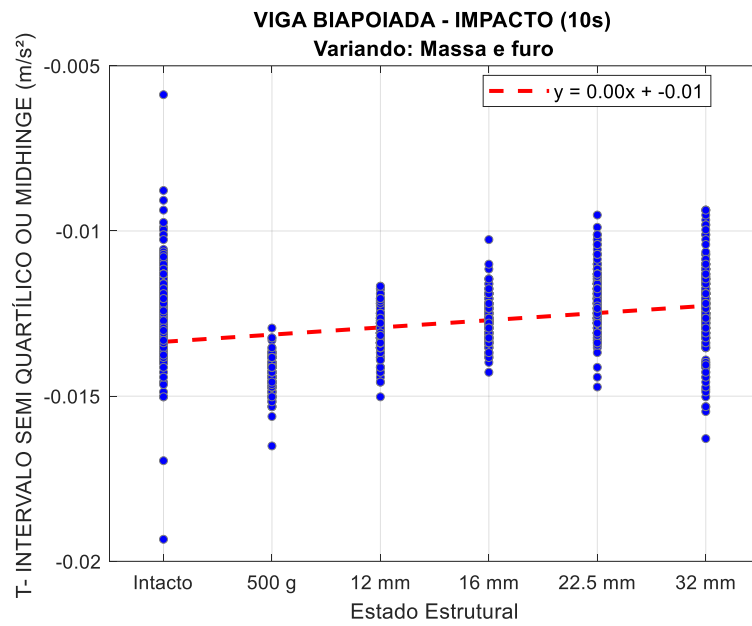


Figura F.114 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

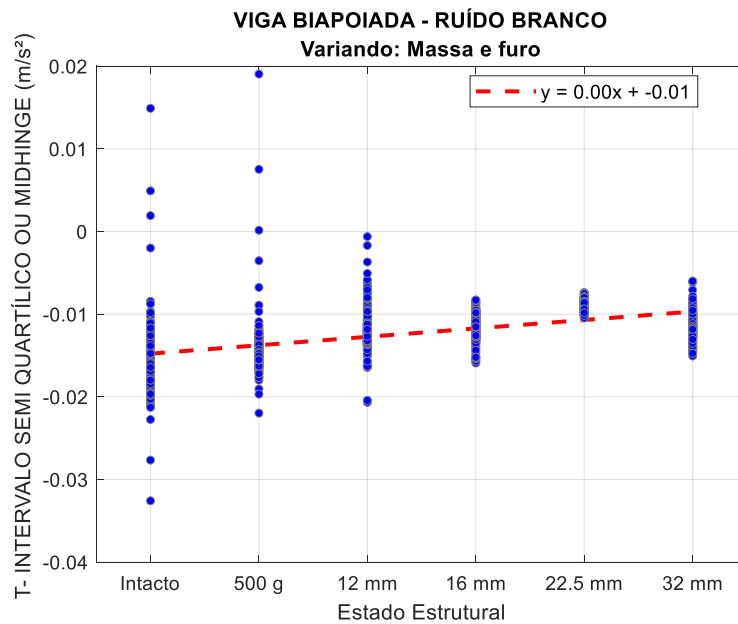


Figura F.115 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

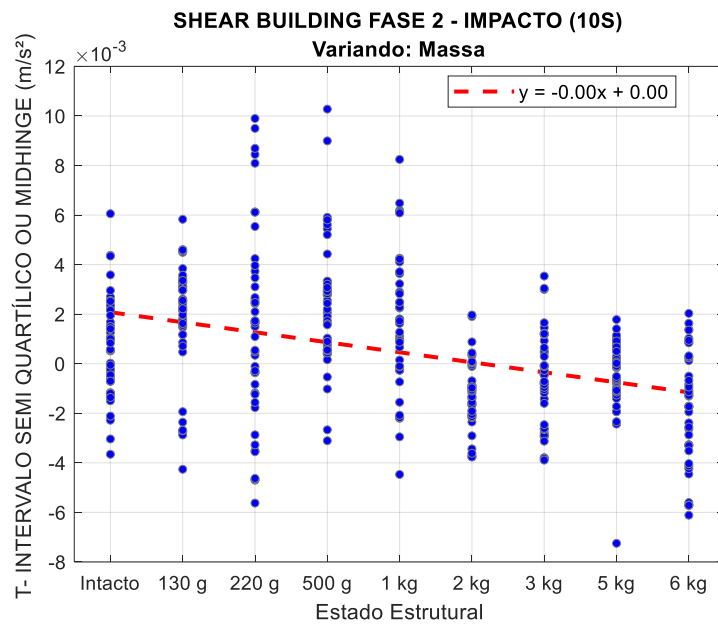


Figura F.116 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

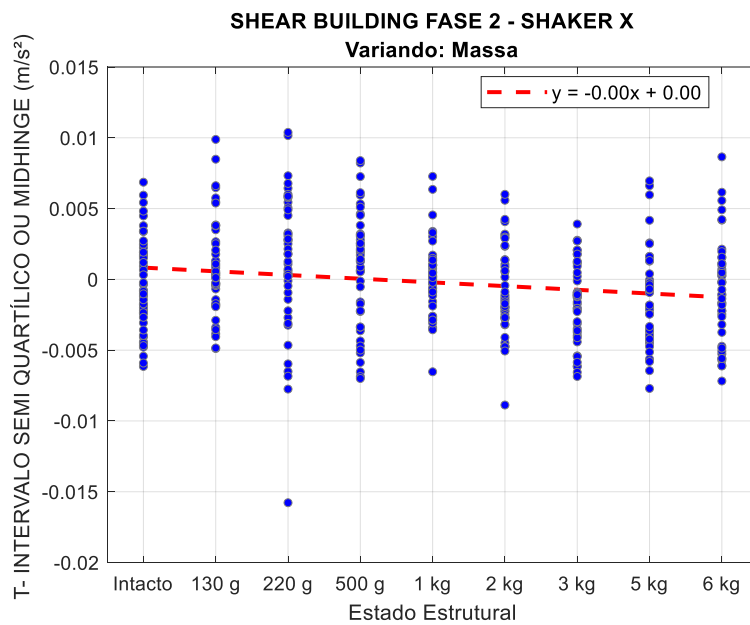


Figura F.117 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

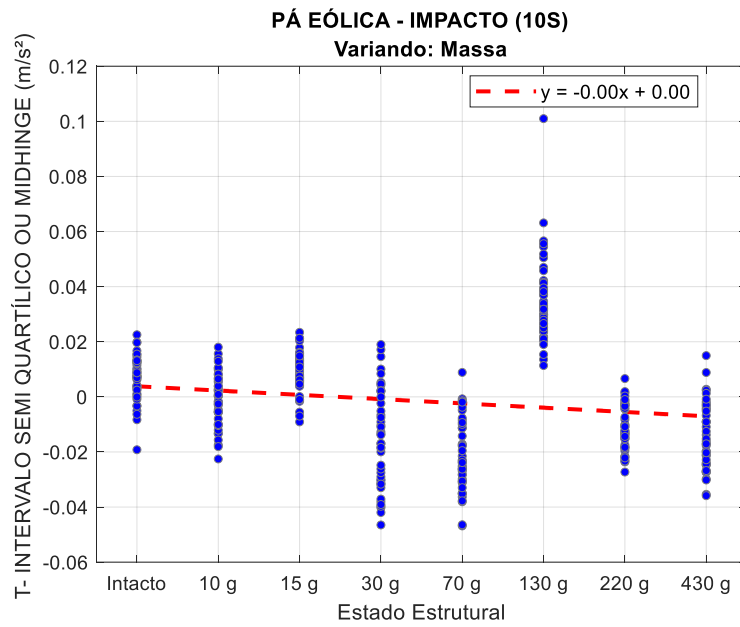


Figura F.118 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

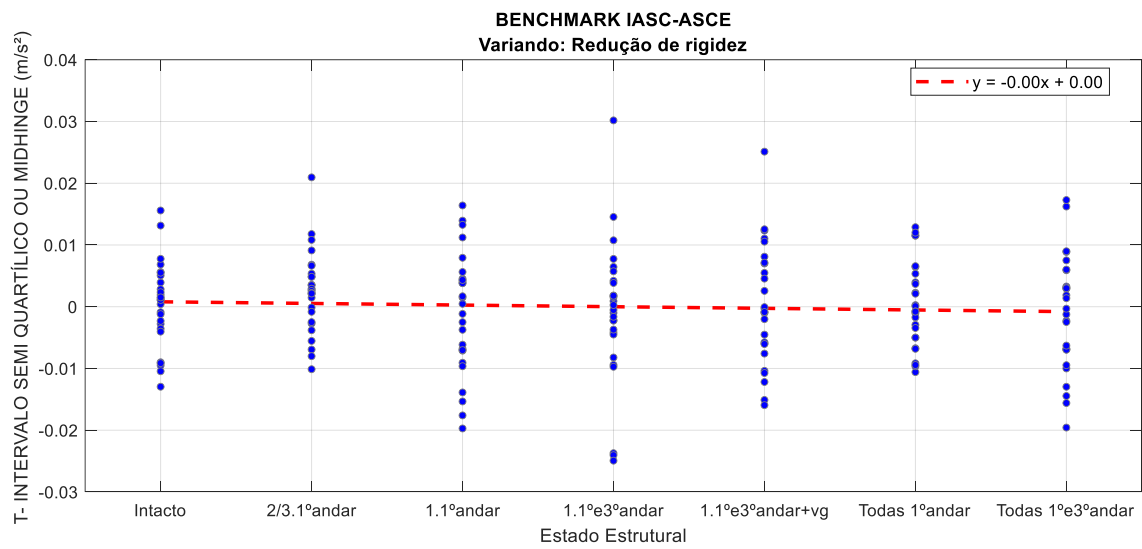
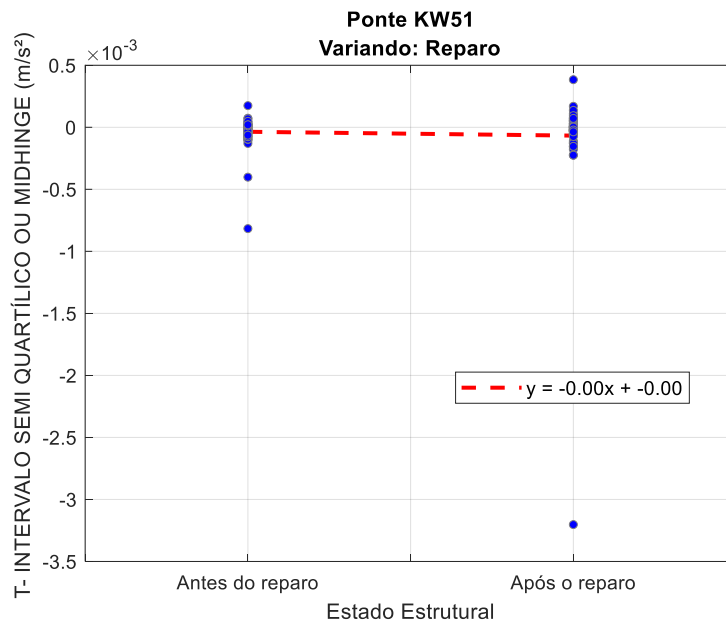


Figura F.119 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3.6. Desvio Médio

Figura F.120 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

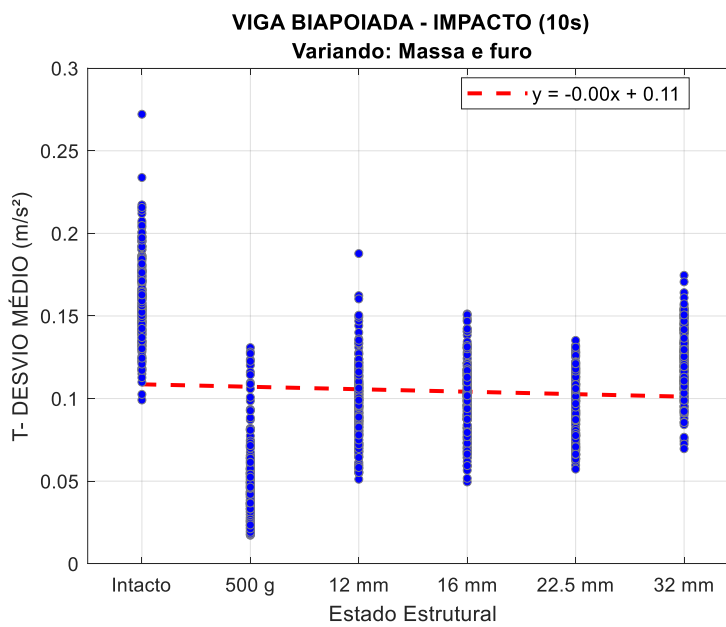


Figura F.121 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

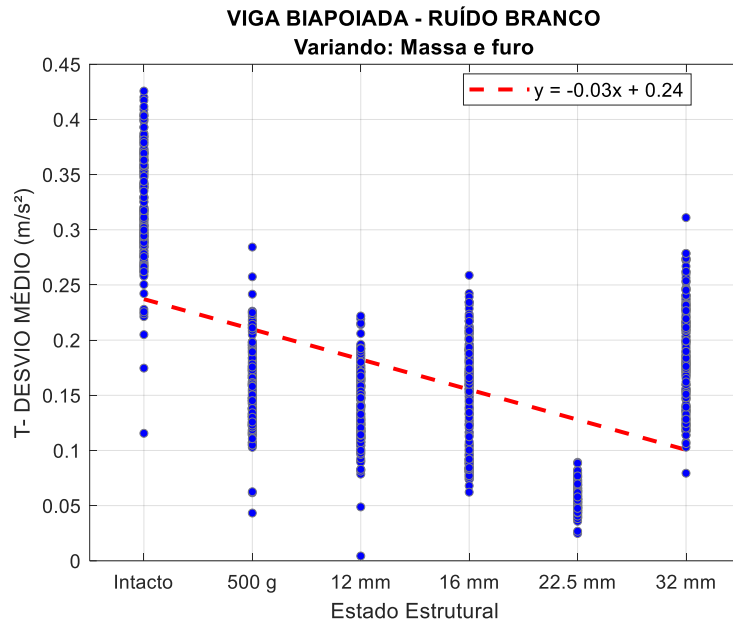


Figura F.122 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

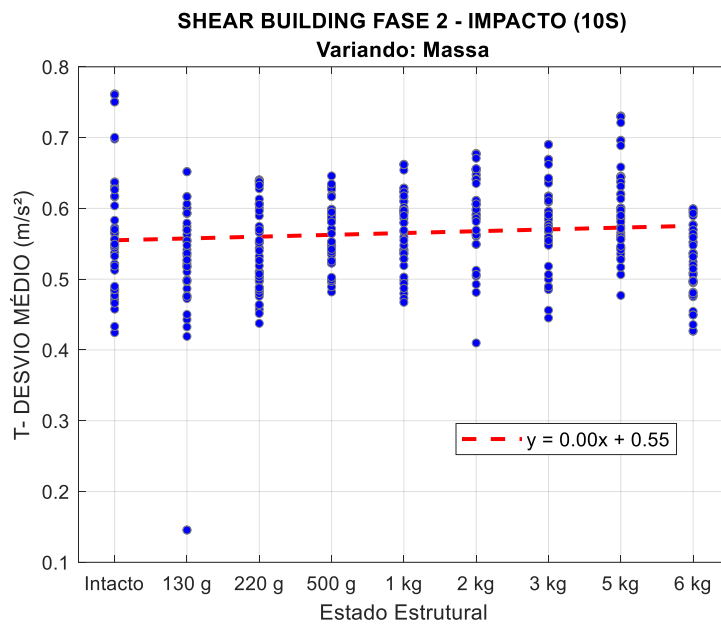


Figura F.123 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

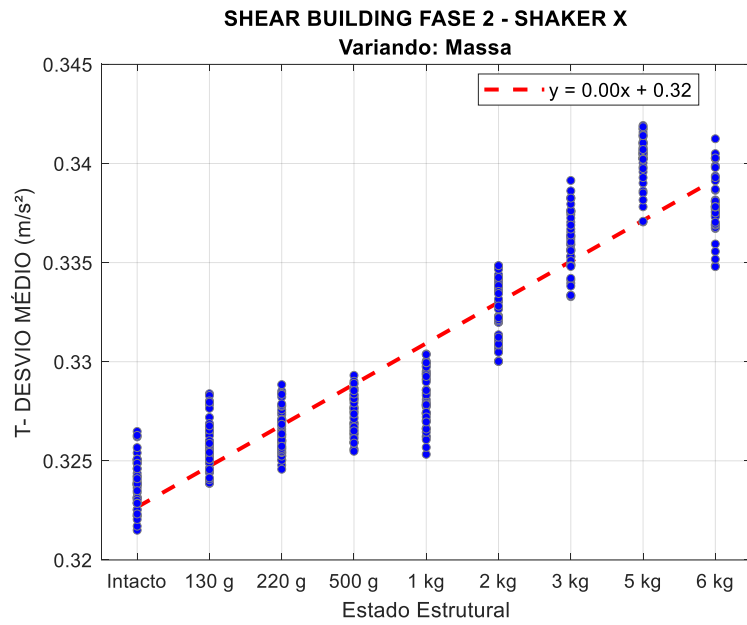


Figura F.124 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

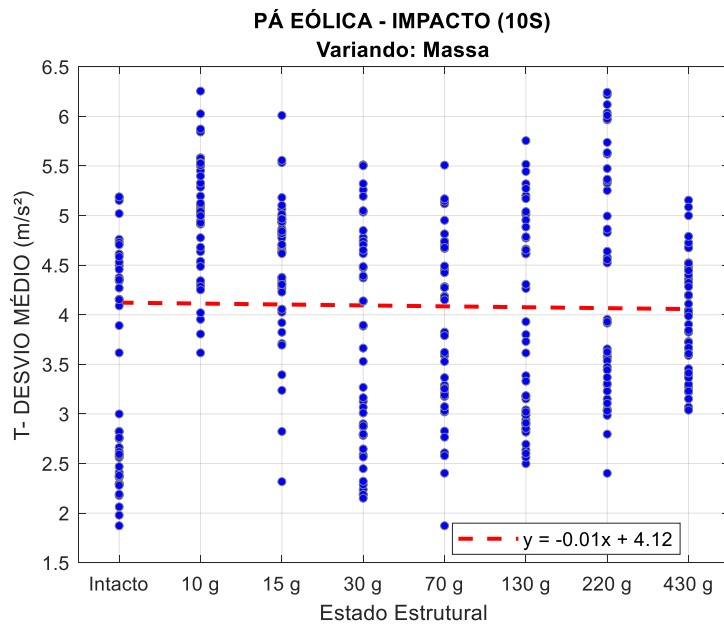


Figura F.125 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

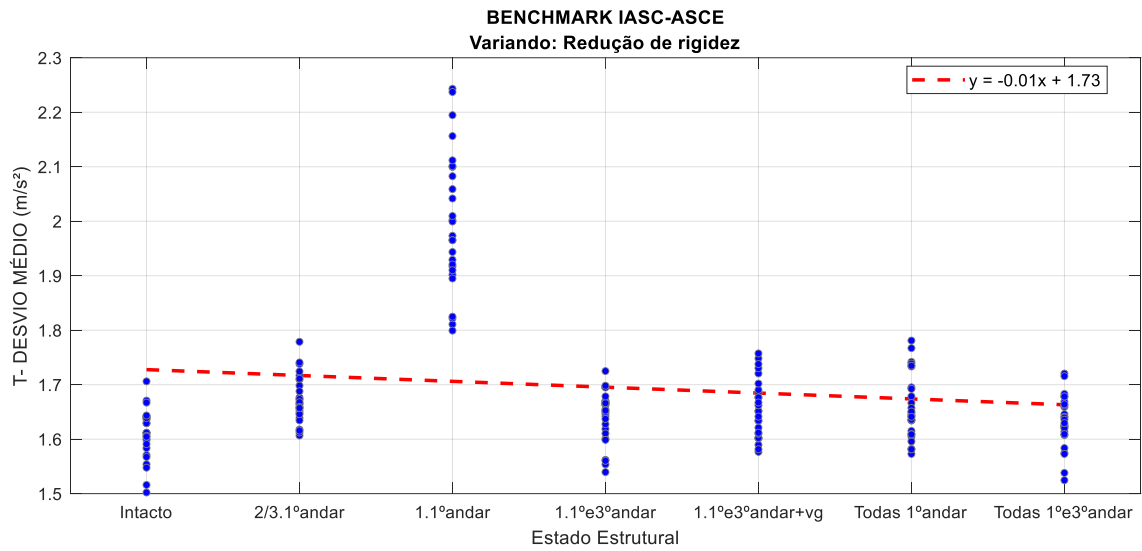
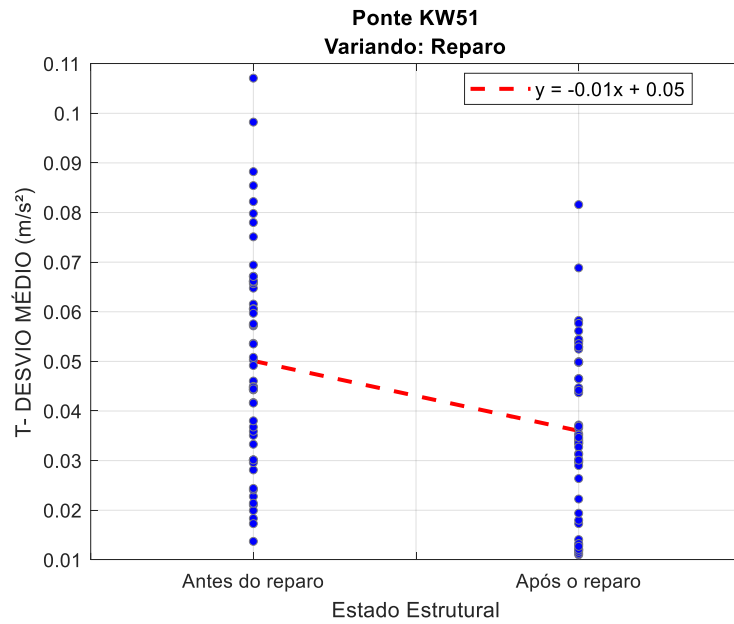


Figura F.126 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3.7. Variância

Figura F.127 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoçada, sob excitação de impacto a cada 10s.

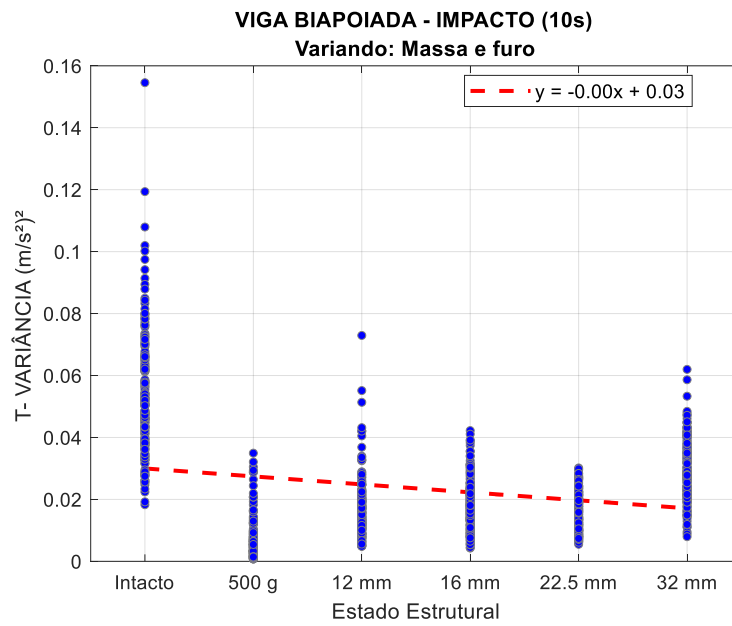


Figura F.128 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoçada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

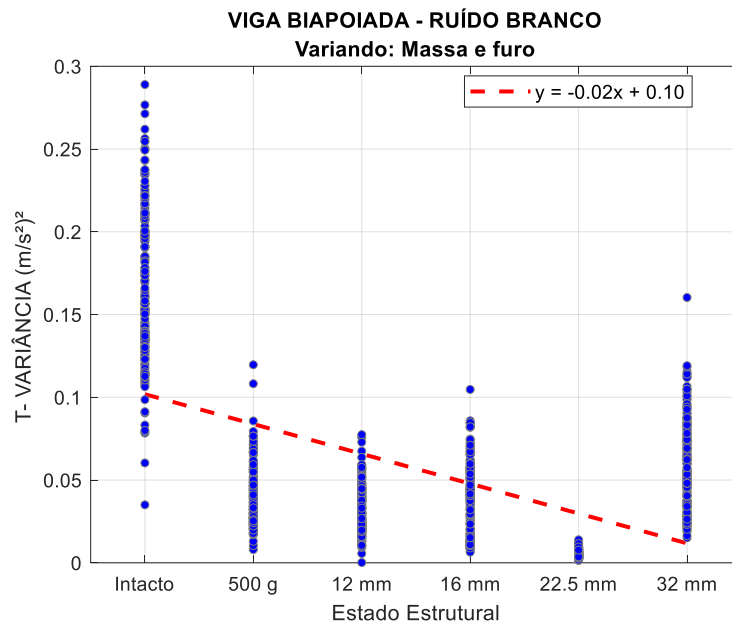


Figura F.129 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

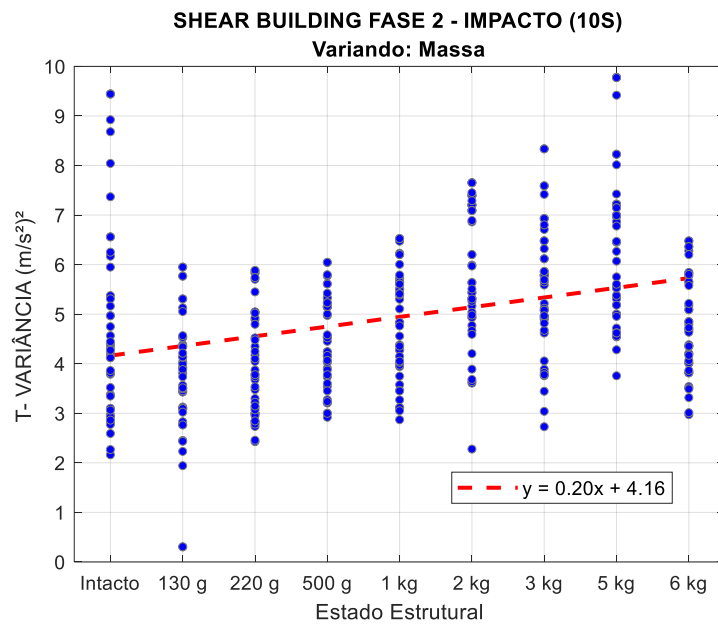


Figura F.130 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

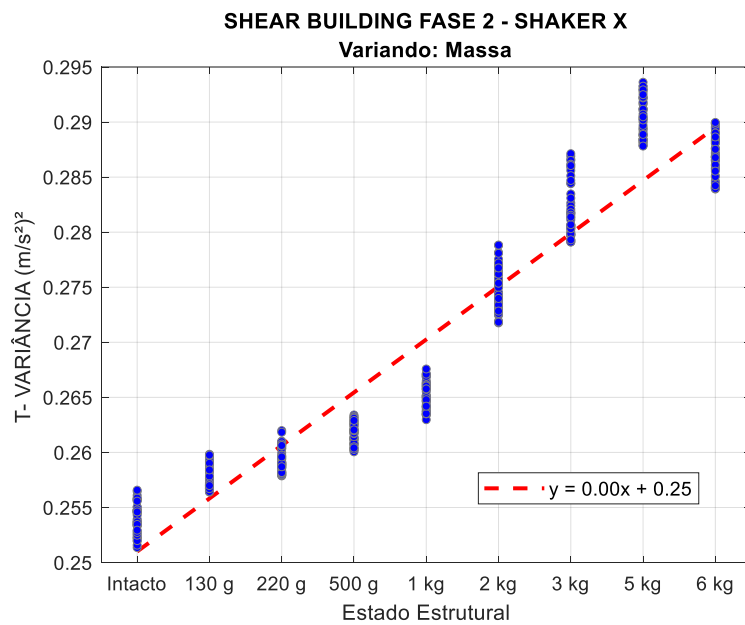


Figura F.131 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

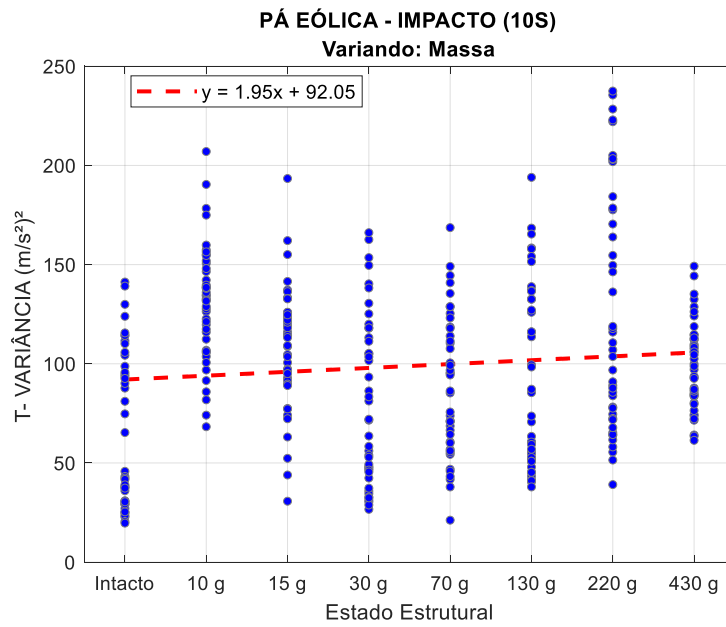


Figura F.132 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

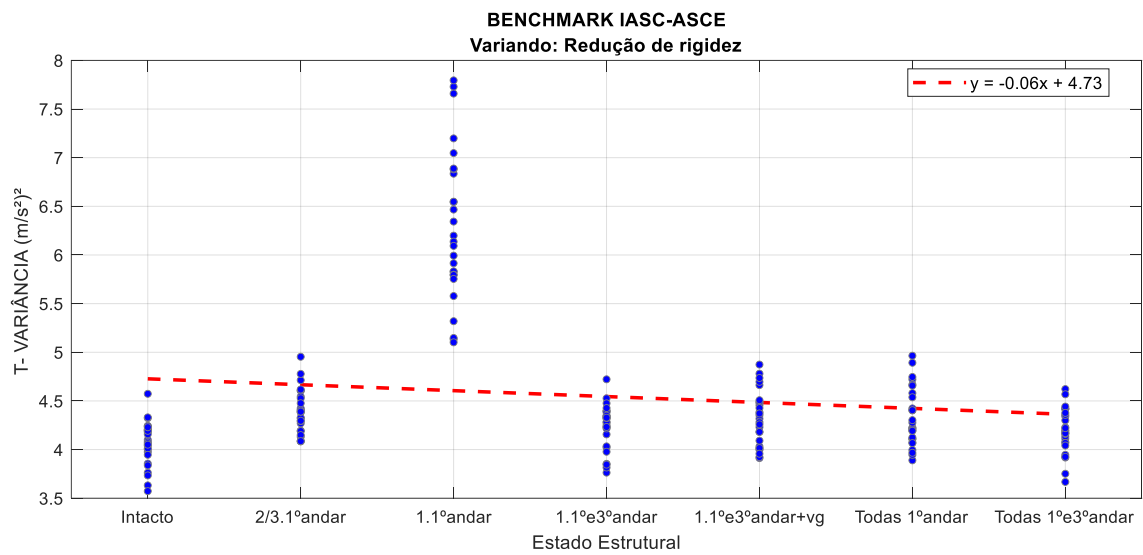
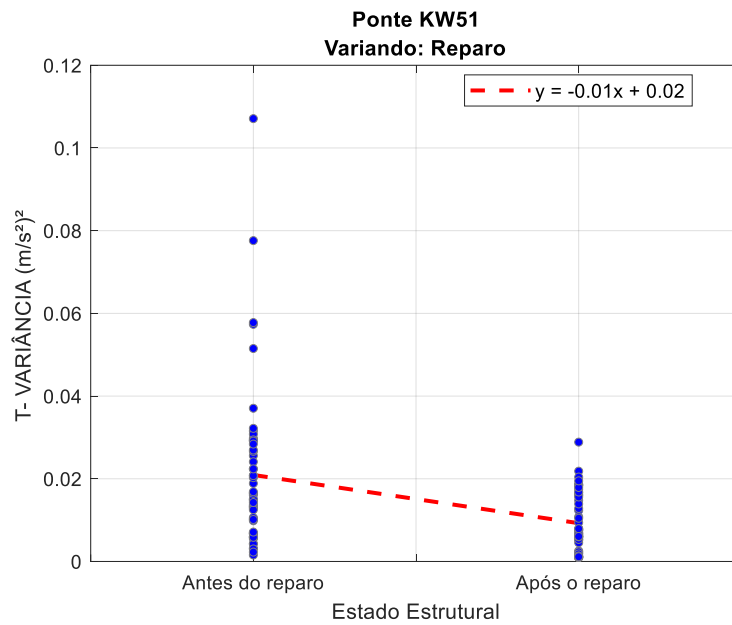


Figura F.133 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3.8. Desvio Padrão

Figura F.134 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

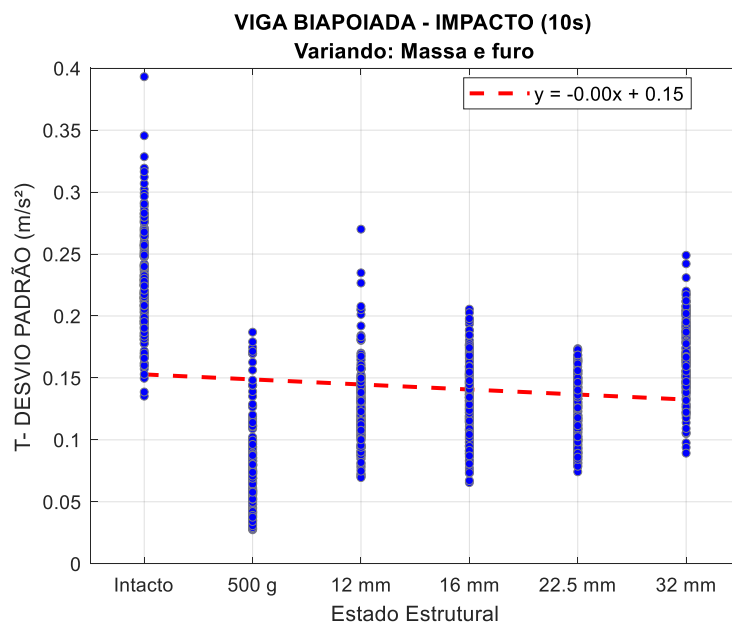


Figura F.135 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

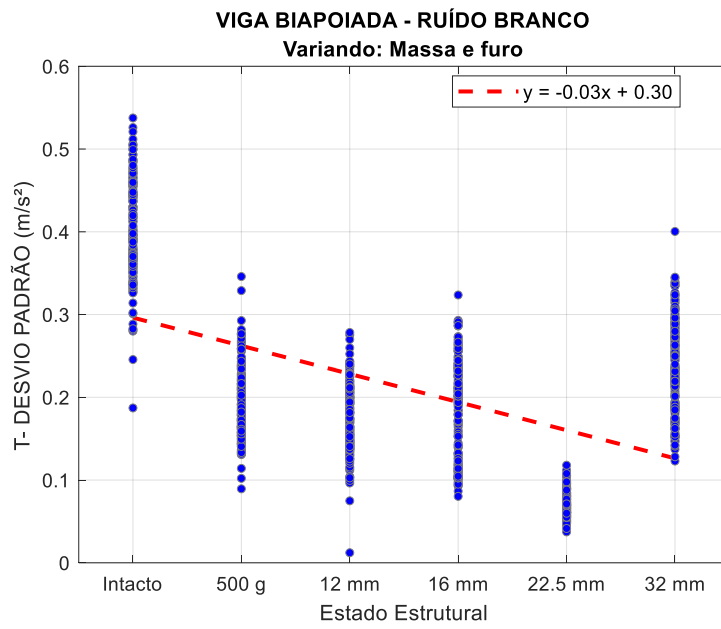


Figura F.136 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

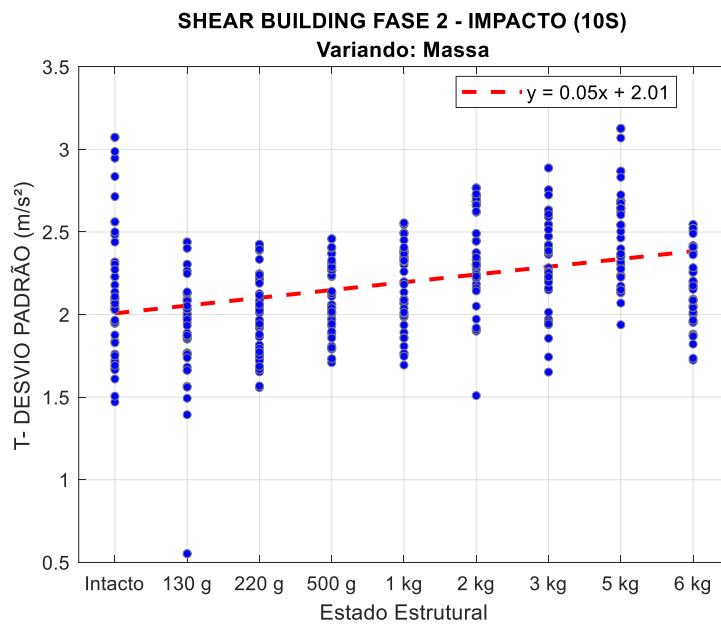


Figura F.137 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

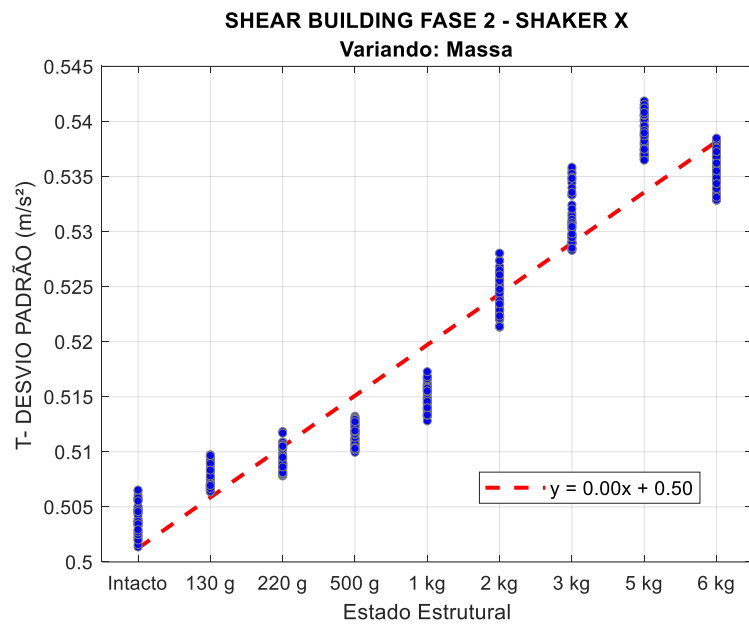


Figura F.138 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

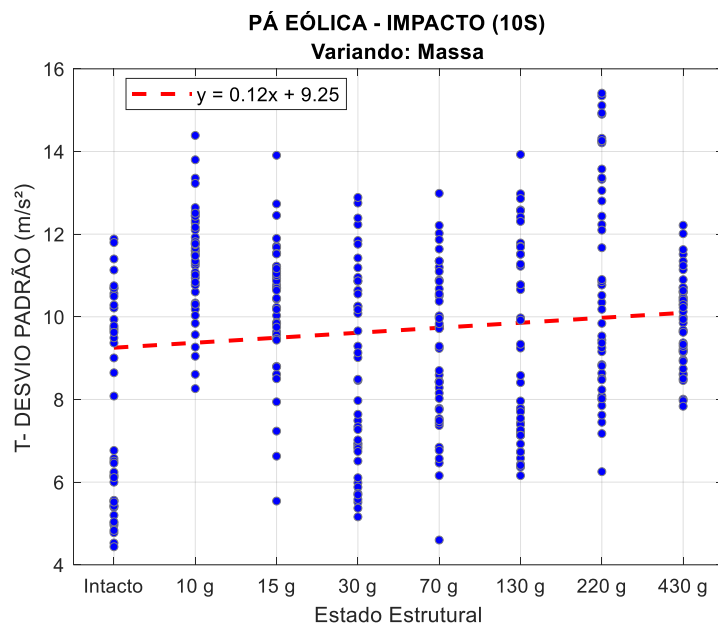


Figura F.139 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

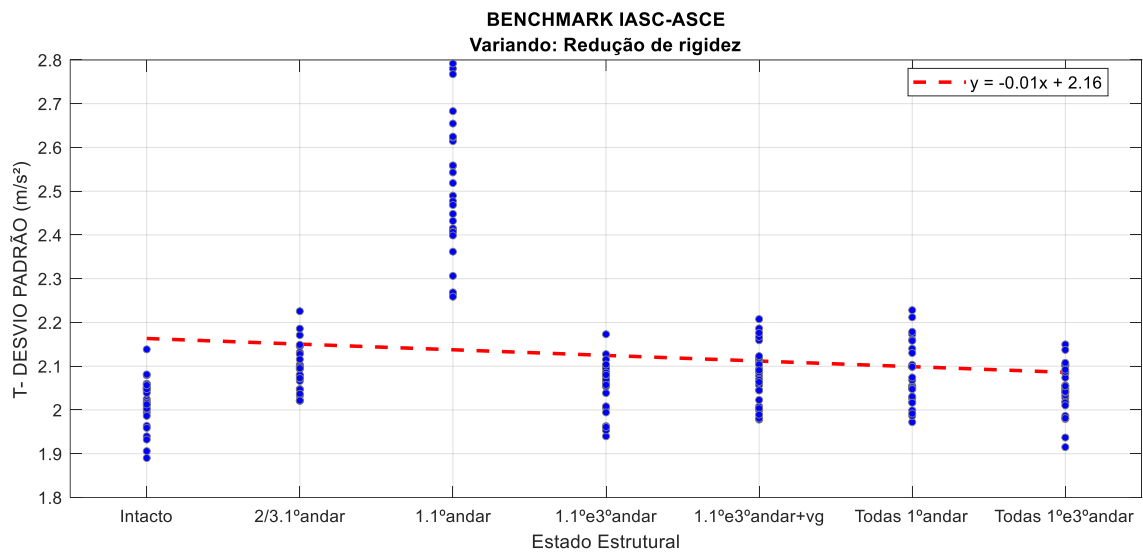
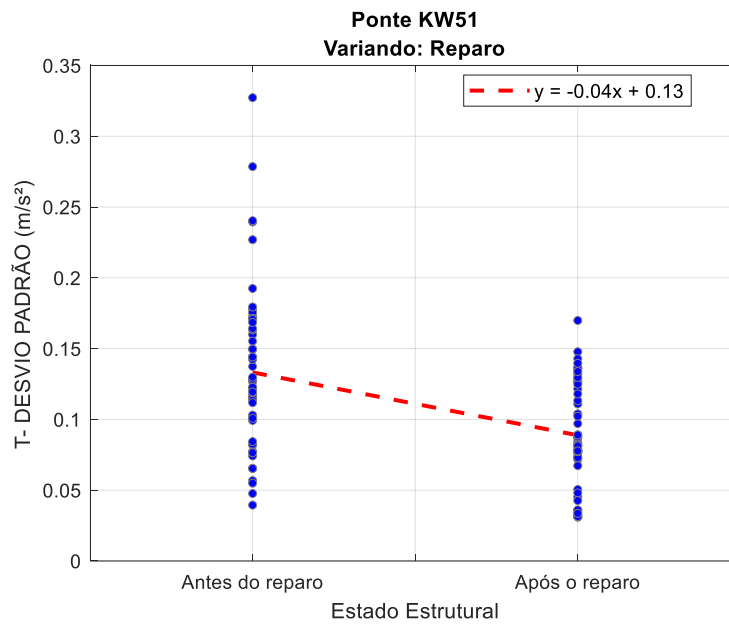


Figura F.140 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.3.9. Coeficiente de Variação

Figura F.141 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

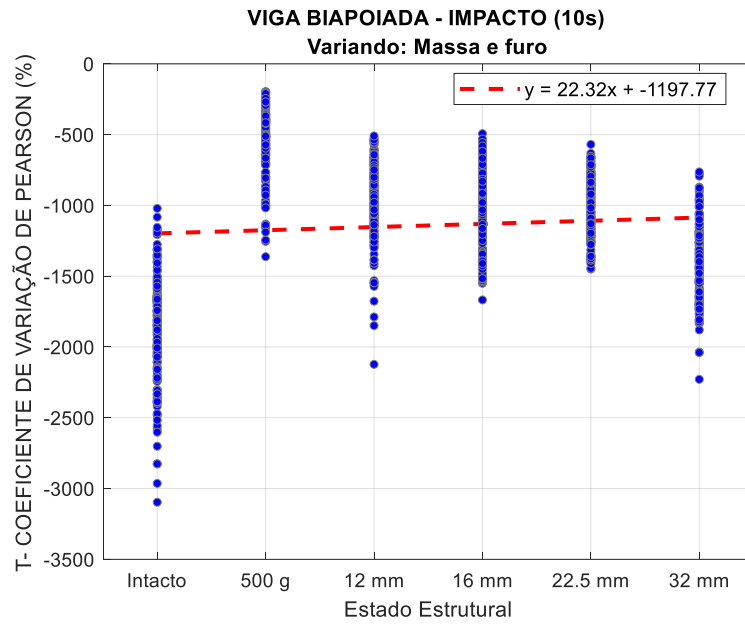


Figura F.142 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

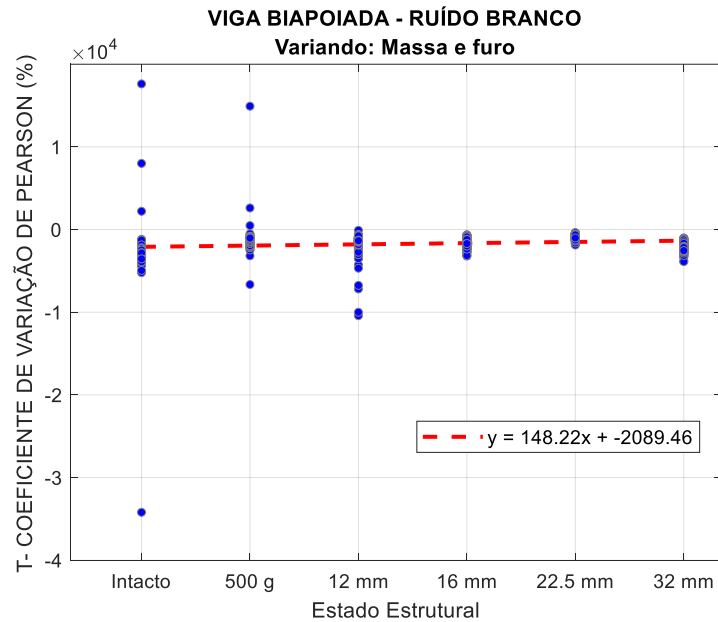


Figura F.143 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

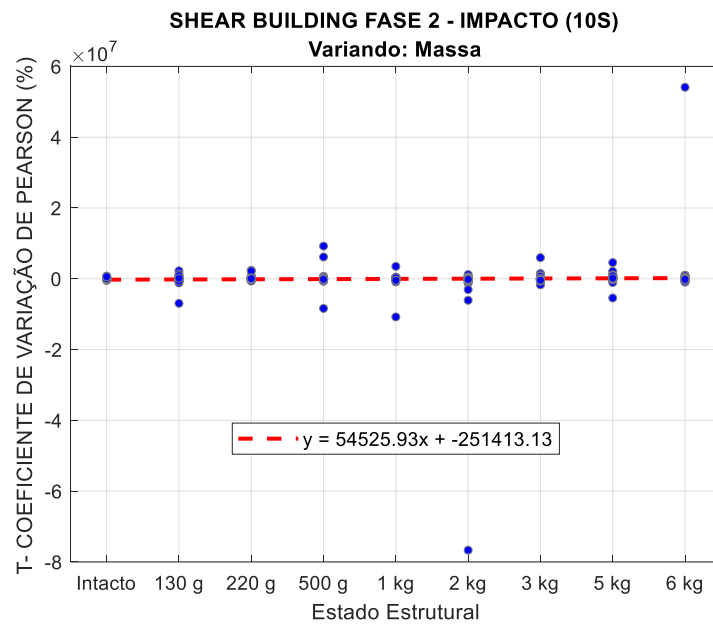


Figura F.144 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

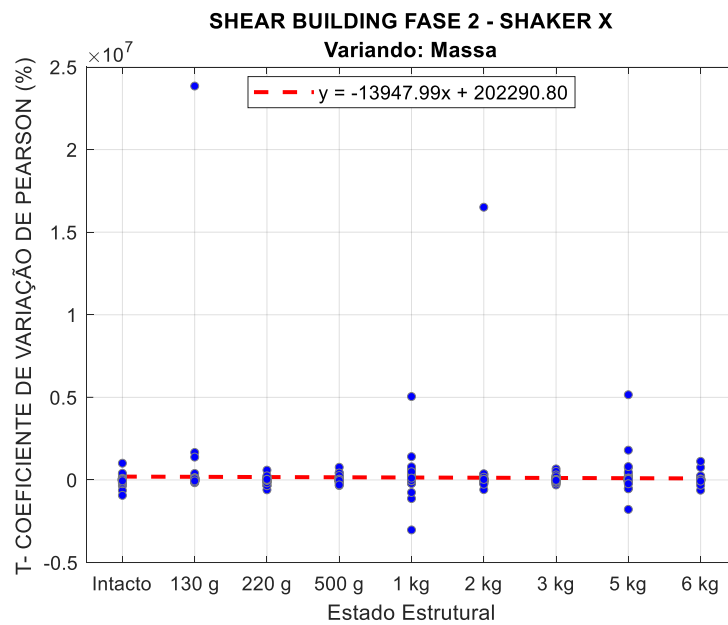


Figura F.145 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

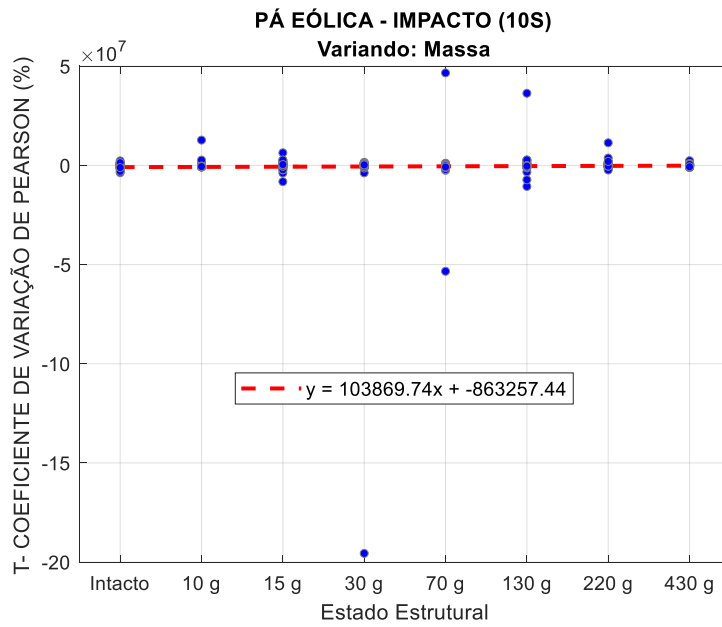


Figura F.146 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

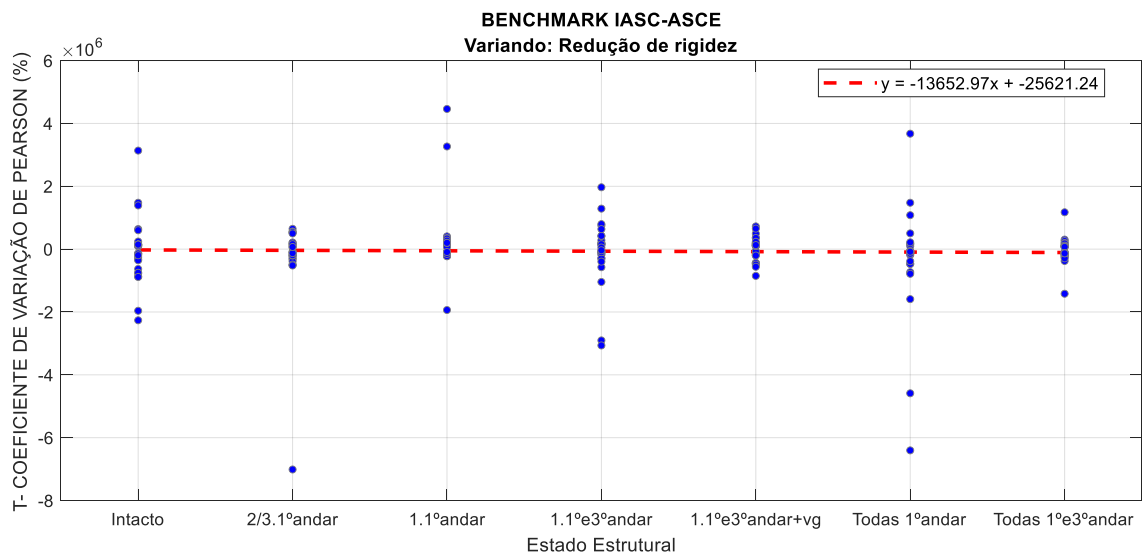
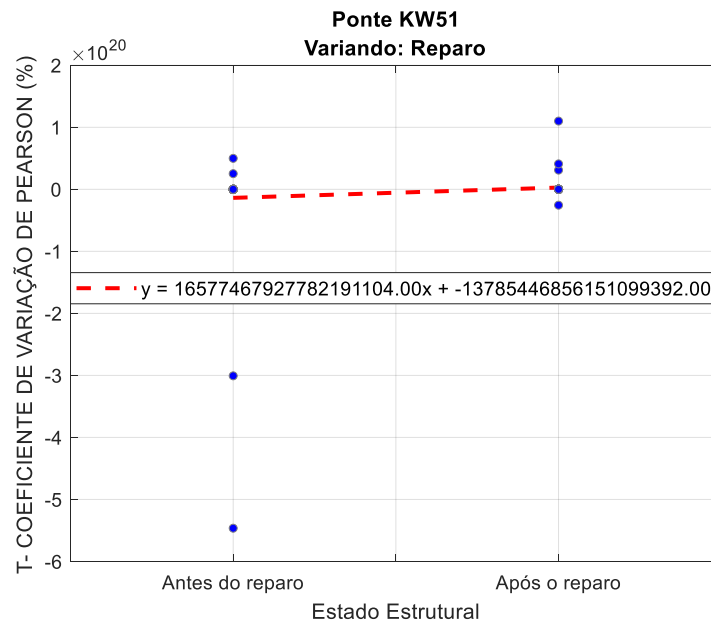


Figura F.147 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4. PARÂMETROS DE FORMA

F.4.1. Assimetria

Figura F.148 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

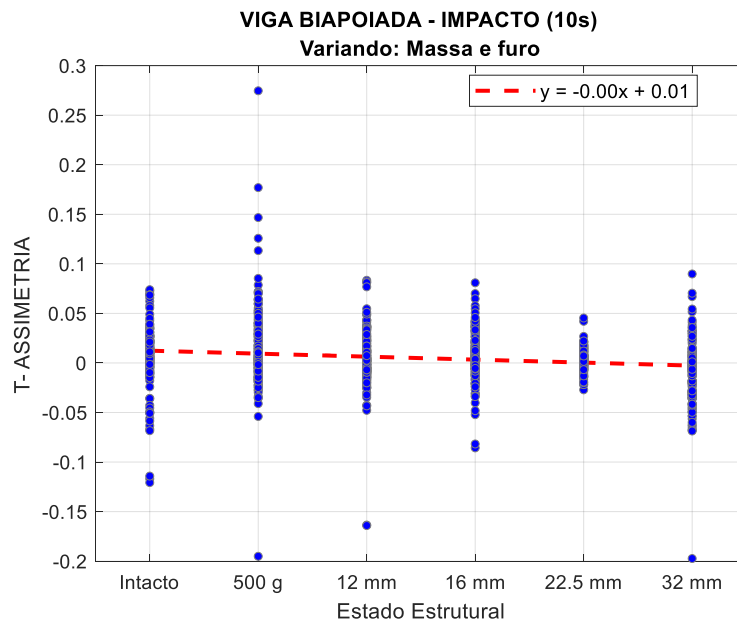


Figura F.149 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

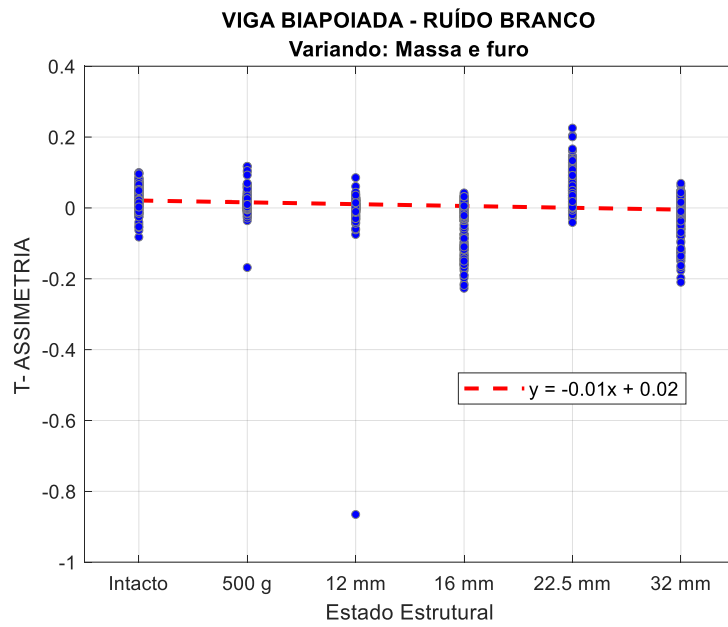


Figura F.150 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

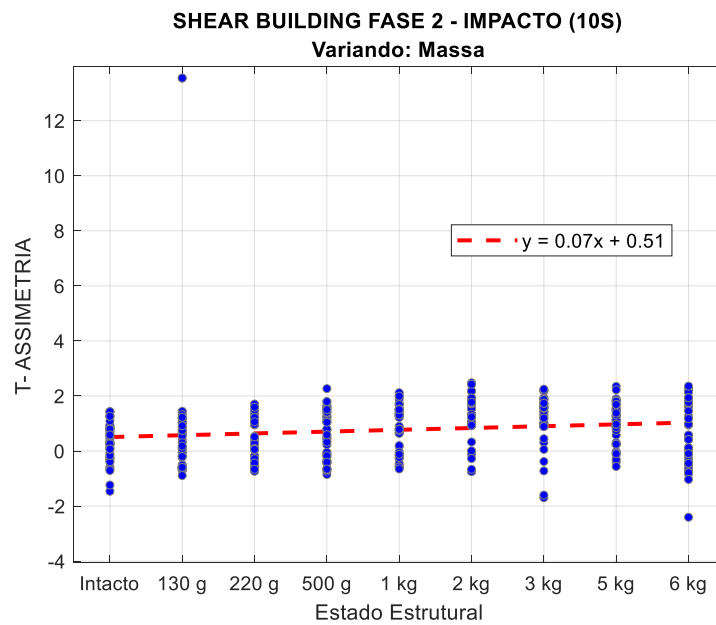


Figura F.151 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

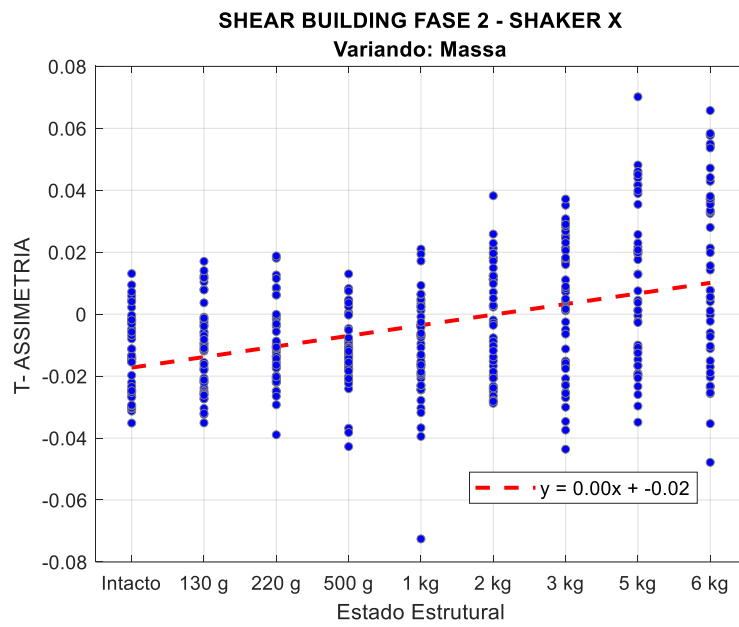


Figura F.152 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

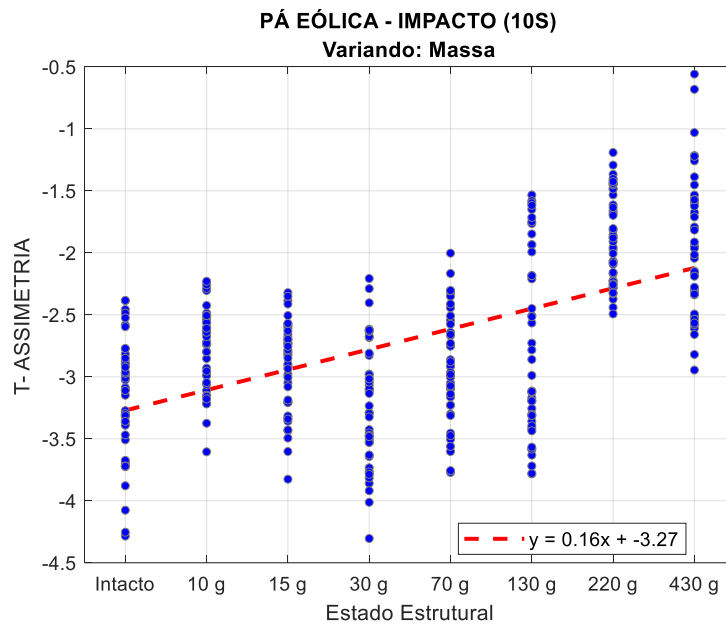


Figura F.153 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

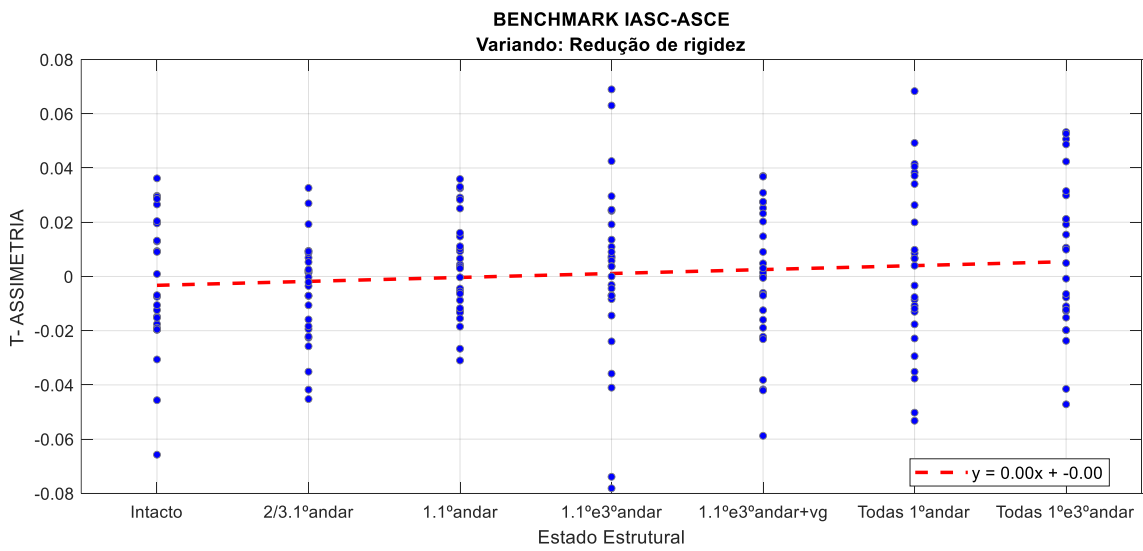
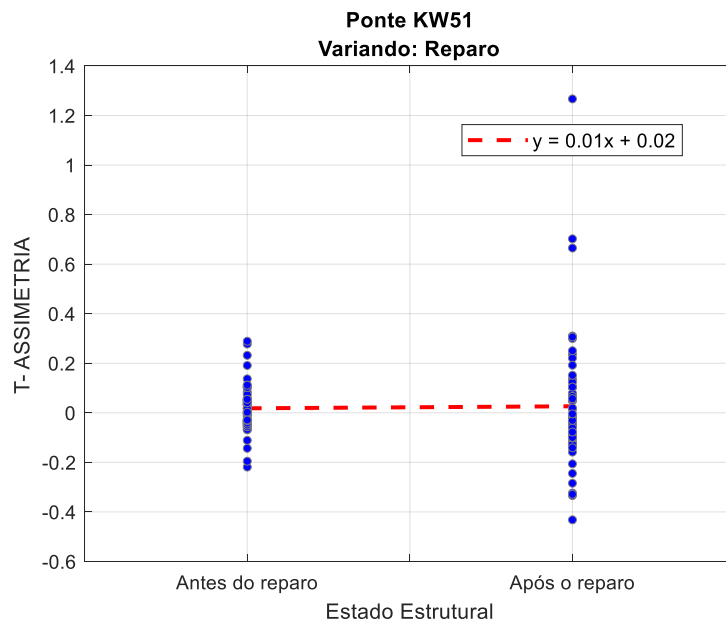


Figura F.154 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.2. Curtose

Figura F.155 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

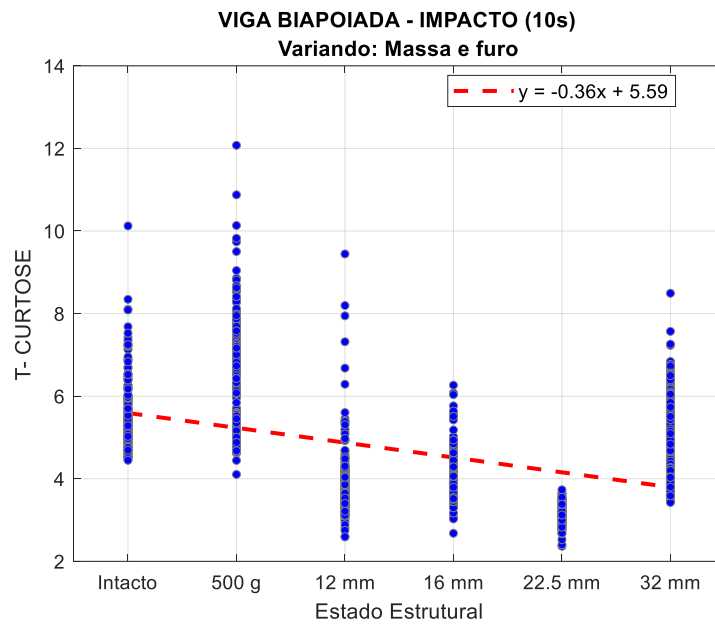


Figura F.156 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

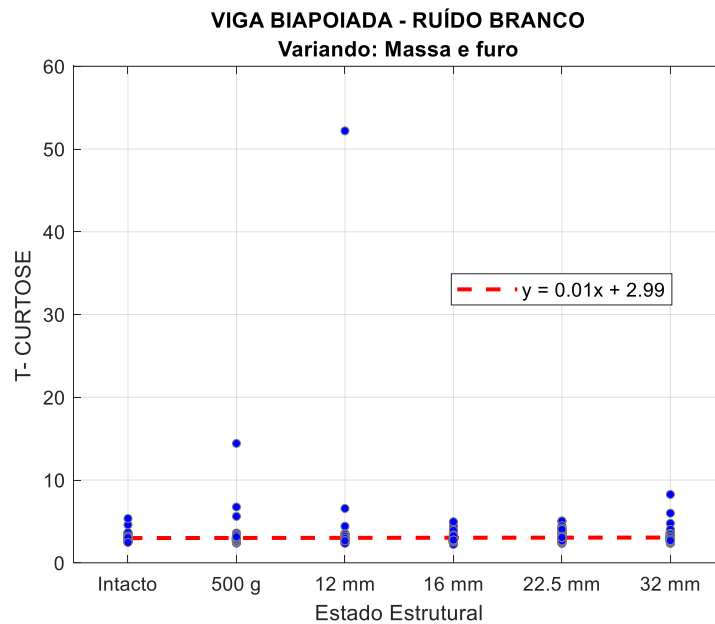


Figura F.157 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

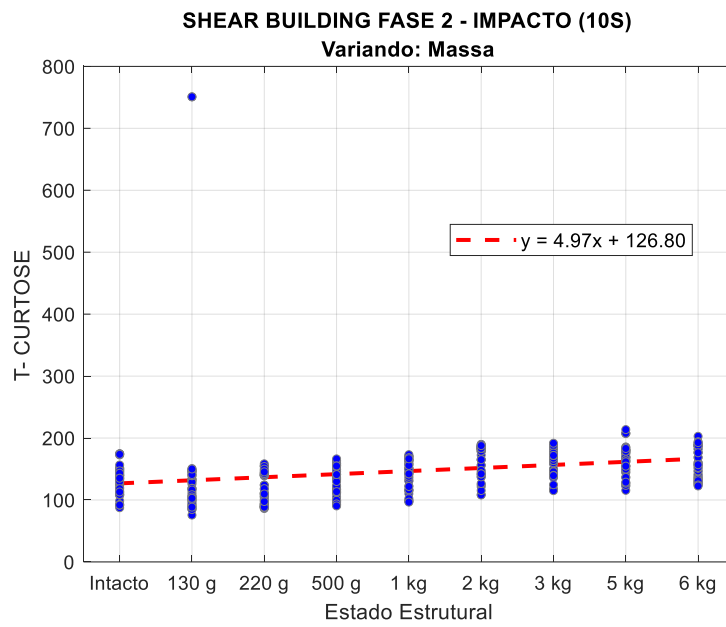


Figura F.158 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

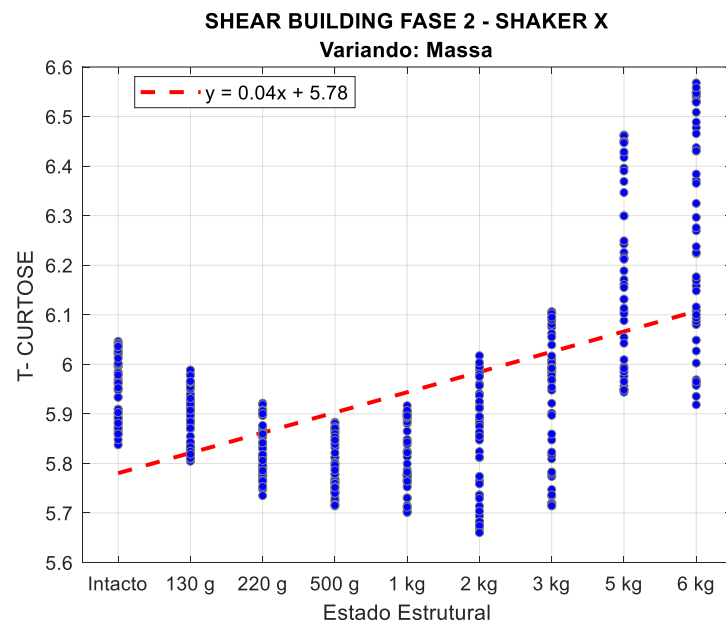


Figura F.159 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

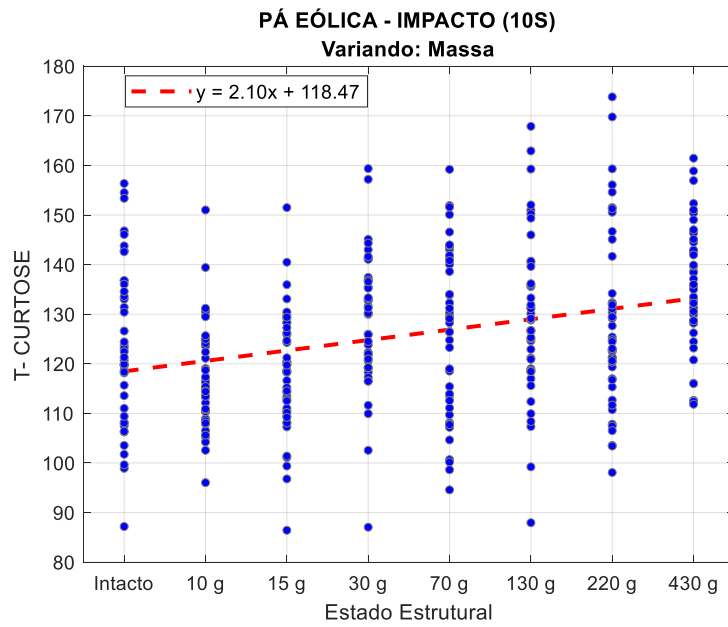


Figura F.160 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

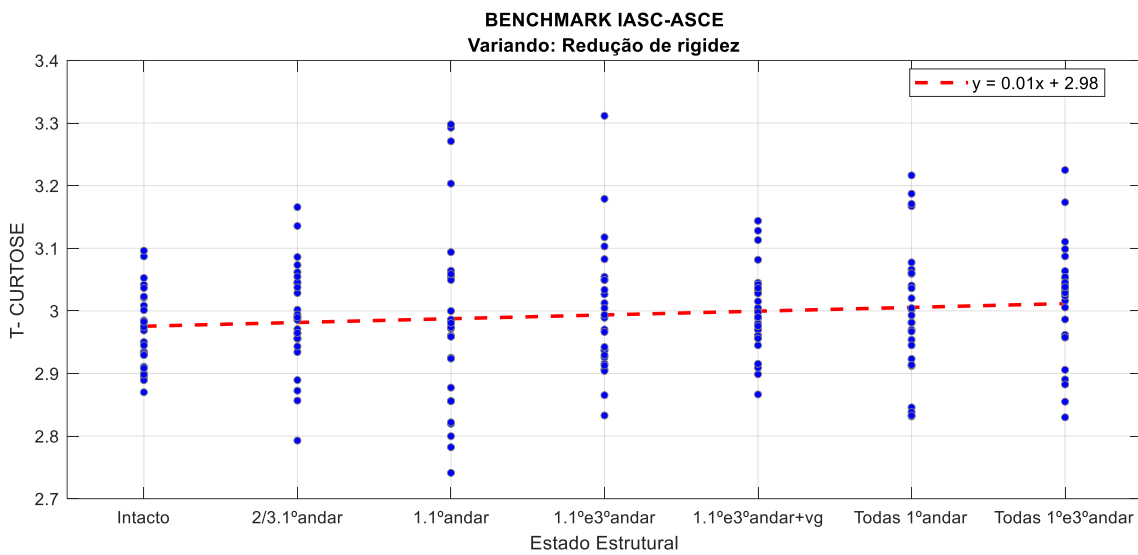
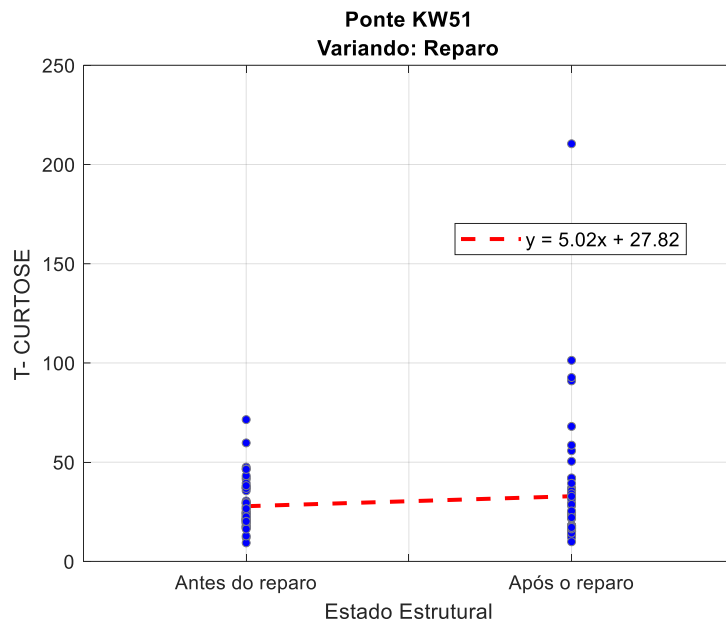


Figura F.161 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.3. Coeficiente do Momento de Sexta Ordem

Figura F.162 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

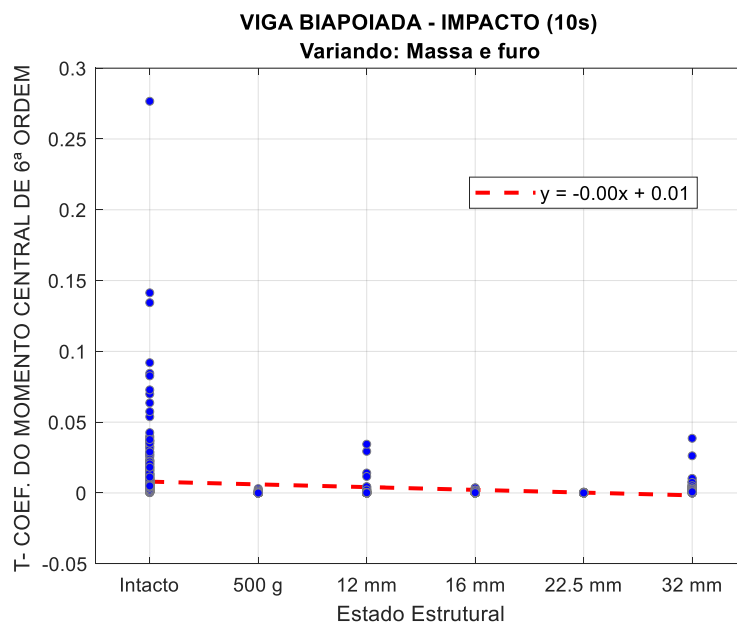


Figura F.163 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

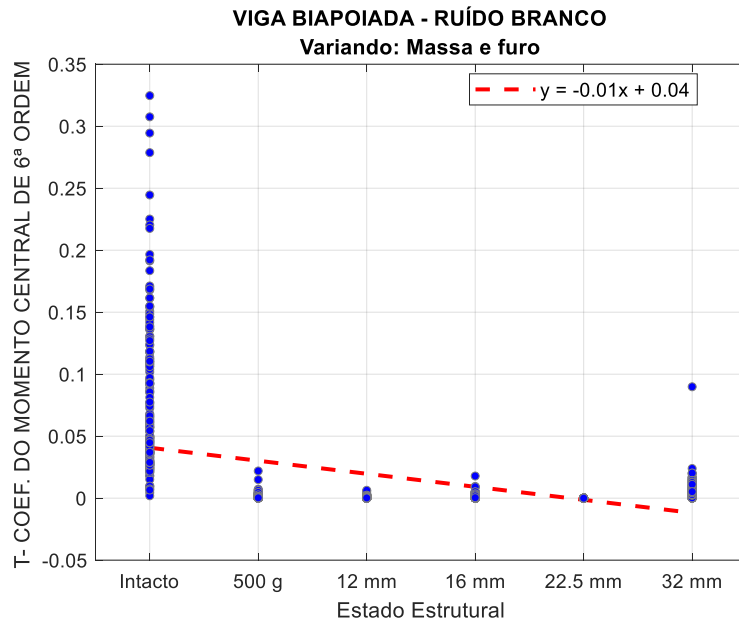


Figura F.164 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

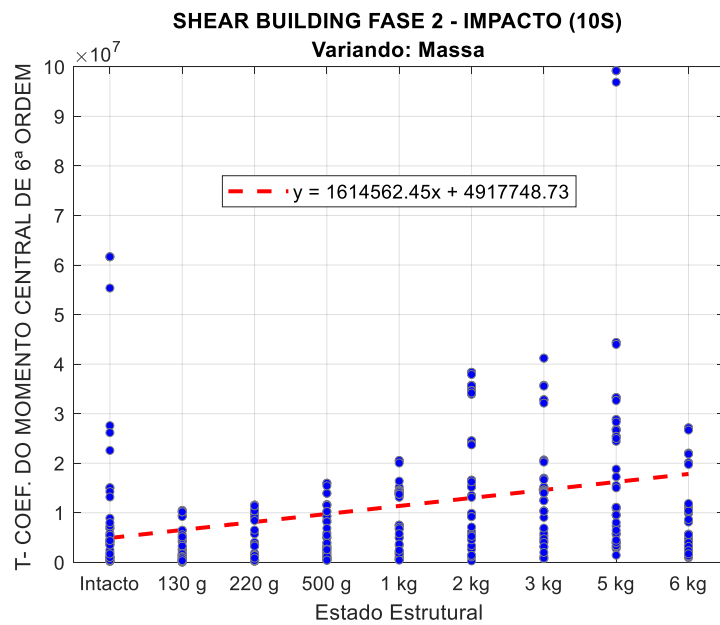


Figura F.165 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

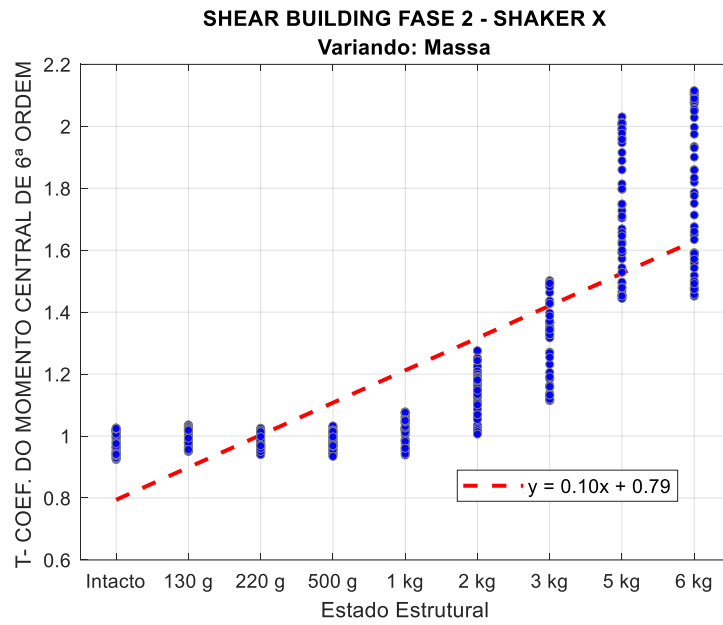


Figura F.166 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

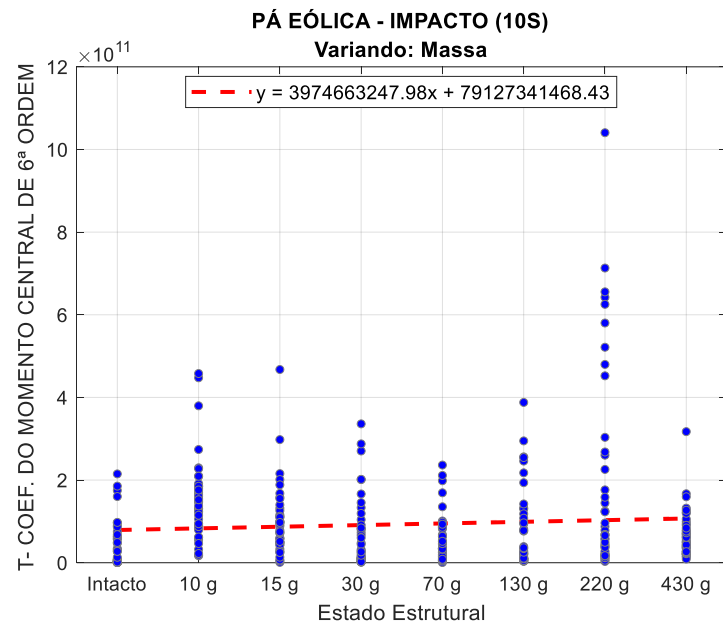


Figura F.167 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

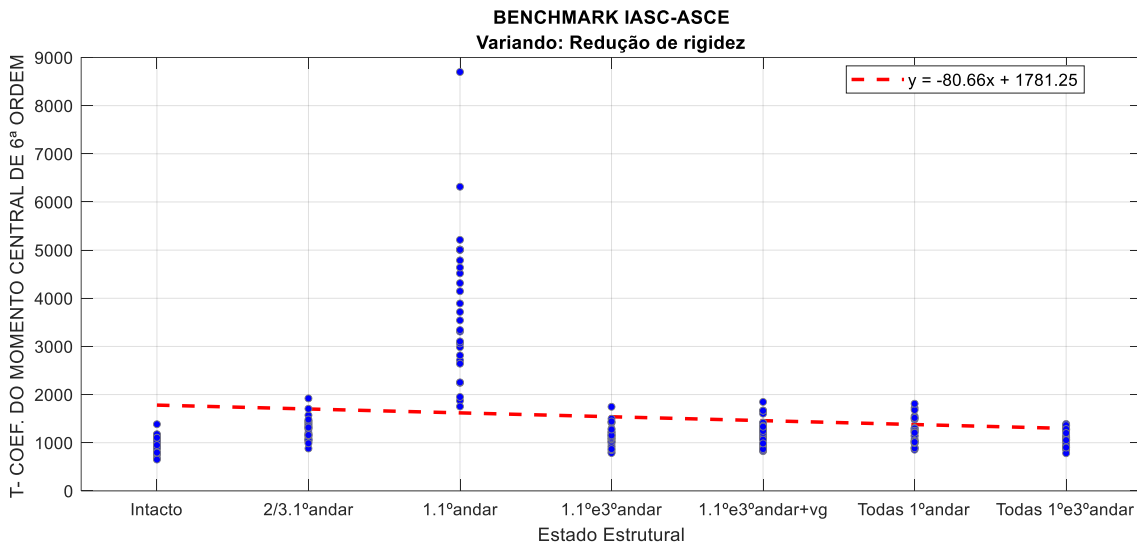
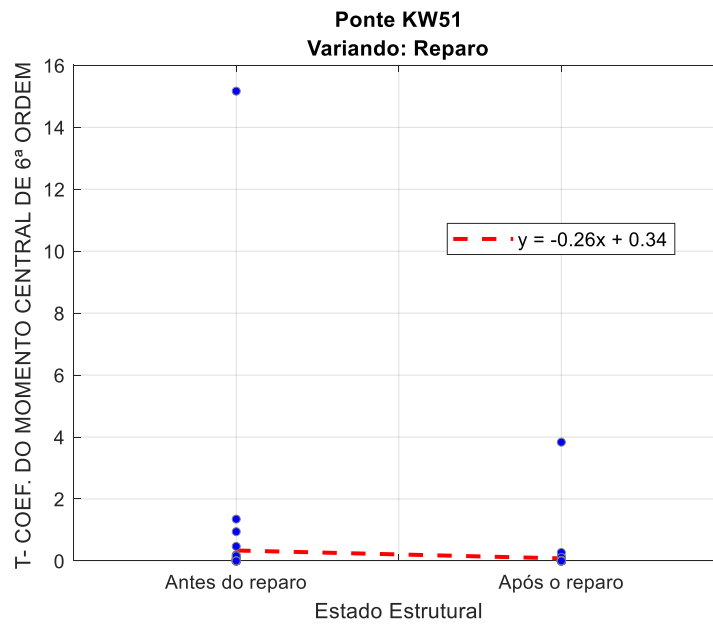


Figura F.168 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.4. Coeficiente Quartílico de Assimetria

Figura F.169 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

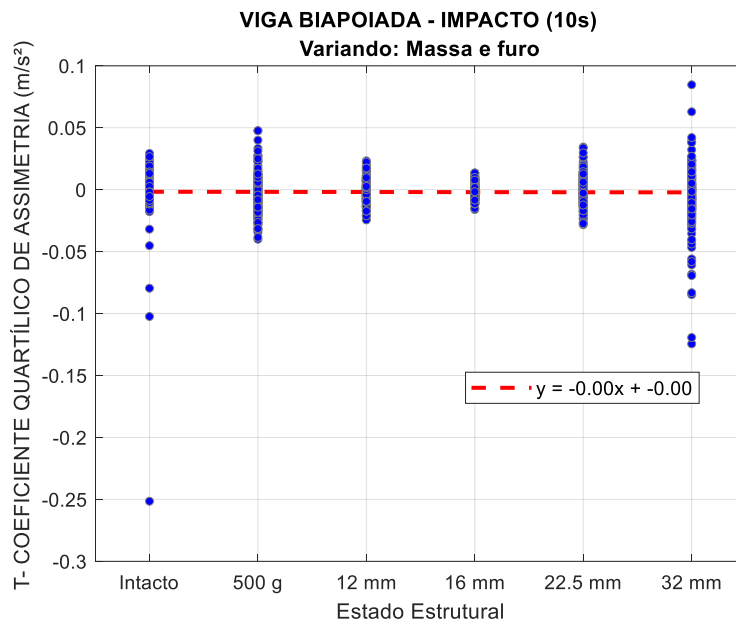


Figura F.170 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

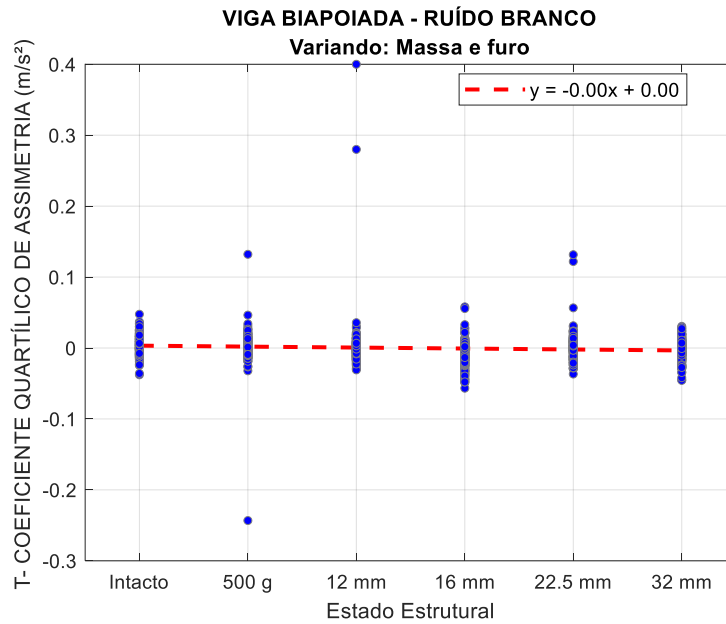


Figura F.171 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

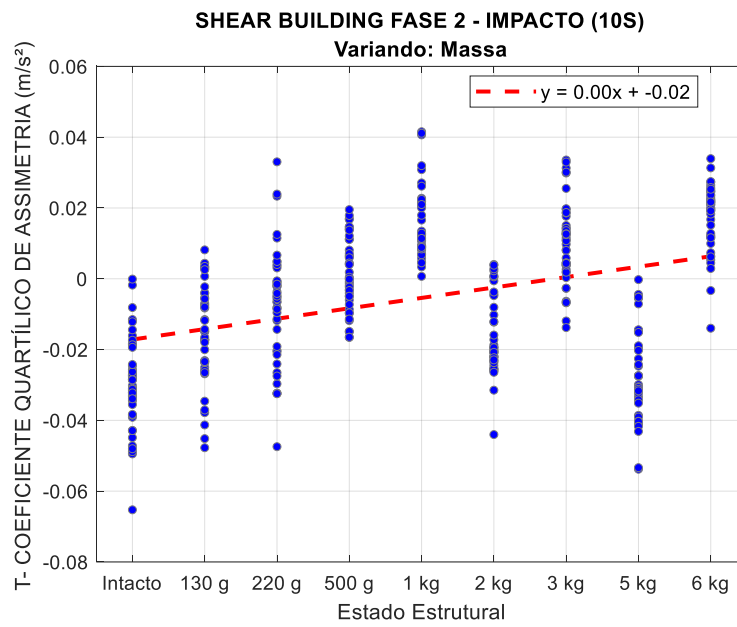


Figura F.172 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

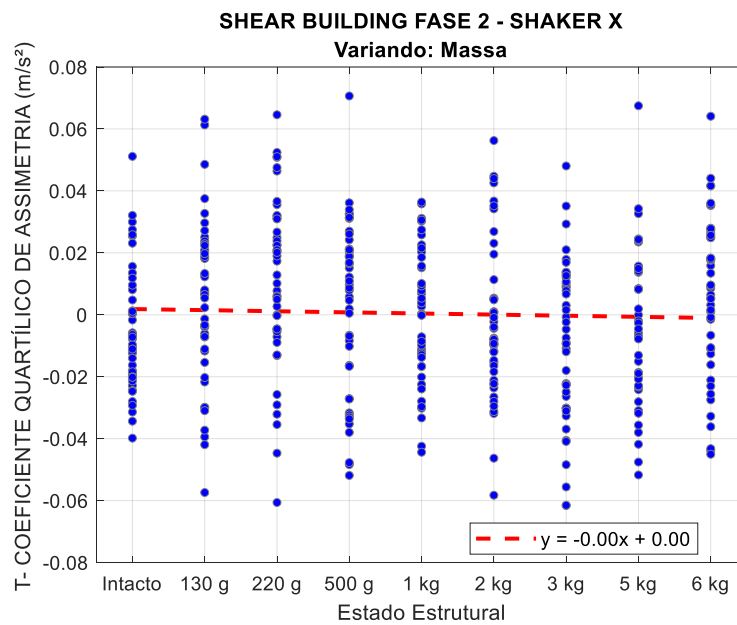


Figura F.173 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

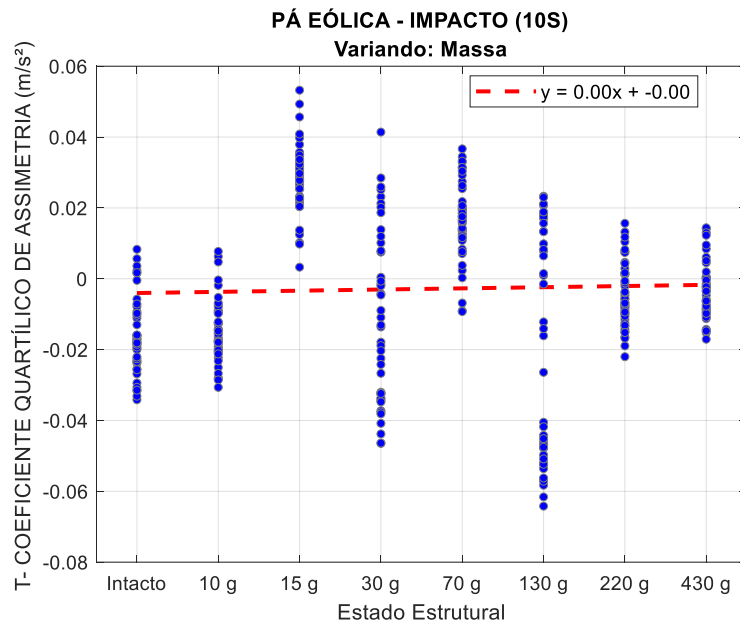


Figura F.174 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

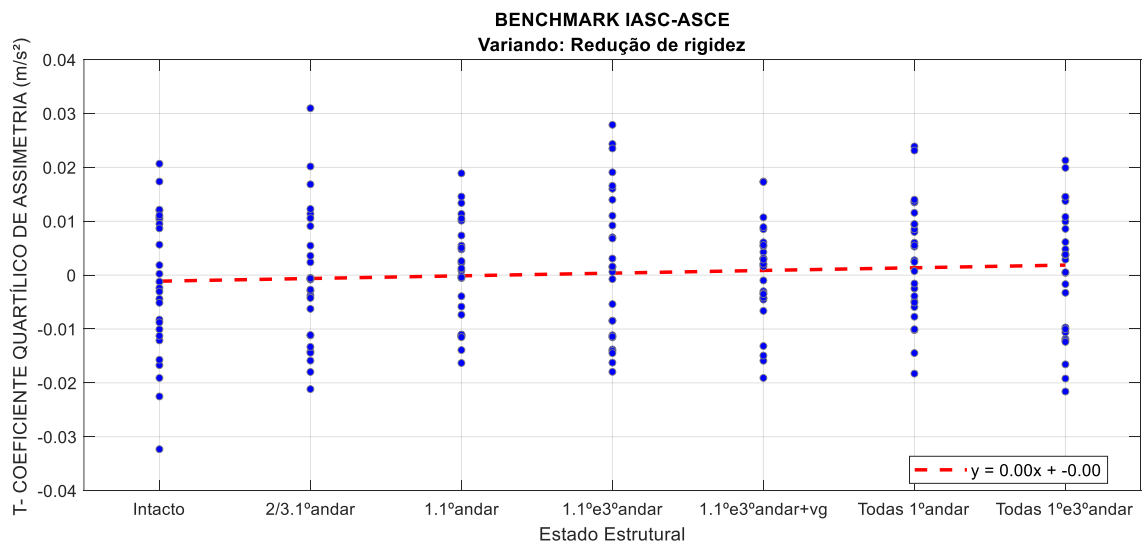
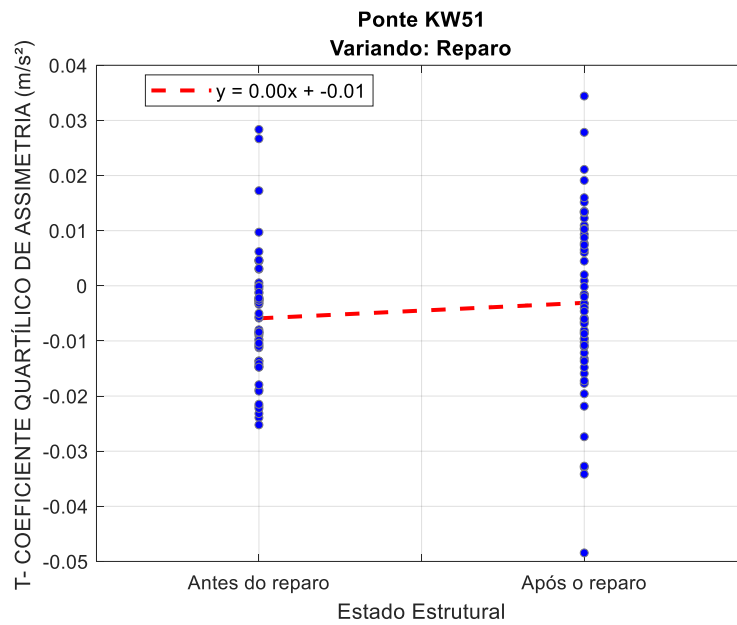


Figura F.175 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.5. Coeficiente Percentílico de Curtose

Figura F.176 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

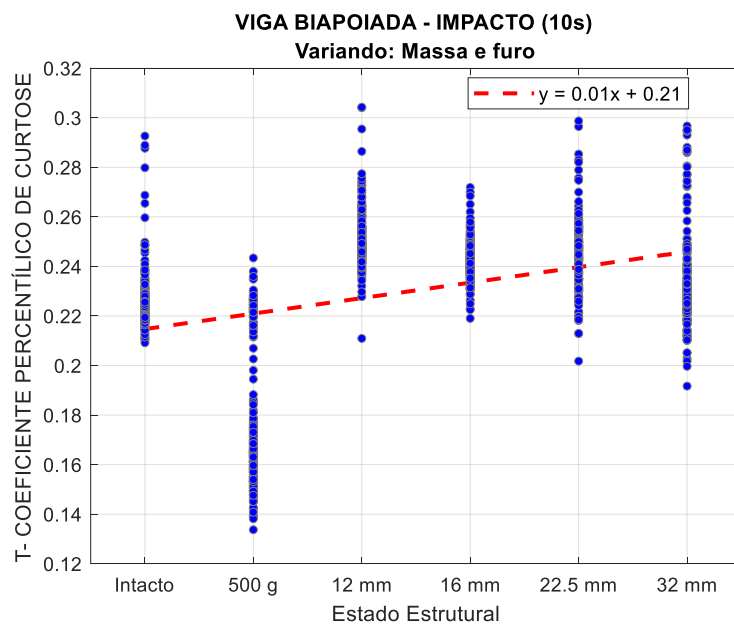


Figura F.177 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

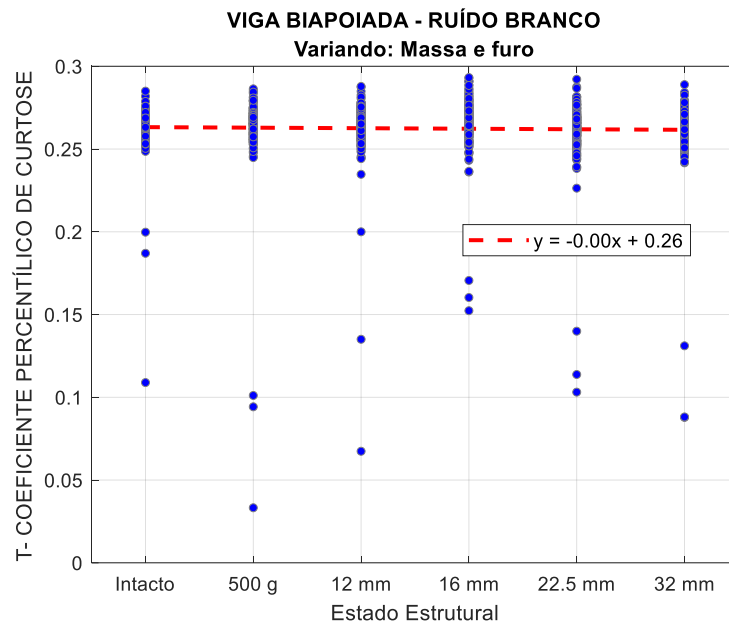


Figura F.178 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

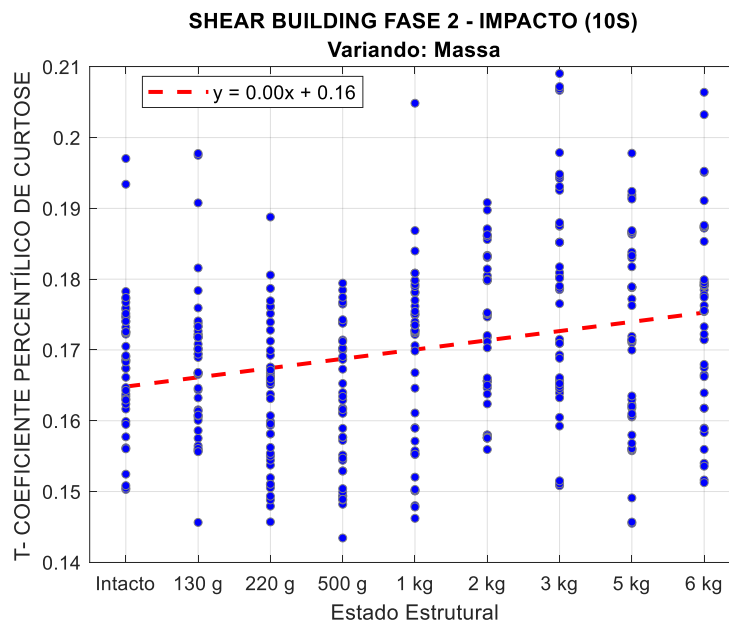


Figura F.179 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

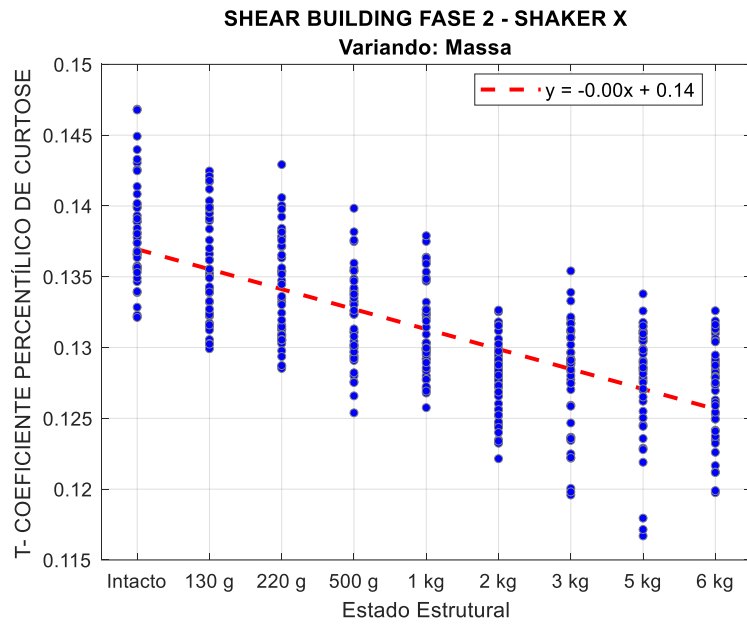


Figura F.180 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

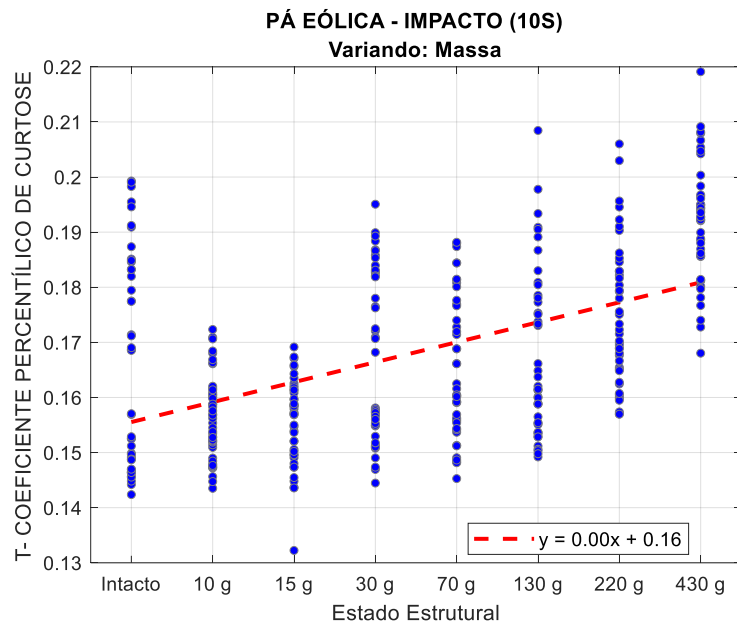


Figura F.181 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

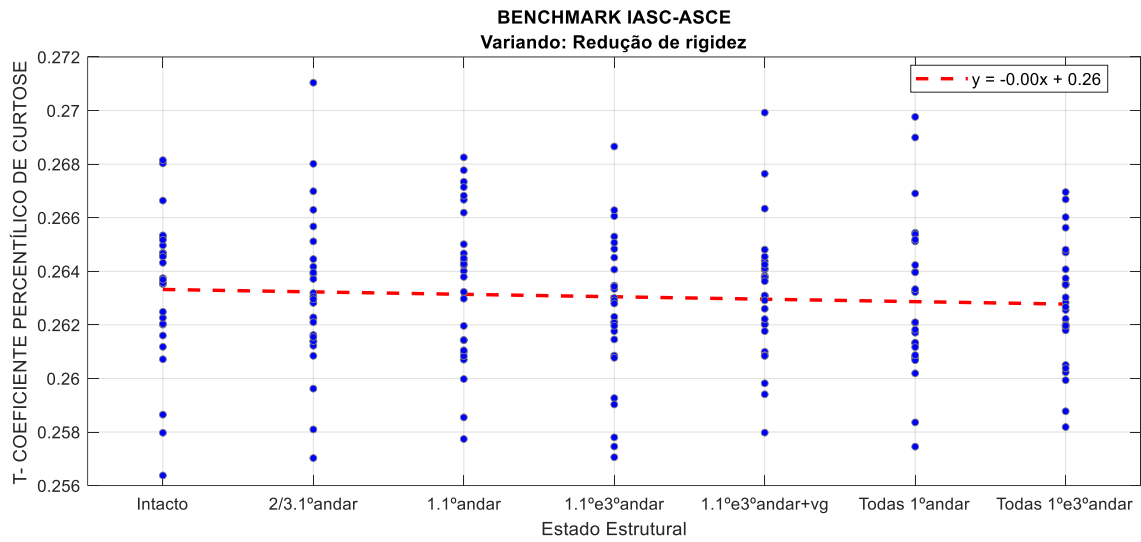
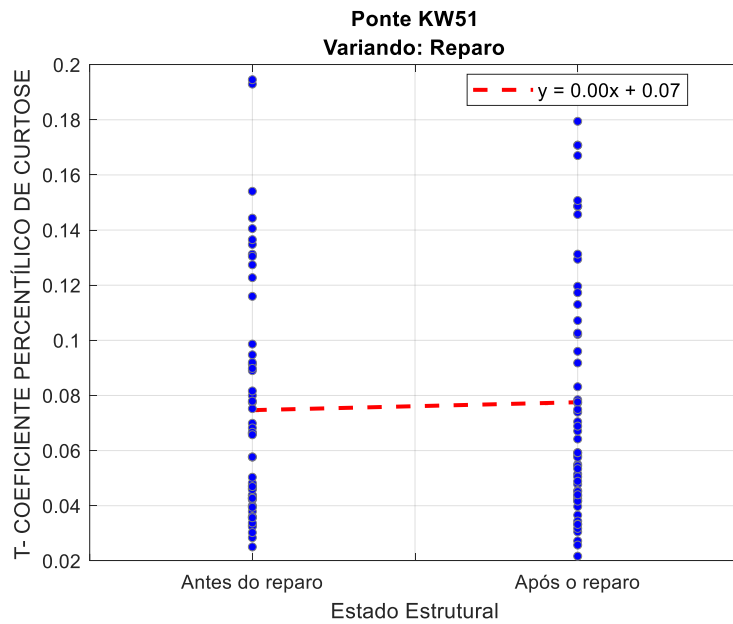


Figura F.182 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.6. Fator de Crista

Figura F.183 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

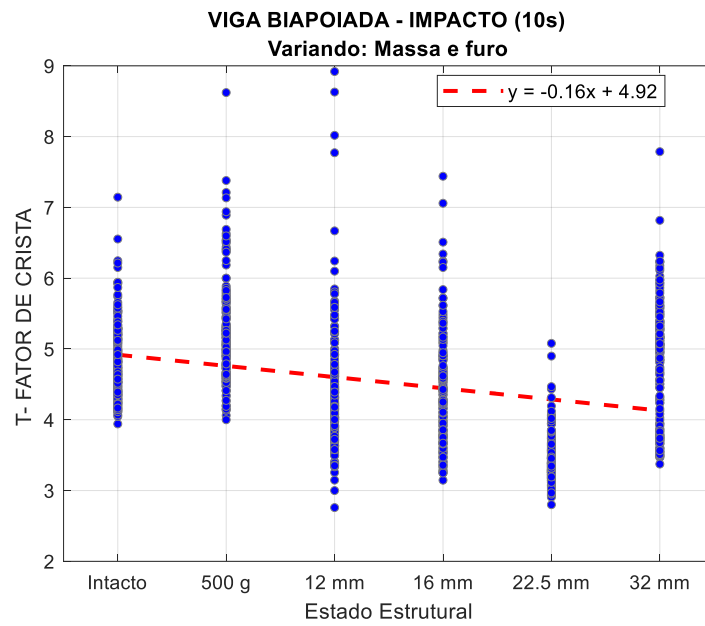


Figura F.184 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

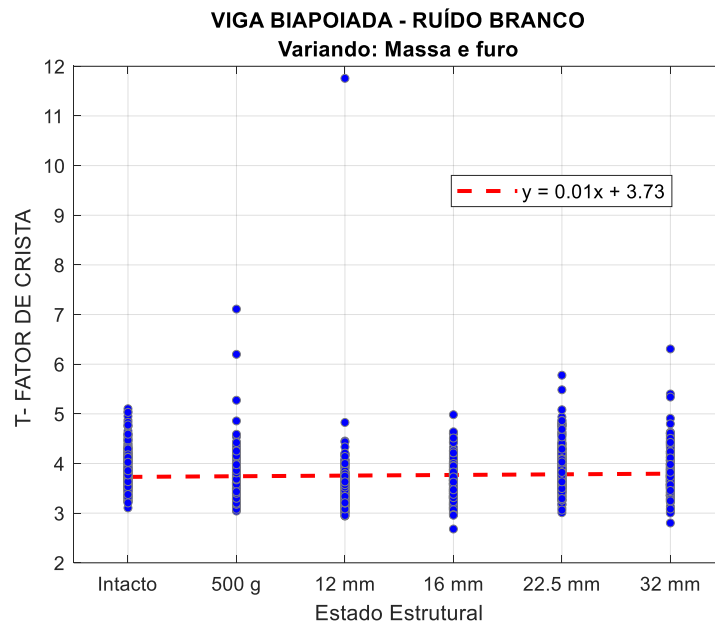


Figura F.185 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

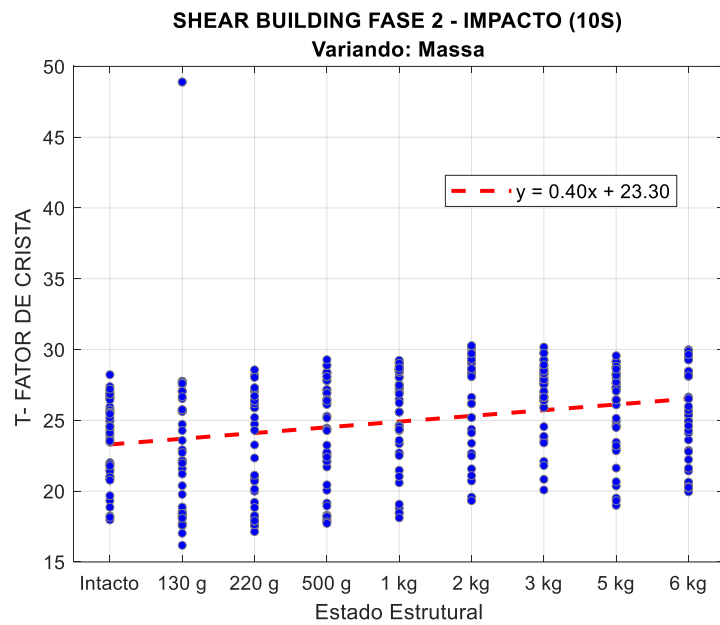


Figura F.186 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

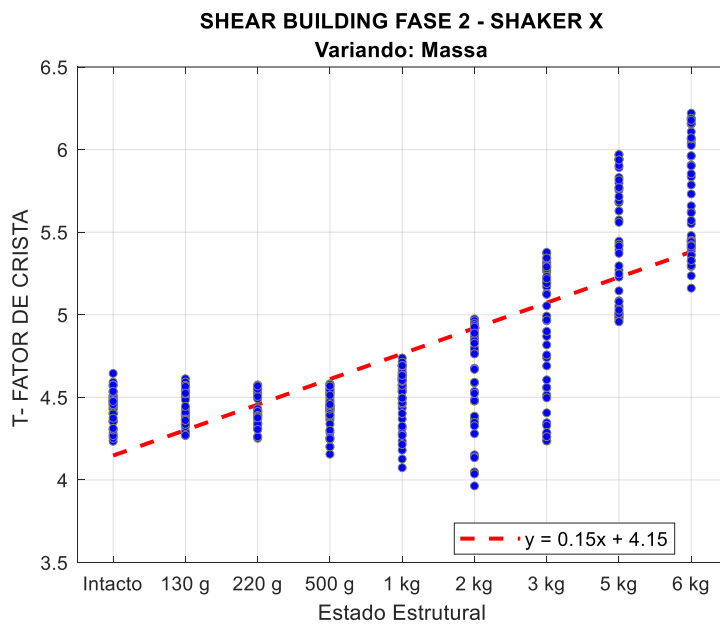


Figura F.187 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

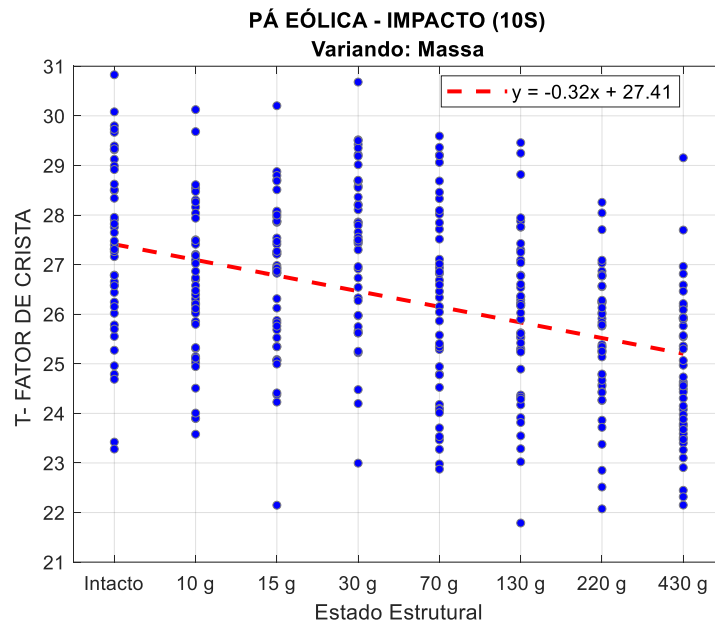


Figura F.188 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

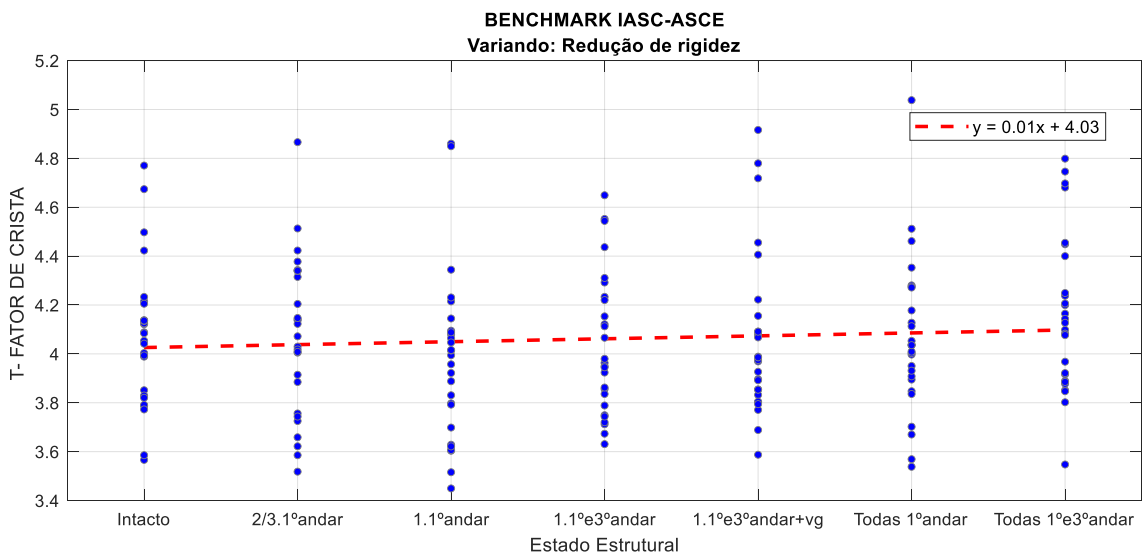
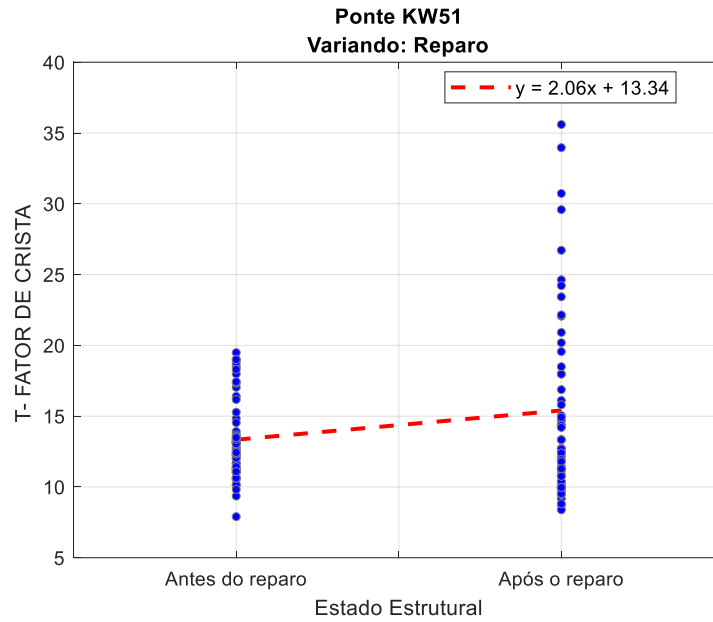


Figura F.189 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.7. Fator K

Figura F.190 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

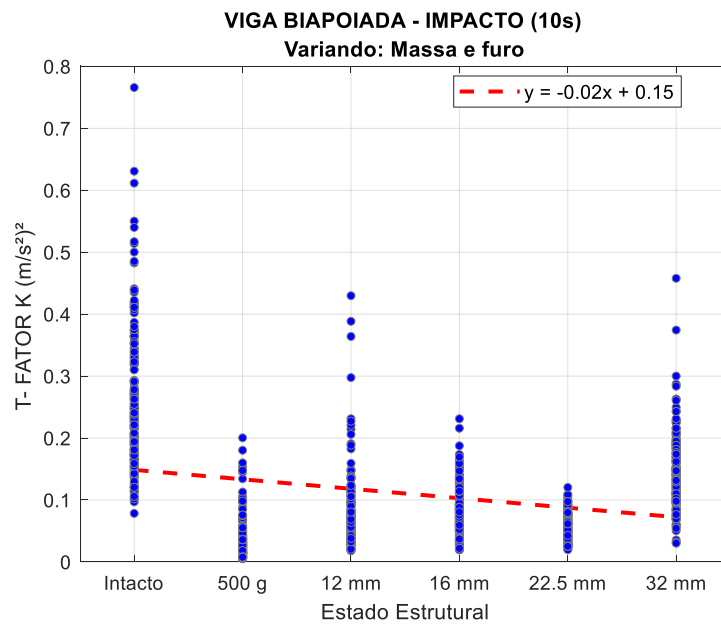


Figura F.191 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

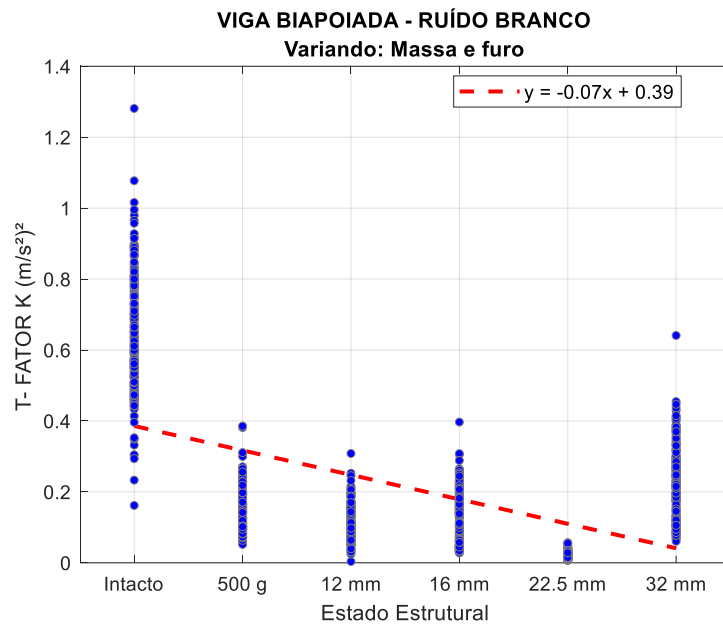


Figura F.192 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

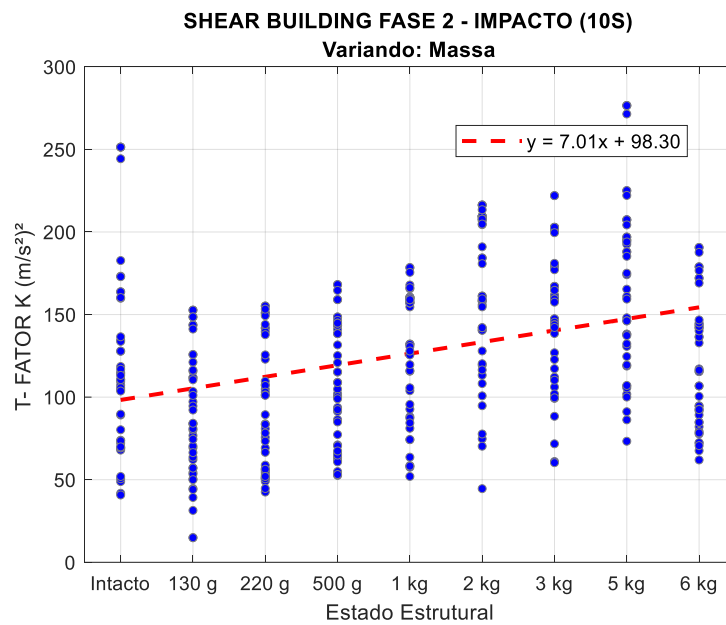


Figura F.193 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

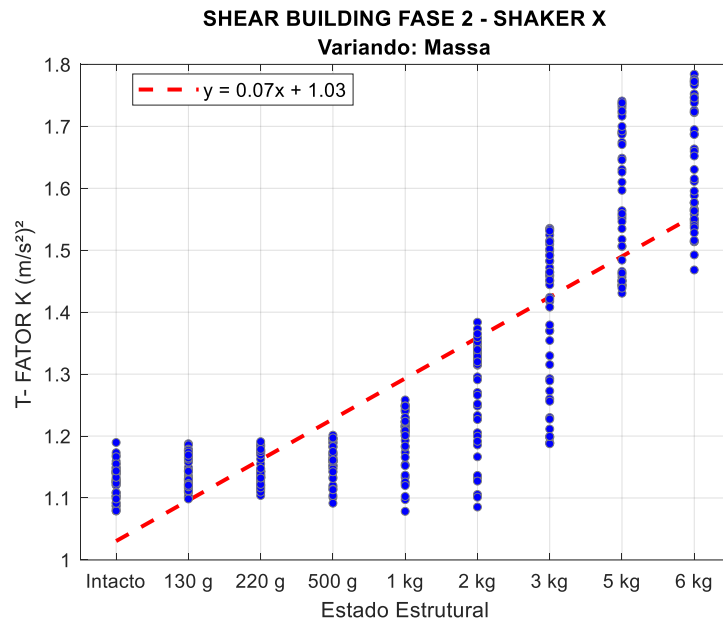


Figura F.194 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

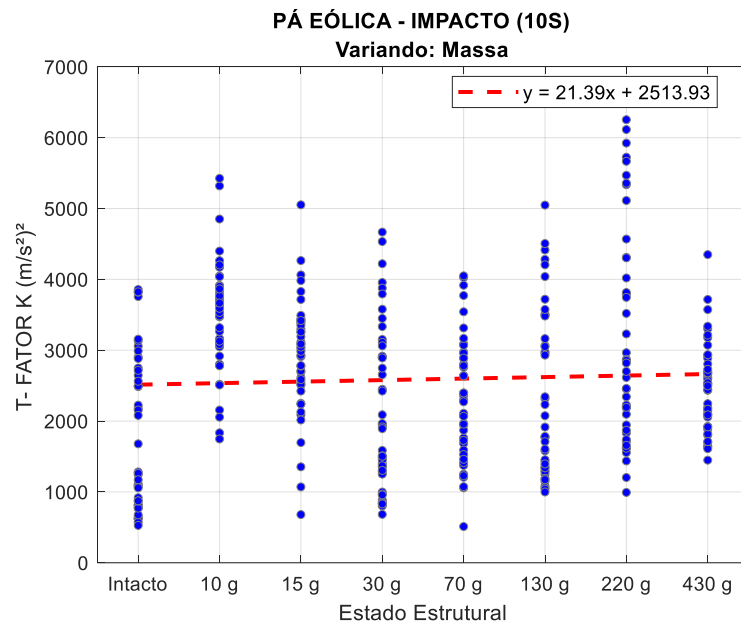


Figura F.195 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

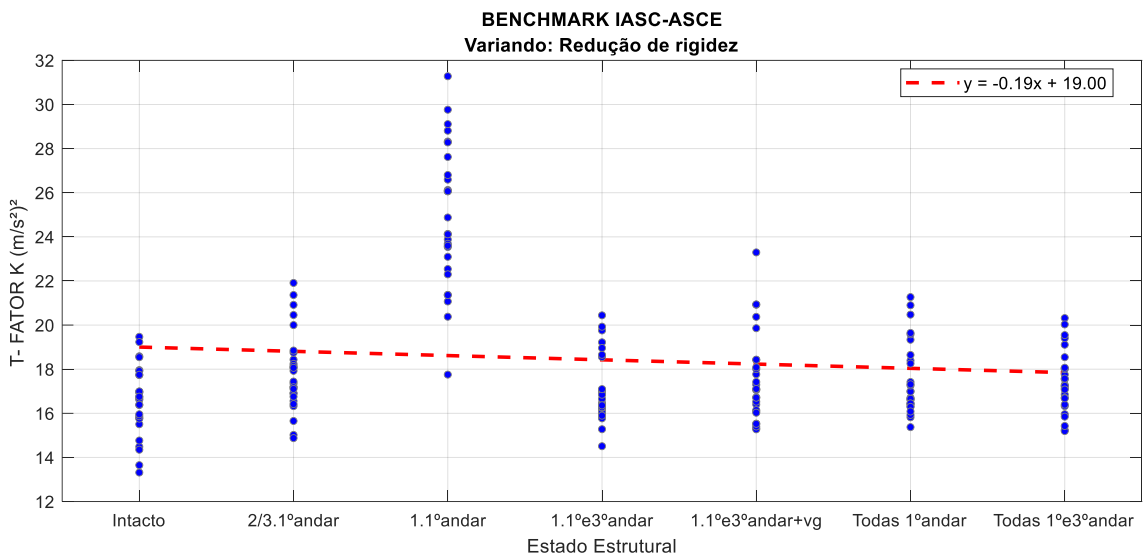
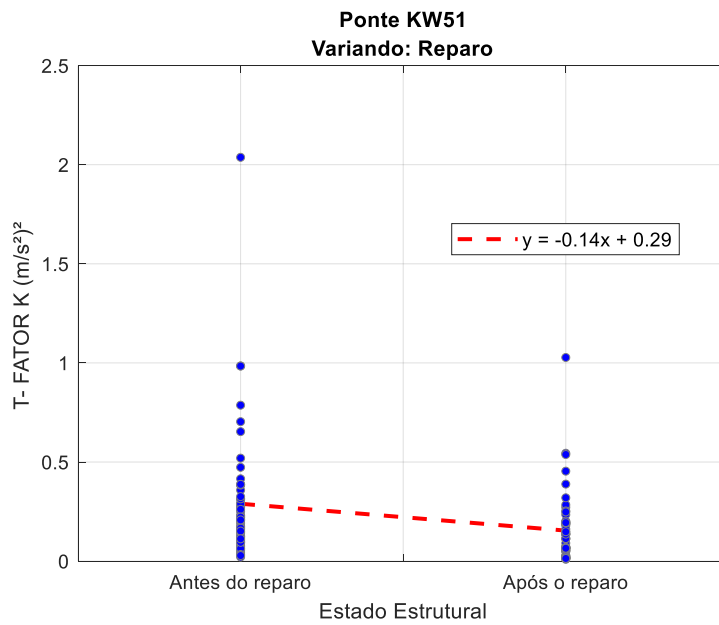


Figura F.196 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.8. Primeiro Coeficiente de Pearson

Figura F.197 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

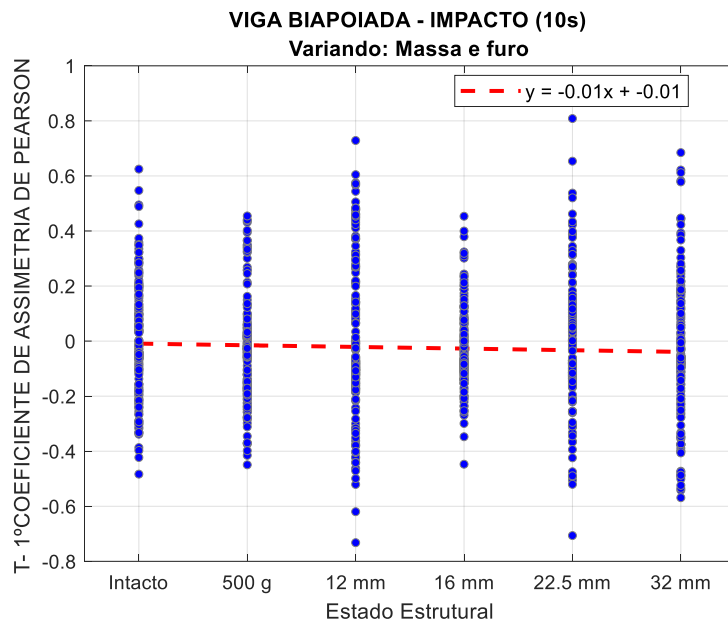


Figura F.198 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

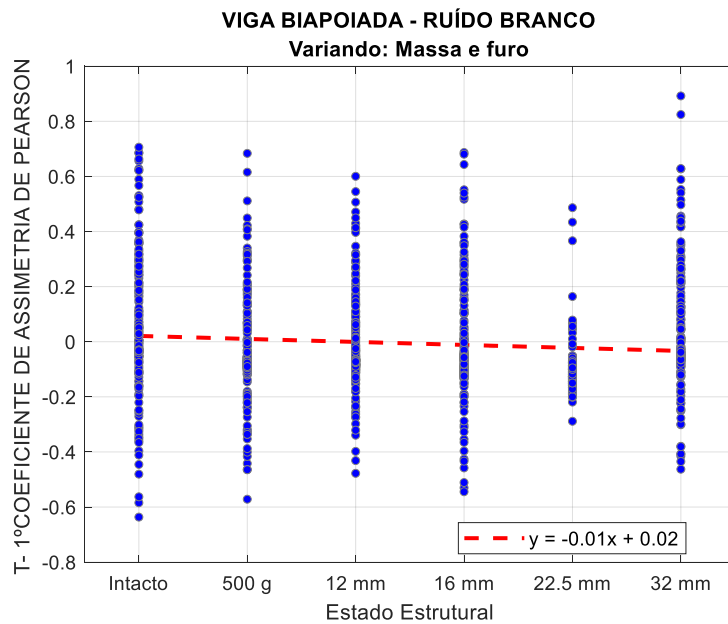


Figura F.199 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

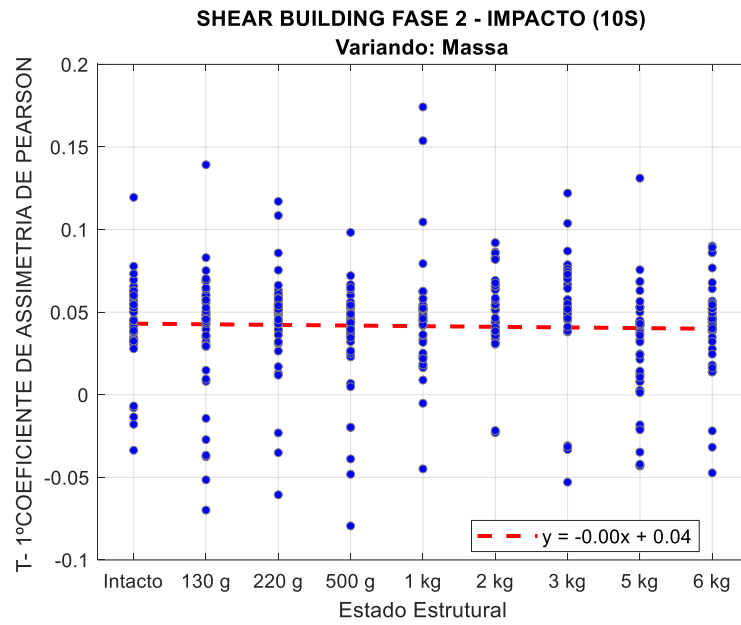


Figura F.200 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

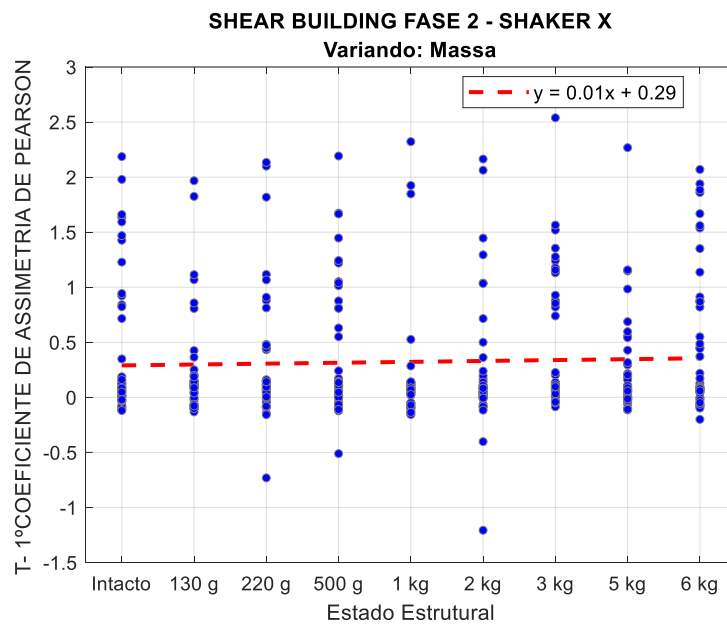


Figura F.201 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

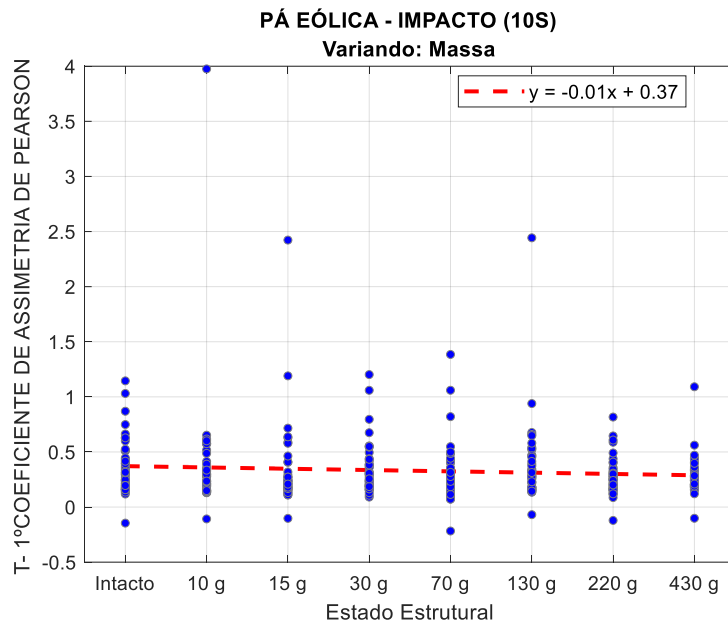


Figura F.202 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

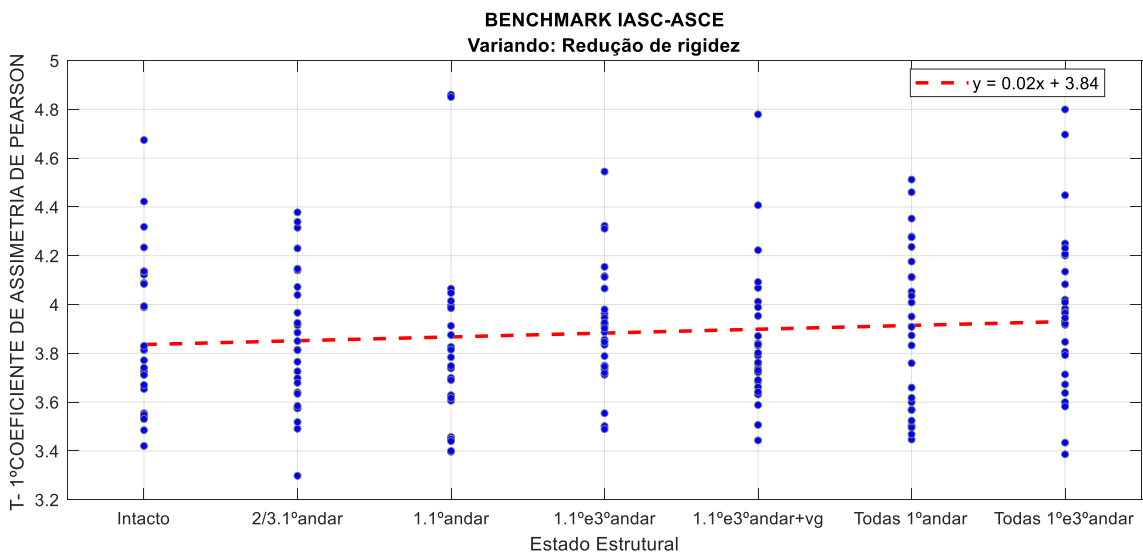
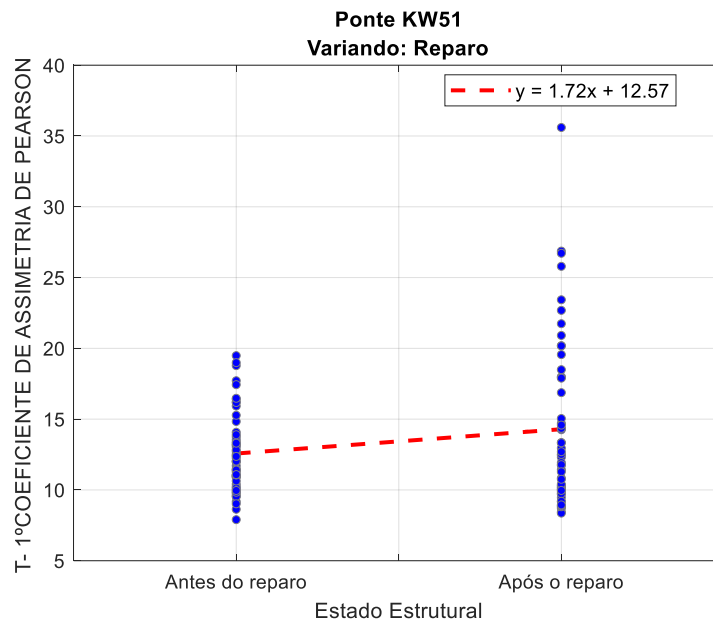


Figura F.203 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.4.9. Segundo Coeficiente de Pearson

Figura F.204 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

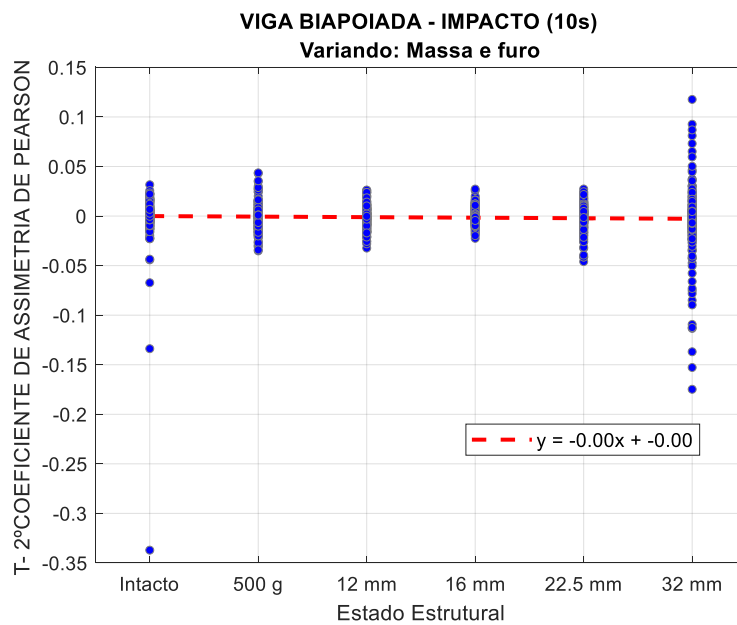


Figura F.205 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

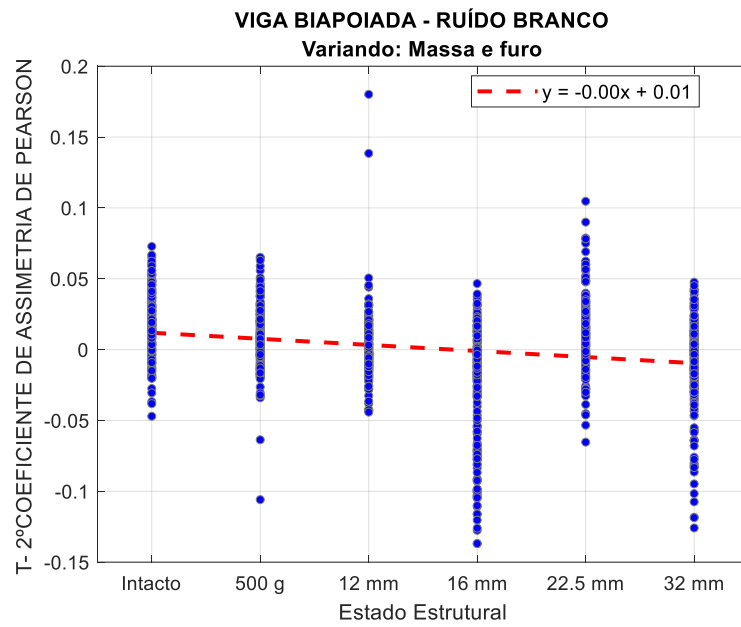


Figura F.206 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

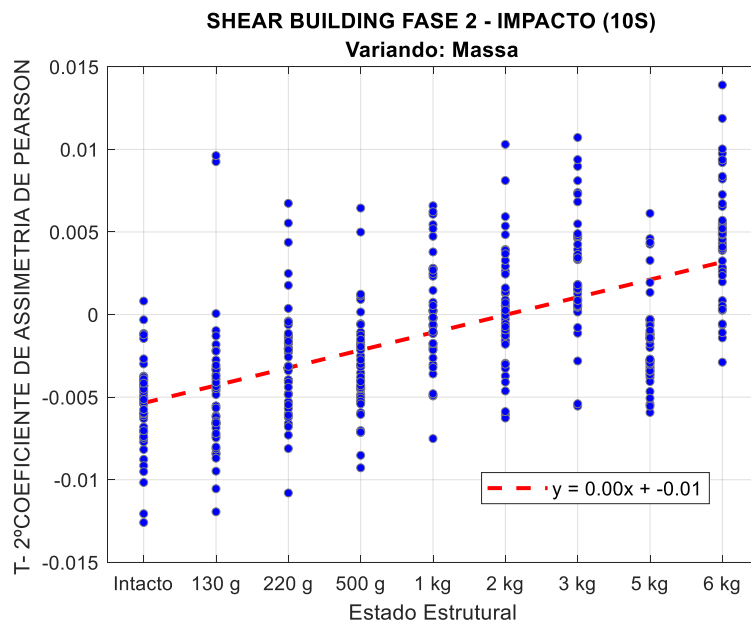


Figura F.207 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

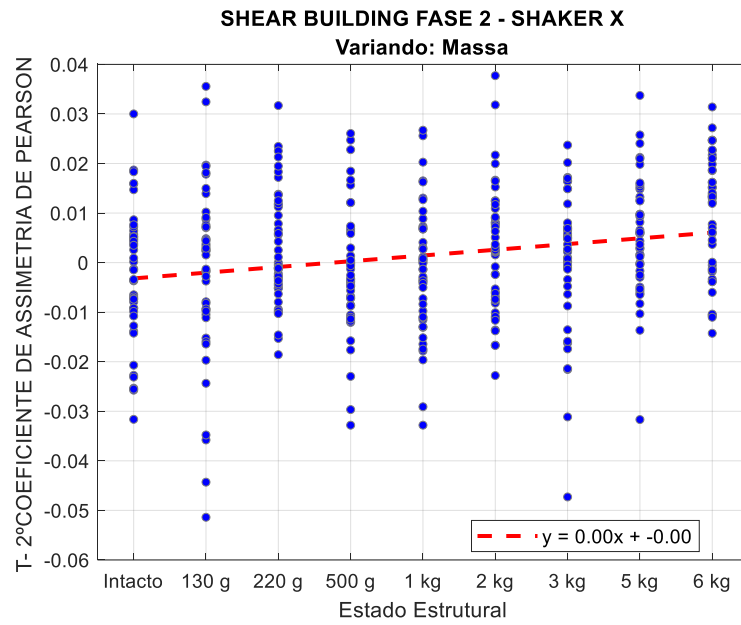


Figura F.208 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

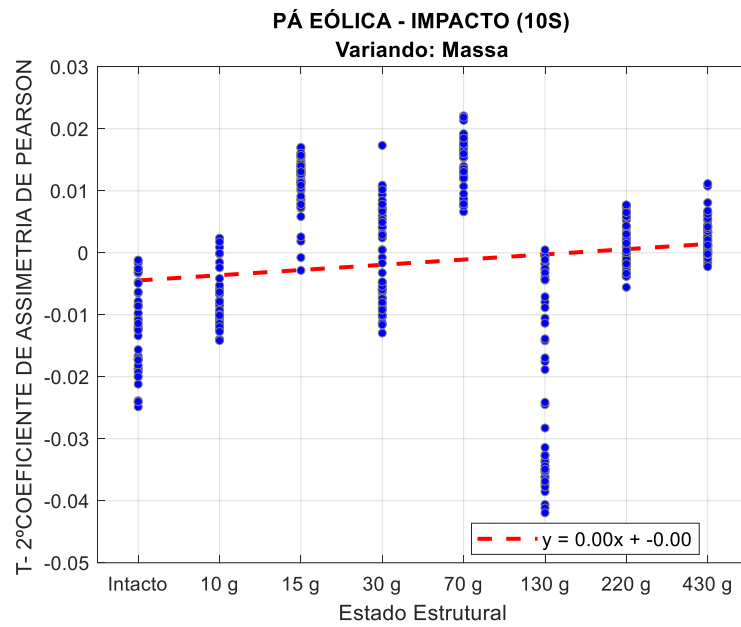


Figura F.209 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

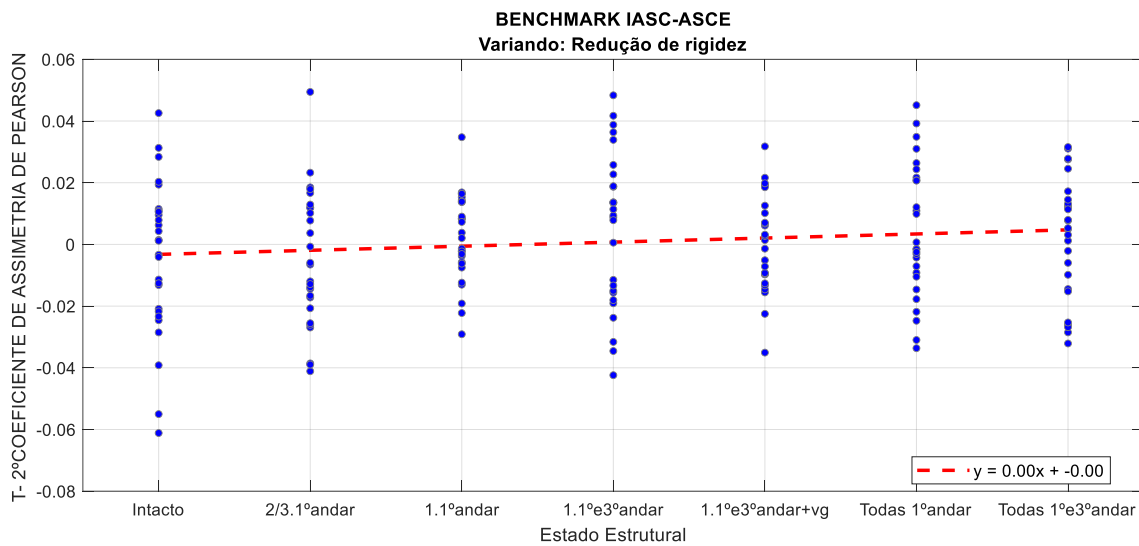
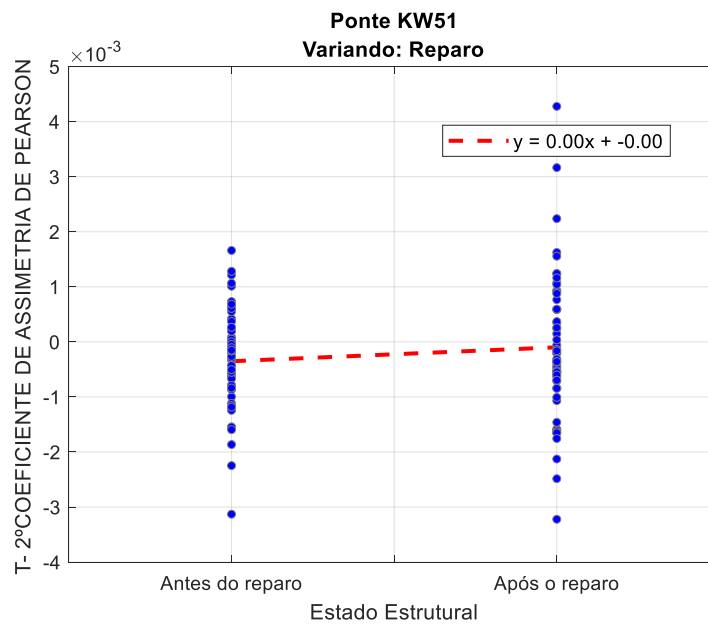


Figura F.210 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



F.5. ADS

Para a análise dos dados simbólicos no domínio do tempo, foi escolhida apenas a sétima categoria, apresentada a seguir. Essa escolha se deve ao fato de essa categoria representar uma posição intermediária e, de modo geral, ter apresentado bons resultados de separação entre os estados estruturais nas diferentes estruturas analisadas.

Figura F.211 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

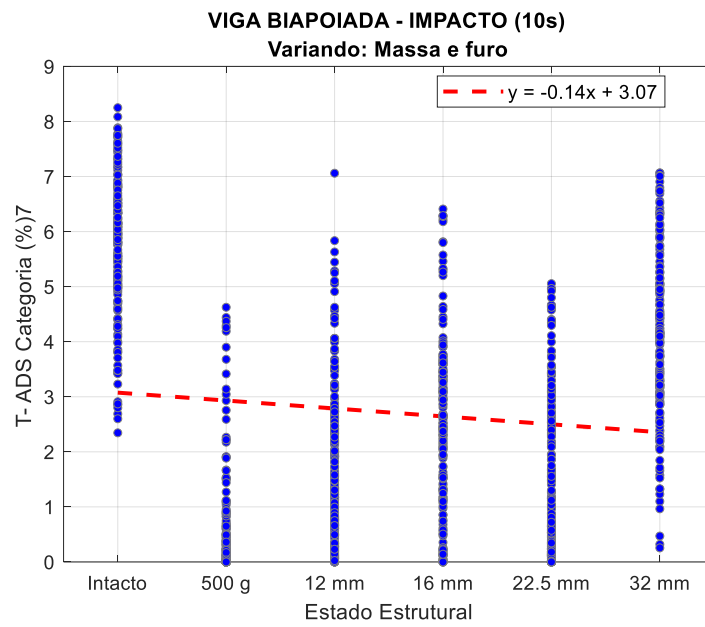


Figura F.212 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

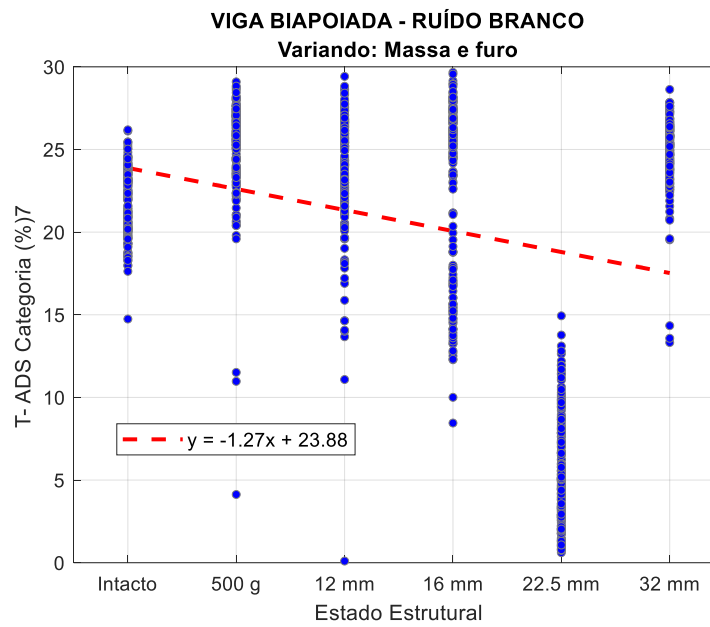


Figura F.213 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

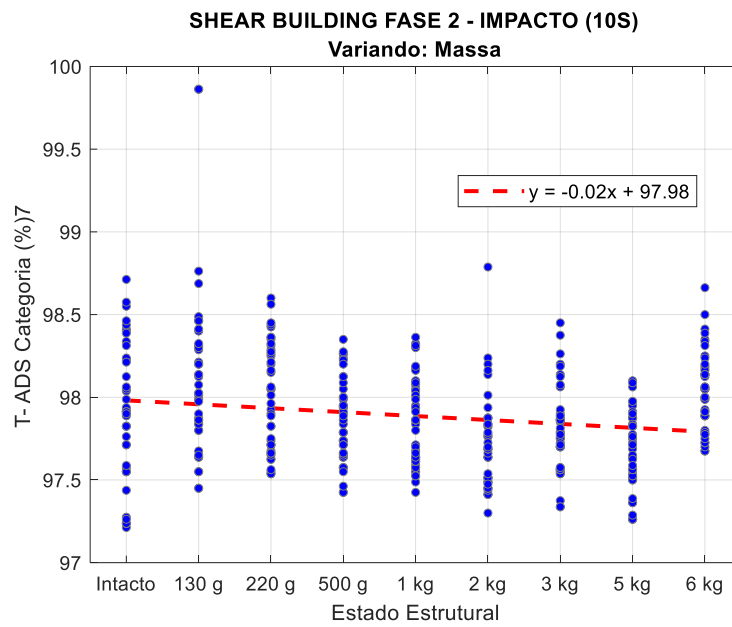


Figura F.214 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

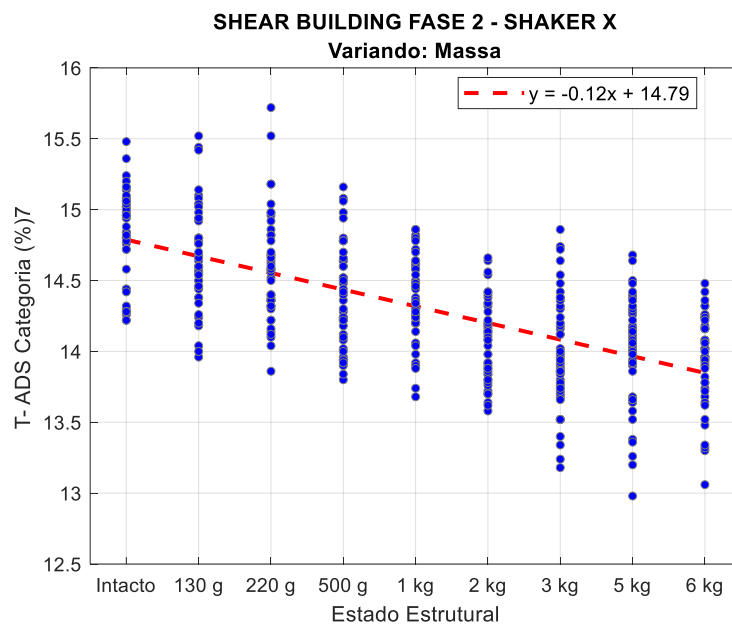


Figura F.215 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

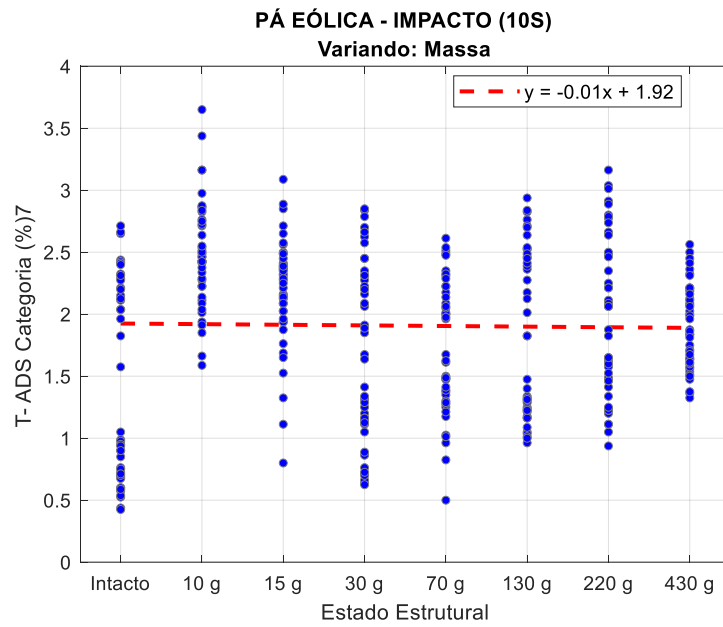


Figura F.216 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

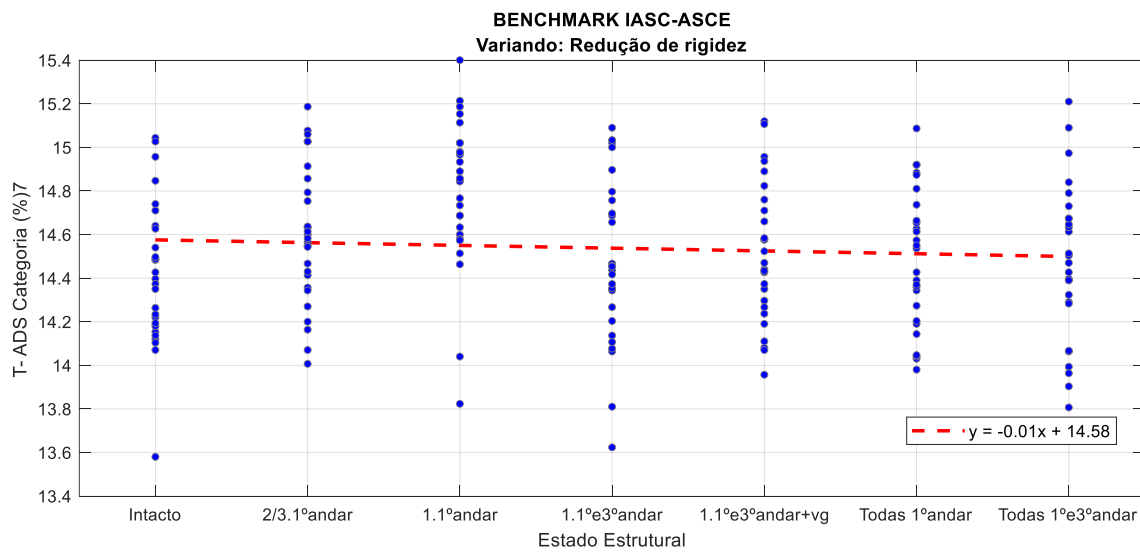
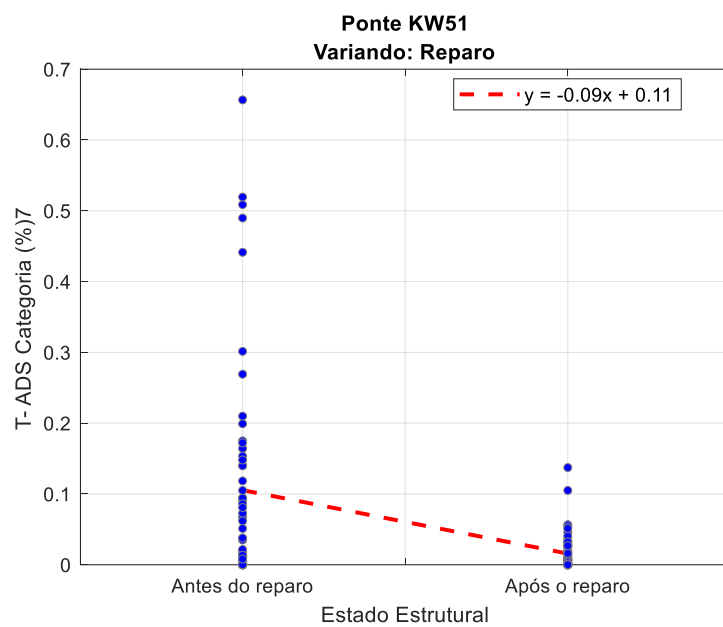


Figura F.217 – Gráfico de tendência da 7ª Categoria da ADS, no domínio do tempo, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



APÊNDICE G

ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A seguir, são apresentados gráficos com os valores encontrados para cada um dos parâmetros extraídos dos registros de aceleração no domínio da frequência (FFT), por ensaio, para cada estado estrutural, de cada uma das principais estruturas analisadas. O gráfico inclui ainda, a linha de tendência que demonstra o comportamento do parâmetro analisado conforme ocorre o aumento de “dano”, “massa” ou o reparo da estrutura.

G.1. PARÂMETROS SEPARATRIZES

G.1.1. Extremo Mínimo

Figura G.1 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

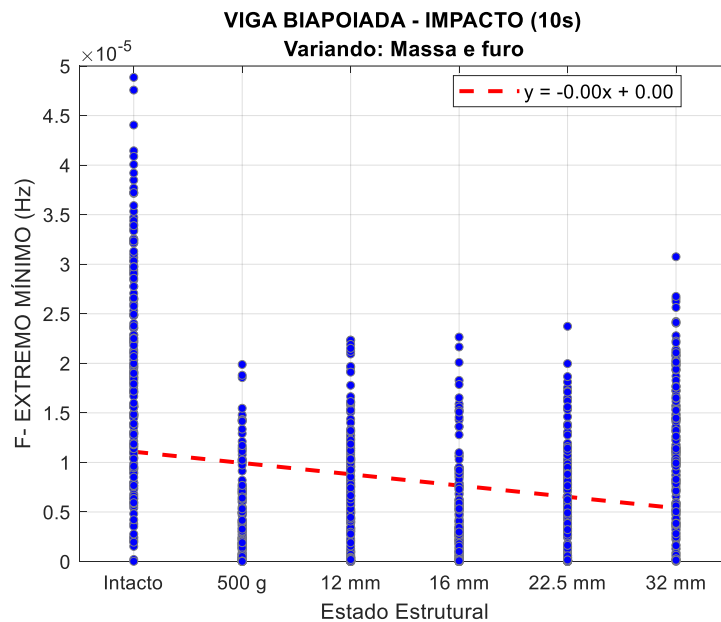


Figura G.2 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

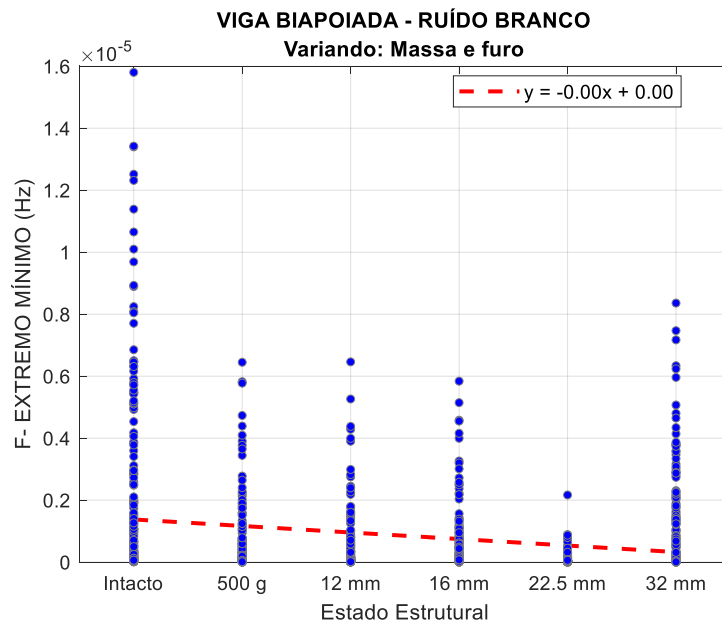


Figura G.3 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

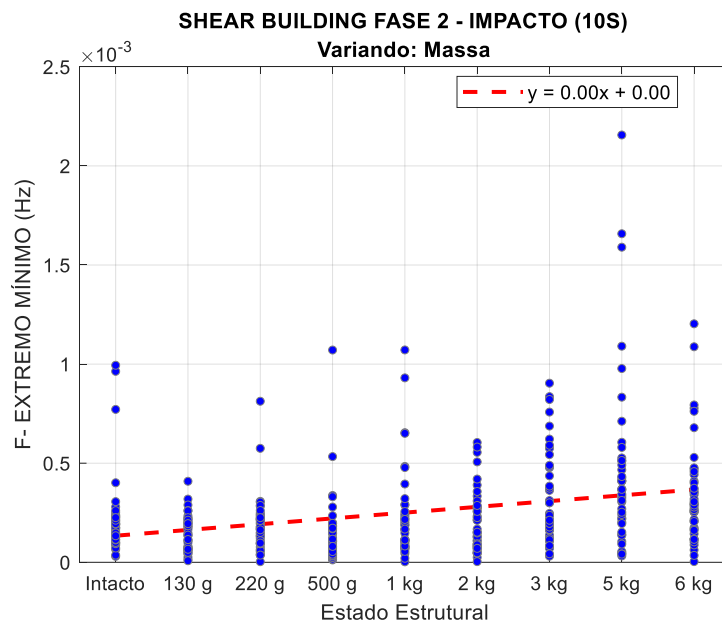


Figura G.4 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

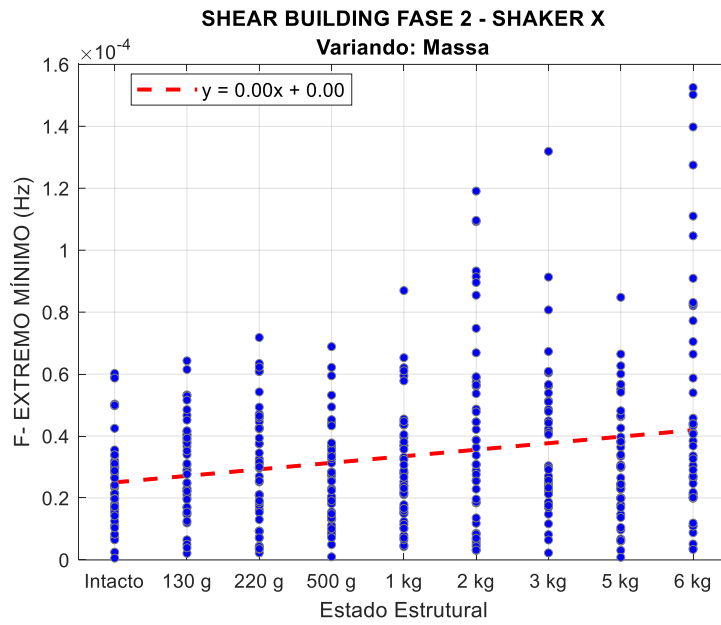


Figura G.5 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

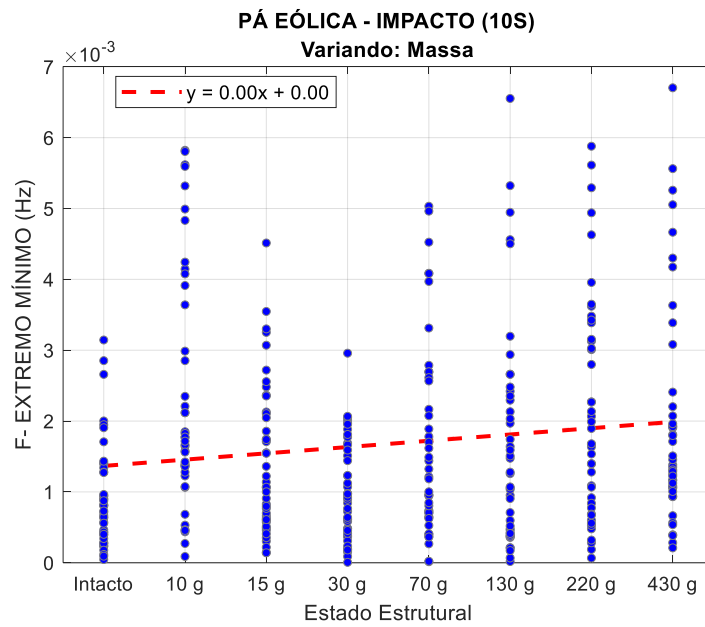


Figura G.6 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

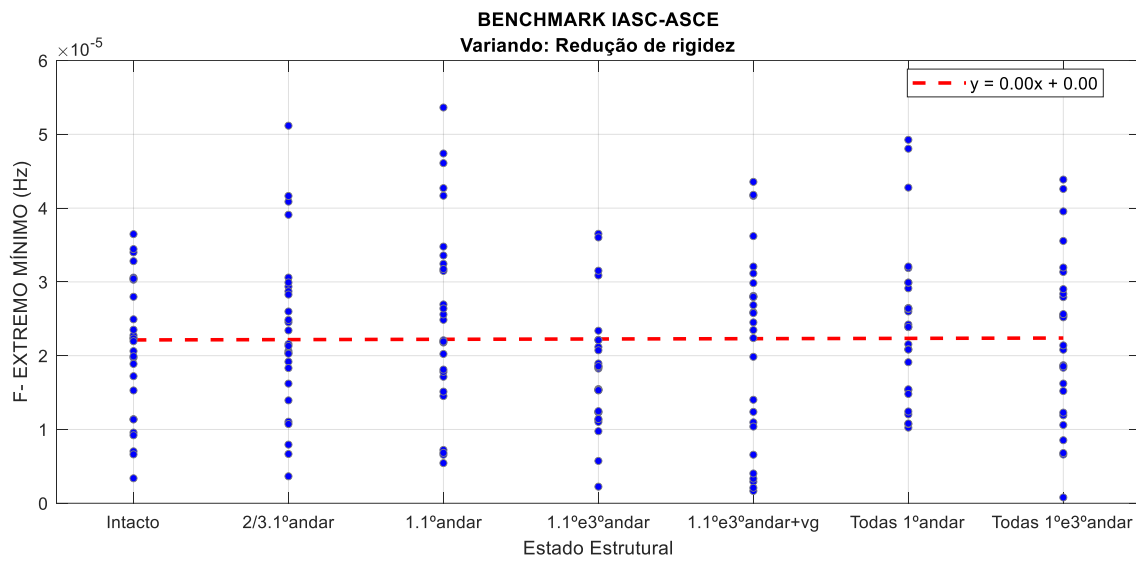
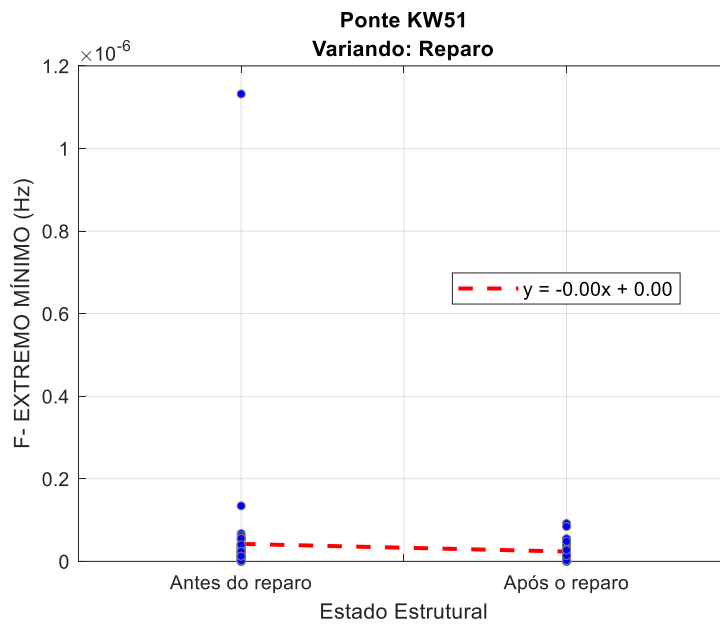


Figura G.7 – Gráfico de tendência do Extremo mínimo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.1.2. Extremo Máximo

Figura G.8 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

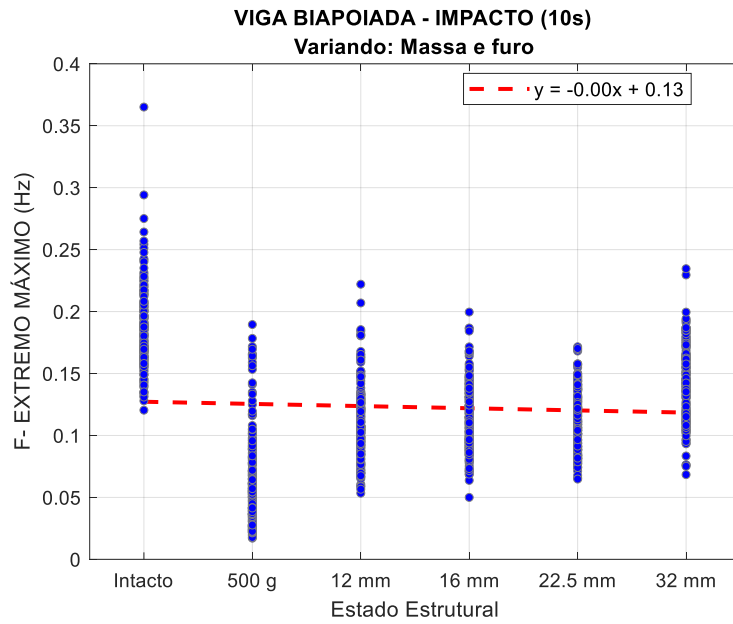


Figura G.9 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

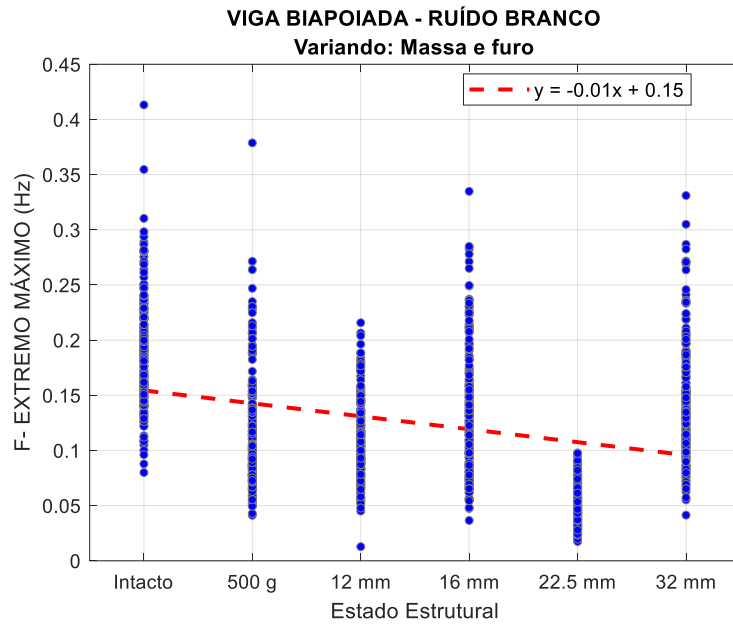


Figura G.10 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s.

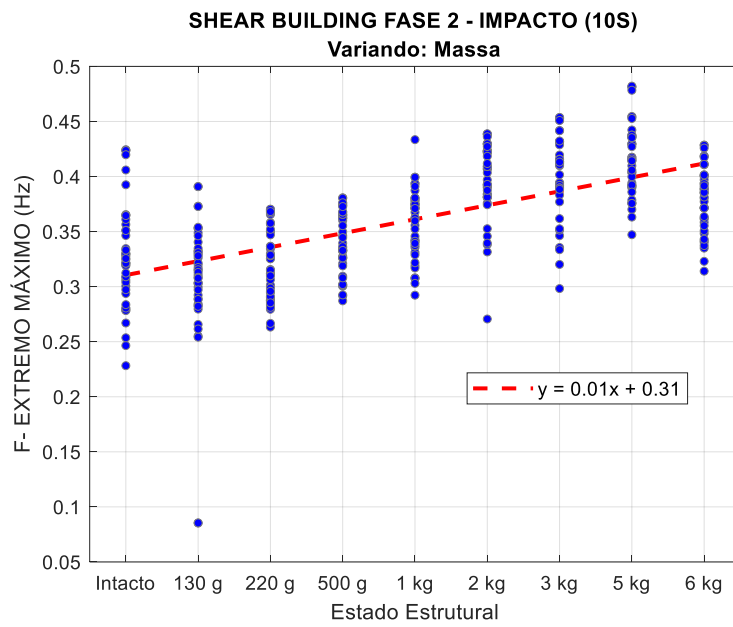


Figura G.11 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building Fase 2, sob excitação de impacto a cada 10s.

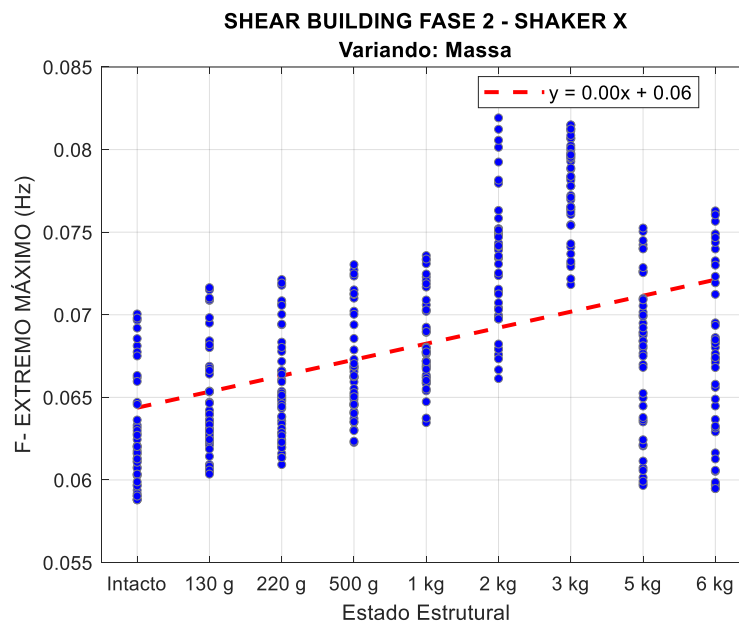


Figura G.12 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

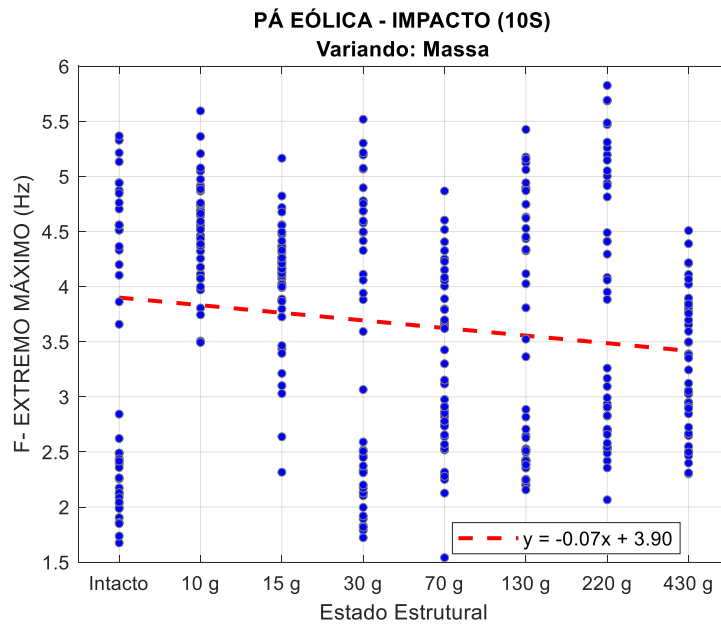


Figura G.13 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

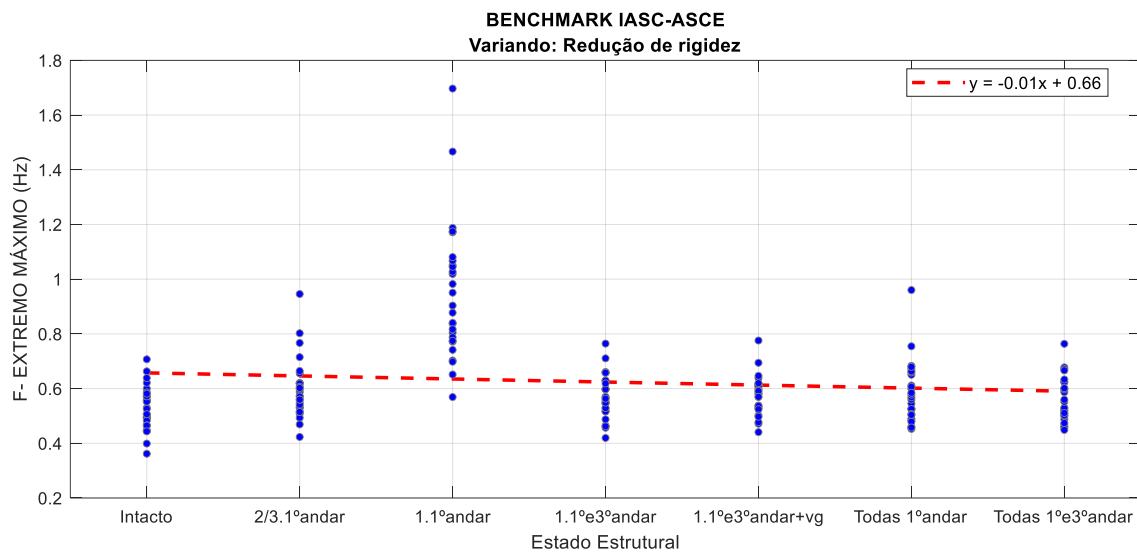
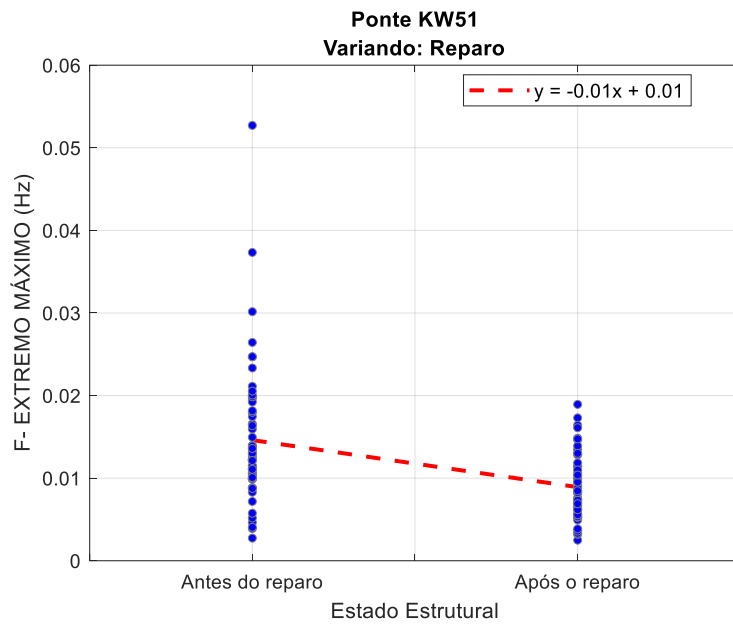


Figura G.14 – Gráfico de tendência do Extremo máximo, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.1.3. Primeiro Quartil

Figura G.15 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

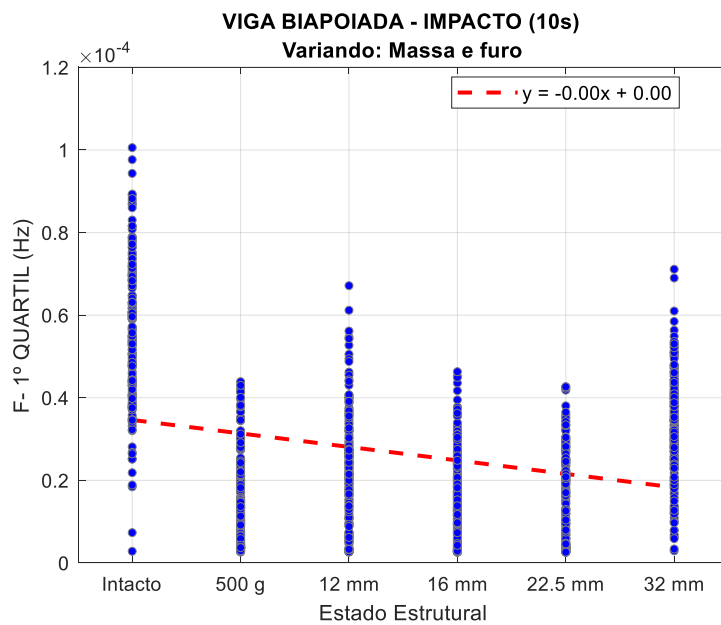


Figura G.16 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

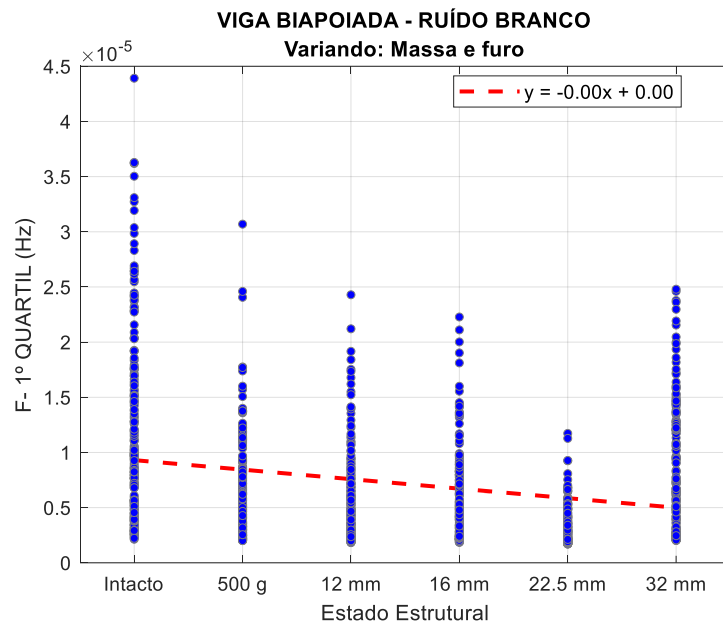


Figura G.17 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

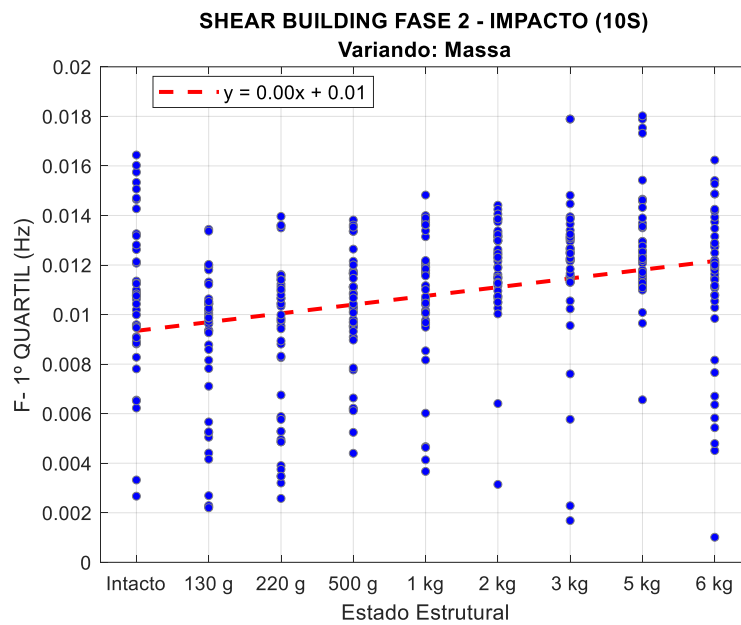


Figura G.18 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase II), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

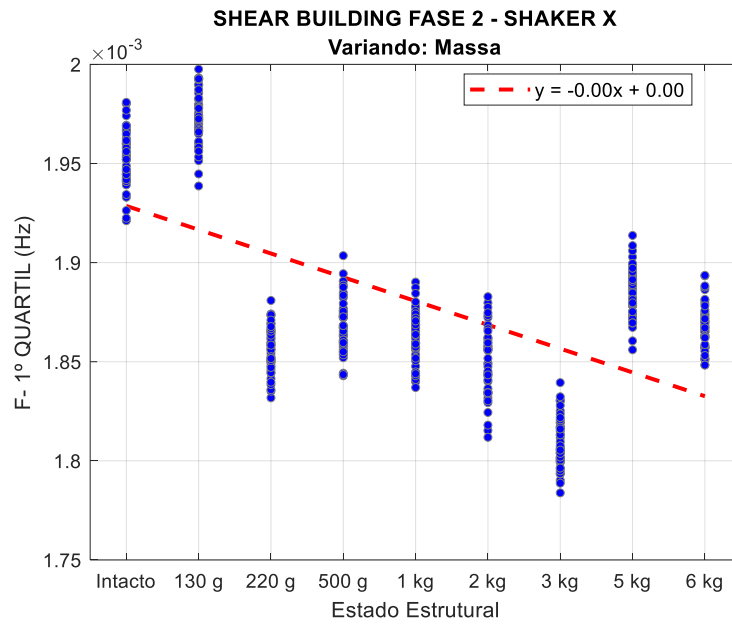


Figura G.19 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

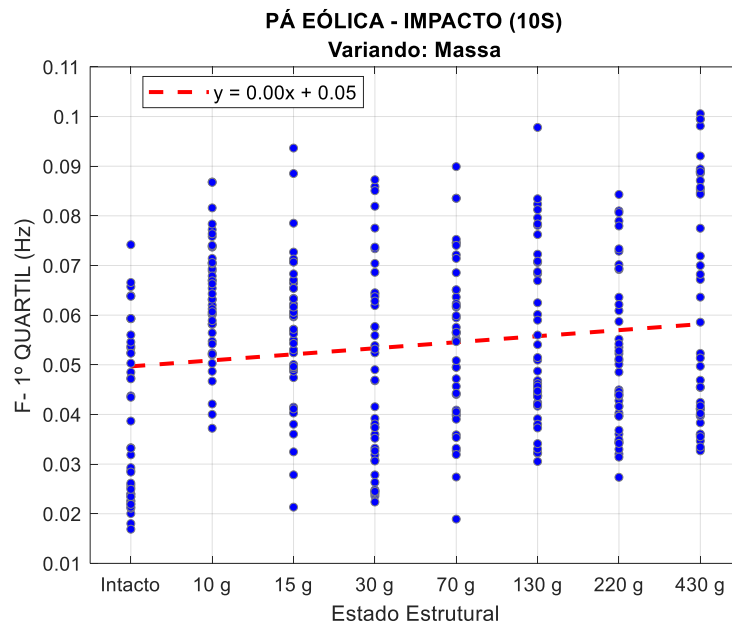


Figura G.20 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

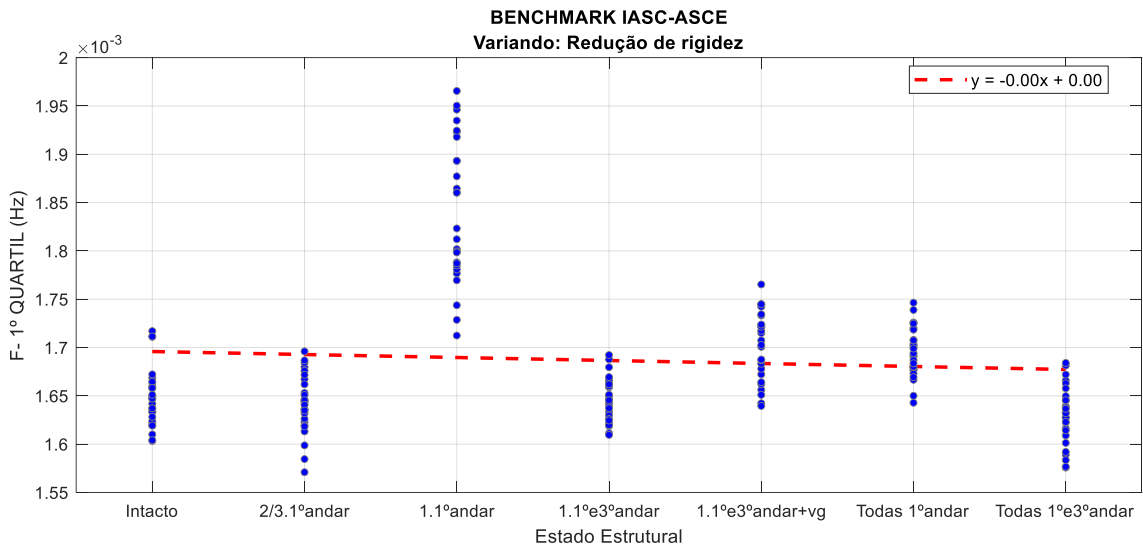
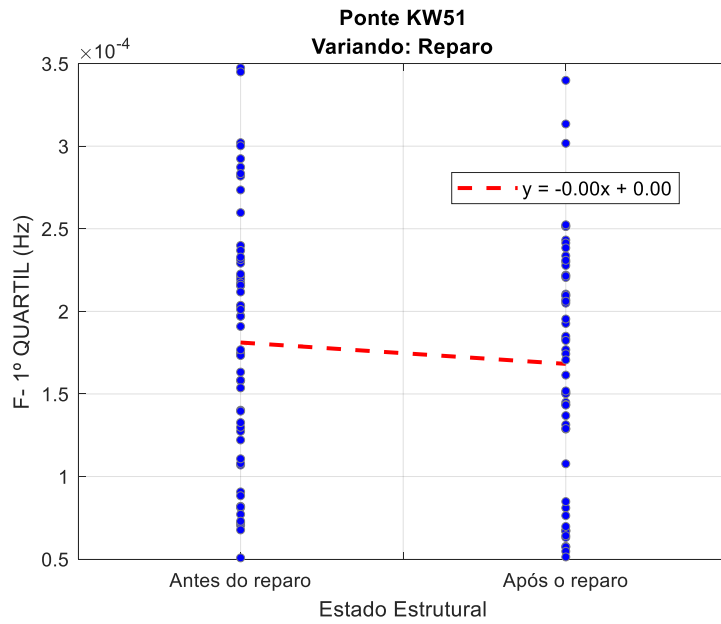


Figura G.21 – Gráfico de tendência do primeiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.1.4. Terceiro Quartil

Figura G.22 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

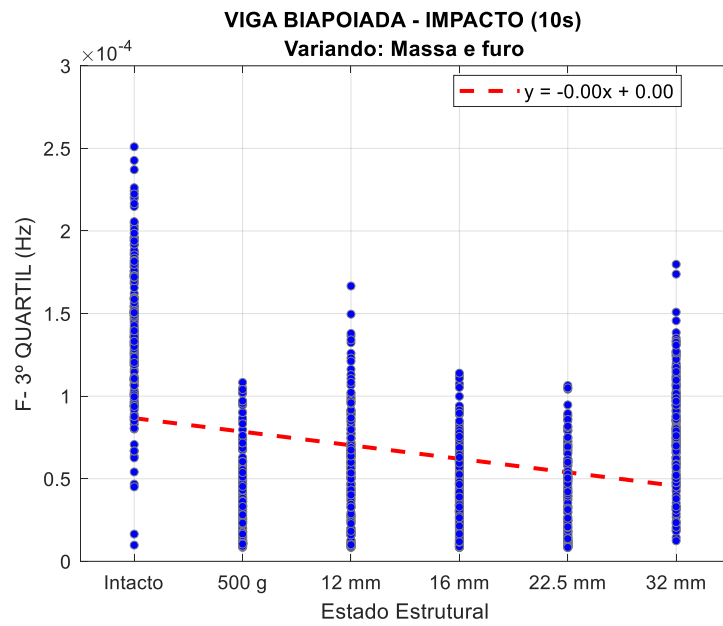


Figura G.23 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

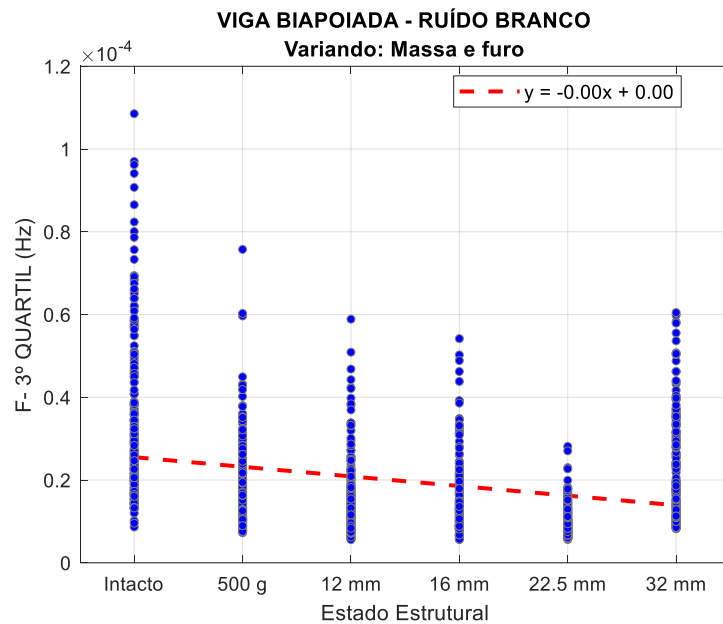


Figura G.24 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

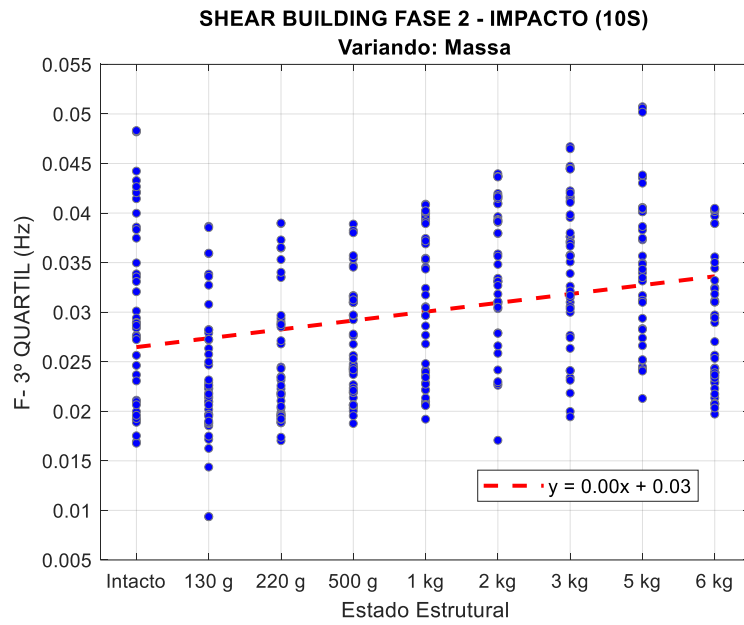


Figura G.25 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building, (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

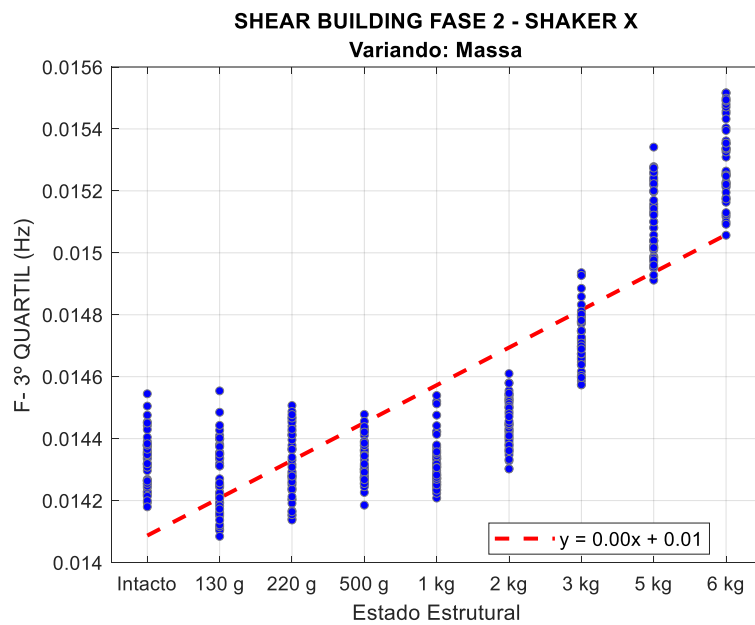


Figura G.26 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

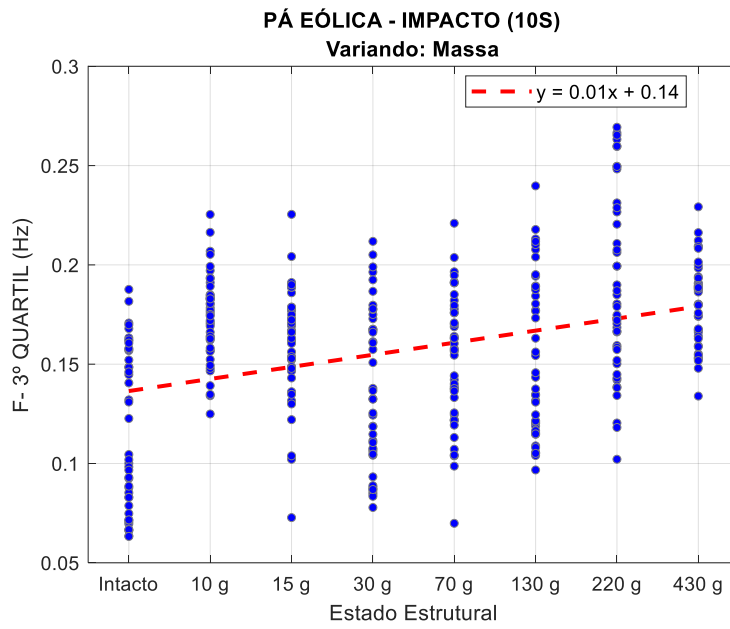


Figura G.27 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

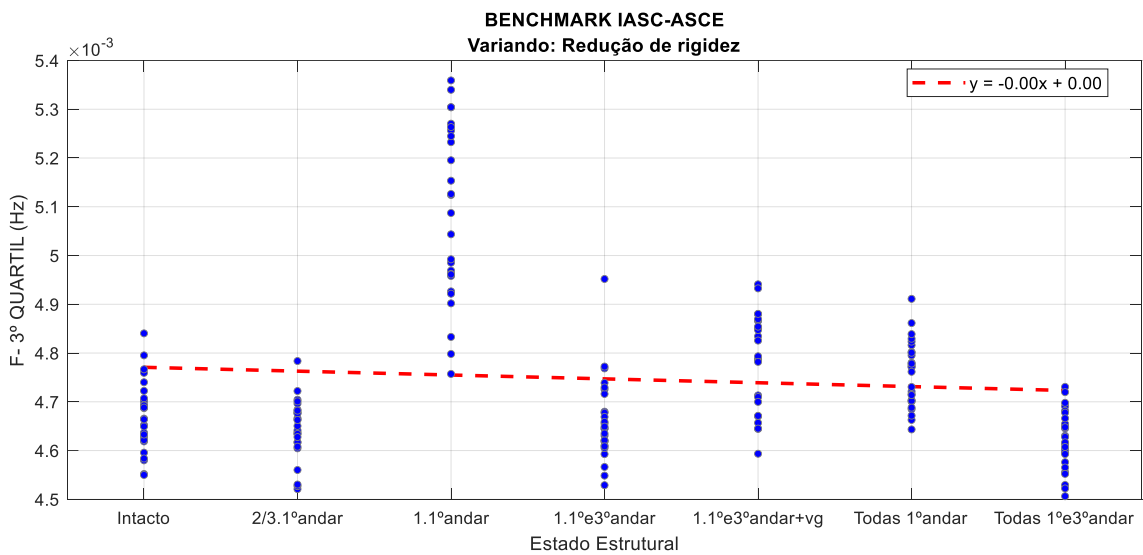
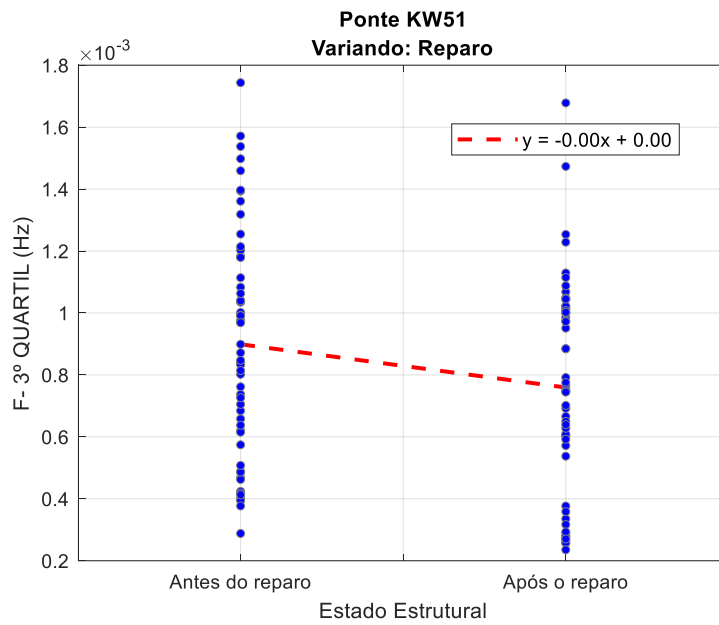


Figura G.28 – Gráfico de tendência do terceiro quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2. PARÂMETROS DE POSIÇÕES OU TENDÊNCIA CENTRAL

G.2.1. Média Aritmética

Figura G.29 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

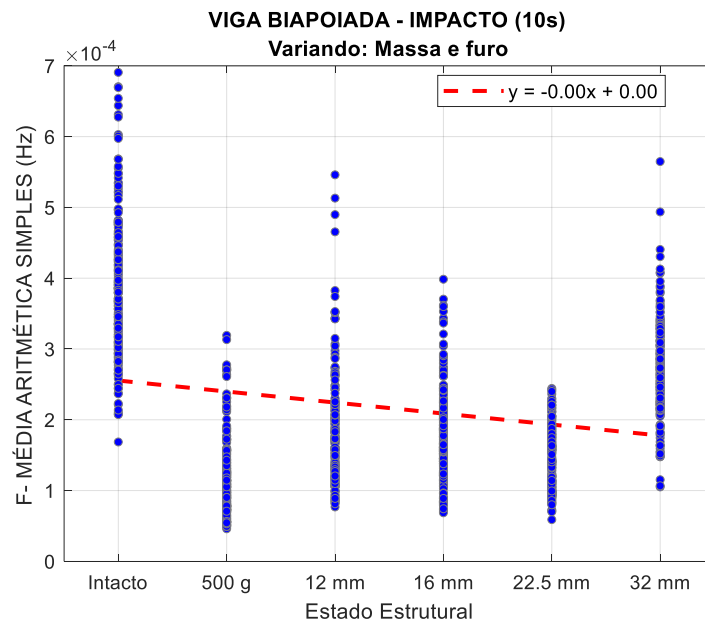


Figura G.30 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

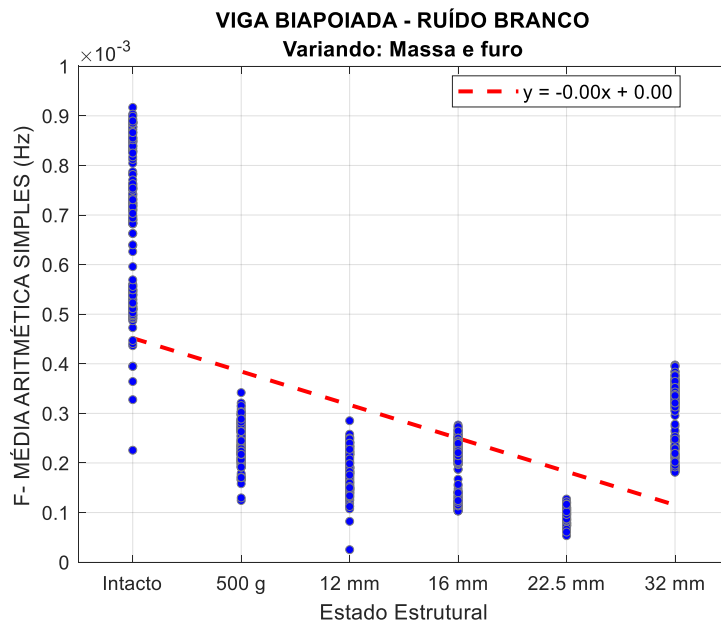


Figura G.31 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

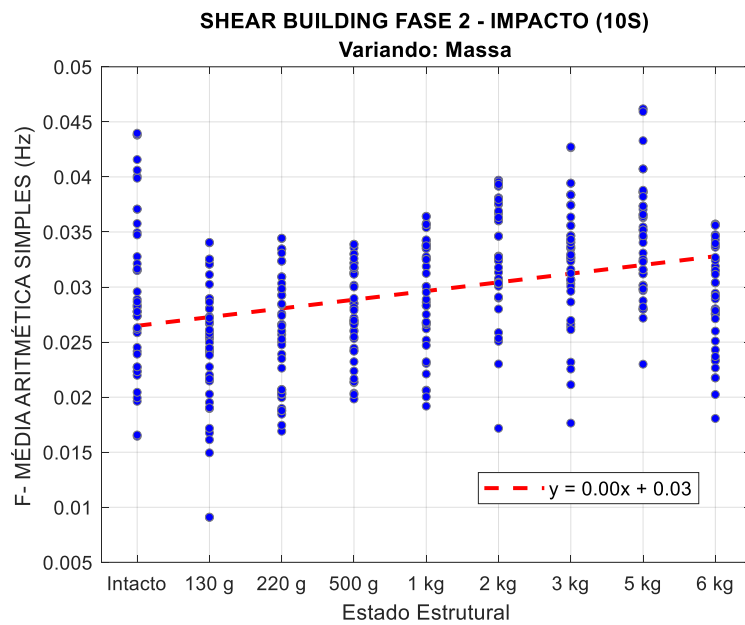


Figura G.32 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

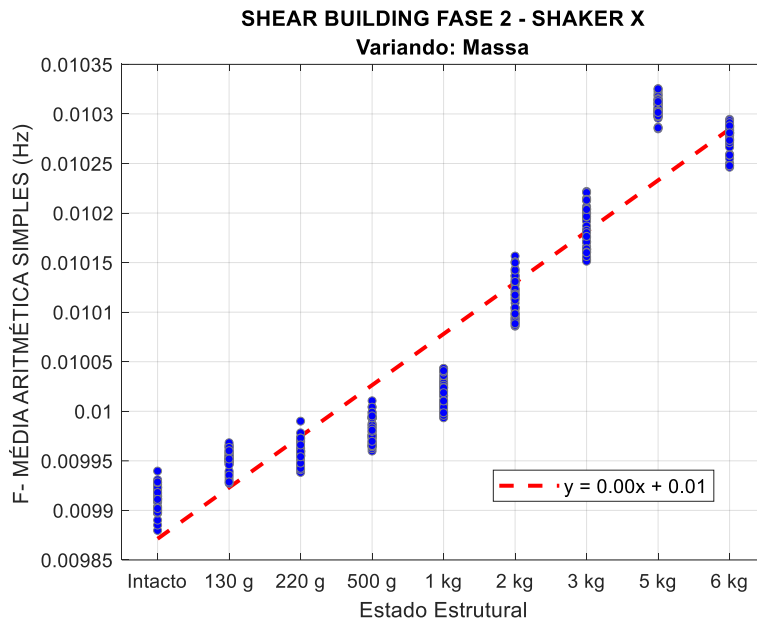


Figura G.33 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

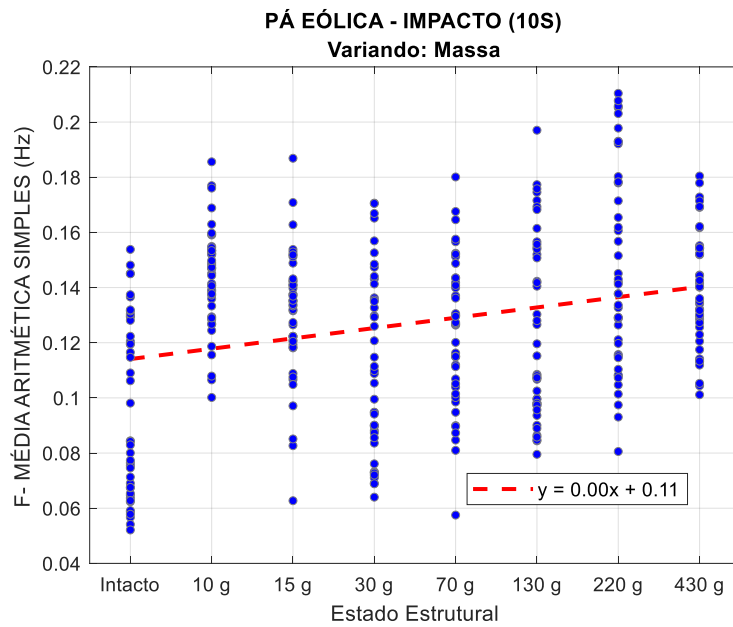


Figura G.34 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

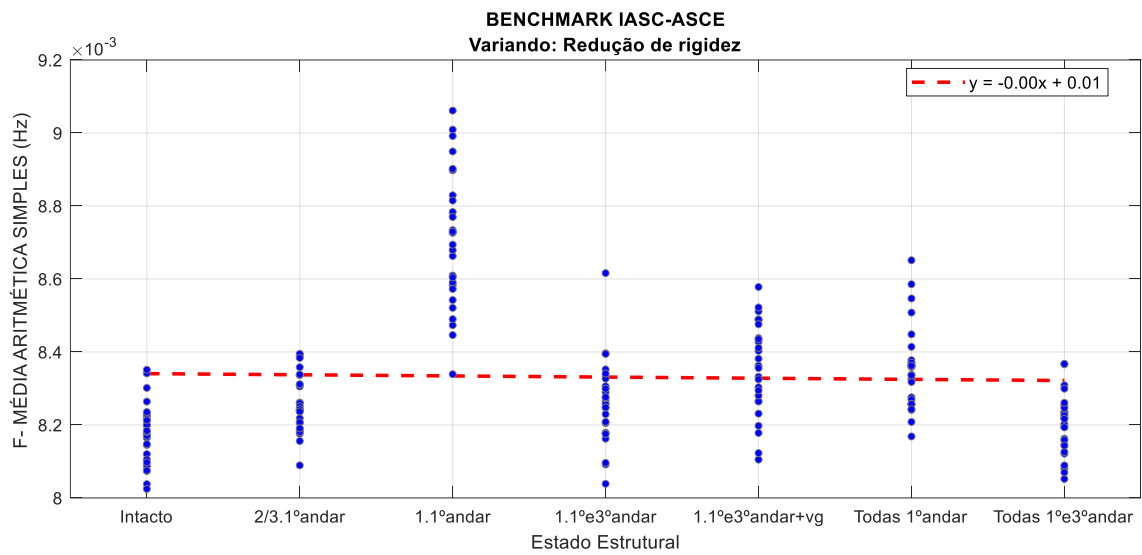
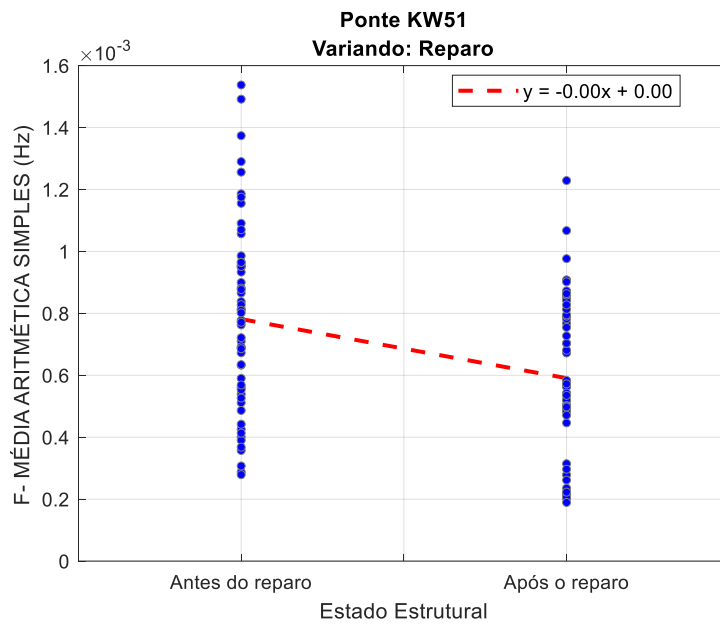


Figura G.35 – Gráfico de tendência da média aritmética simples, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.2. Média Harmônica

Figura G.36 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

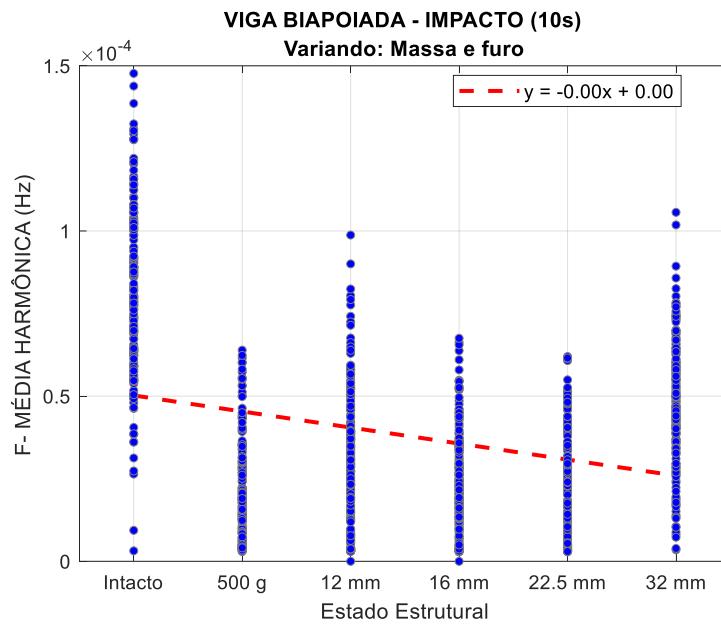


Figura G.37 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

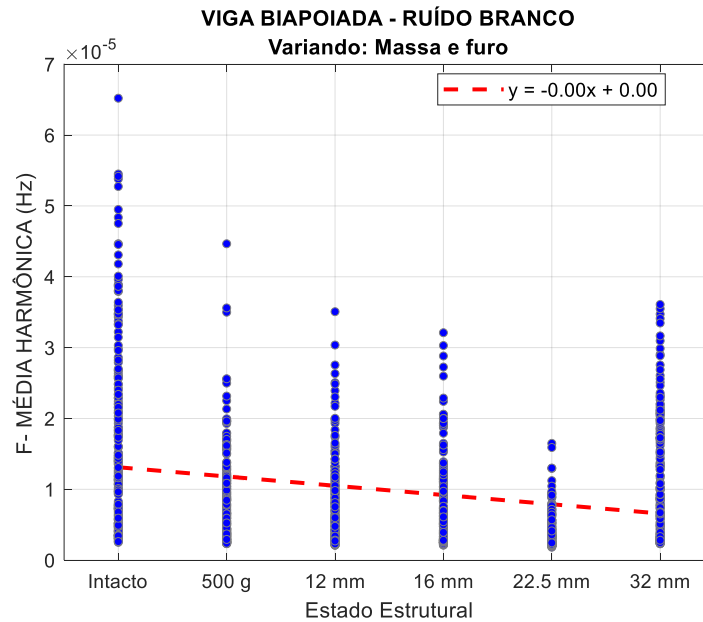


Figura G.38 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

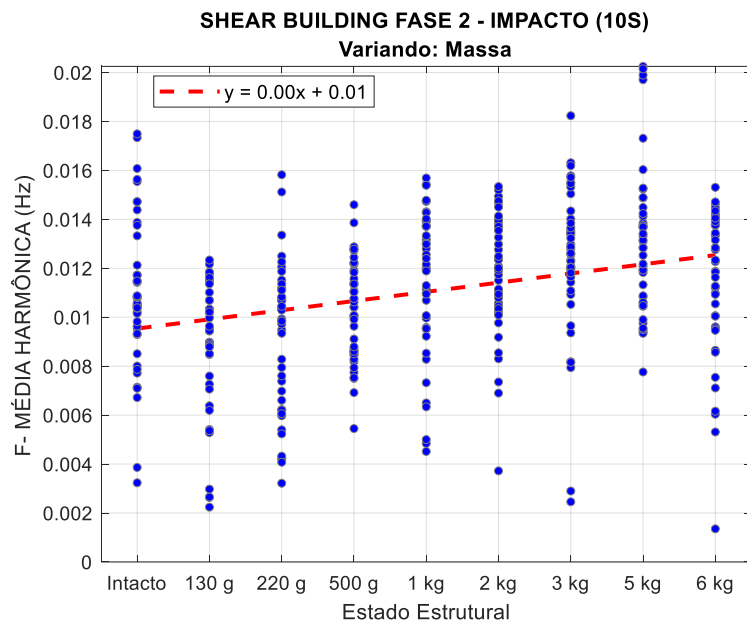


Figura G.39 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

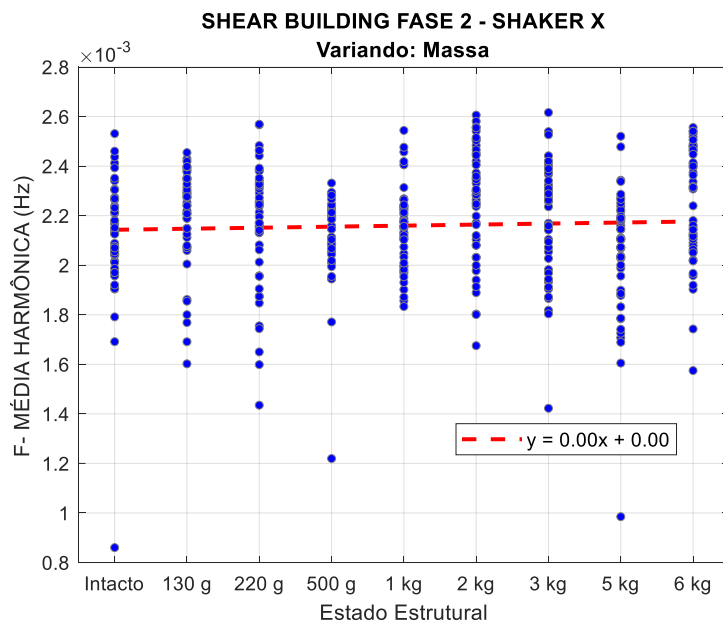


Figura G.40 – Gráfico de tendência do da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

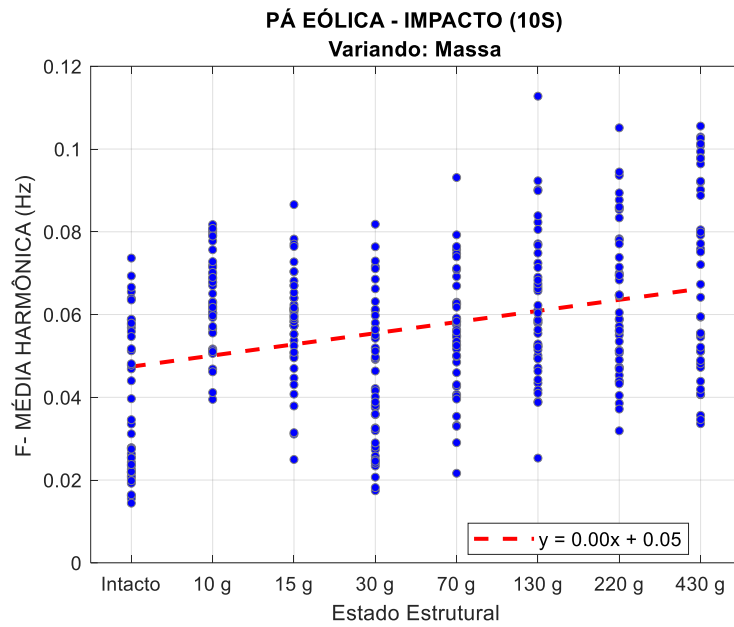


Figura G.41 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

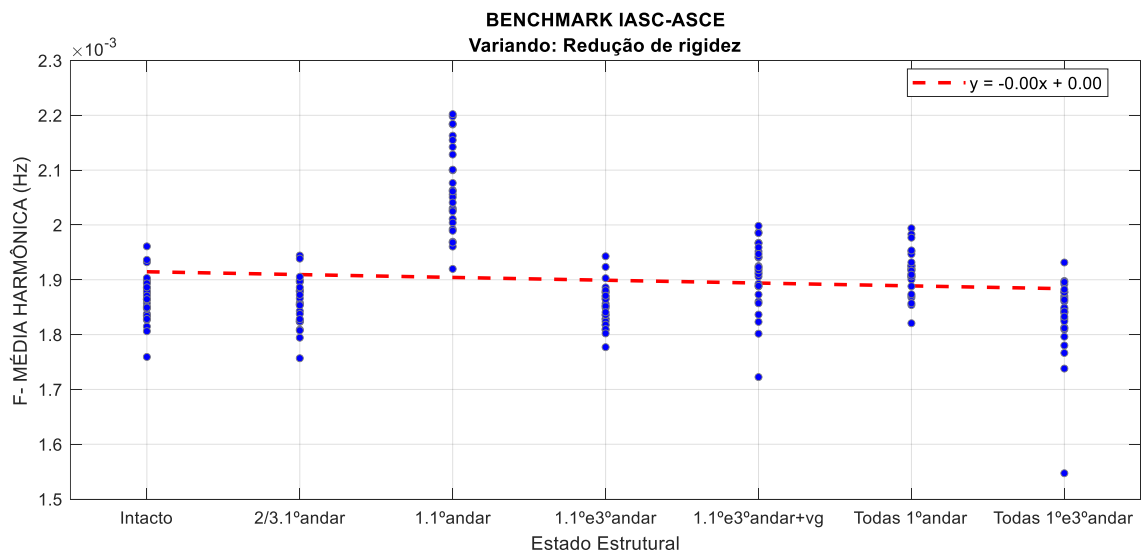
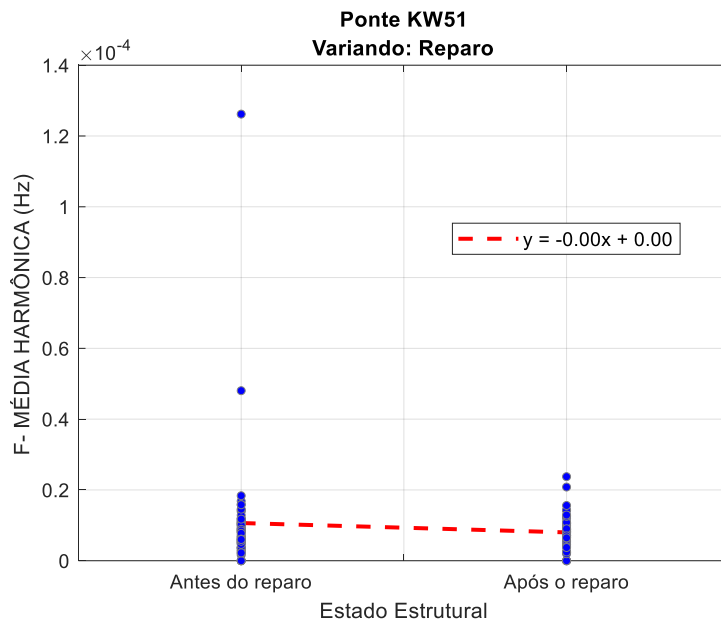


Figura G.42 – Gráfico de tendência da média harmônica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.3. Média Geométrica

Figura G.43 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

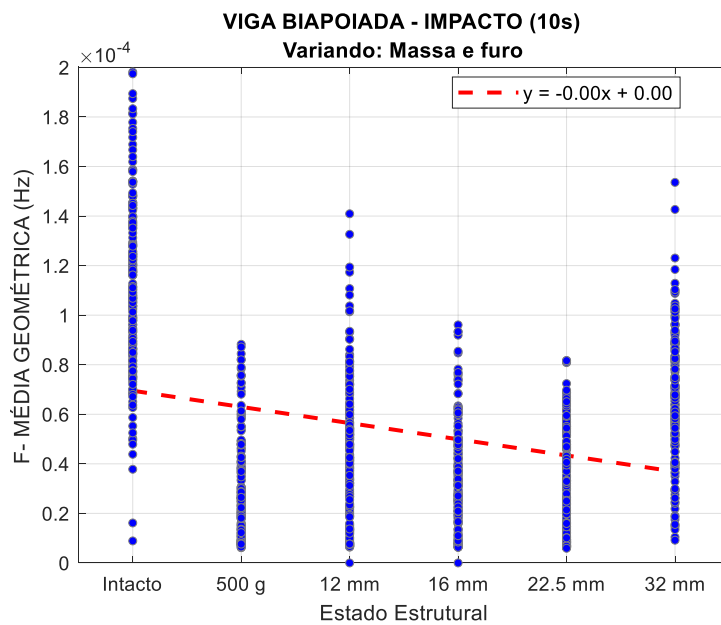


Figura G.44 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

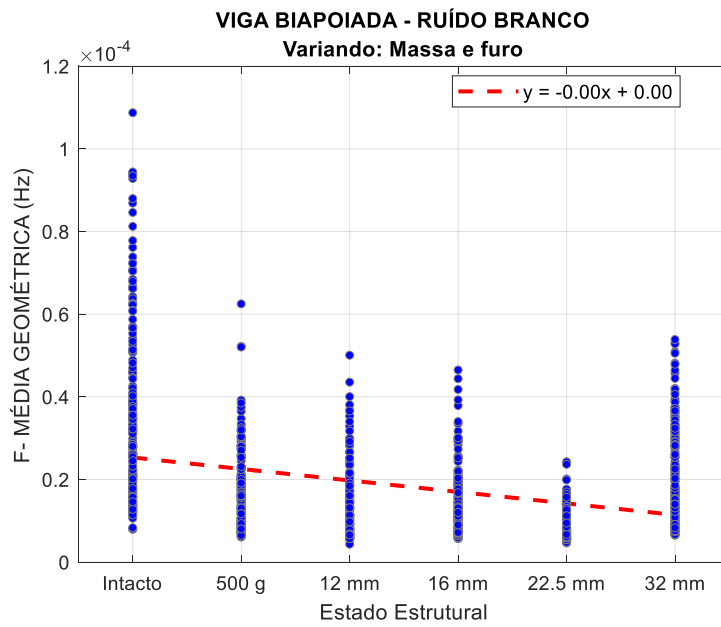


Figura G.45 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

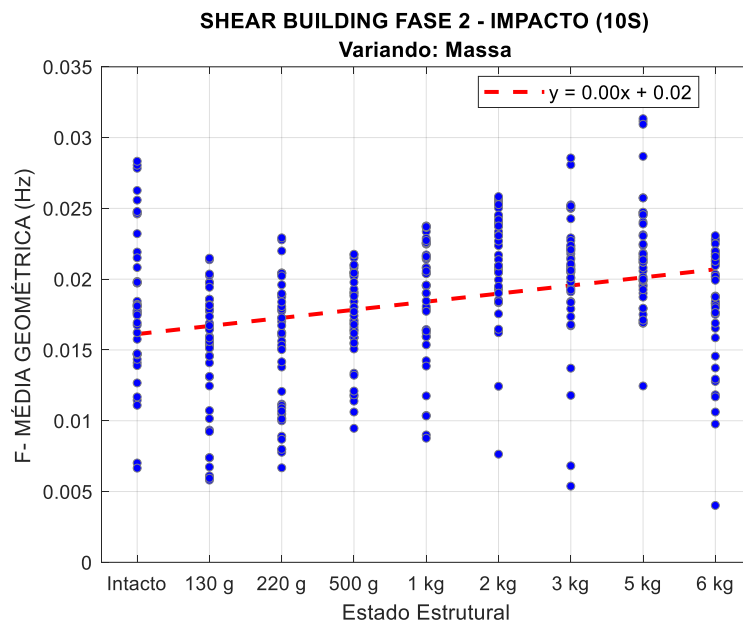


Figura G.46 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

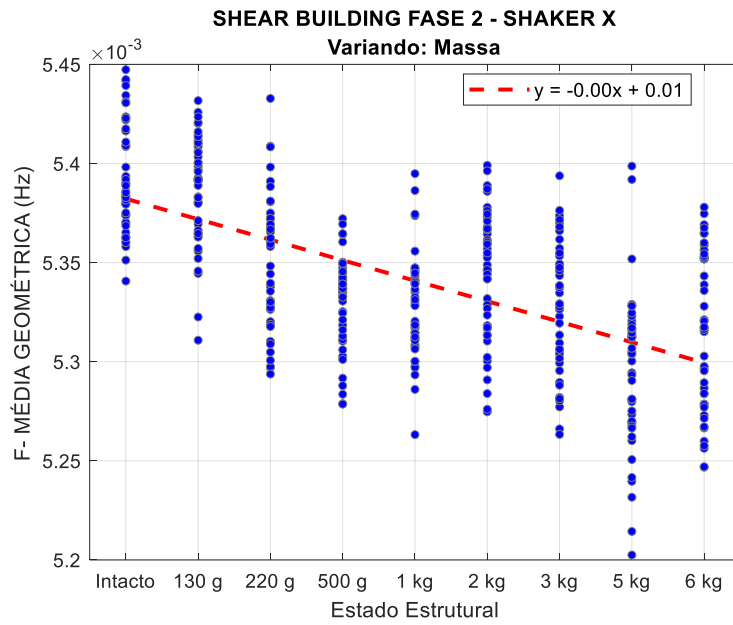


Figura G.47 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

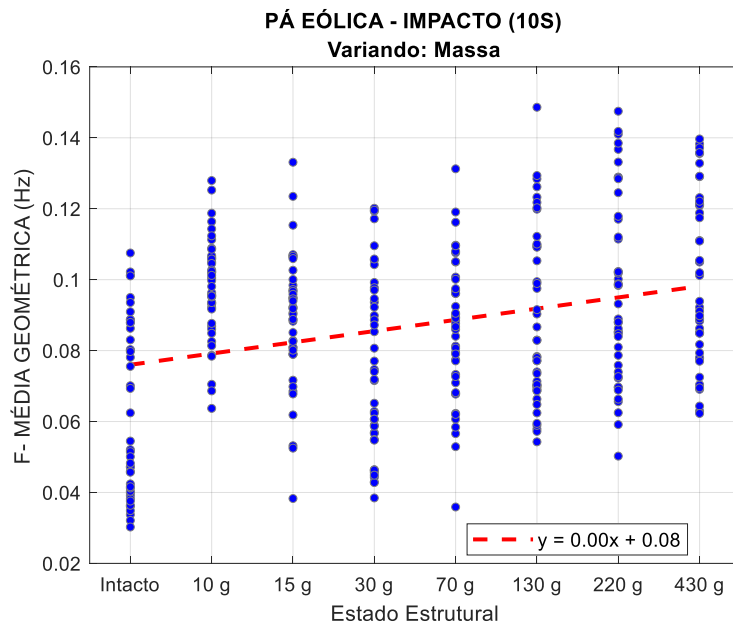


Figura G.48 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

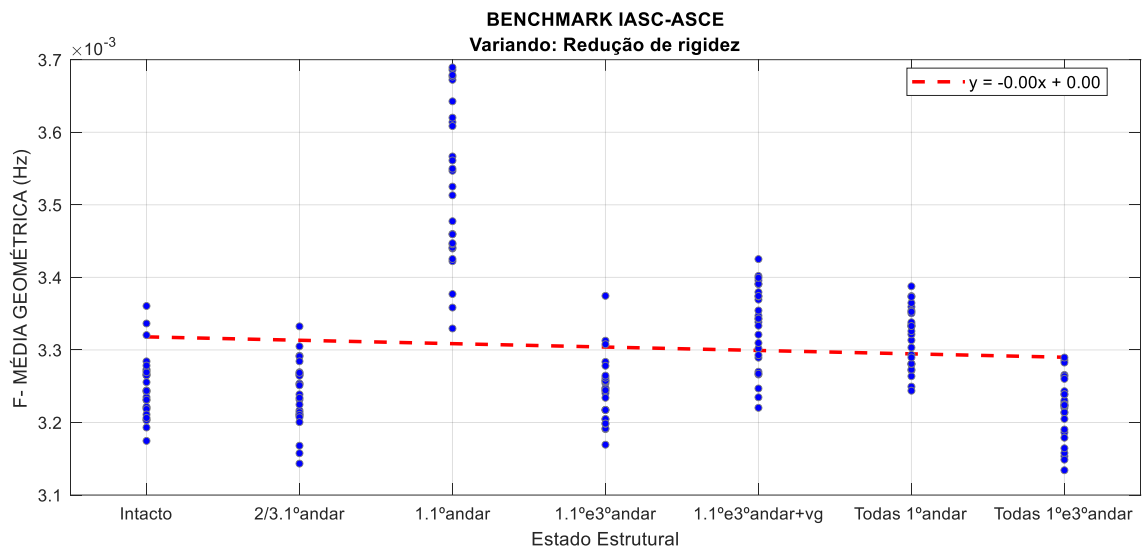
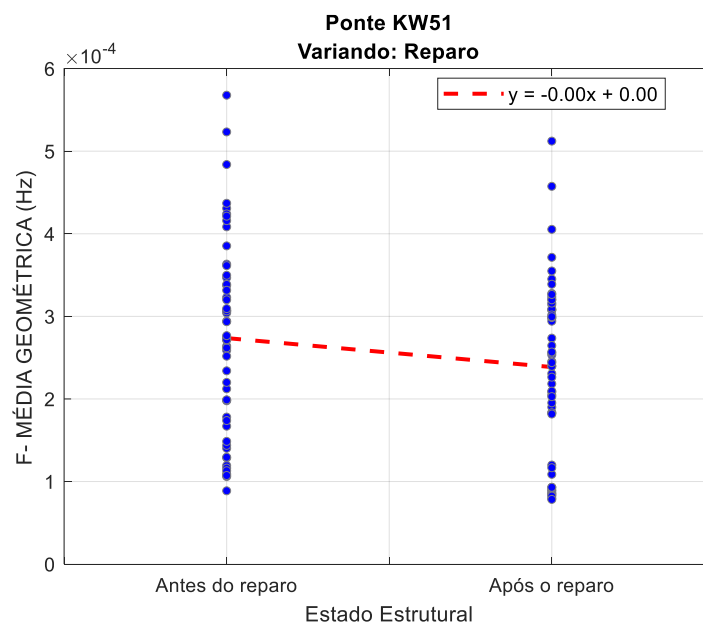


Figura G.49 – Gráfico de tendência da média geométrica, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.4. Média dos Quadrados dos Valores

Figura G.50 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

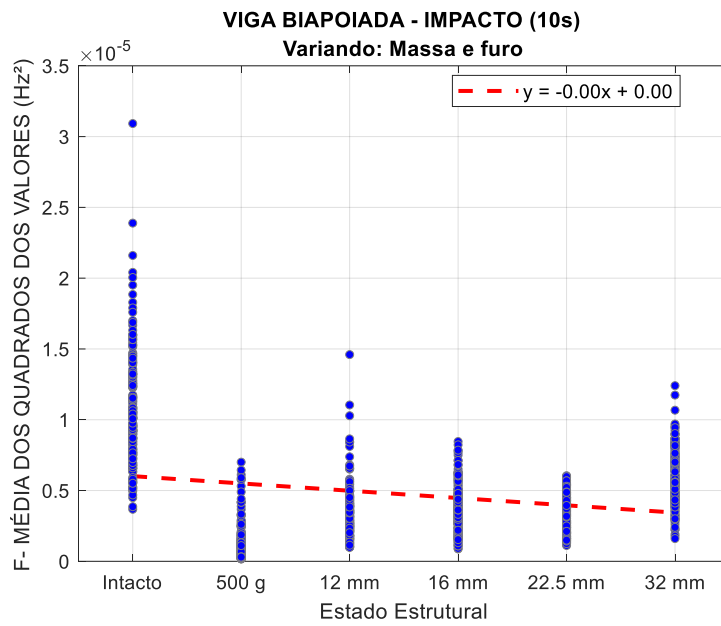


Figura G.51 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

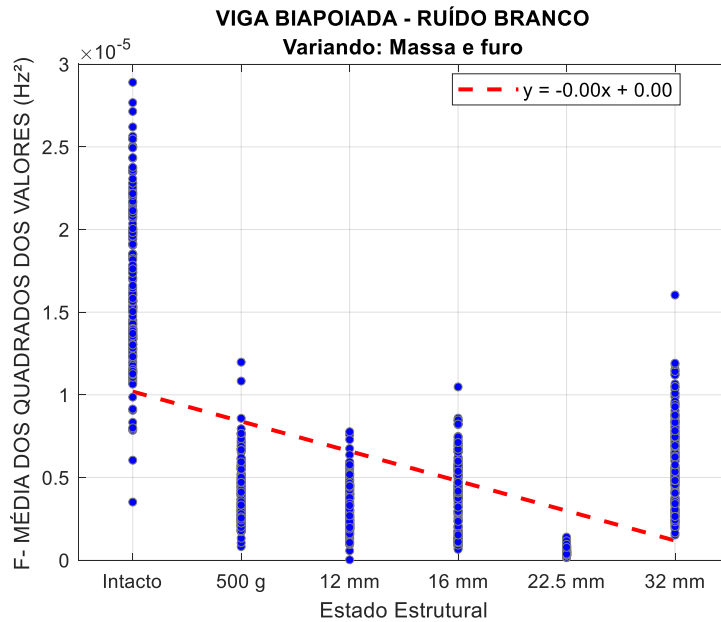


Figura G.52 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

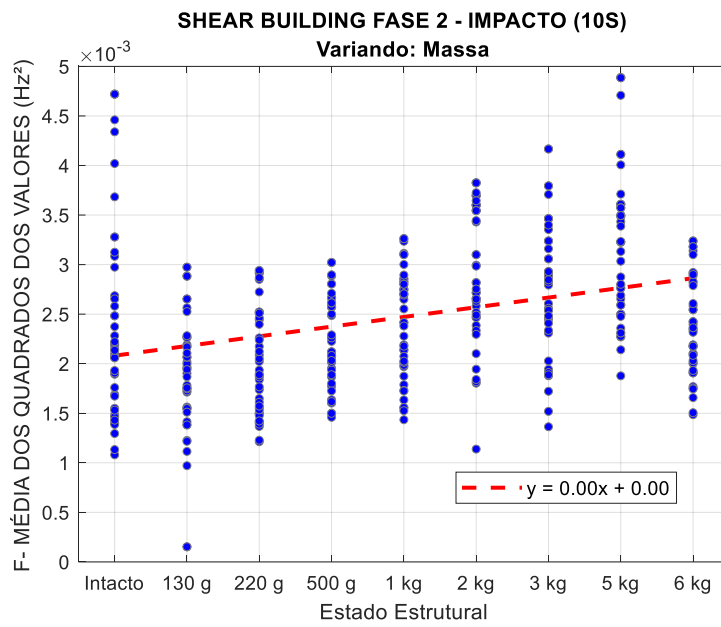


Figura G.53 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

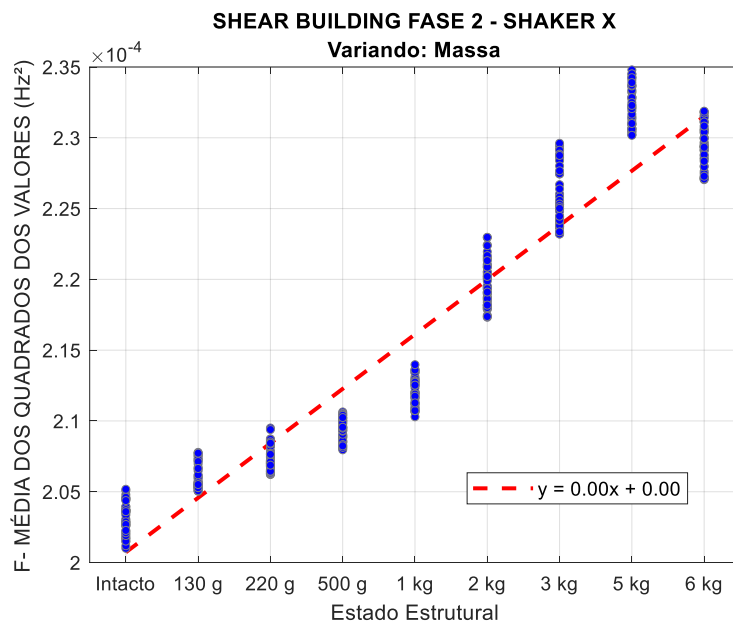


Figura G.54 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

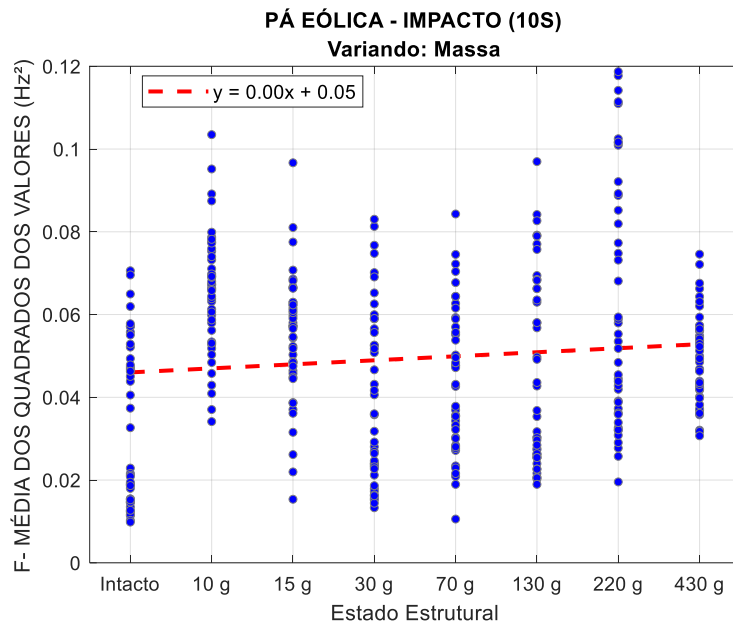


Figura G.55 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

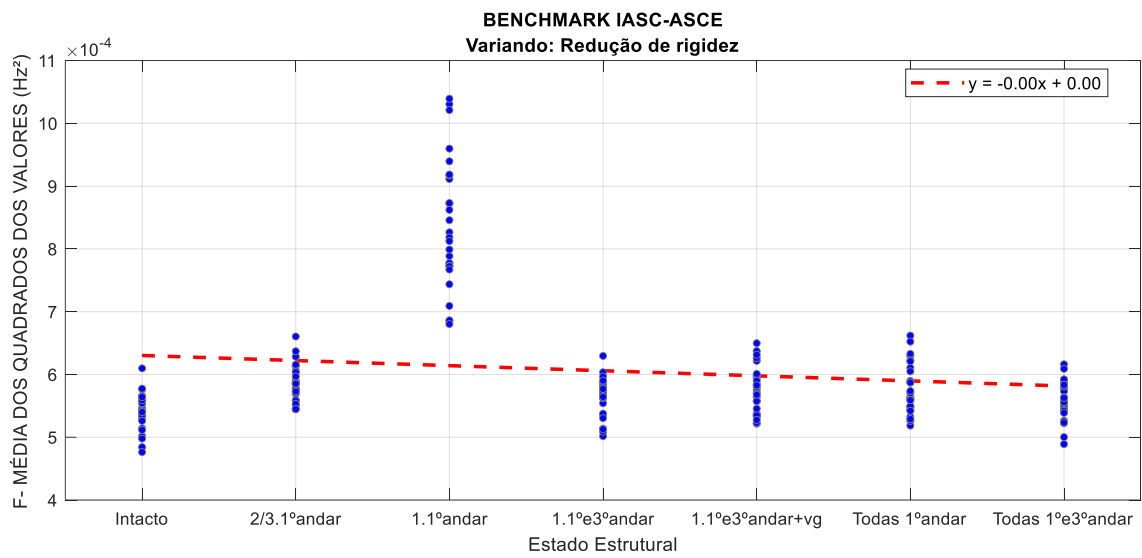
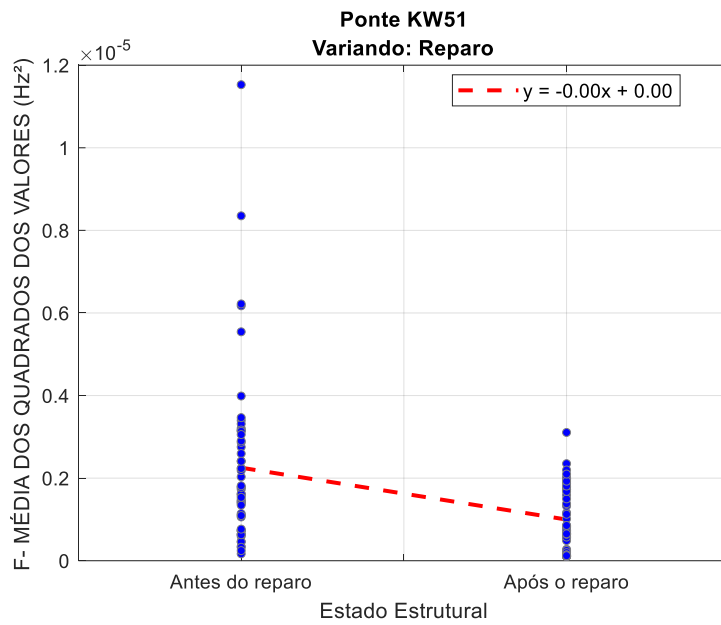


Figura G.56 – Gráfico de tendência da Média dos Quadrados dos Valores, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.5. Raiz Quadrada da Média

Figura G.57 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

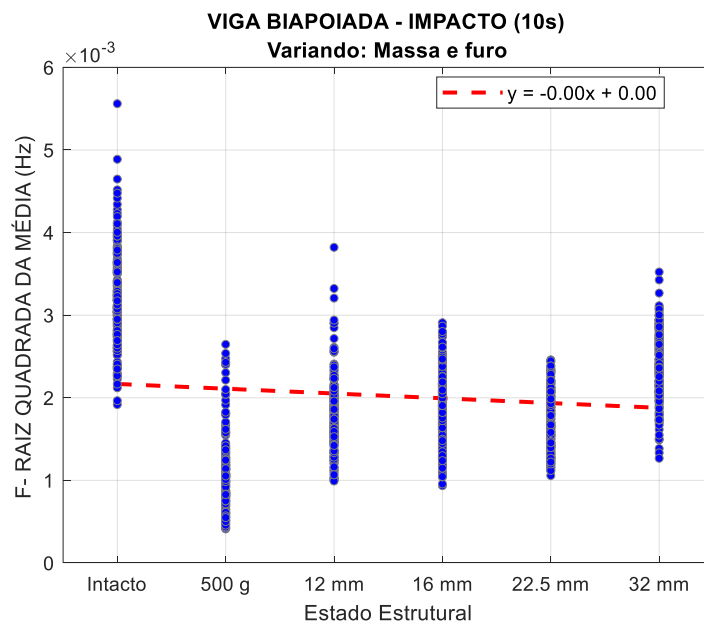


Figura G.58 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoçada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

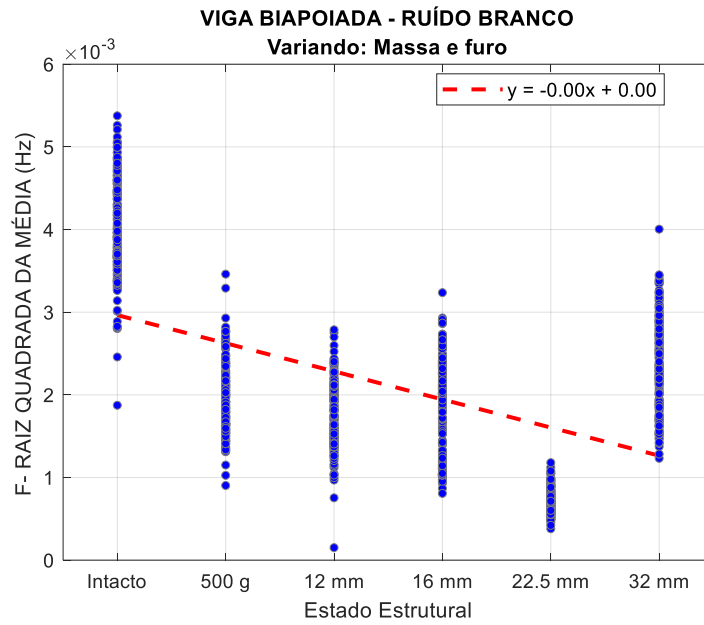


Figura G.59 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

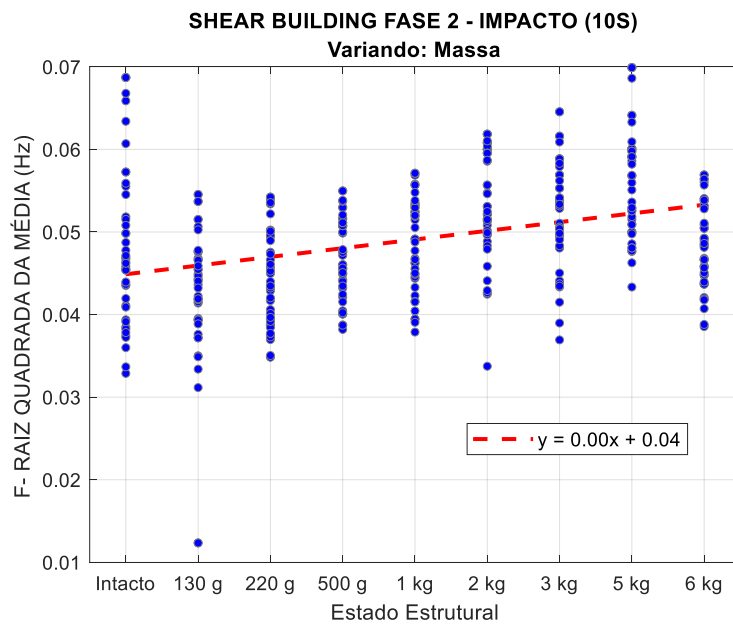


Figura G.60 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

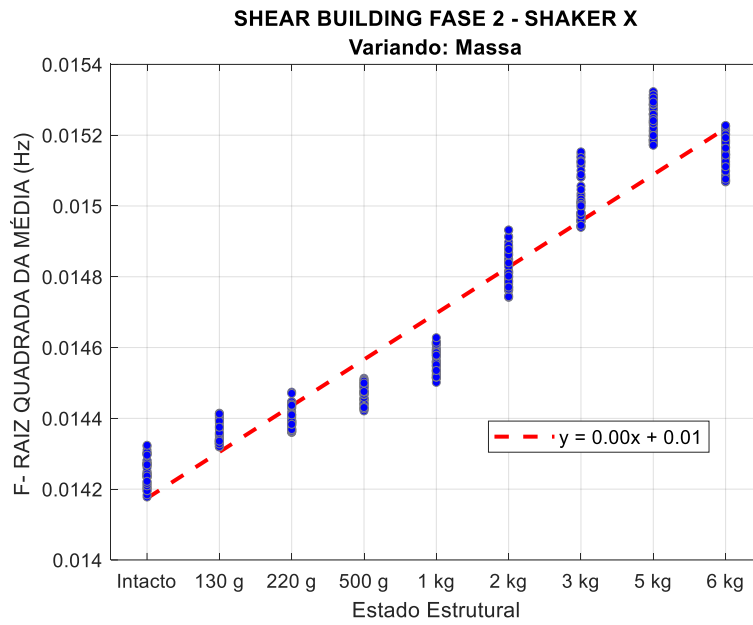


Figura G.61 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

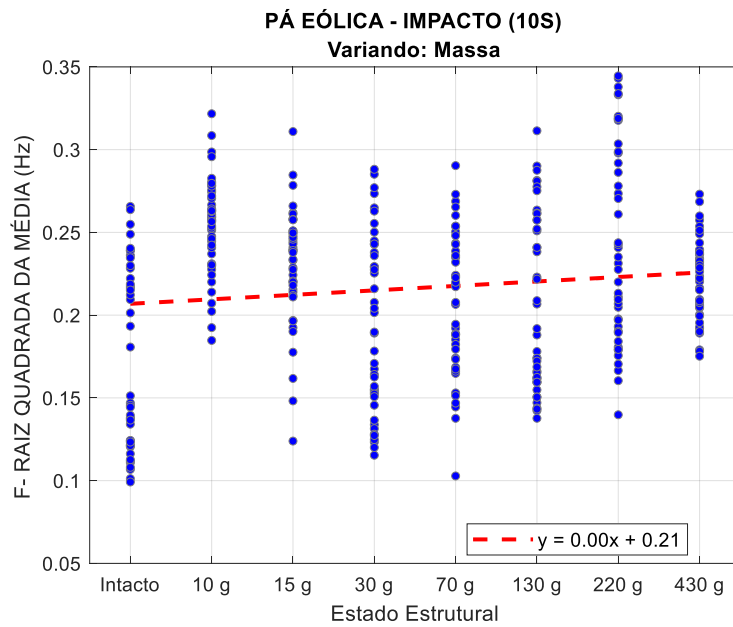


Figura G.62 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

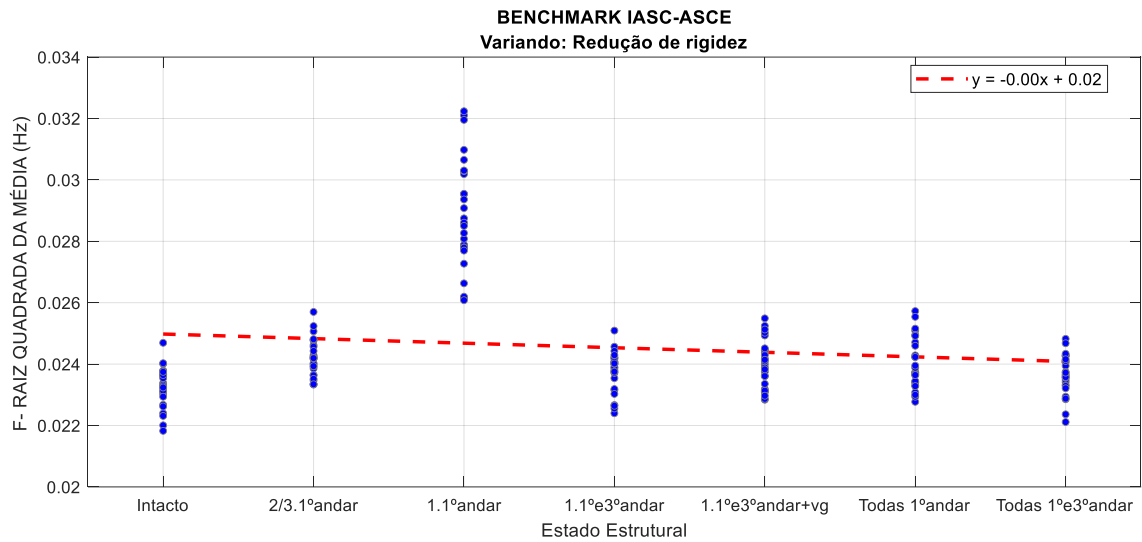
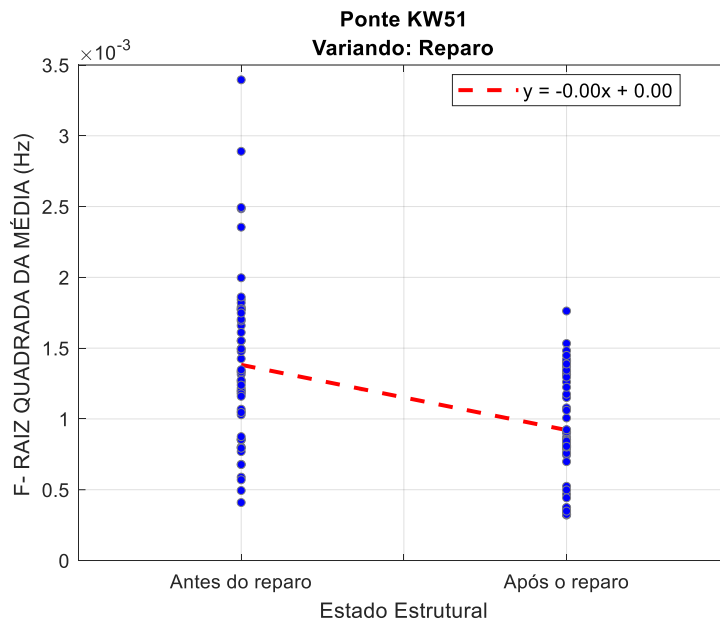


Figura G.63 – Gráfico de tendência da Raiz Quadrada da Média, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.6. Mediana ou Segundo Quartil

Figura G.64 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

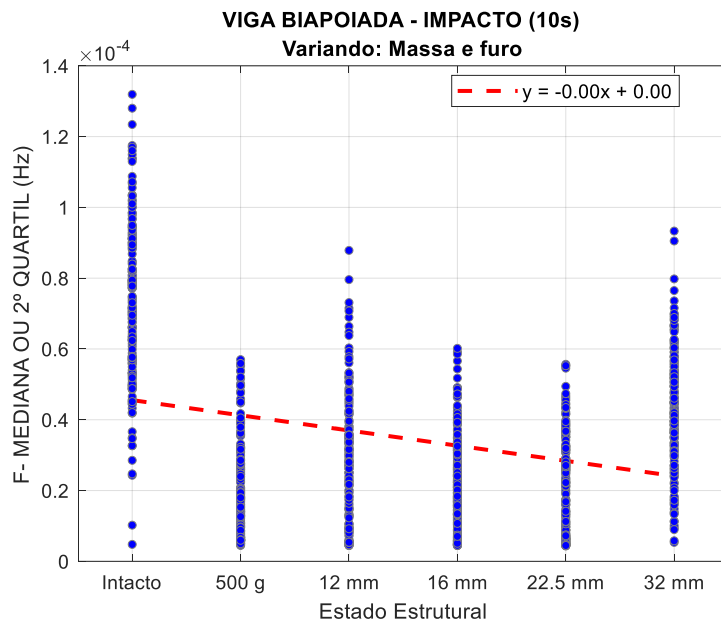


Figura G.65 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

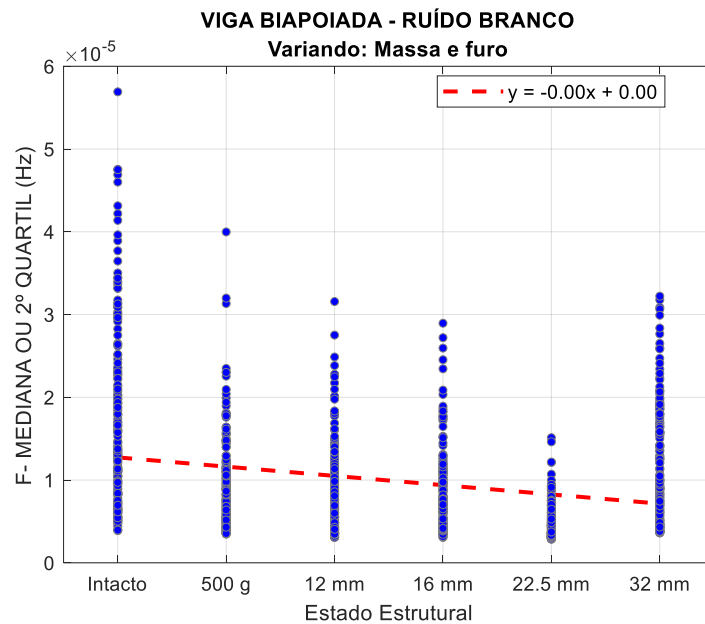


Figura G.66 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

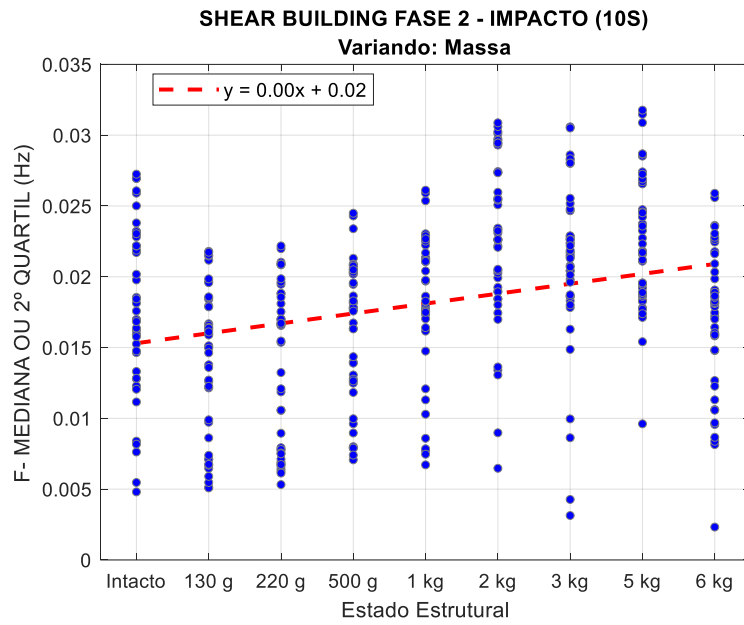


Figura G.67 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

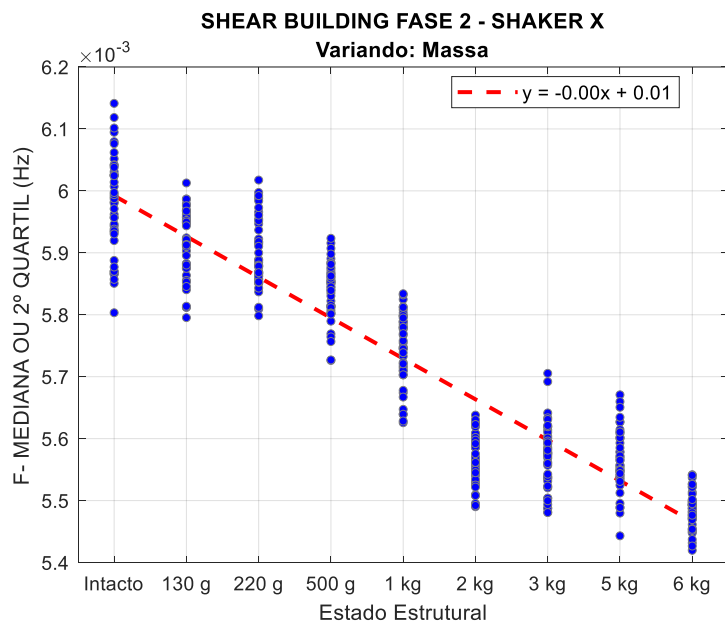


Figura G.68 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

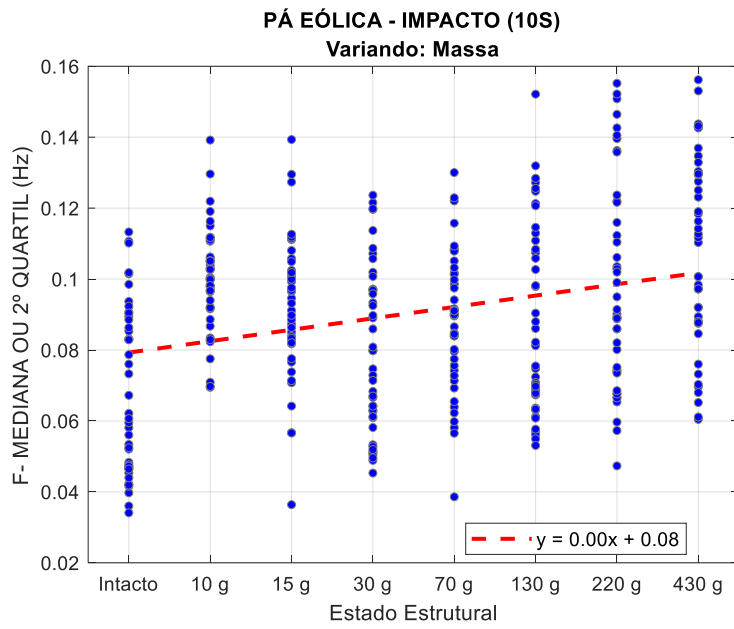


Figura G.69 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

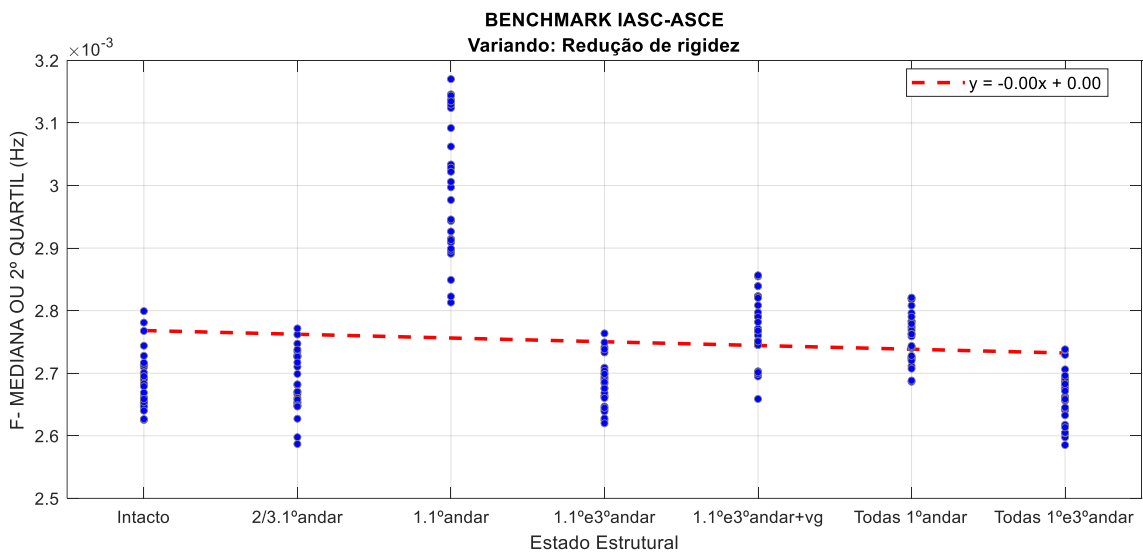
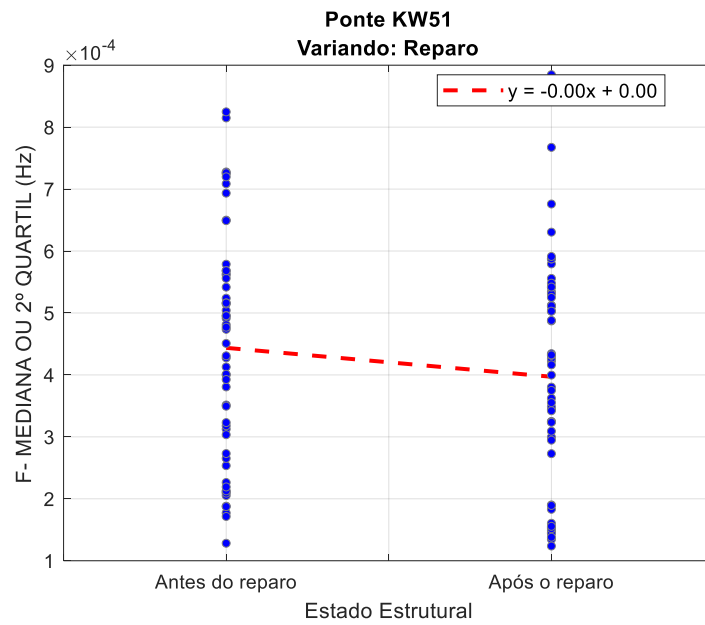


Figura G.70 – Gráfico de tendência do 2º quartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.7. Moda

Figura G.71 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

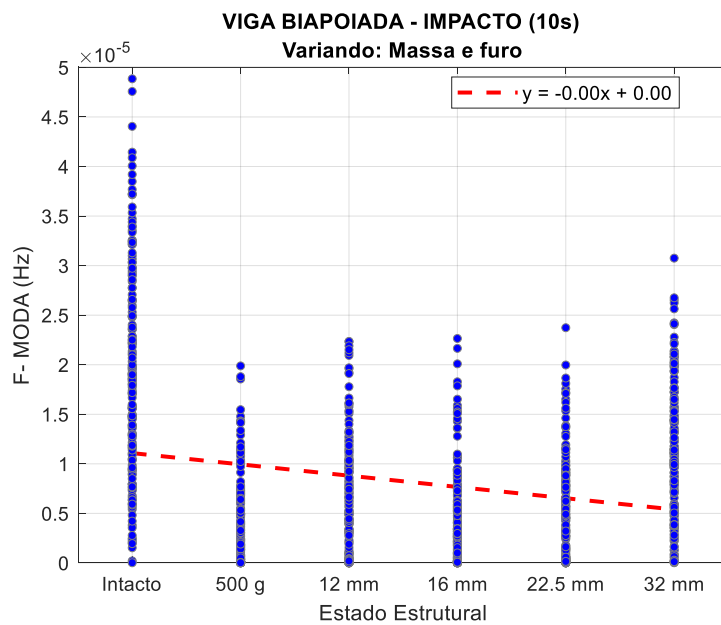


Figura G.72 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

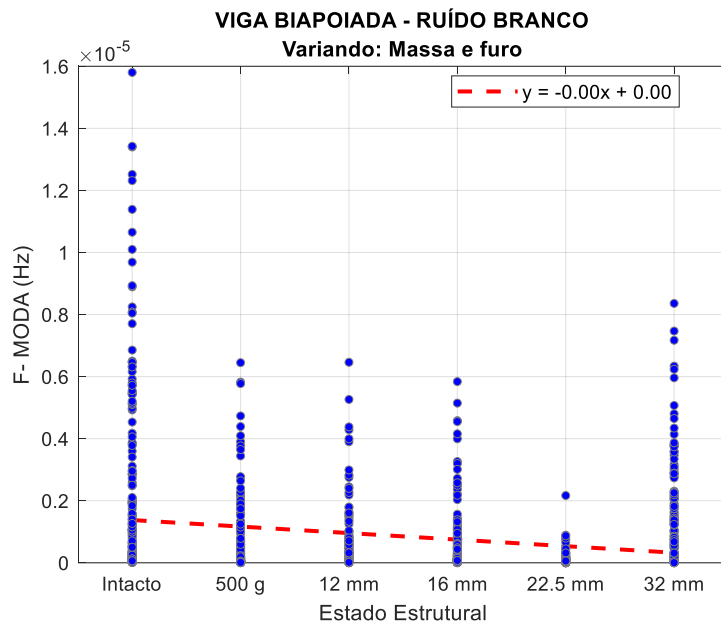


Figura G.73 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

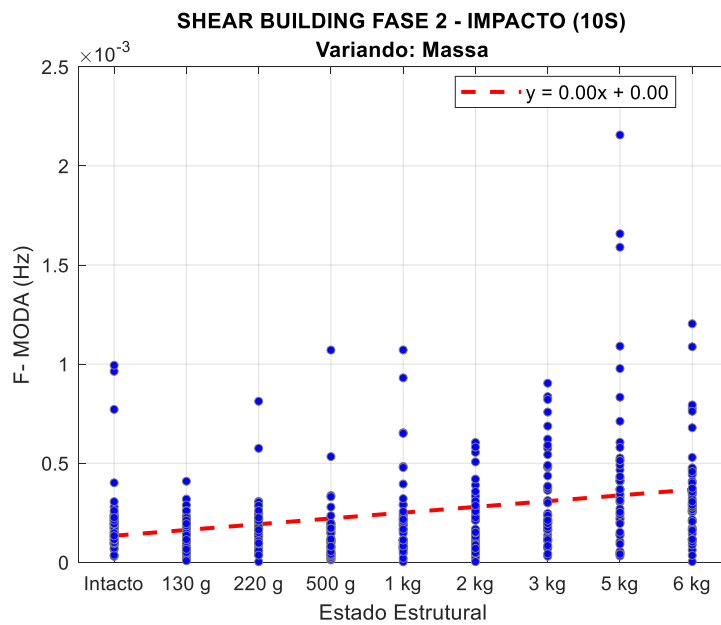


Figura G.74 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

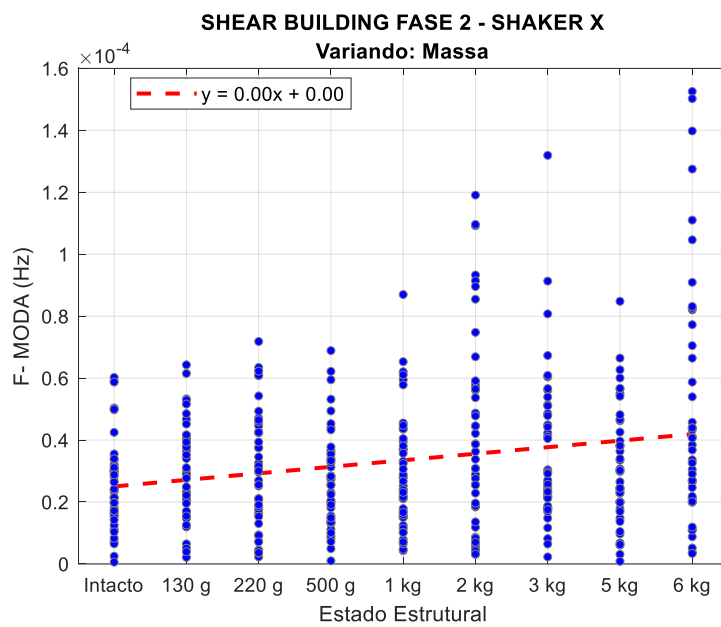


Figura G.75 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

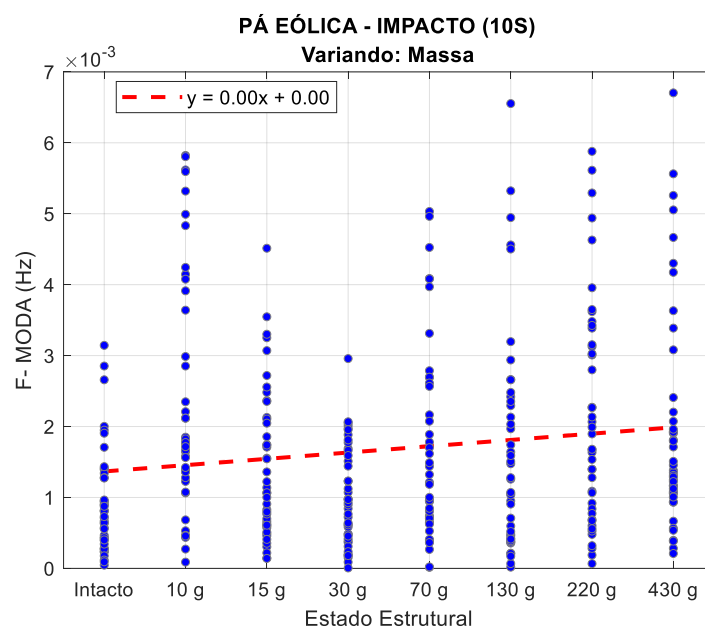


Figura G.76 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

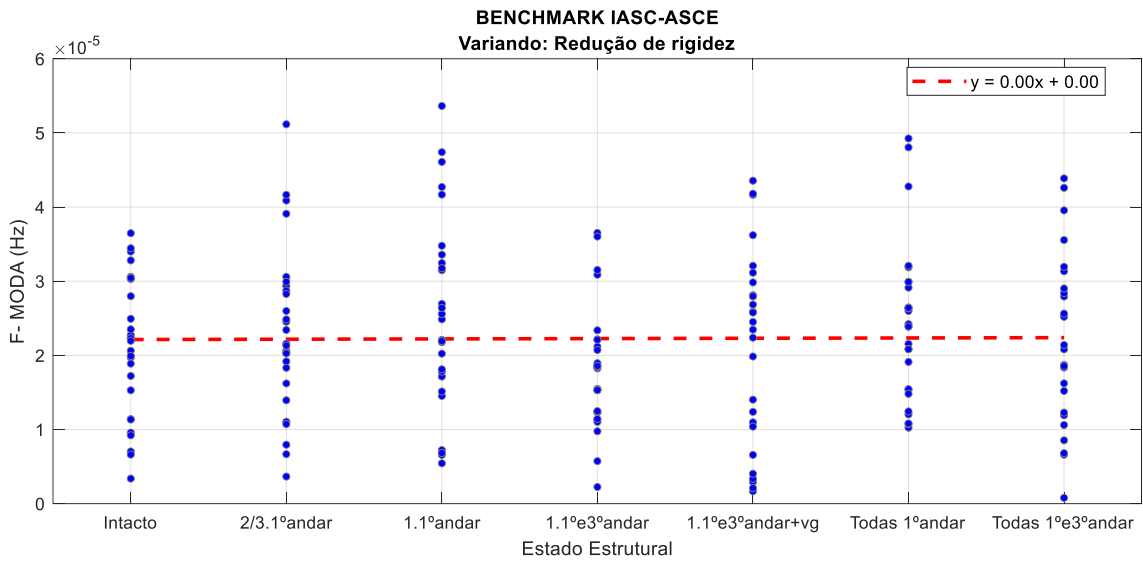
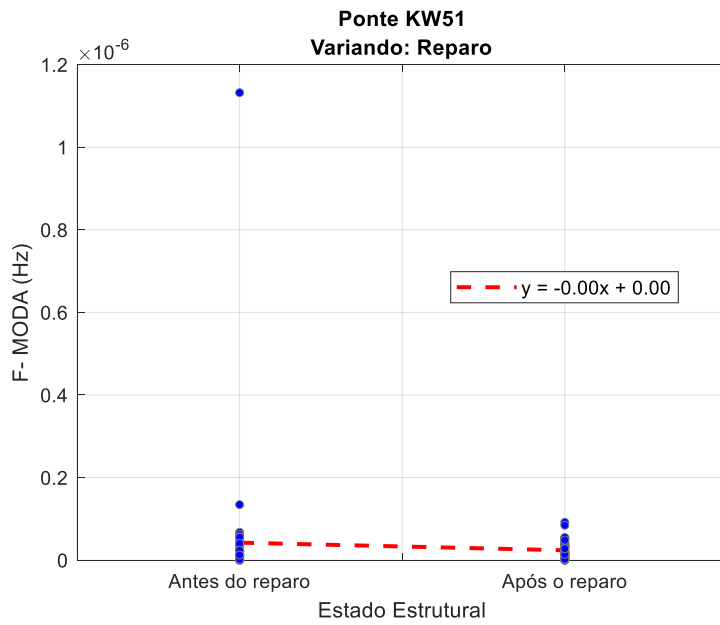


Figura G.77 – Gráfico de tendência da Moda, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.2.8. Ponto Médio

Figura G.78 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

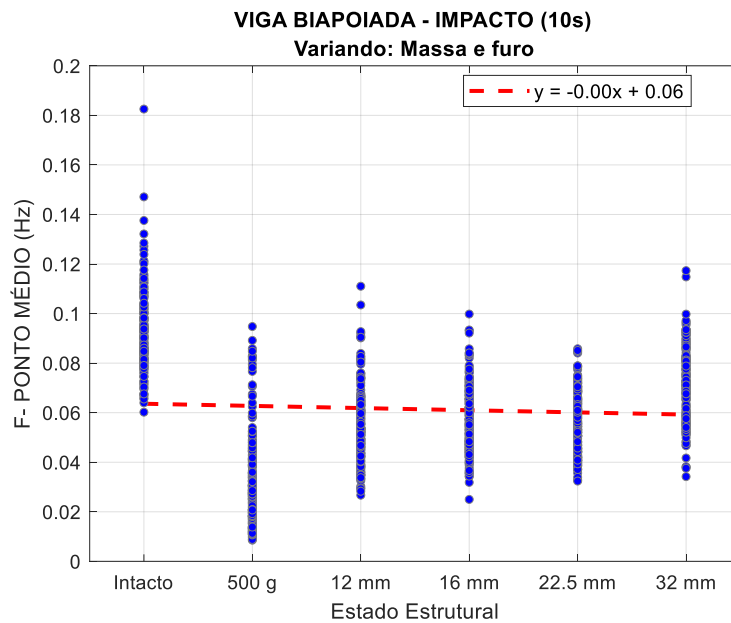


Figura G.79 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

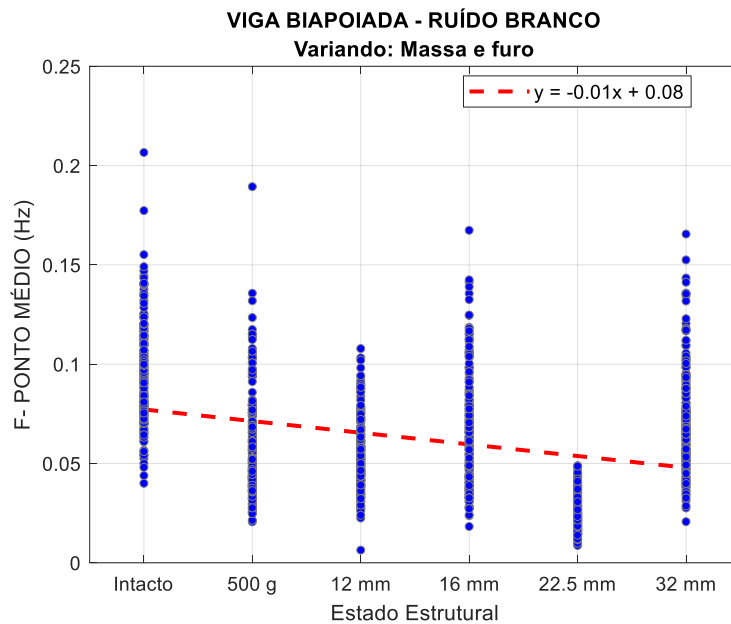


Figura G.80 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

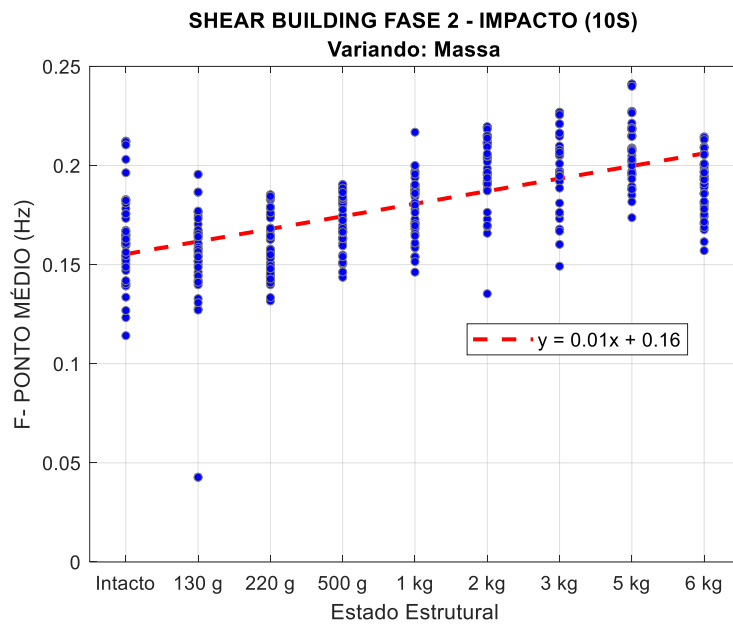


Figura G.81 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

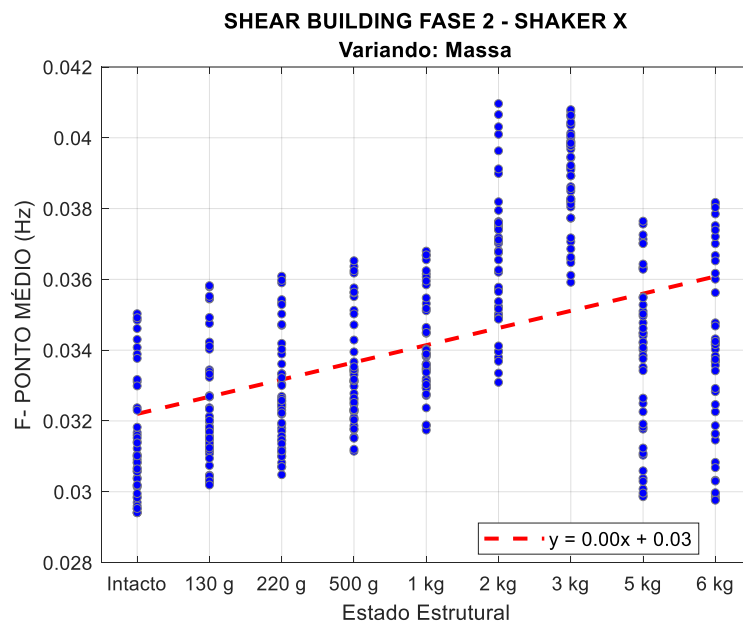


Figura G.82 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

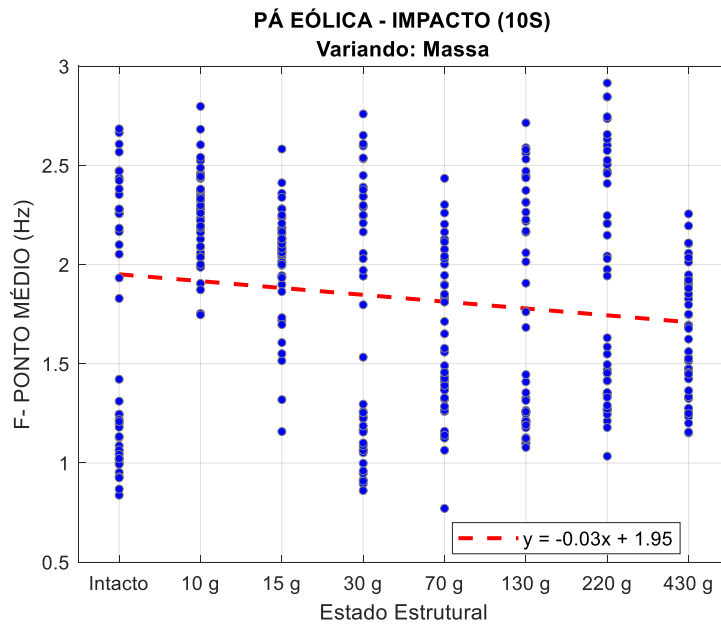


Figura G.83 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

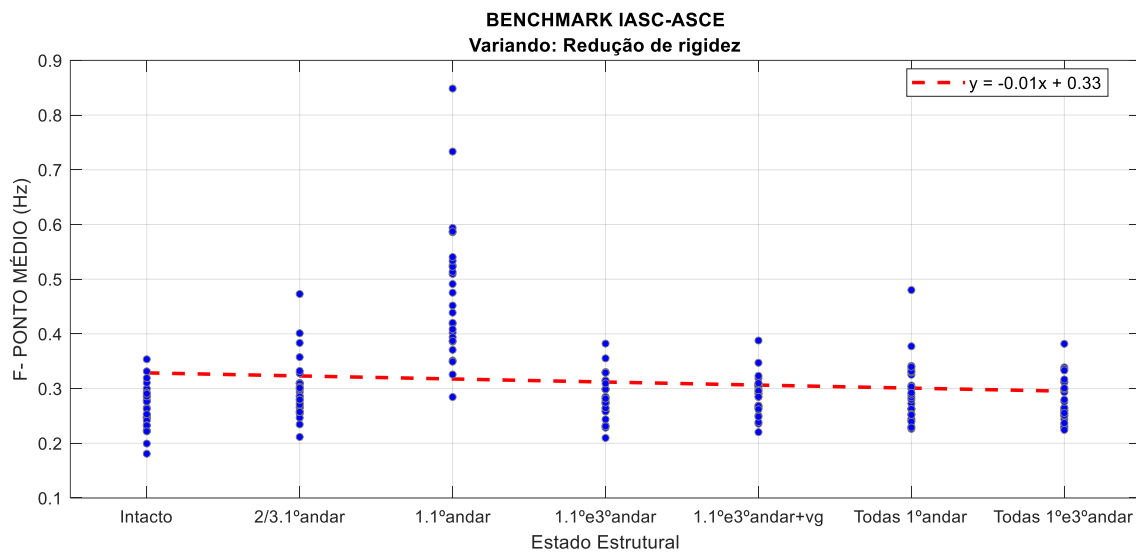
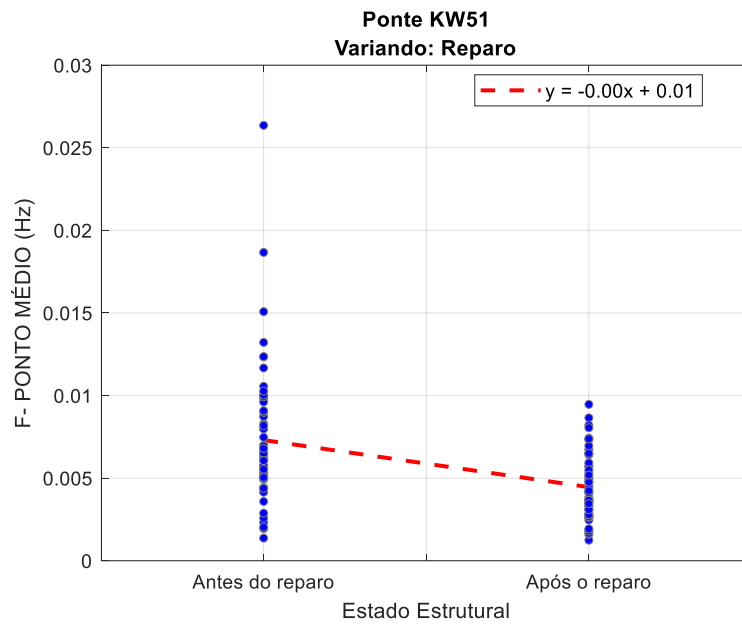


Figura G.84 – Gráfico de tendência do Ponto Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3. PARÂMETROS DE DISPERSÃO

G.3.1. Amplitude de Pico

Figura G.85 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

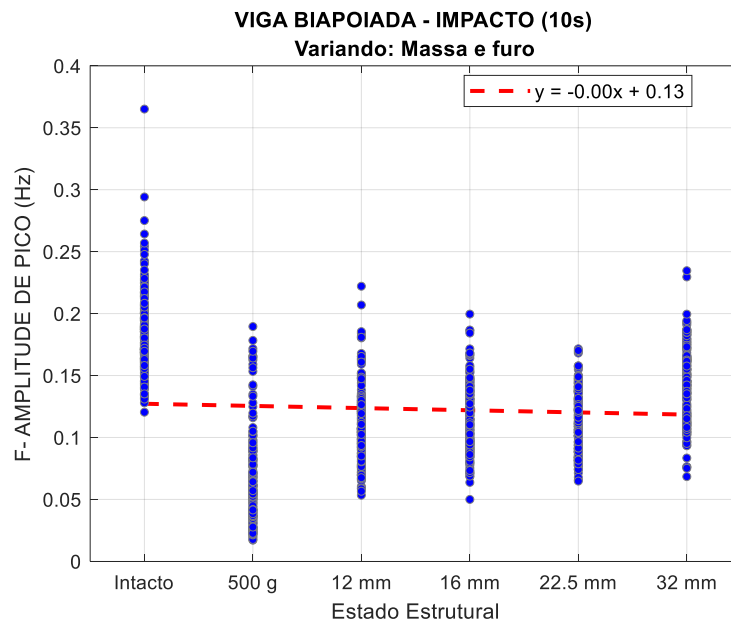


Figura G.86 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

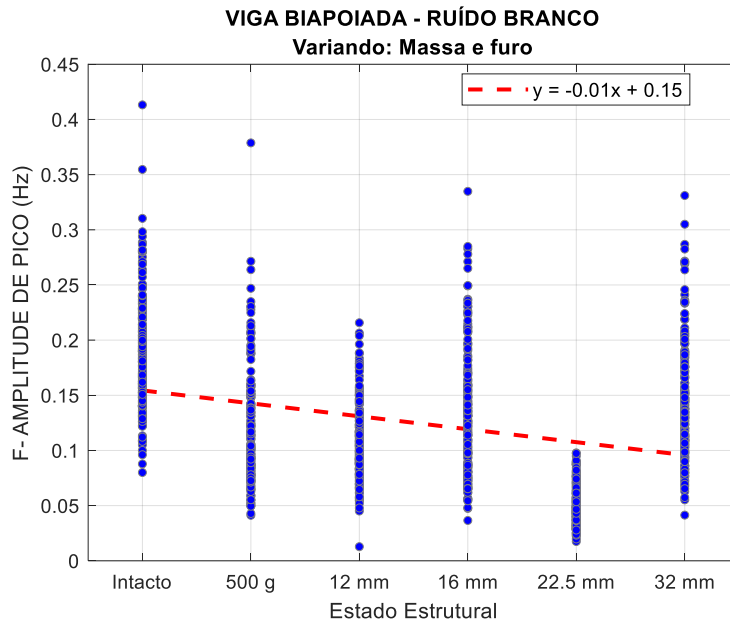


Figura G.87 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

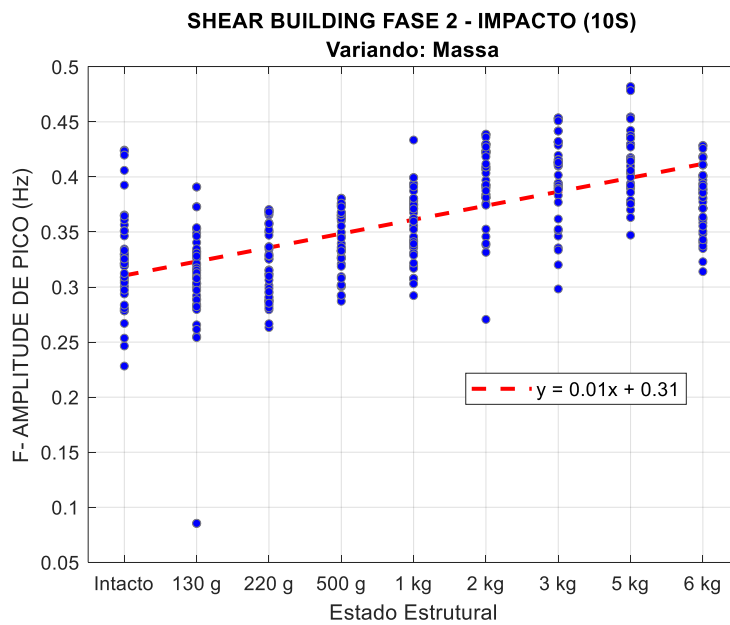


Figura G.88 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

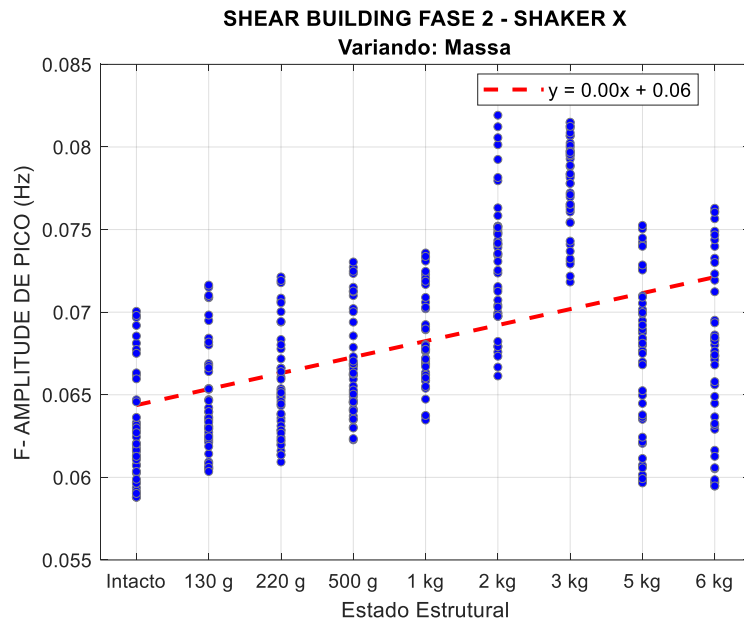


Figura G.89 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

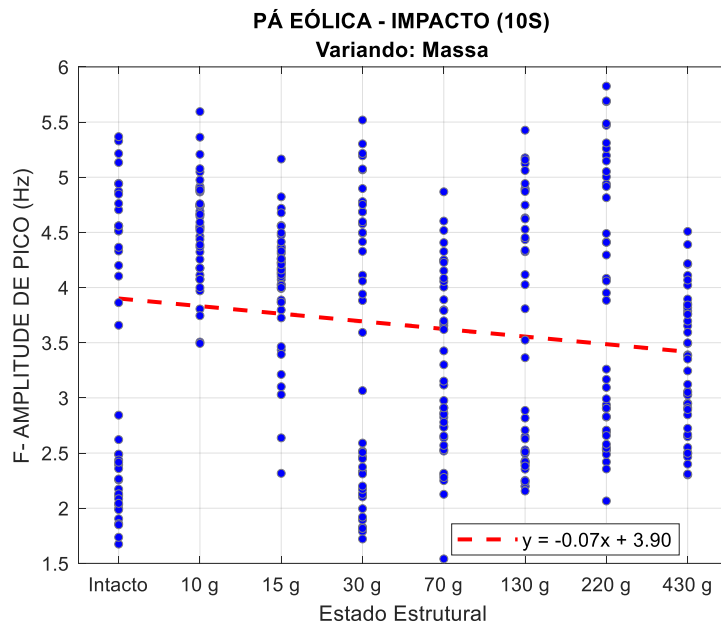


Figura G.90 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

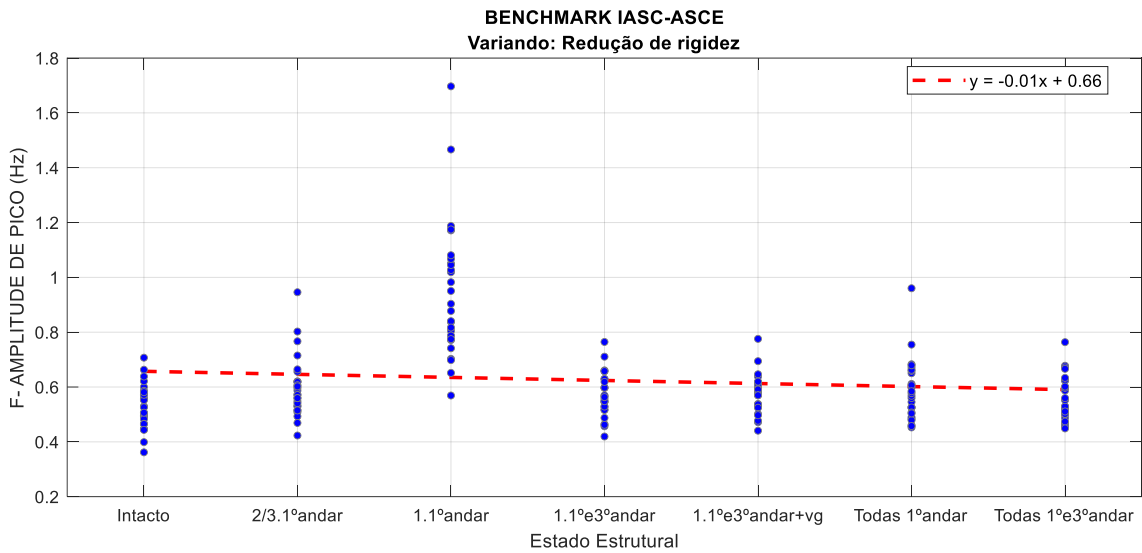
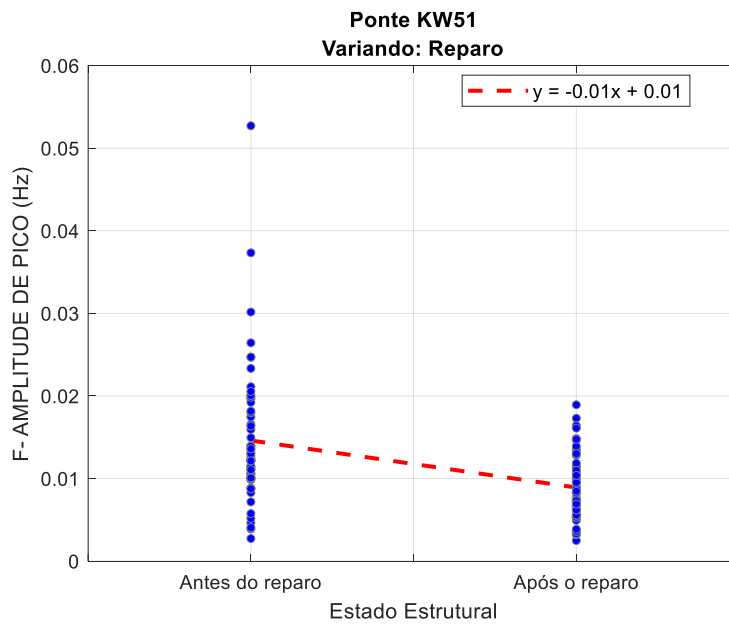


Figura G.91 – Gráfico de tendência da Amplitude de Pico, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3.2. Amplitude Total

Figura G.92 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

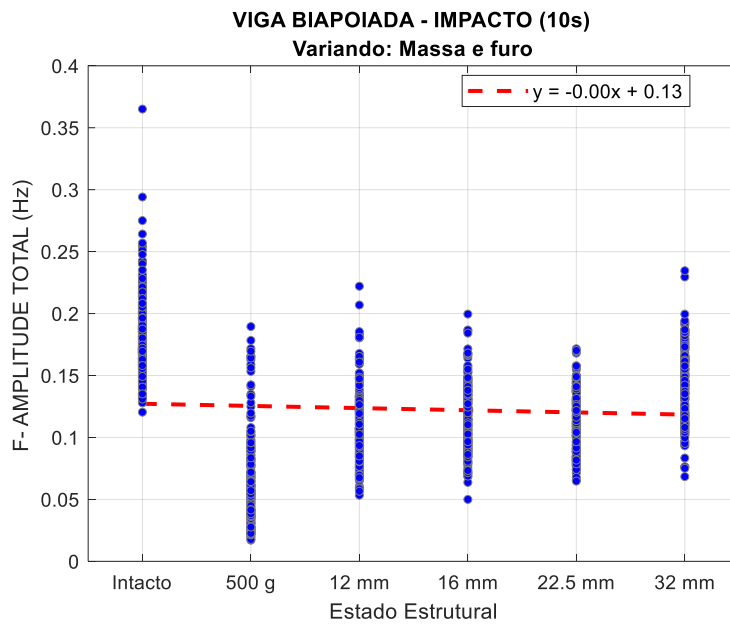


Figura G.93 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

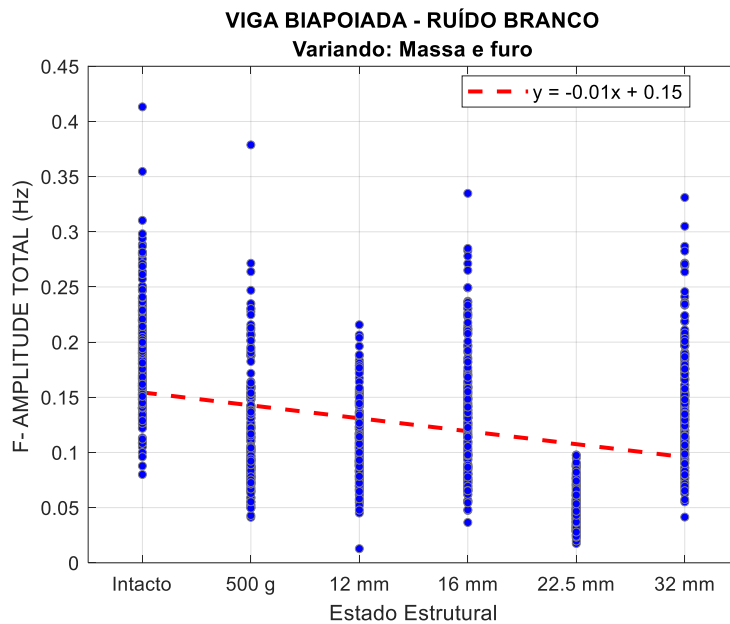


Figura G.94 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

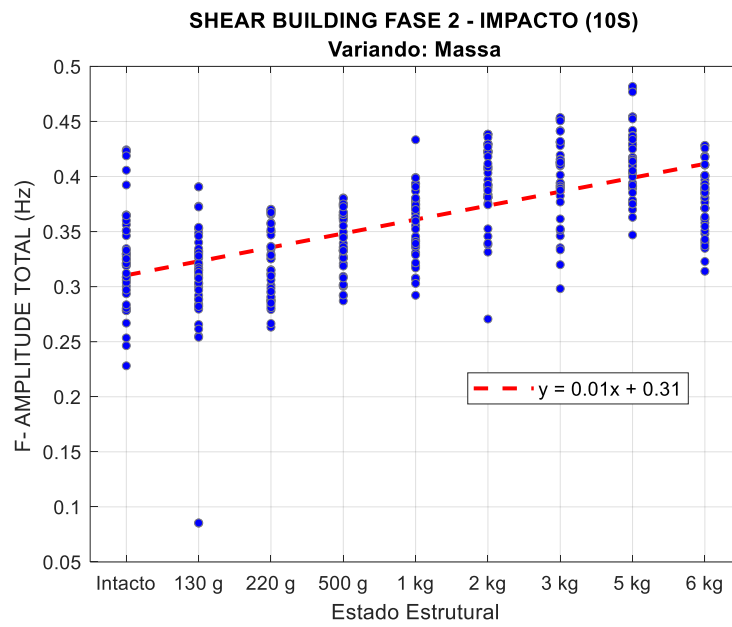


Figura G.95 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

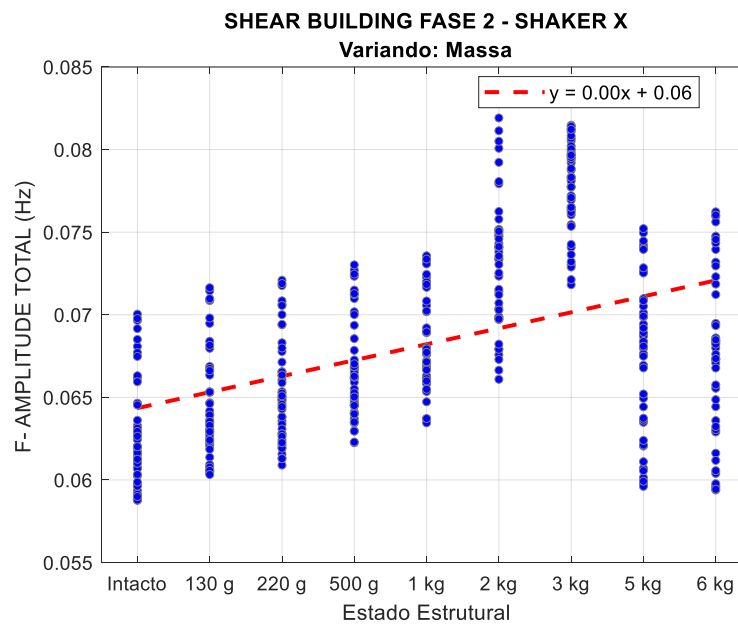


Figura G.96 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

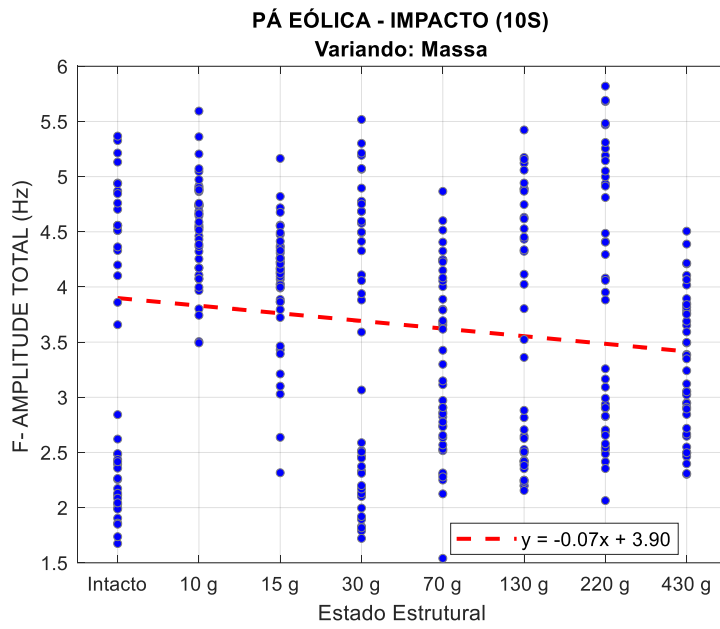


Figura G.97 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

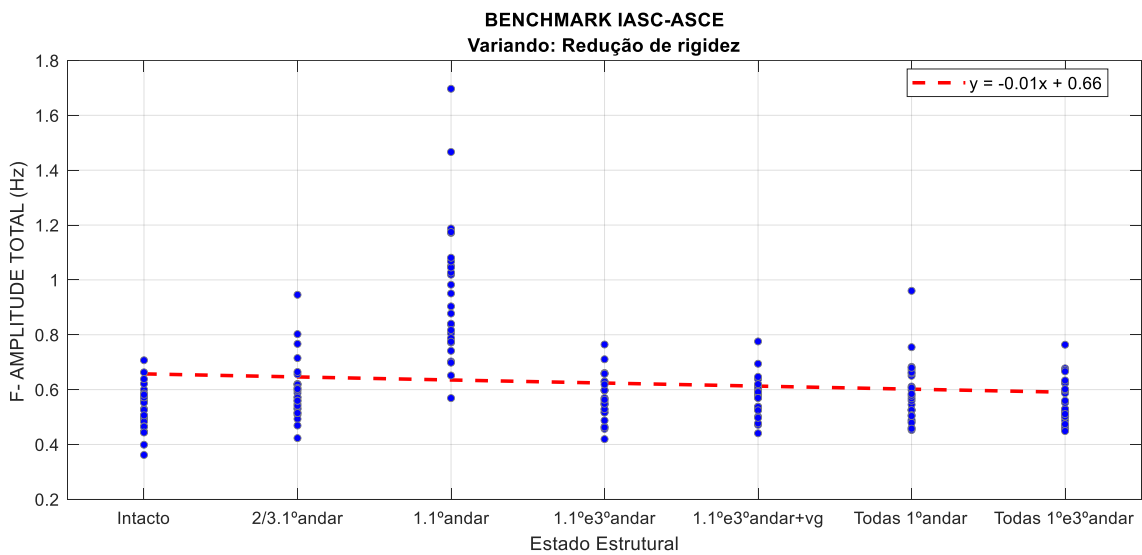
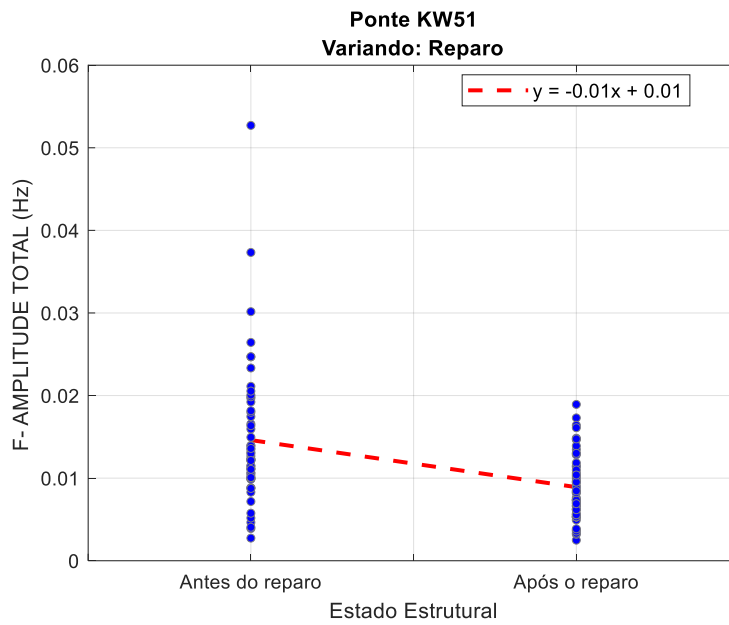


Figura G.98 – Gráfico de tendência da Amplitude Total, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3.3. Amplitude Interquartil

Figura G.99 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

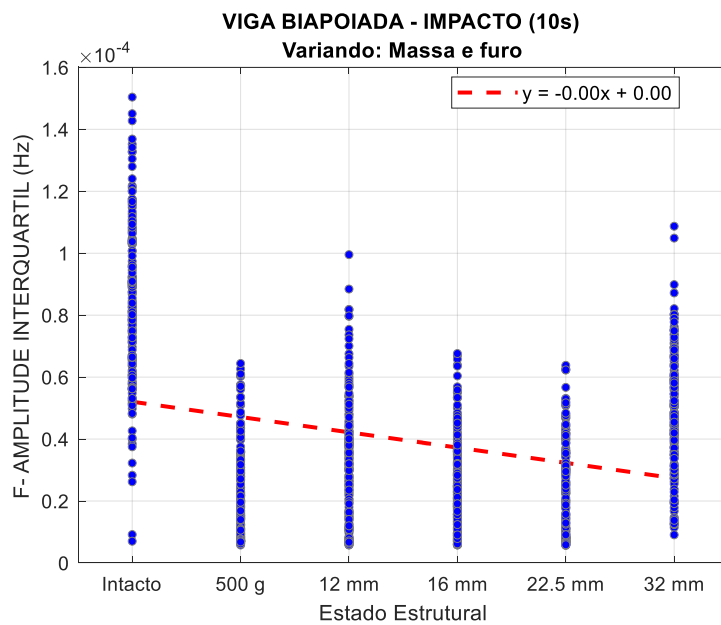


Figura G.100 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoçada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

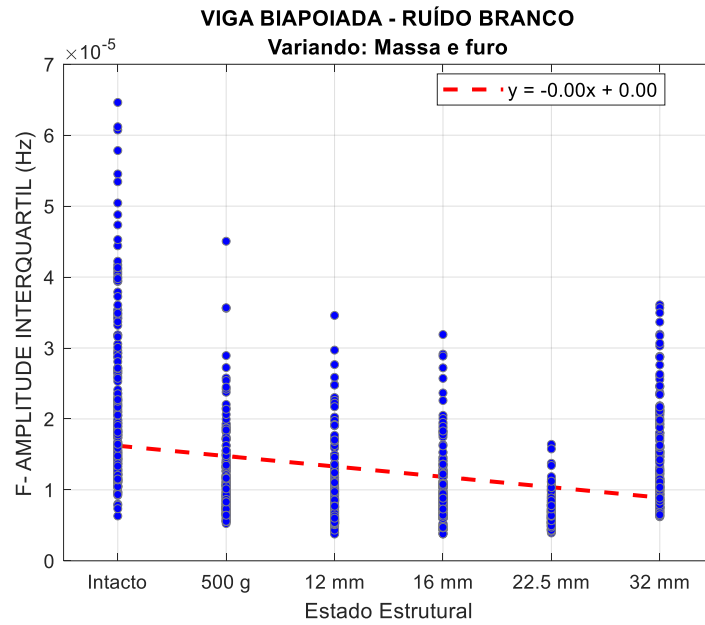


Figura G.101 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

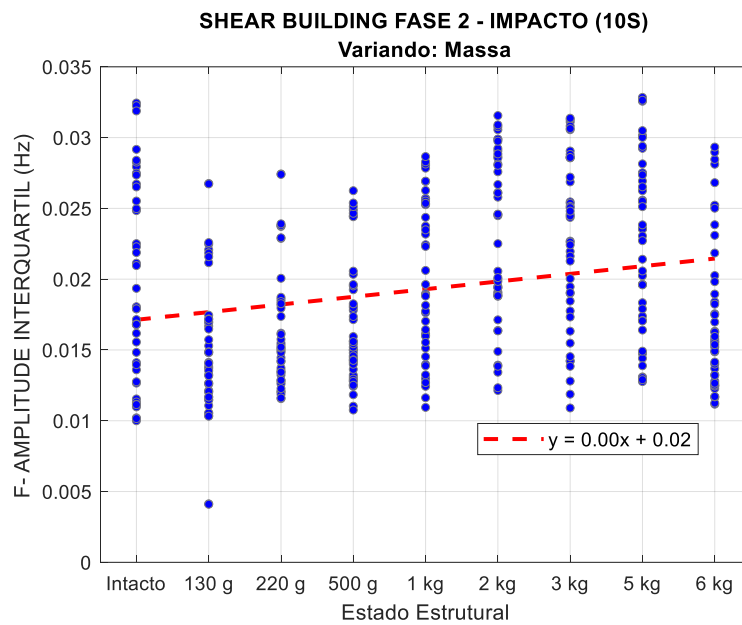


Figura G.102 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

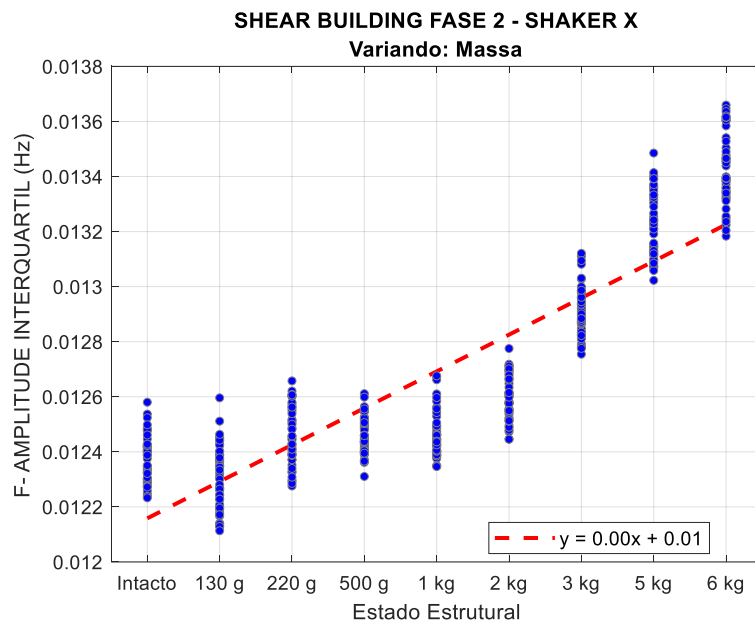


Figura G.103 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

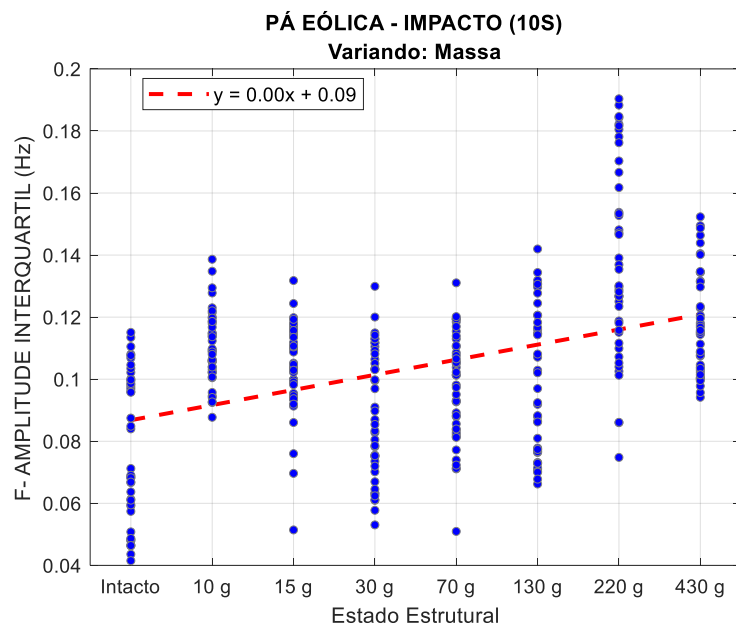


Figura G.104 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

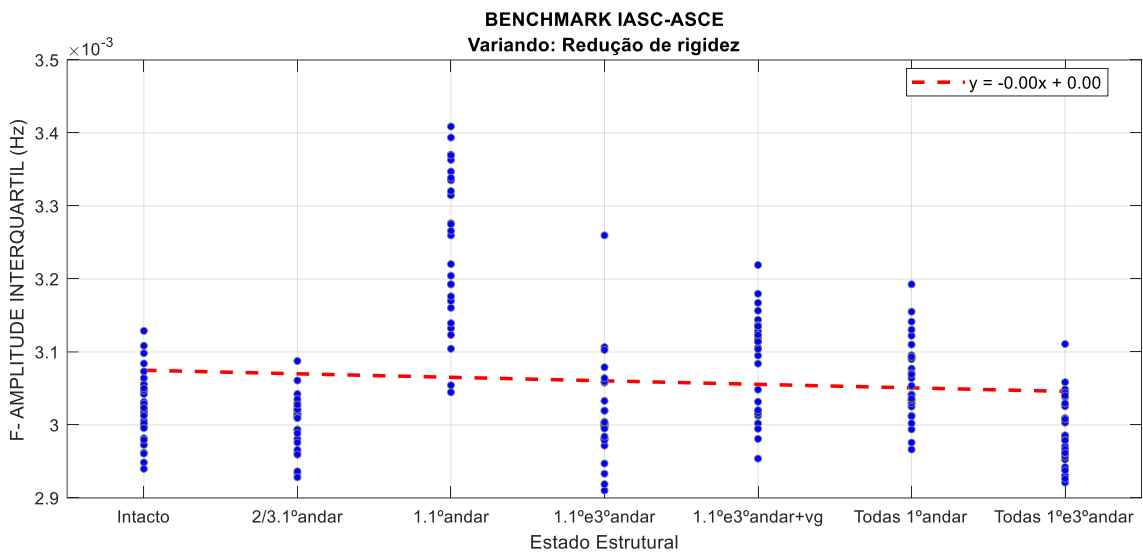
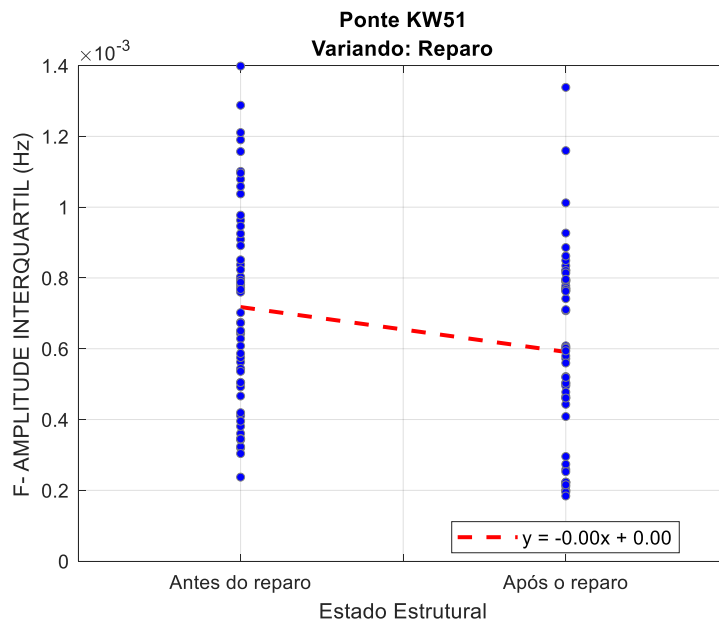


Figura G.105 – Gráfico de tendência da Amplitude Interquartil, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.



G.3.4. Amplitude de Percentis

Figura G.106 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

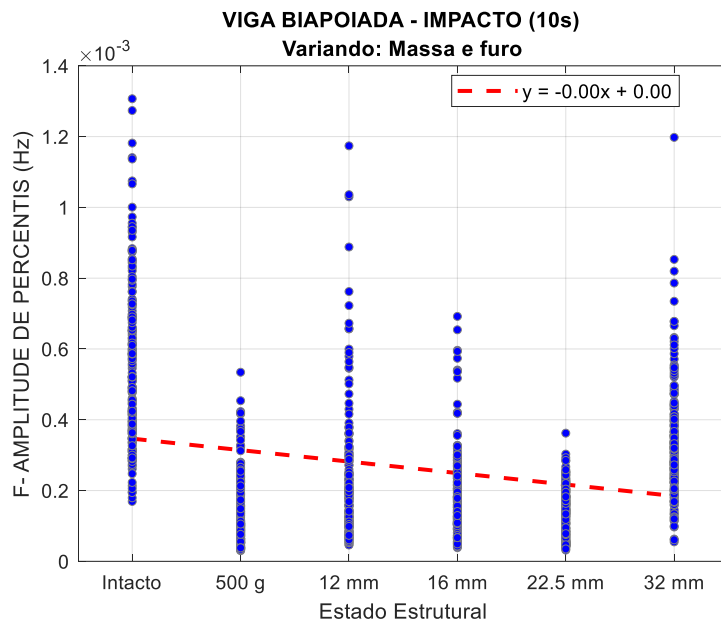


Figura G.107 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

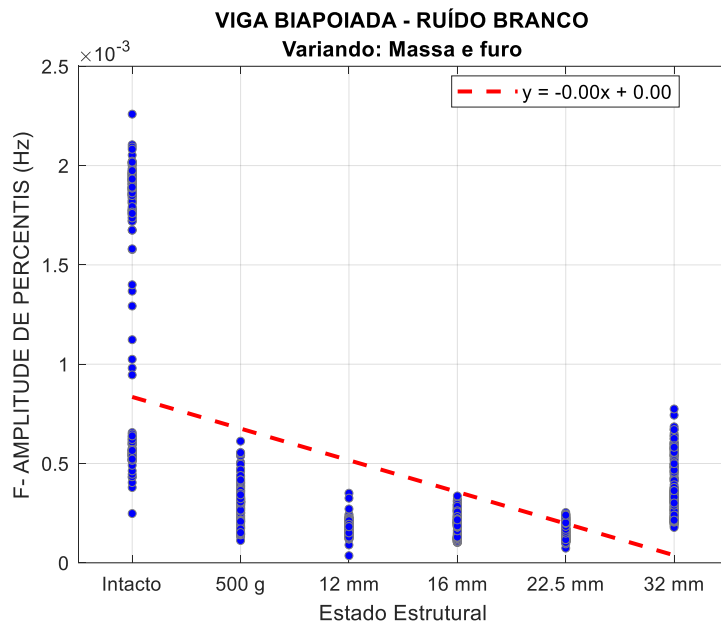


Figura G.108 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

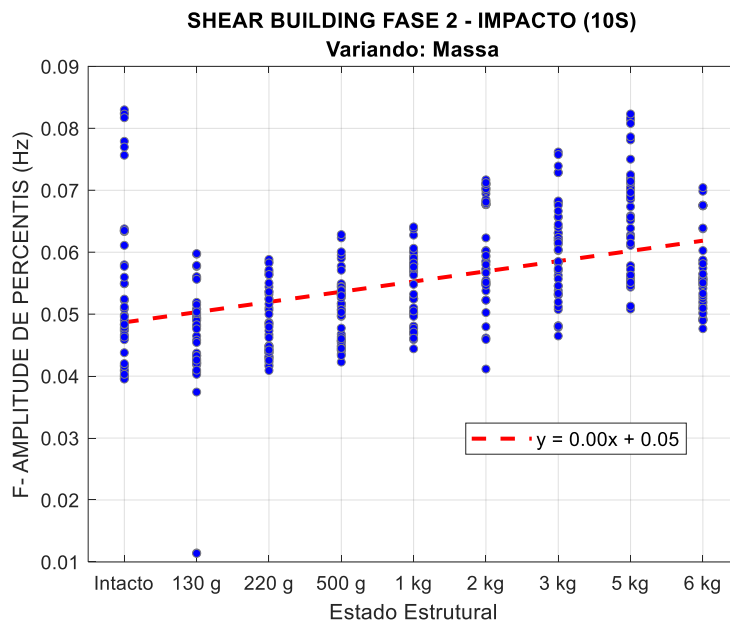


Figura G.109 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

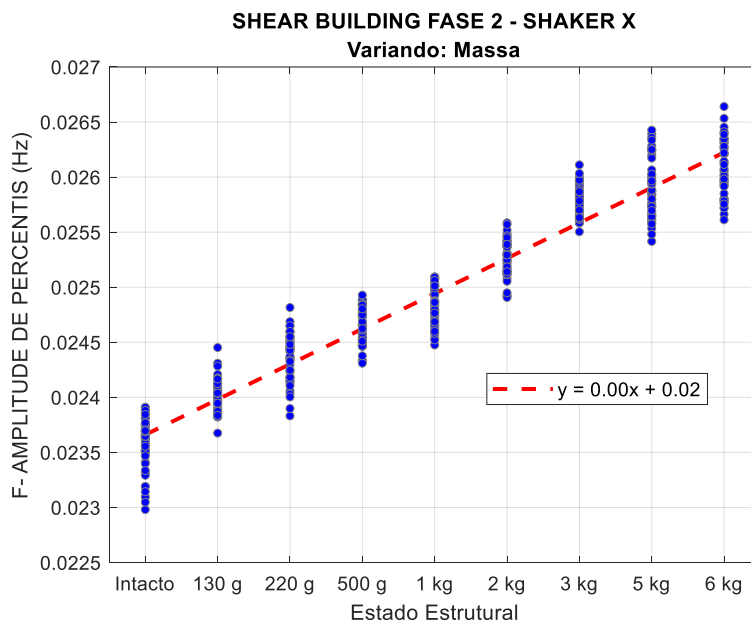


Figura G.110 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

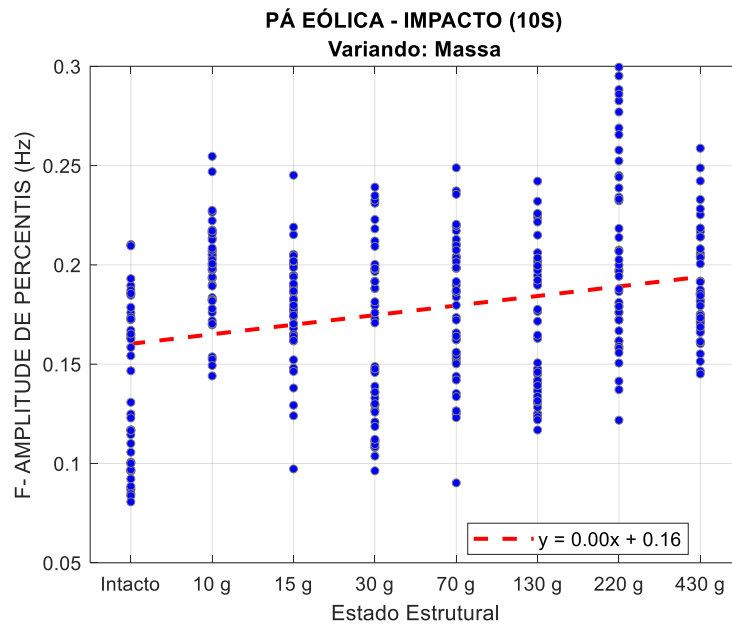


Figura G.111 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

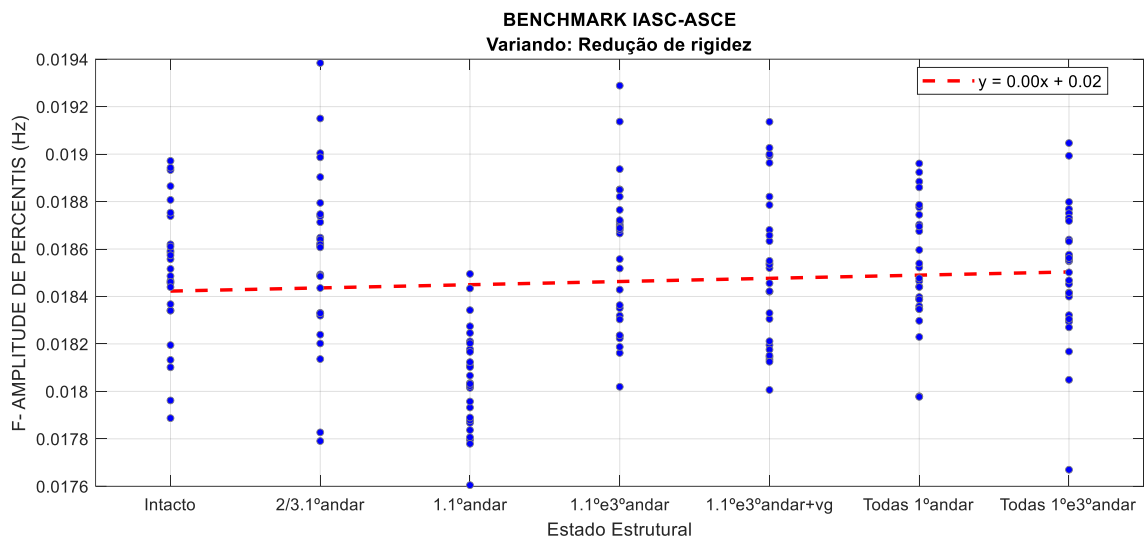
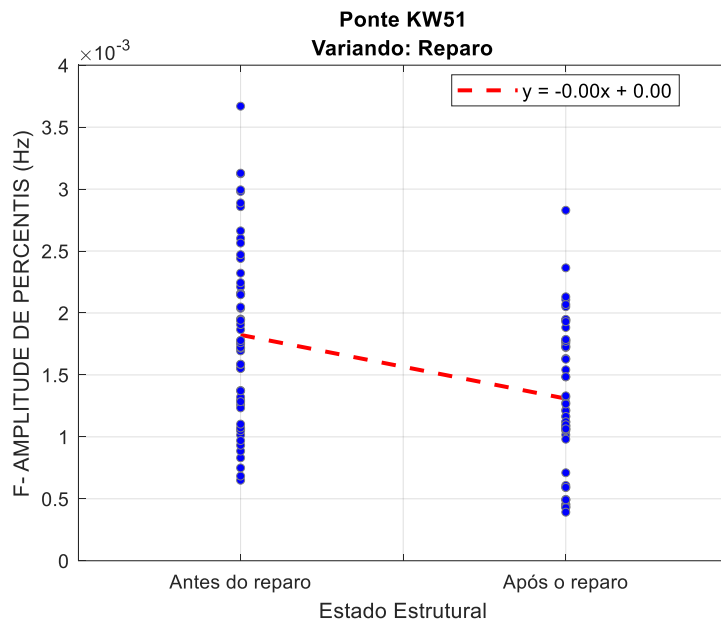


Figura G.112 – Gráfico de tendência da Amplitude de Percentis, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação do shaker.



G.3.5. Intervalo Semi Quartílico ou Midhinge

Figura G.113 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

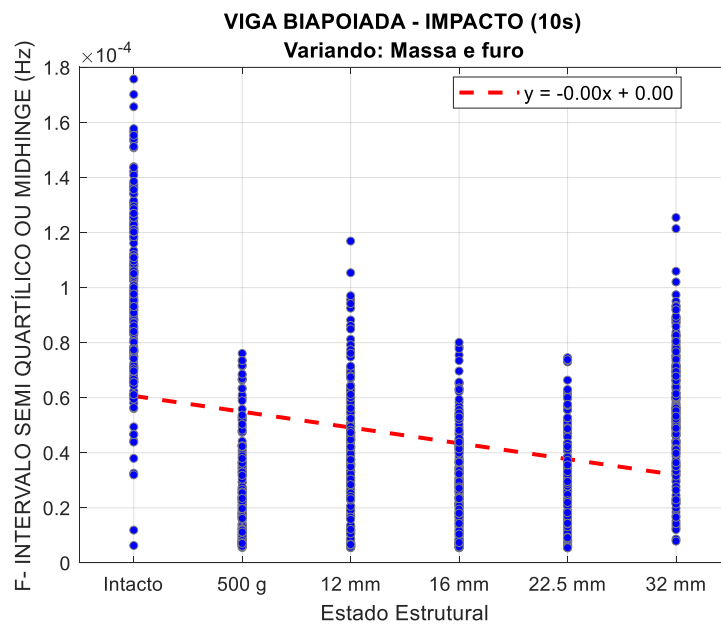


Figura G.114 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

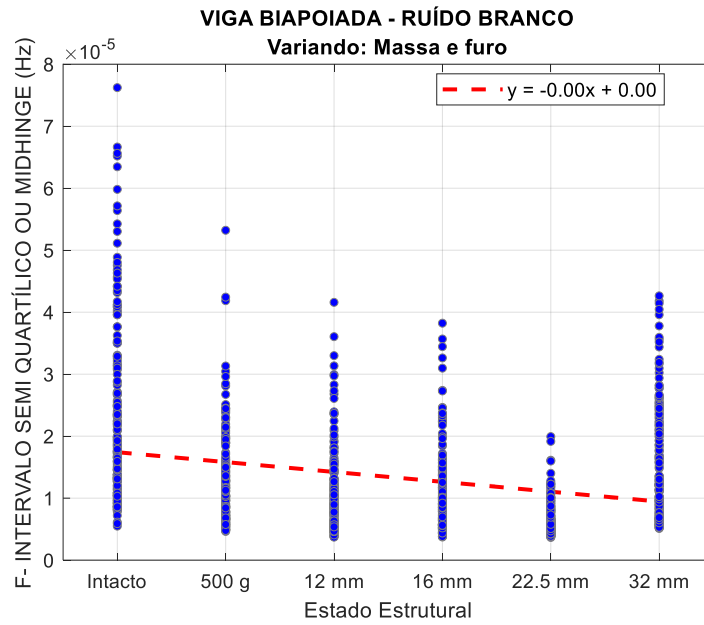


Figura G.115 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

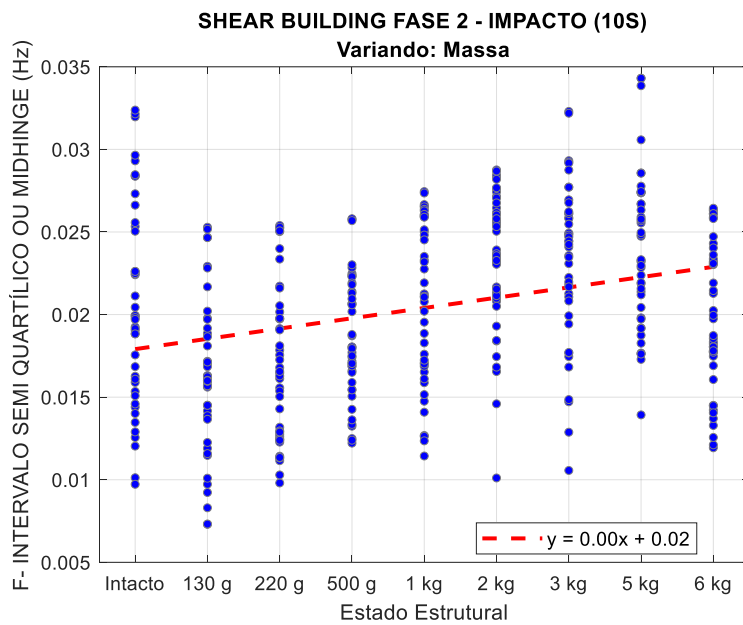


Figura G.116 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

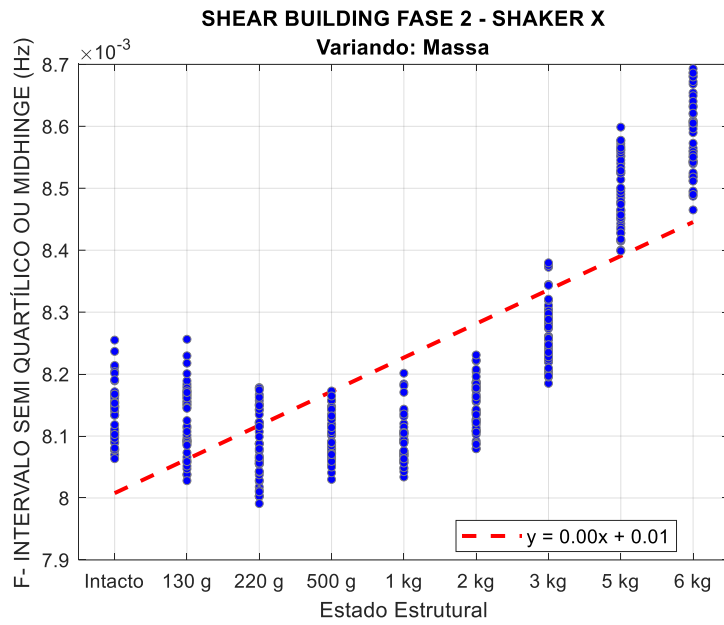


Figura G.117 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

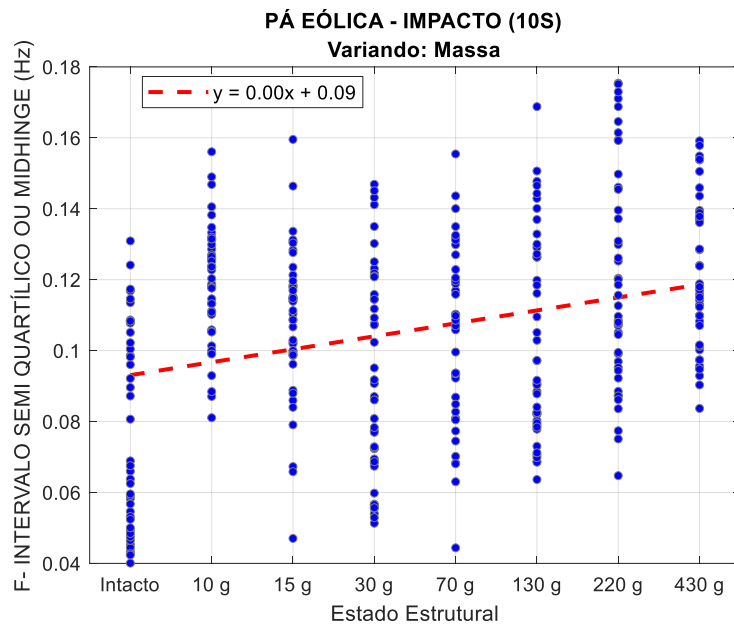


Figura G.118 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

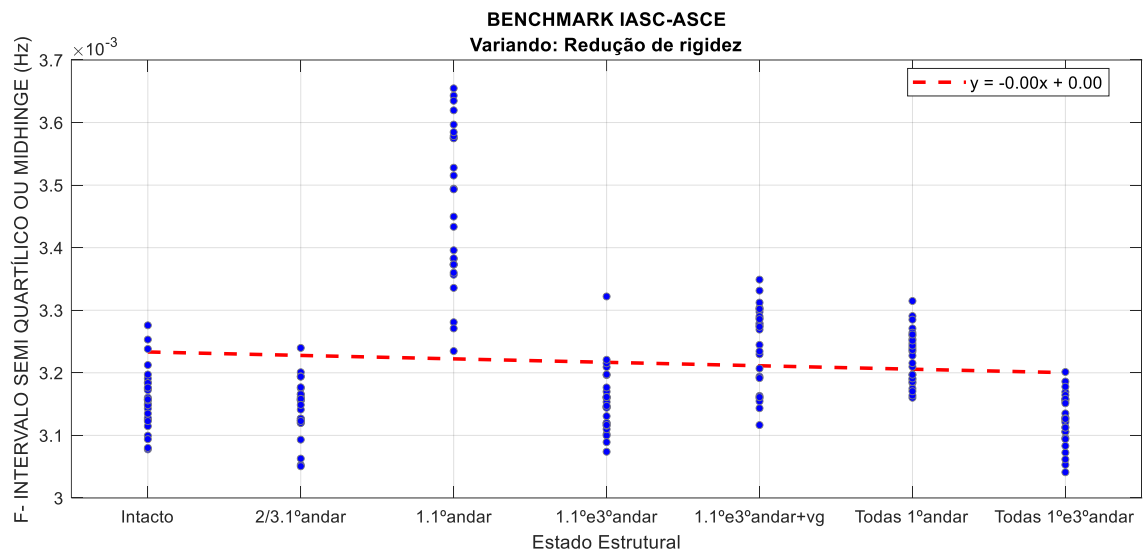
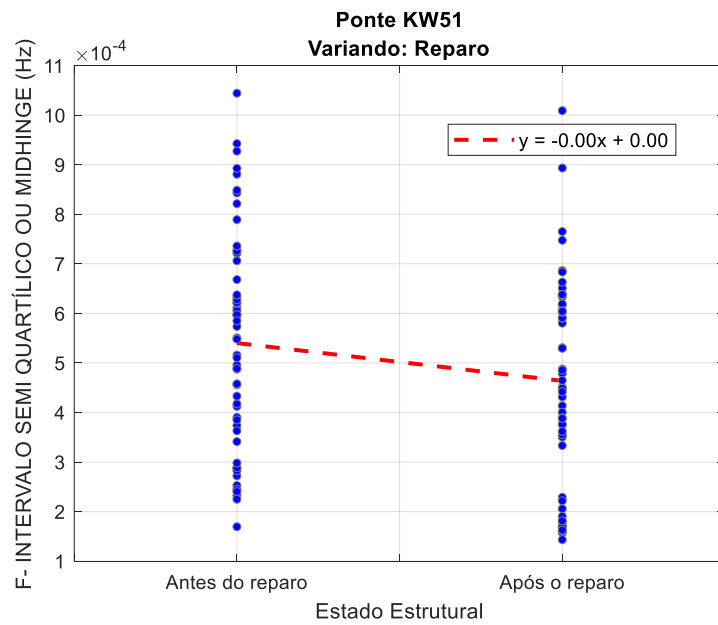


Figura G.119 – Gráfico de tendência do Midhinge, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3.6. Desvio Médio

Figura G.120 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

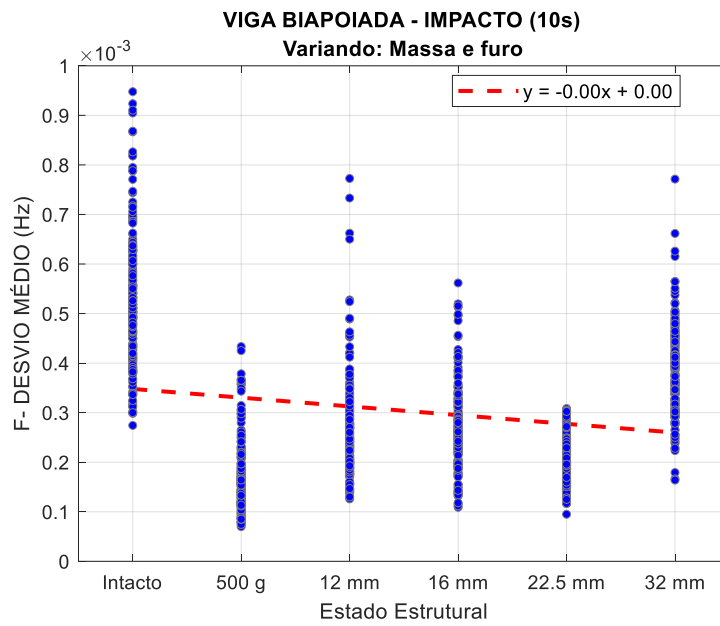


Figura G.121 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

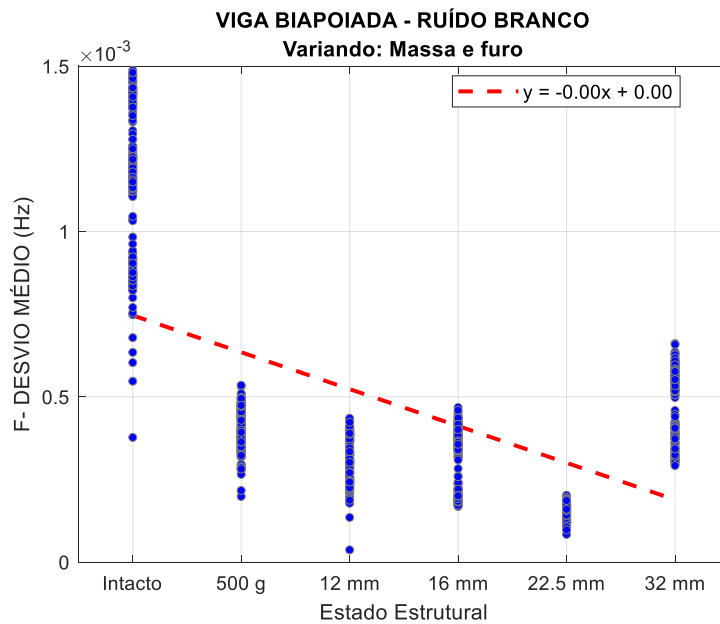


Figura G.122 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

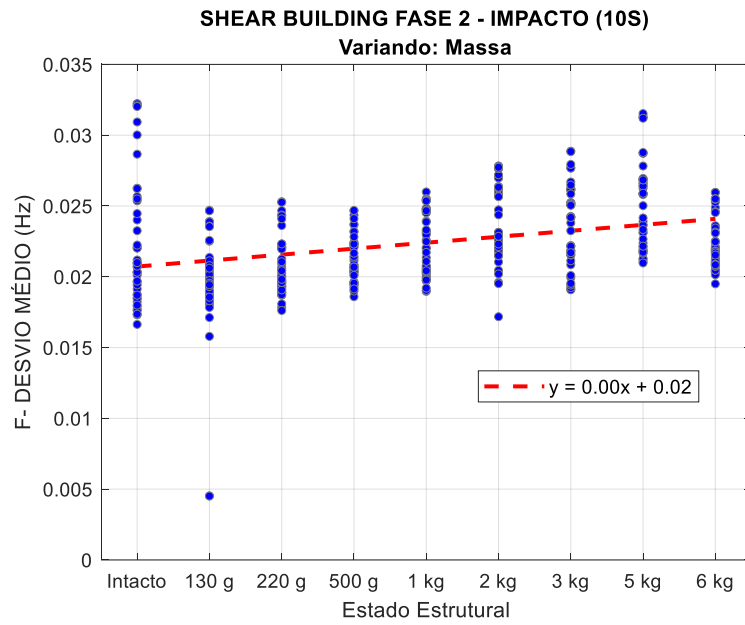


Figura G.123 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

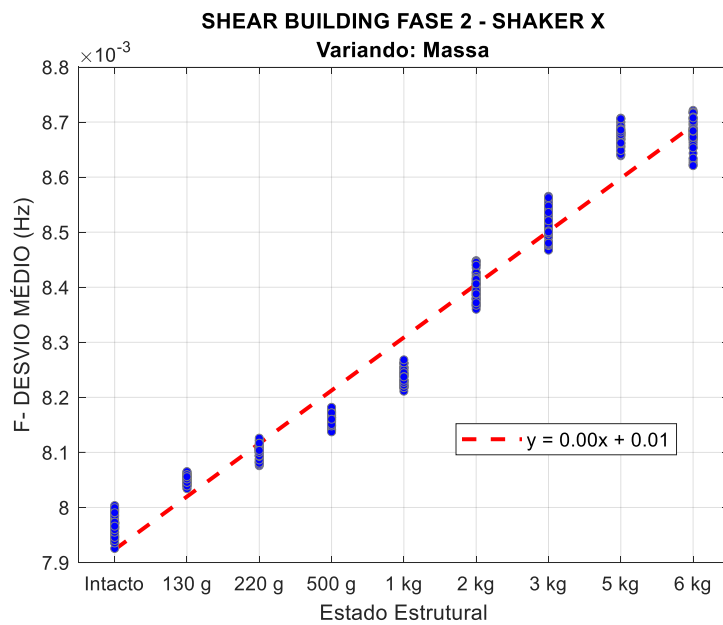


Figura G.124 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

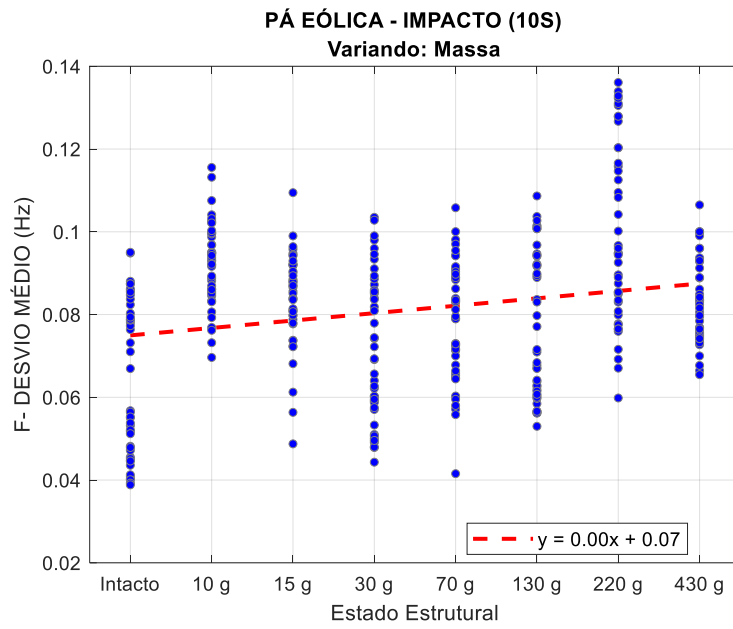


Figura G.125 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

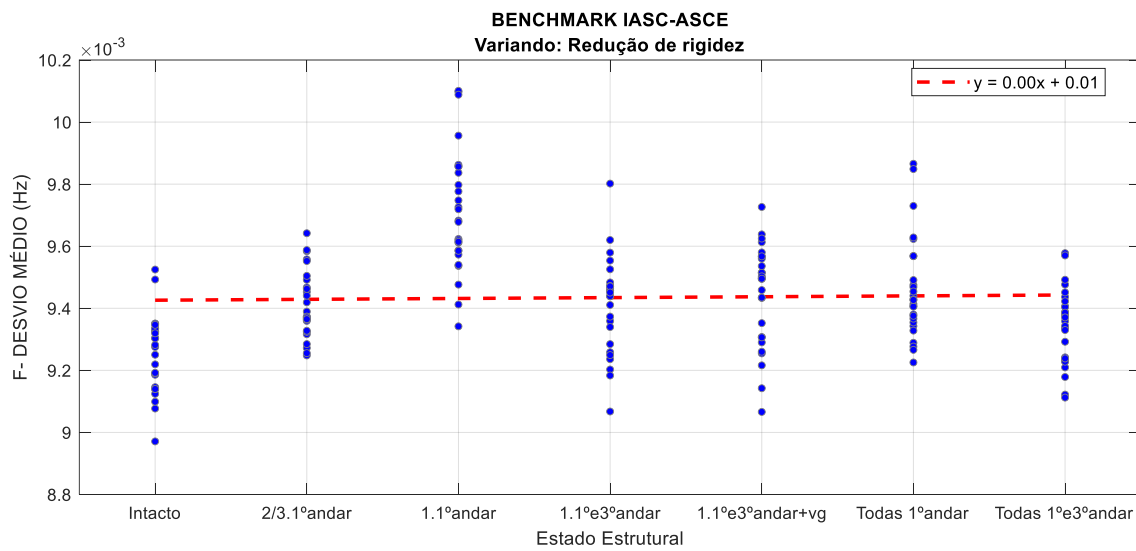
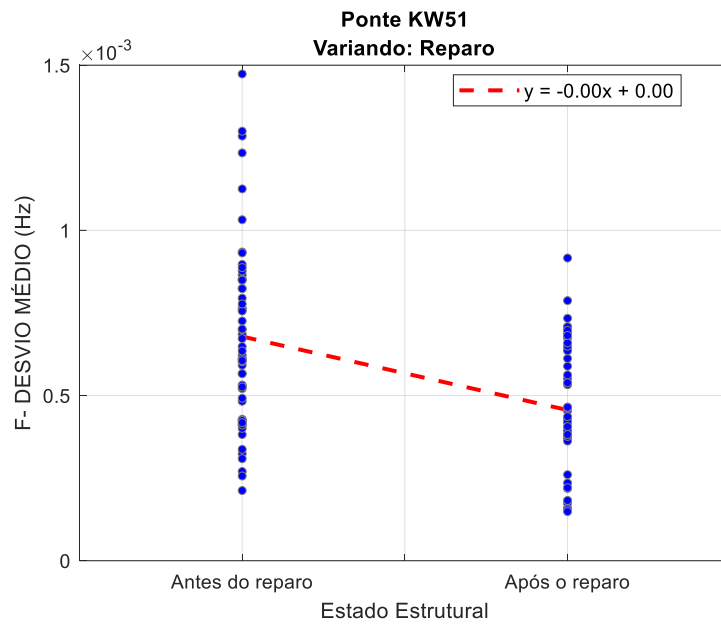


Figura G.126 – Gráfico de tendência do Desvio Médio, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3.7. Variância

Figura G.127 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

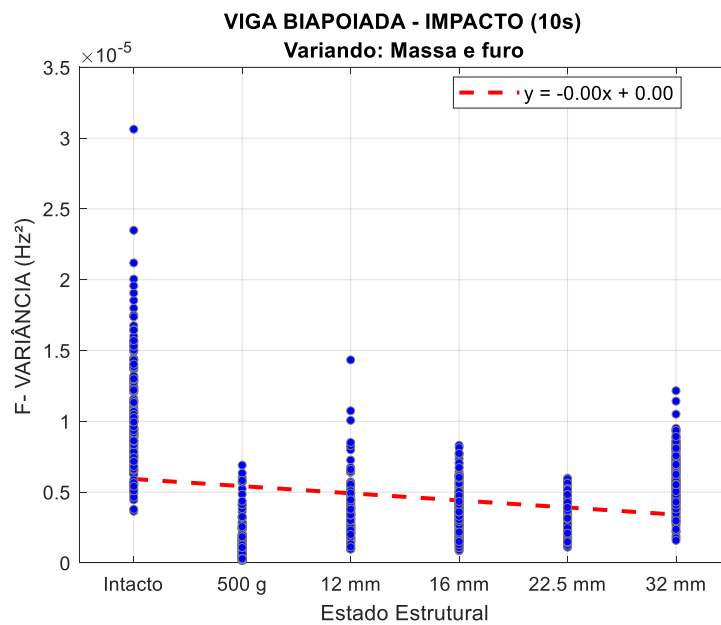


Figura G.128 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

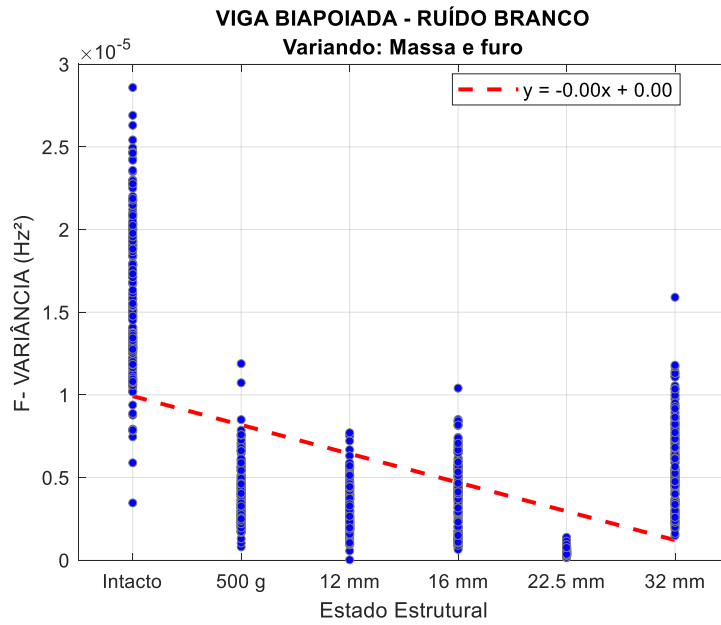


Figura G.129 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

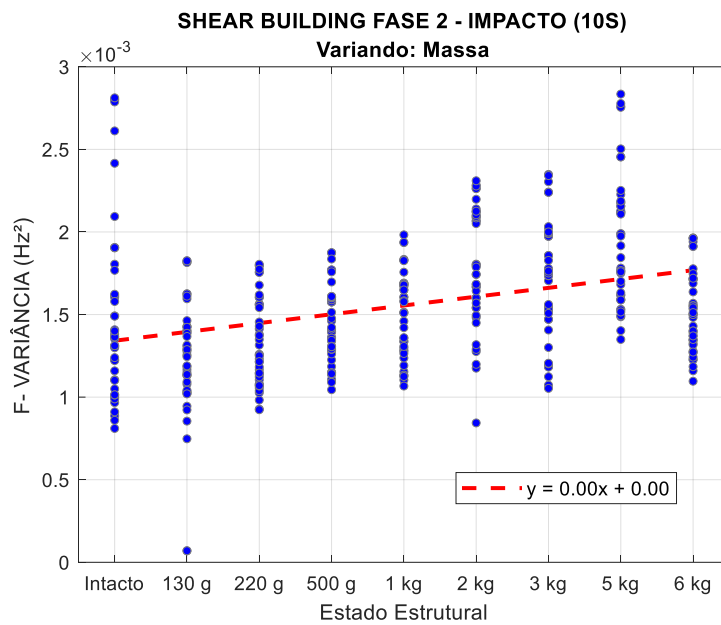


Figura G.130 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

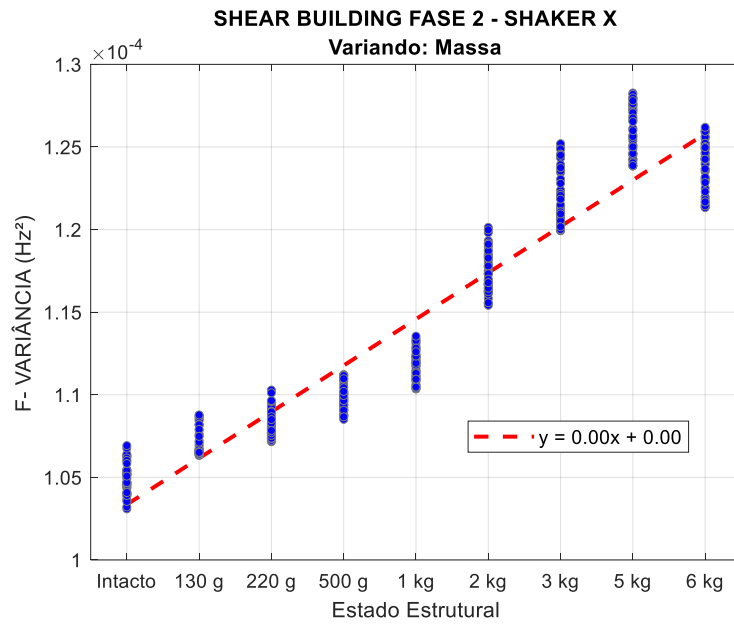


Figura G.131 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

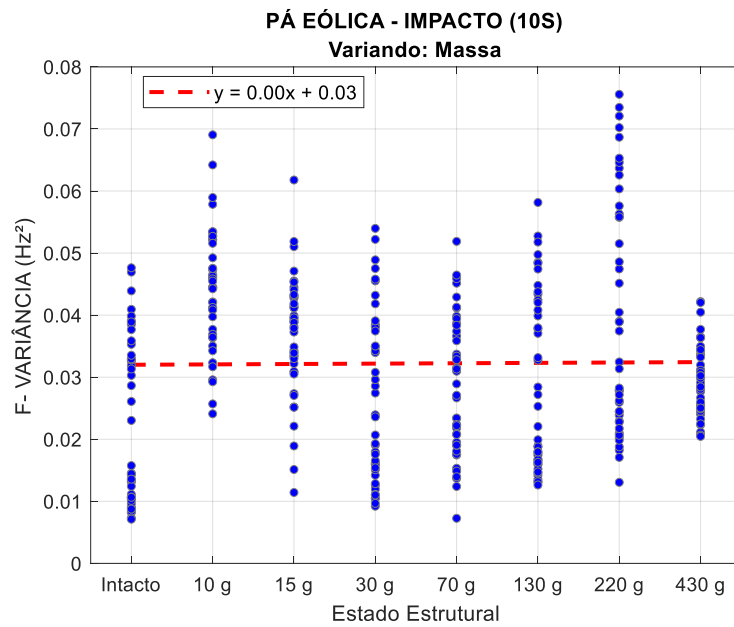


Figura G.132 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

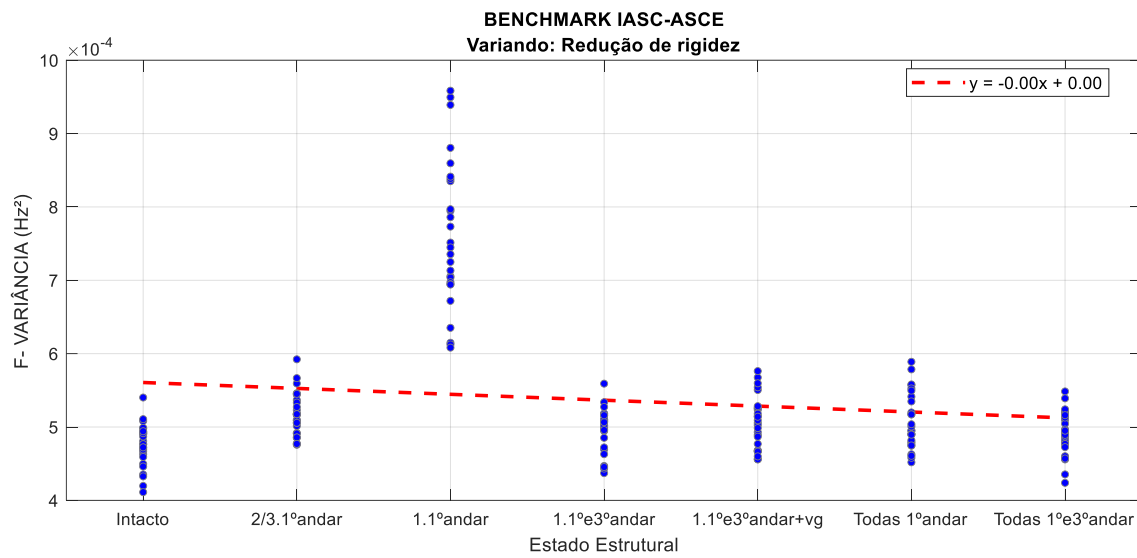
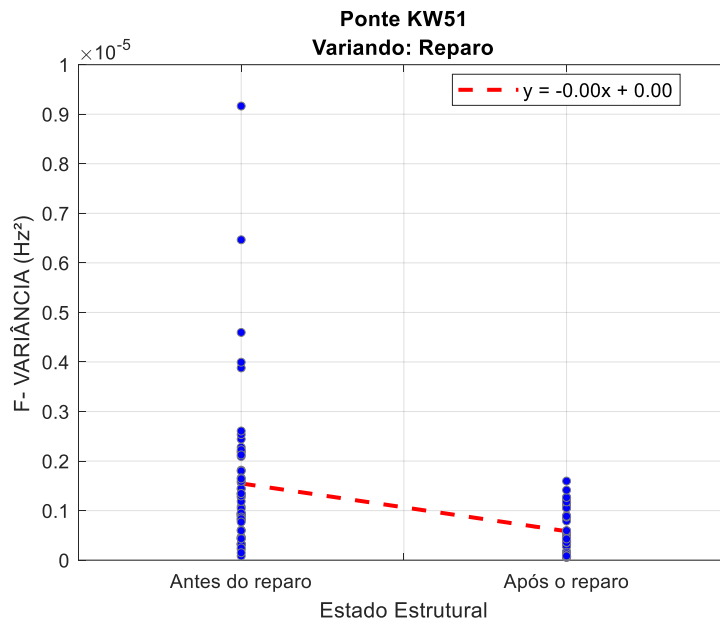


Figura G.133 – Gráfico de tendência da Variância, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3.8. Desvio Padrão

Figura G.134 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

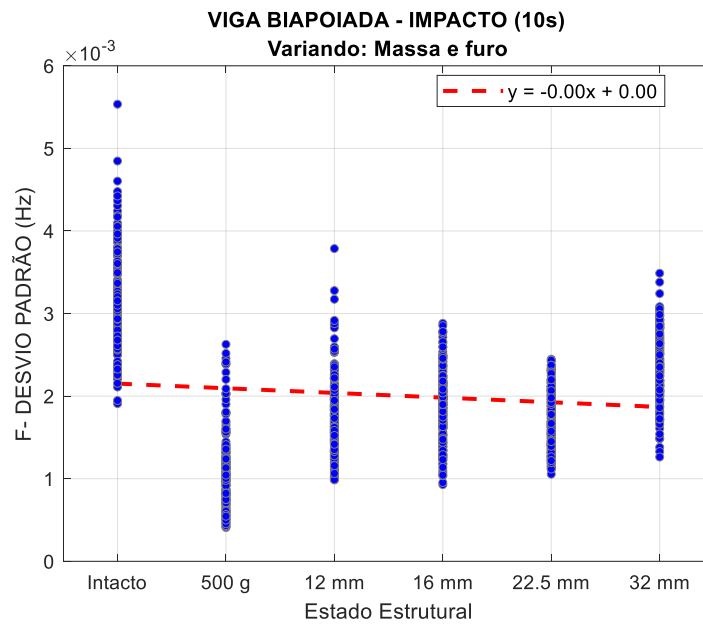


Figura G.135 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

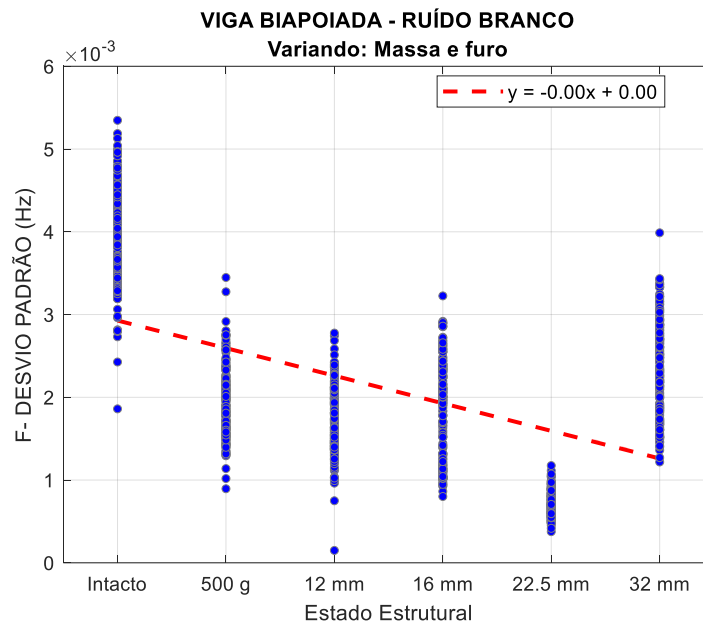


Figura G.136 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

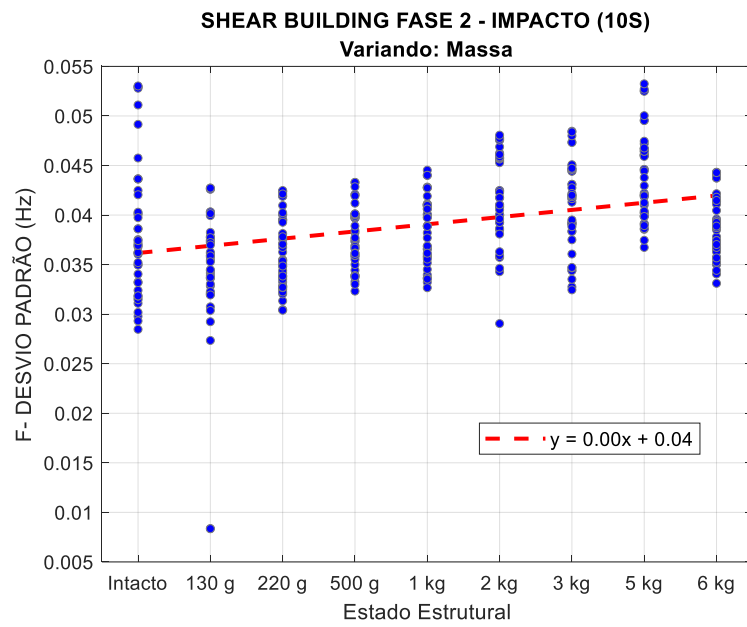


Figura G.137 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

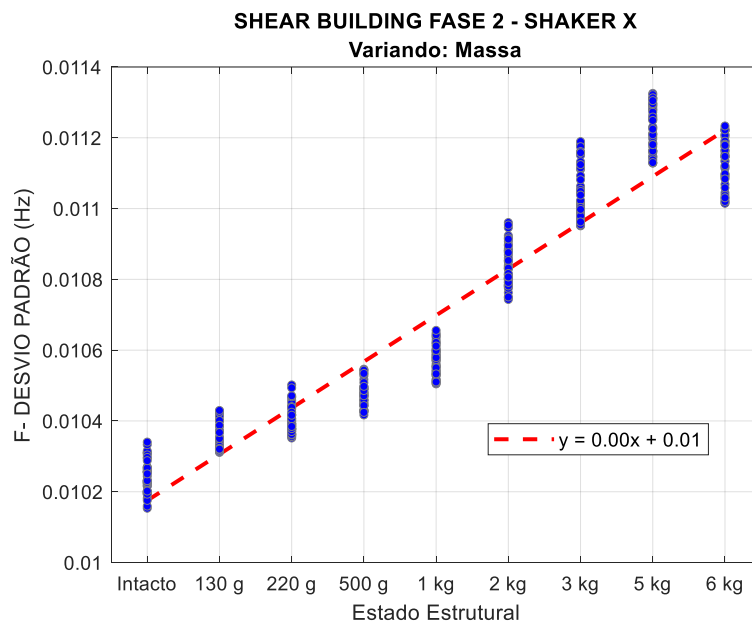


Figura G.138 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

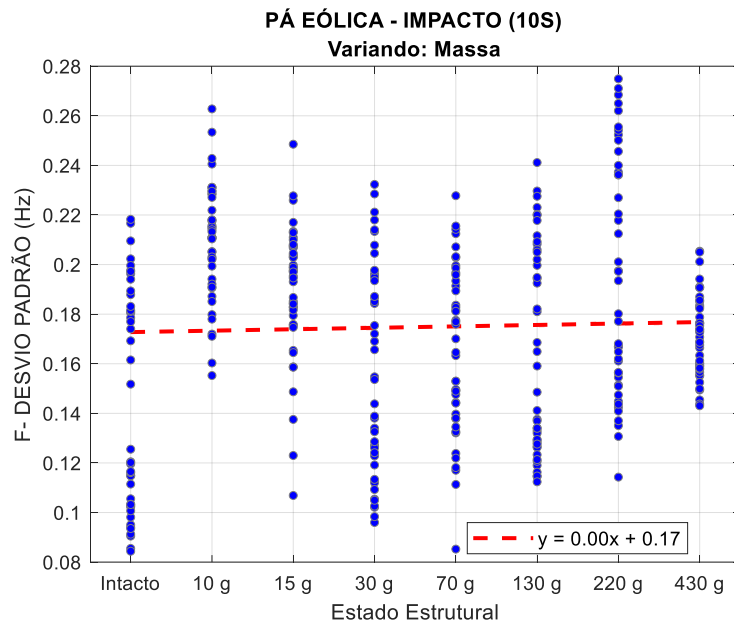


Figura G.139 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

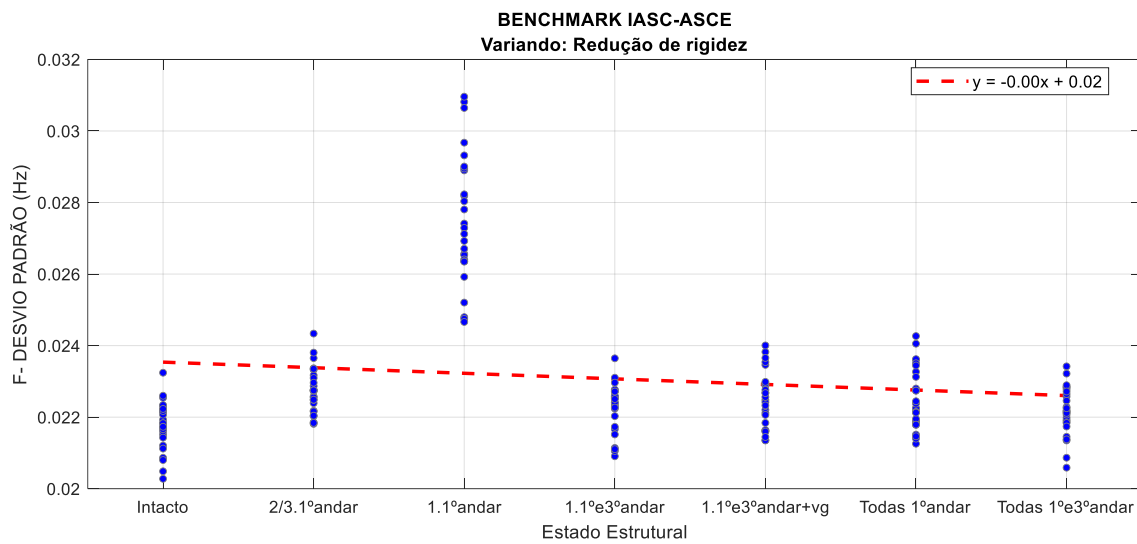
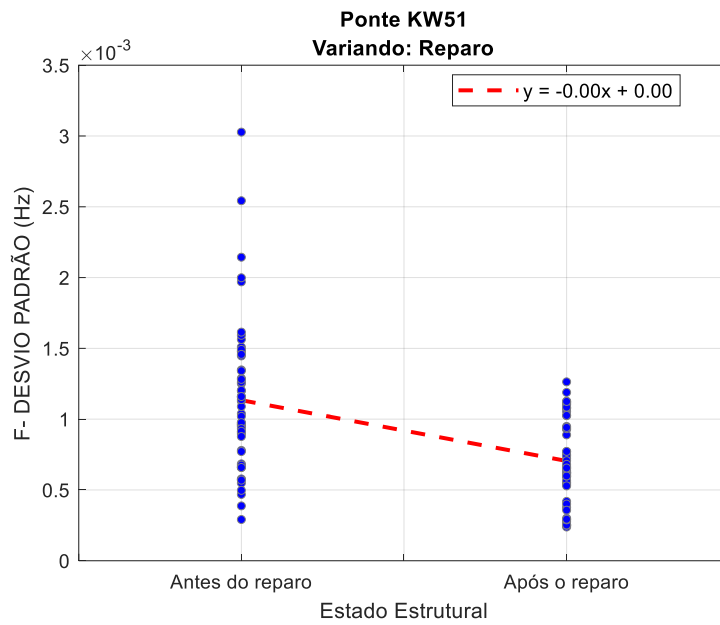


Figura G.140 – Gráfico de tendência do Desvio Padrão, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.3.9. Coeficiente de Variação

Figura G.141 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

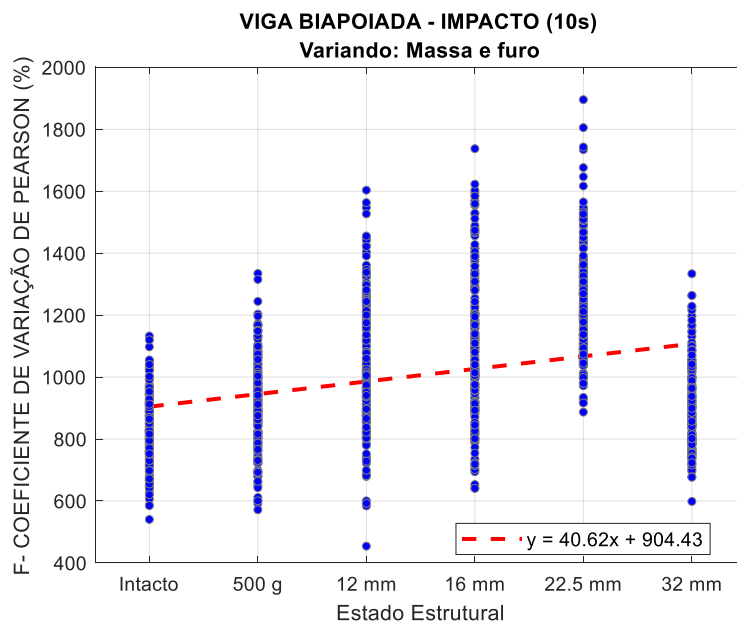


Figura G.142 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

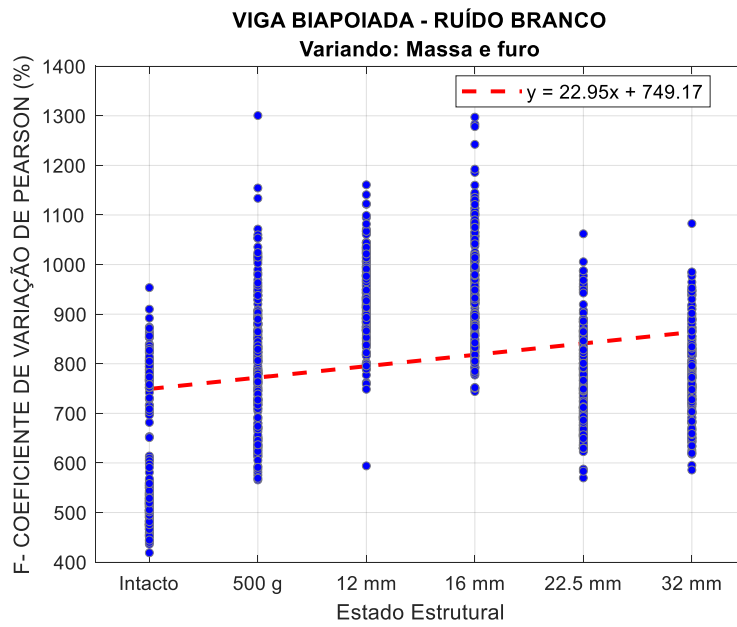


Figura G.143 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

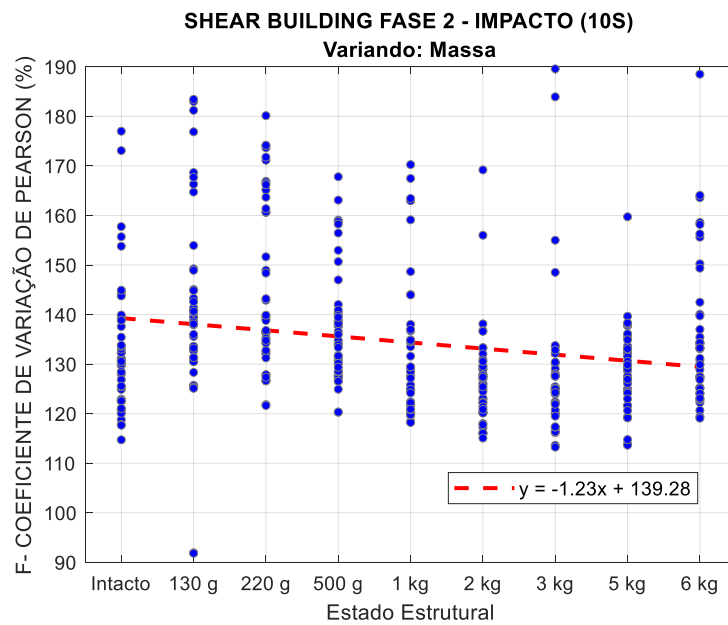


Figura G.144 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

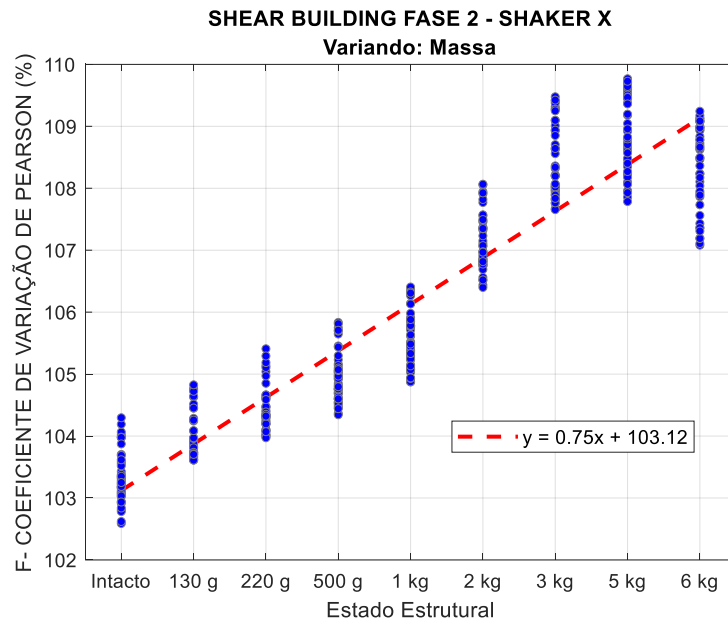


Figura G.145 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

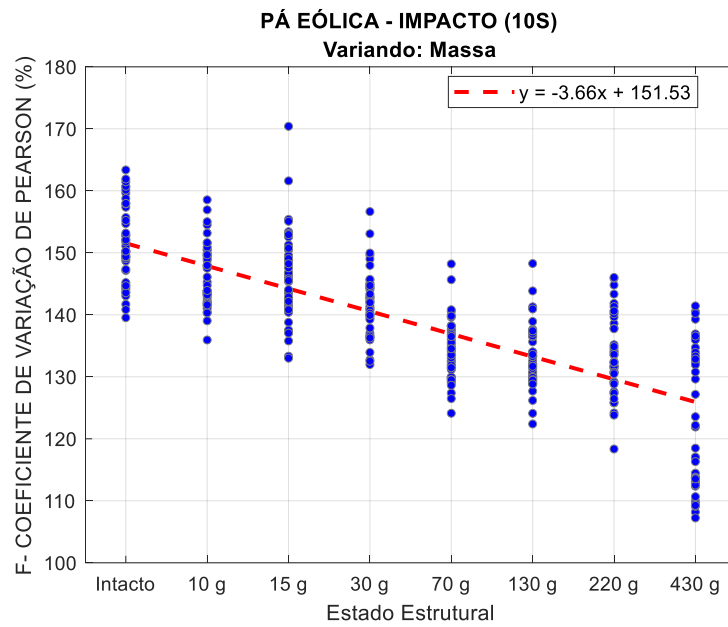


Figura G.146 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

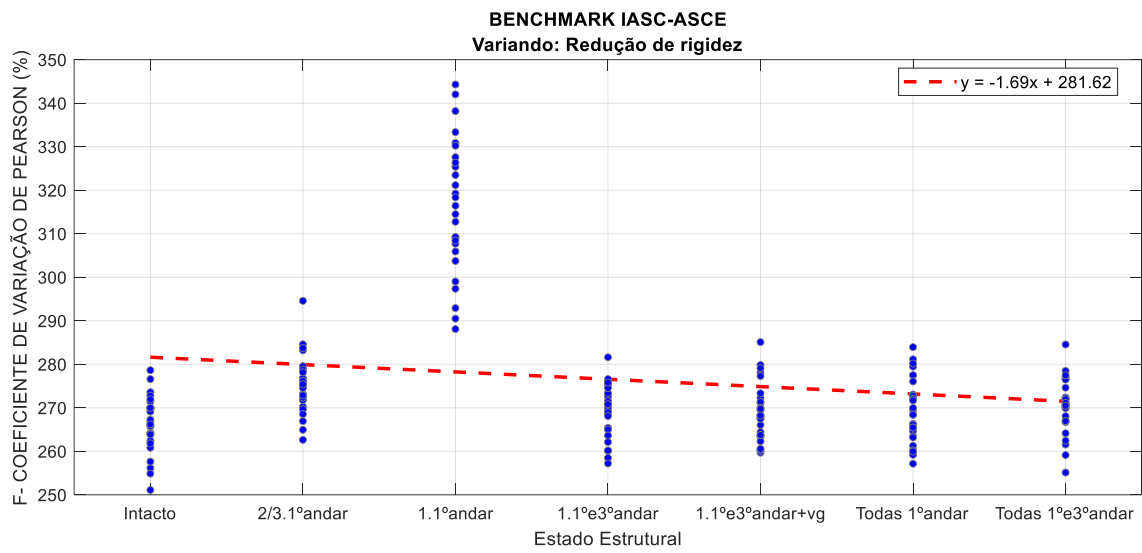
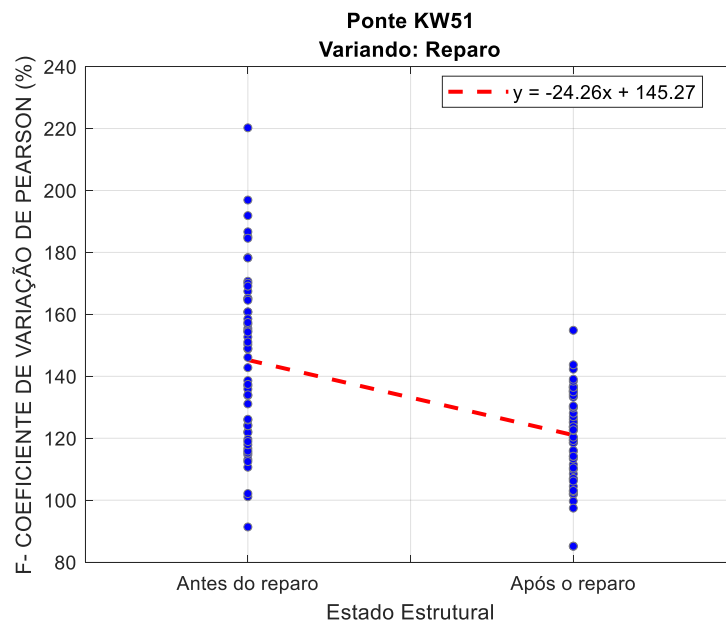


Figura G.147 – Gráfico de tendência do Coeficiente de Variação, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4. PARÂMETROS DE FORMA

G.4.1. Assimetria

Figura G.148 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

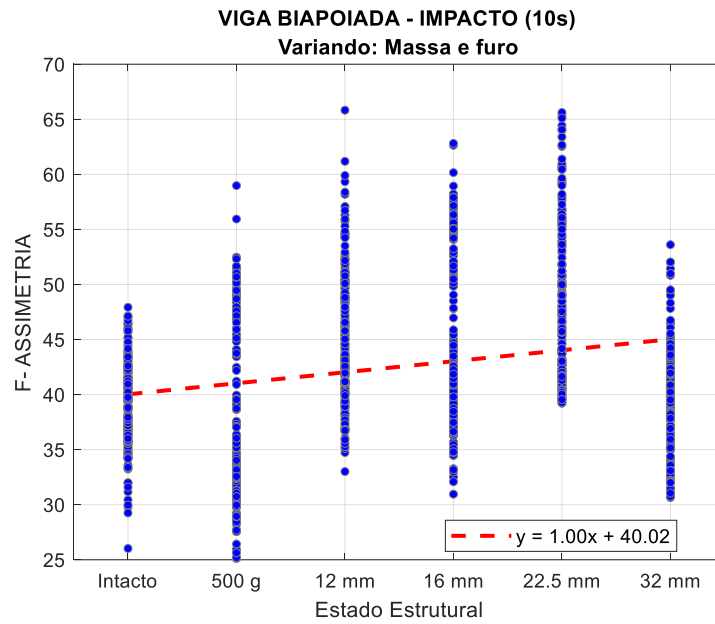


Figura G.149 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

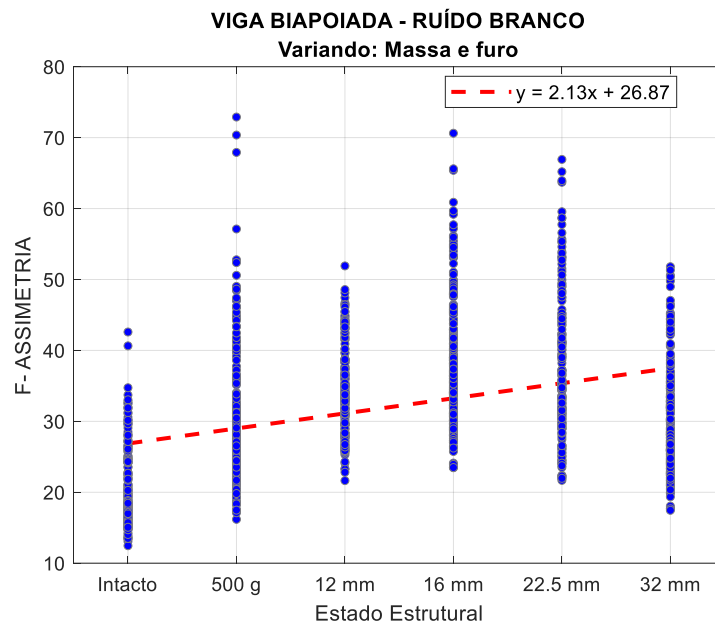


Figura G.150 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

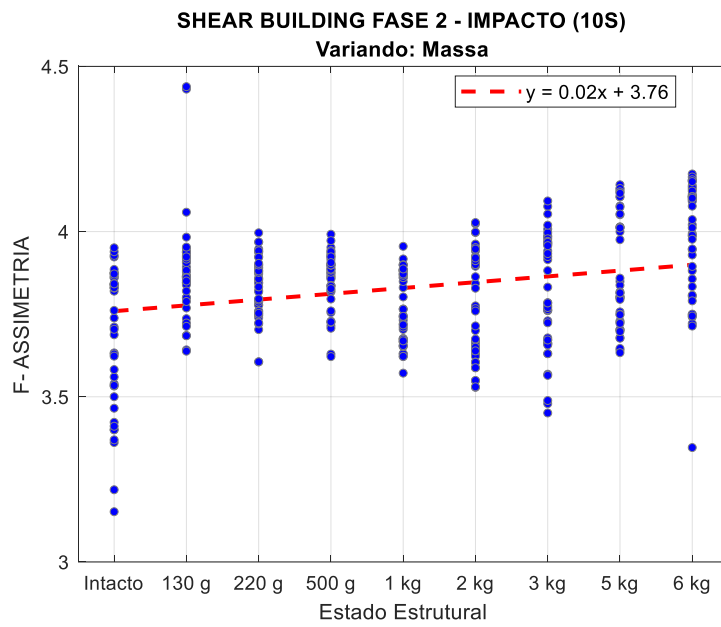


Figura G.151 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

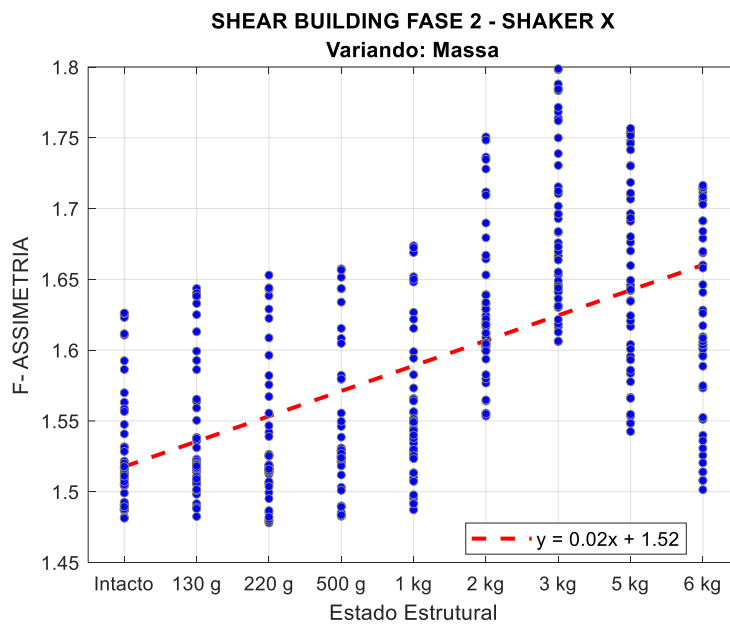


Figura G.152 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

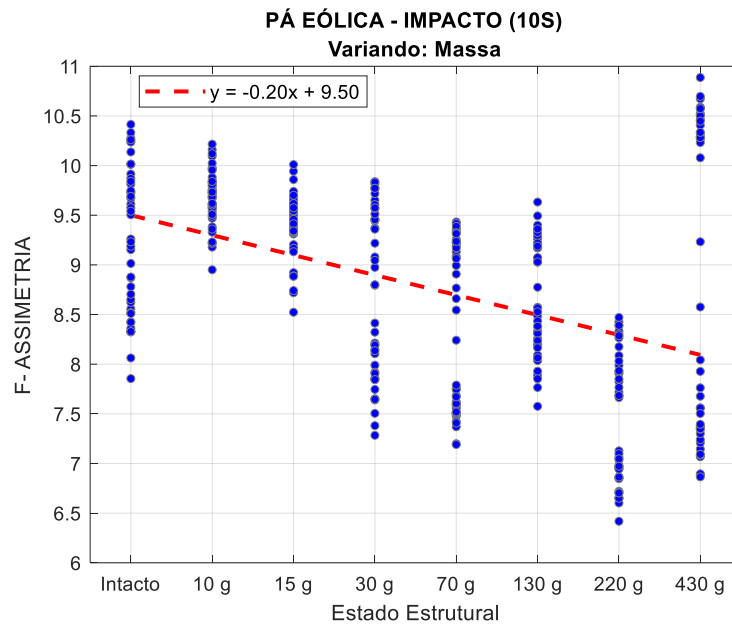


Figura G.153 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

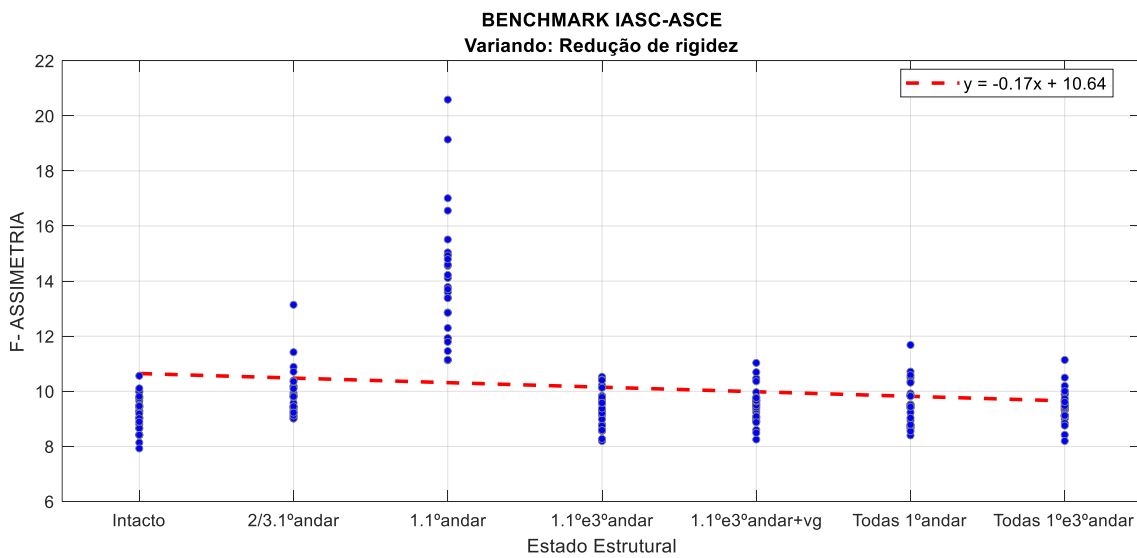
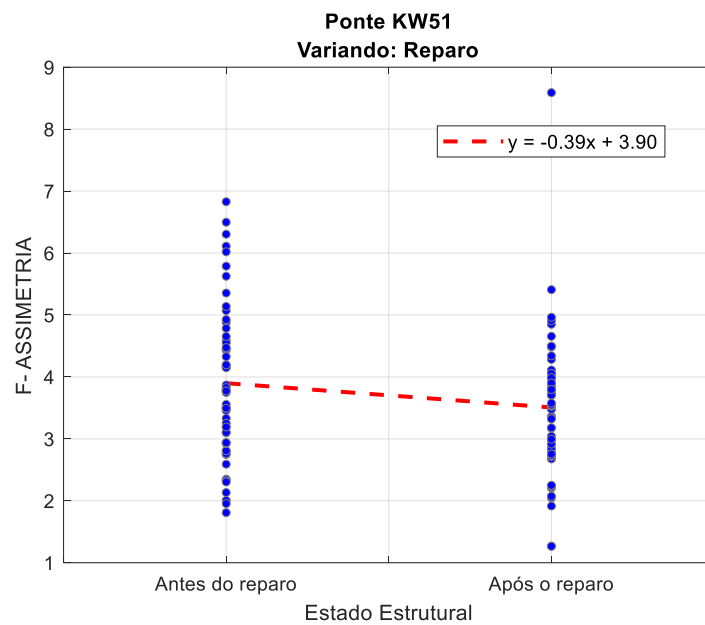


Figura G.154 – Gráfico de tendência da Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.2. Curtose

Figura G.155 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

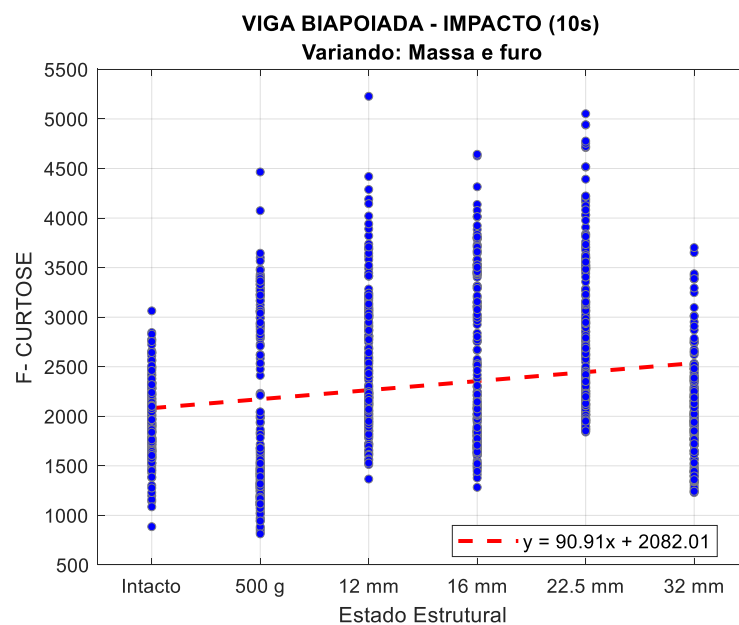


Figura G.156 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

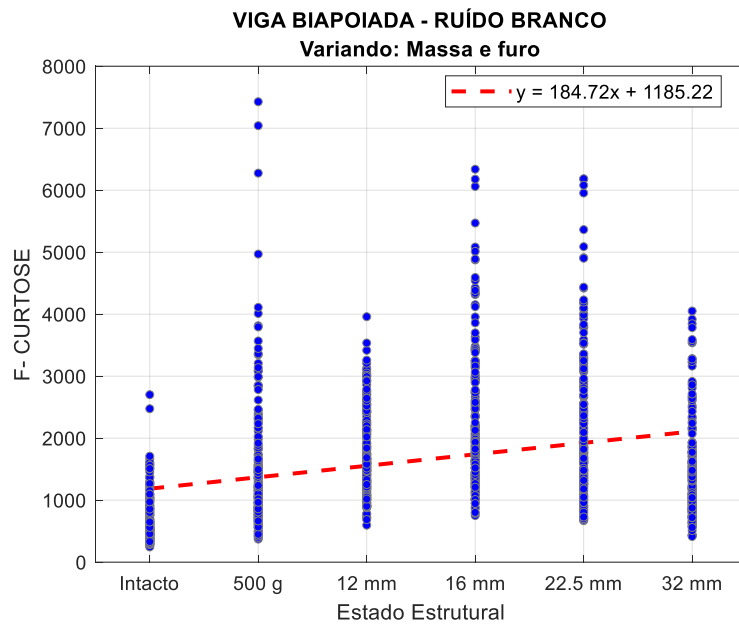


Figura G.157 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

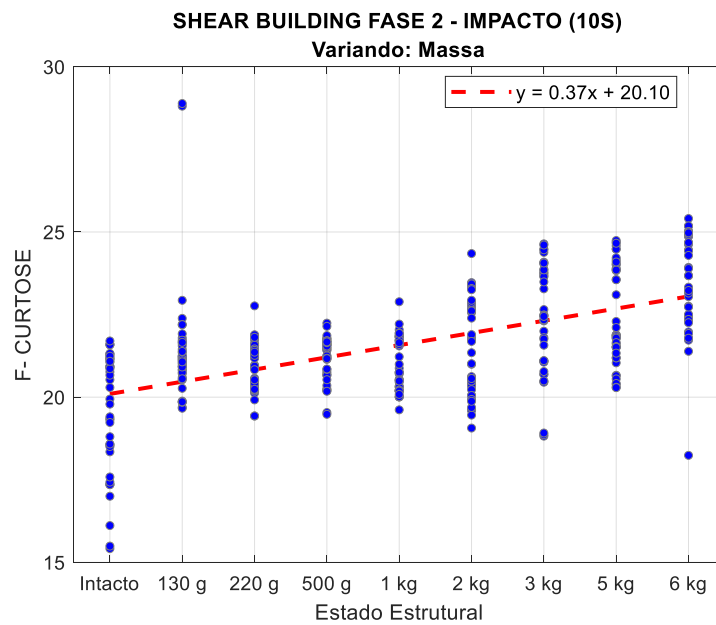


Figura G.158 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

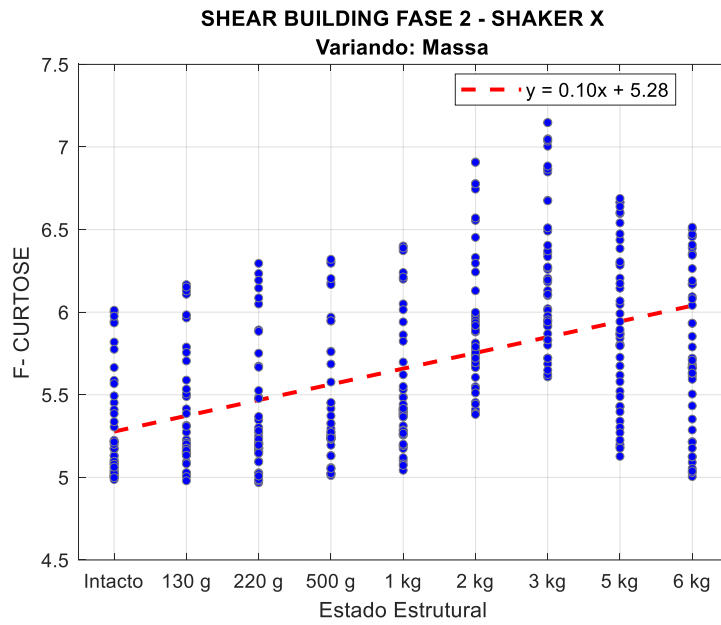


Figura G.159 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

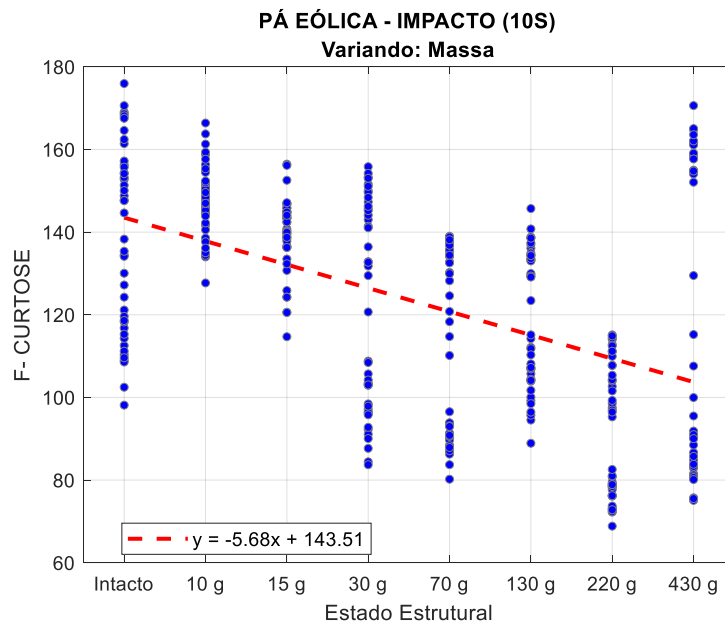


Figura G.160 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

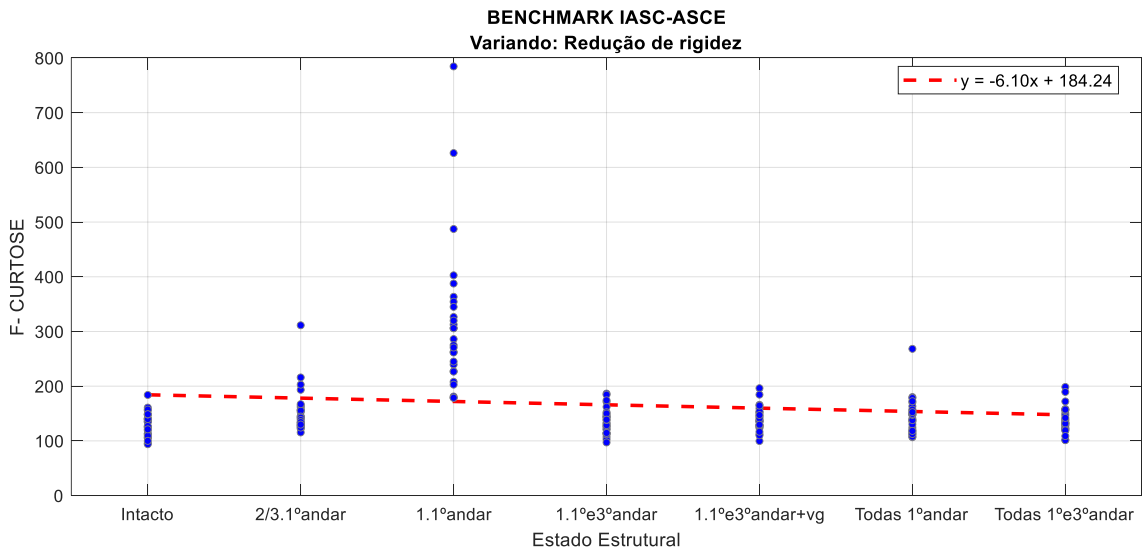
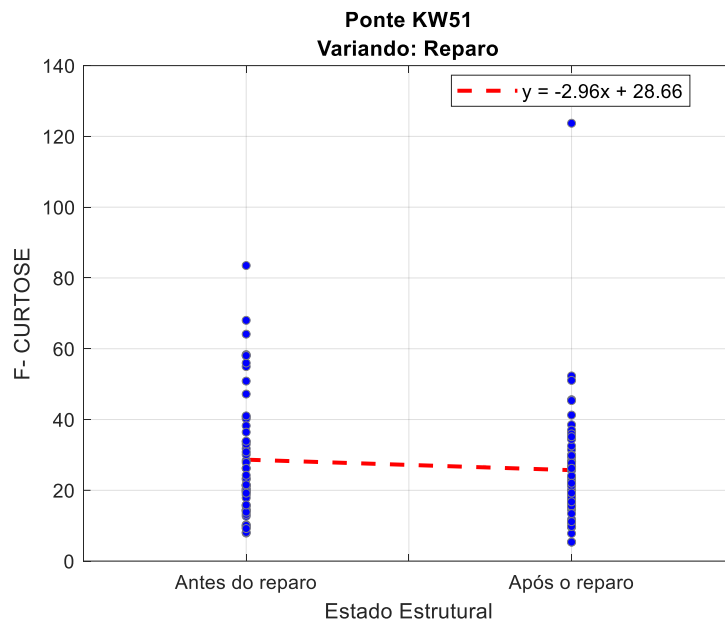


Figura G.161 – Gráfico de tendência da Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.3. Coeficiente do Momento de Sexta Ordem

Figura G.162 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

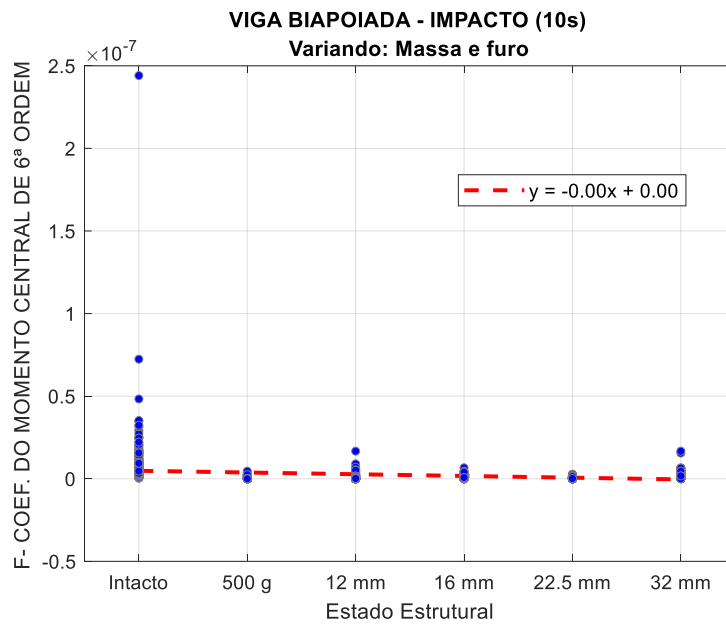


Figura G.163 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

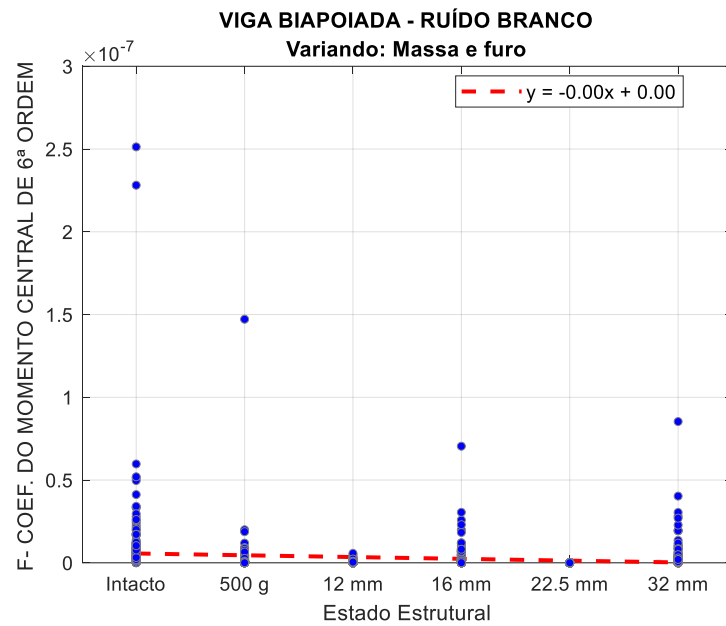


Figura G.164 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

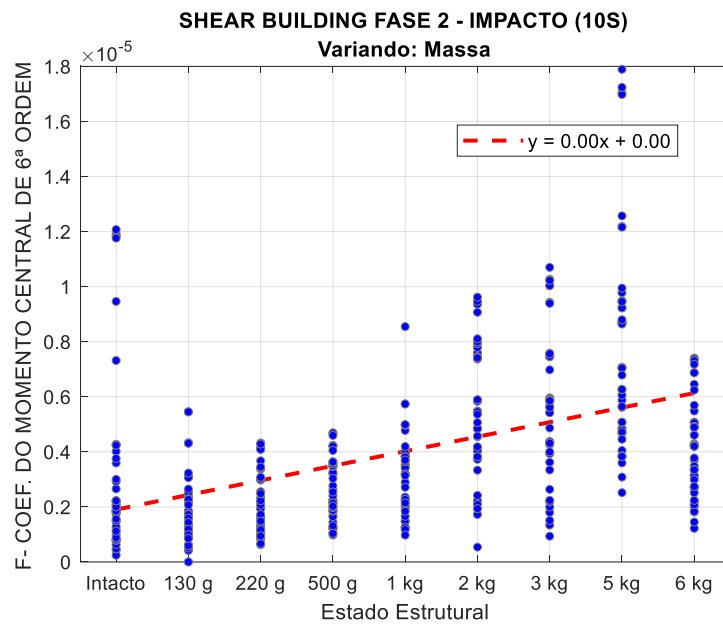


Figura G.165 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

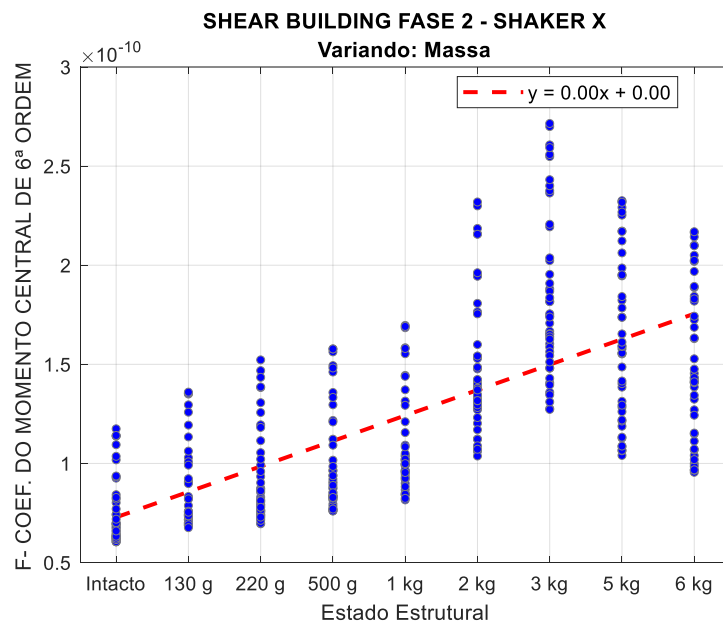


Figura G.166 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

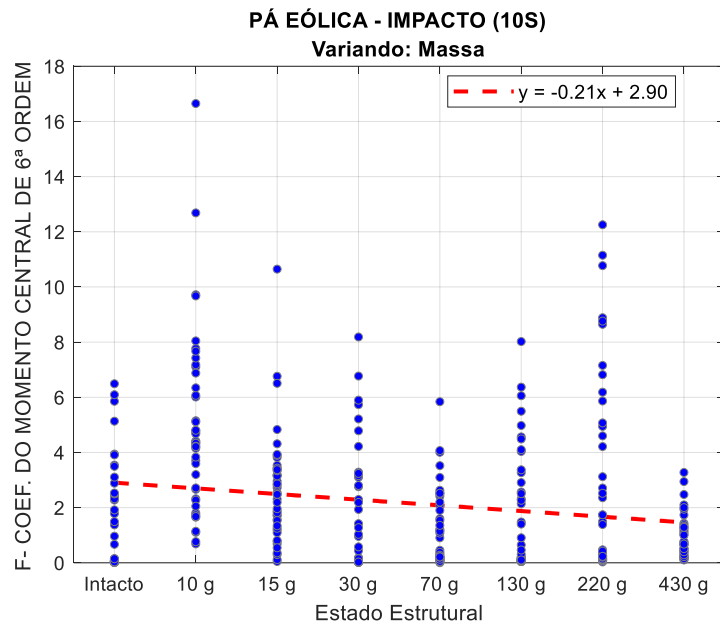


Figura G.167 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

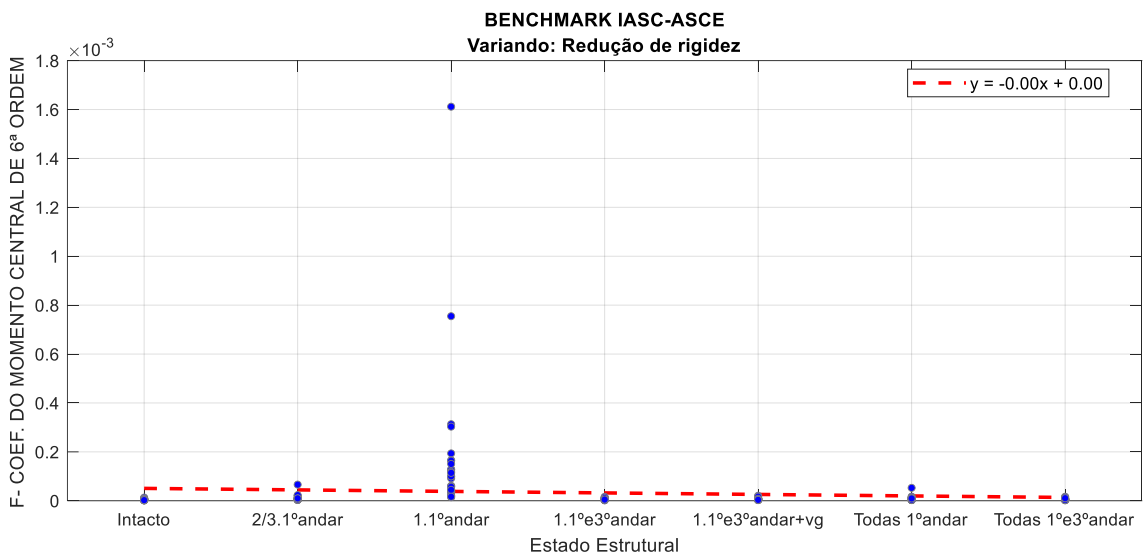
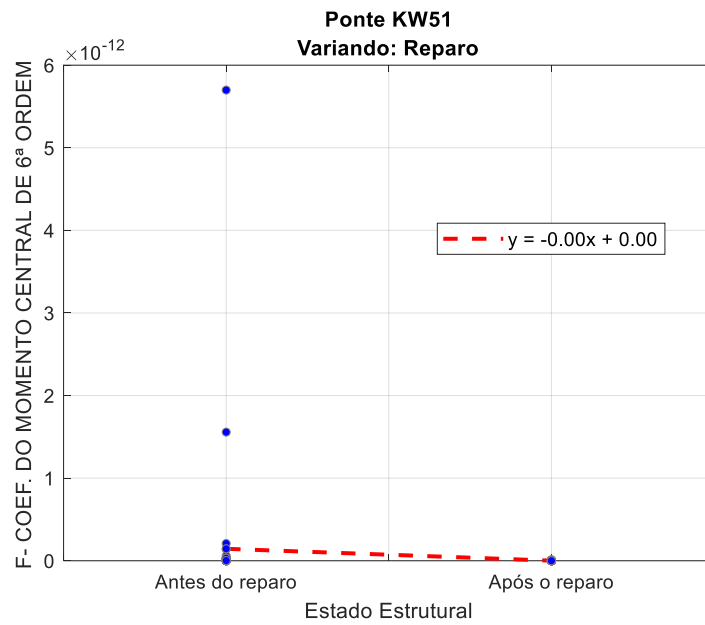


Figura G.168 – Gráfico de tendência do Momento de 6ª ordem, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.4. Coeficiente Quartílico de Assimetria

Figura G.169 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

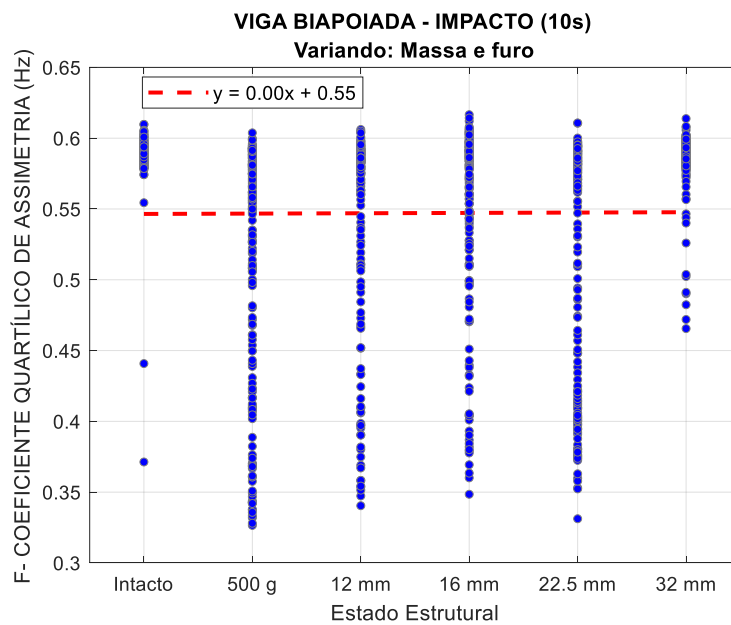


Figura G.170 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

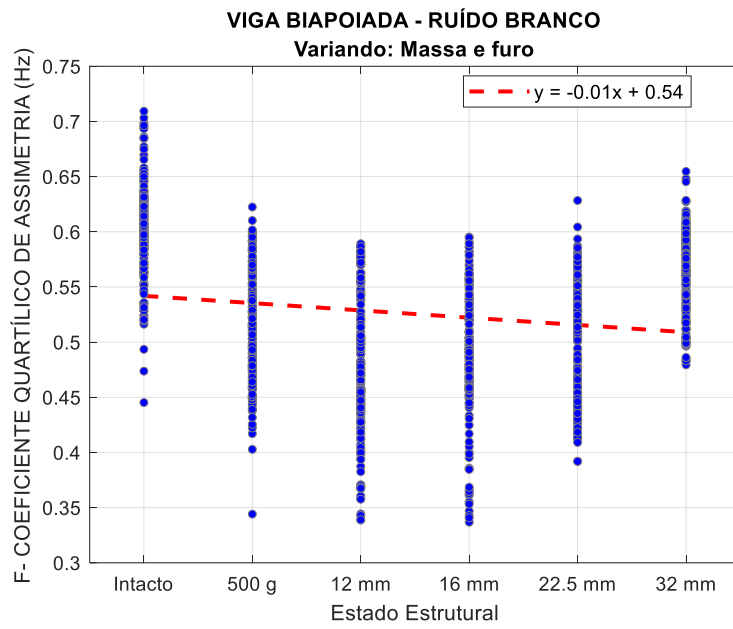


Figura G.171 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

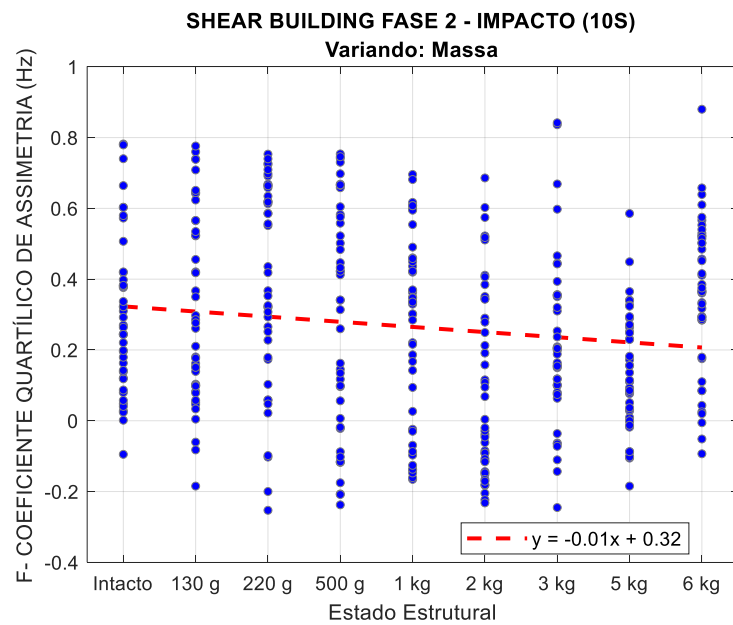


Figura G.172 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

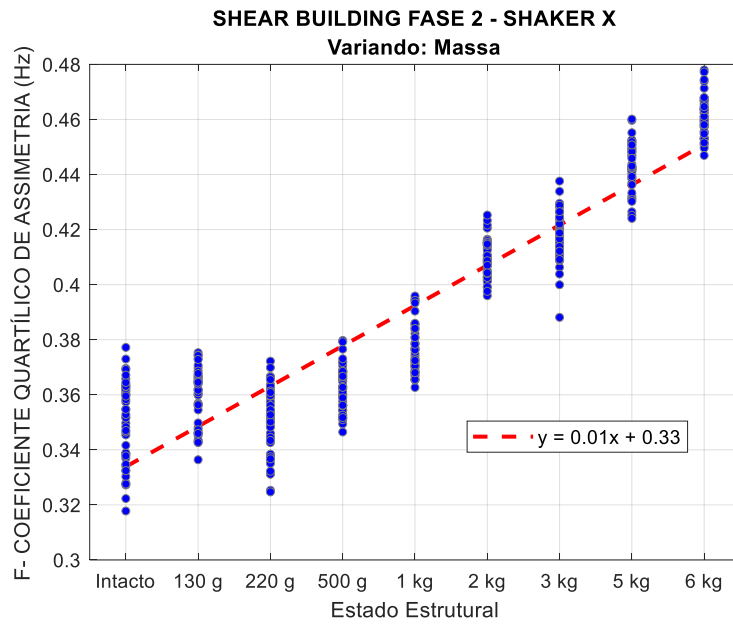


Figura G.173 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

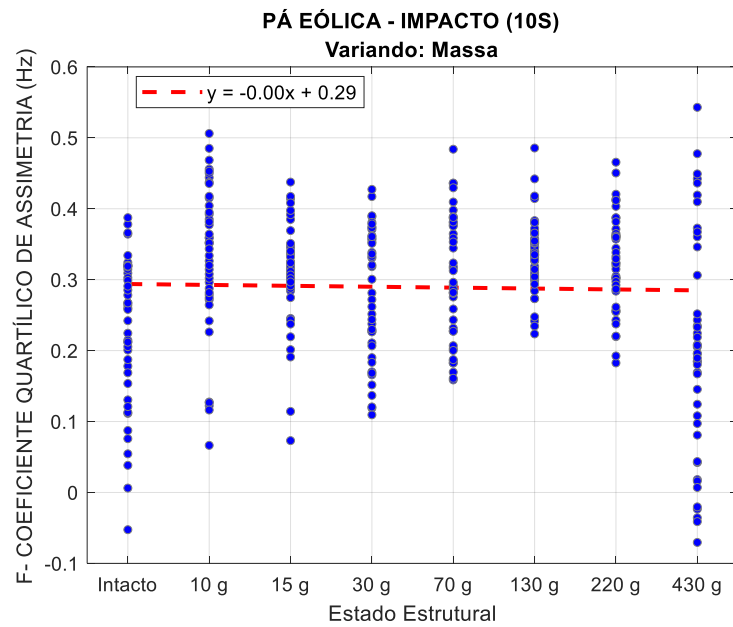


Figura G.174 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

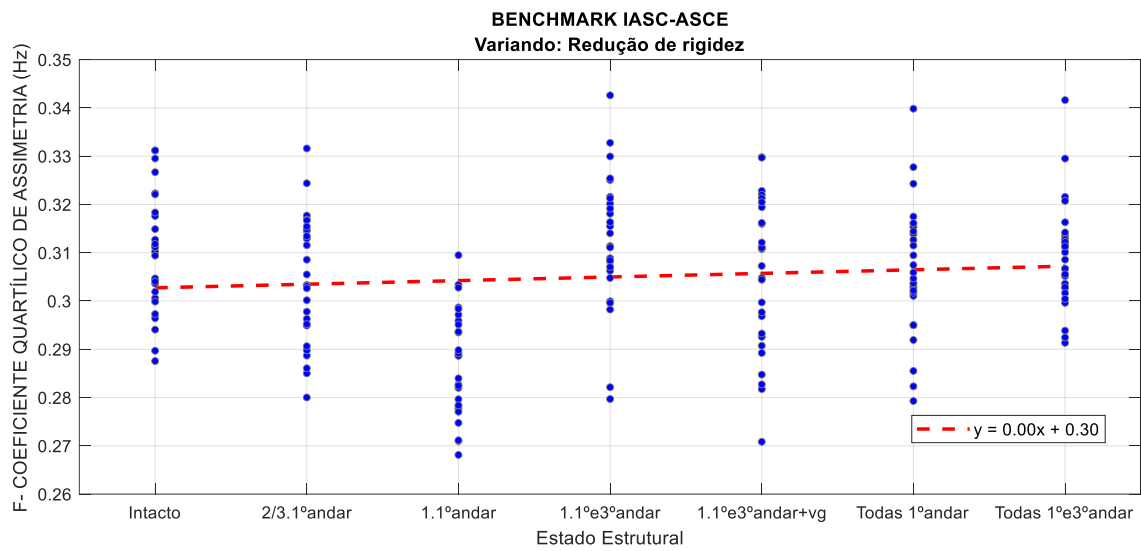
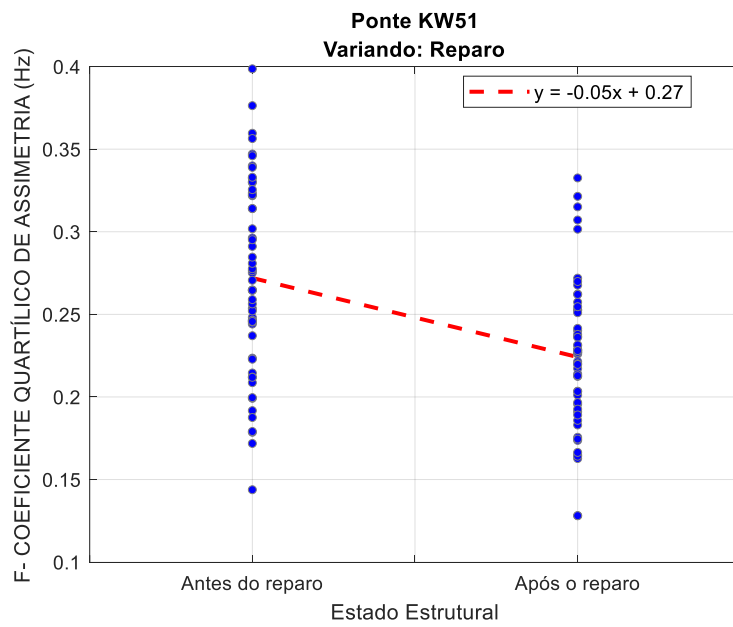


Figura G.175 – Gráfico de tendência do Coeficiente Quartílico de Assimetria, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.5. Coeficiente Percentílico de Curtose

Figura G.176 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

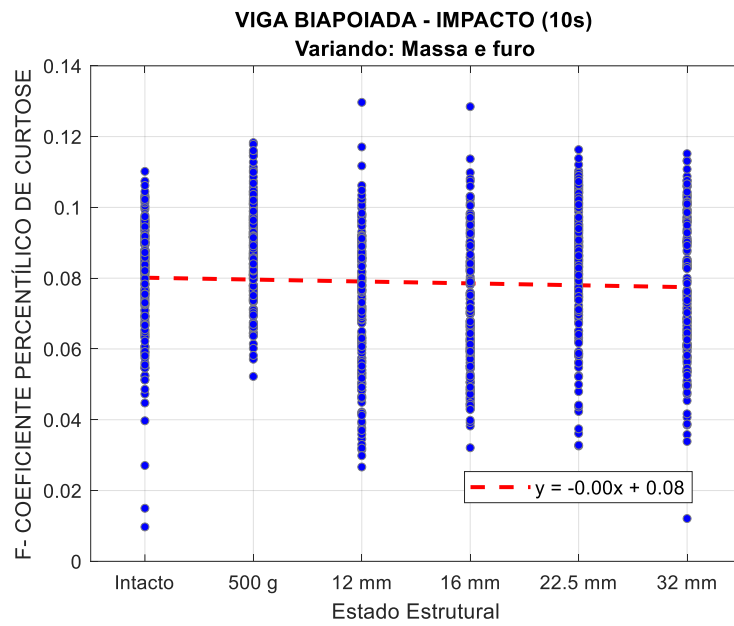


Figura G.177 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

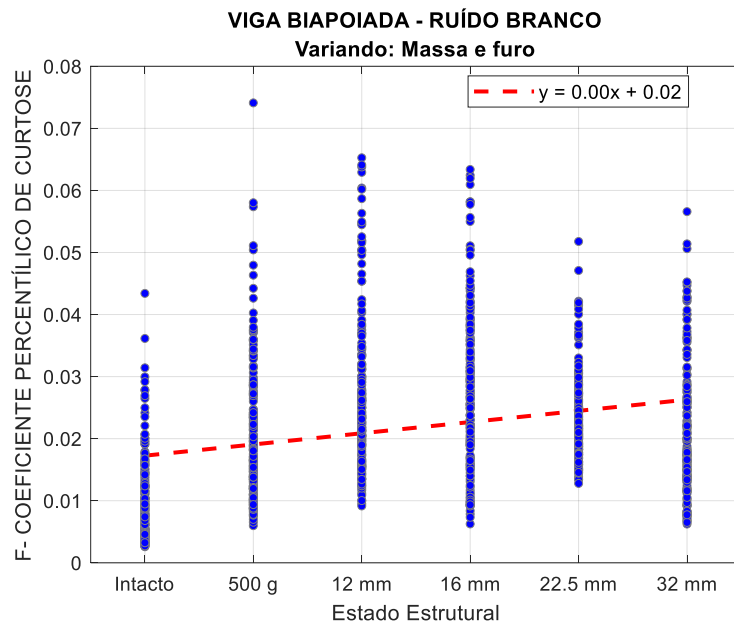


Figura G.178 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

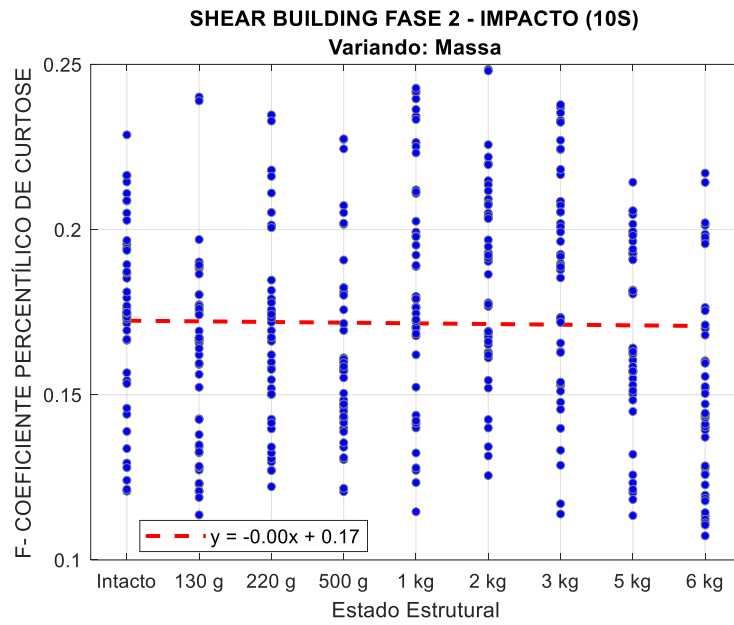


Figura G.179 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

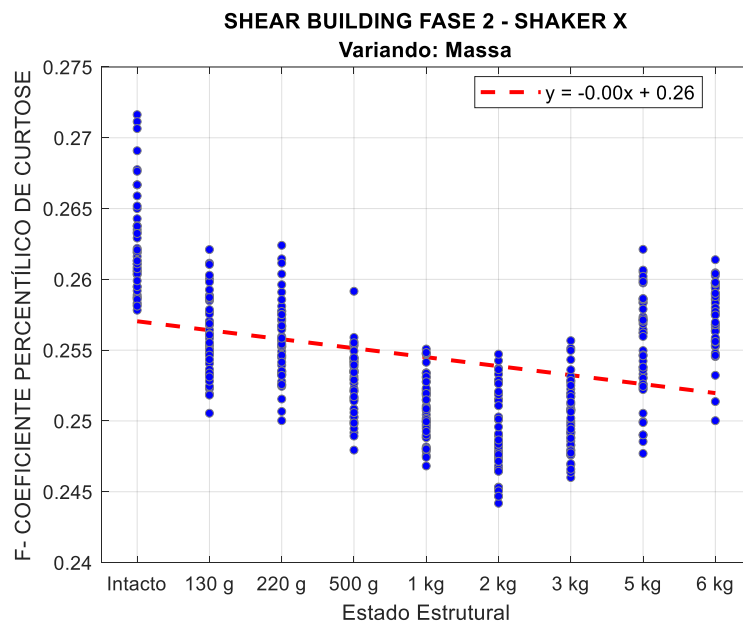


Figura G.180 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

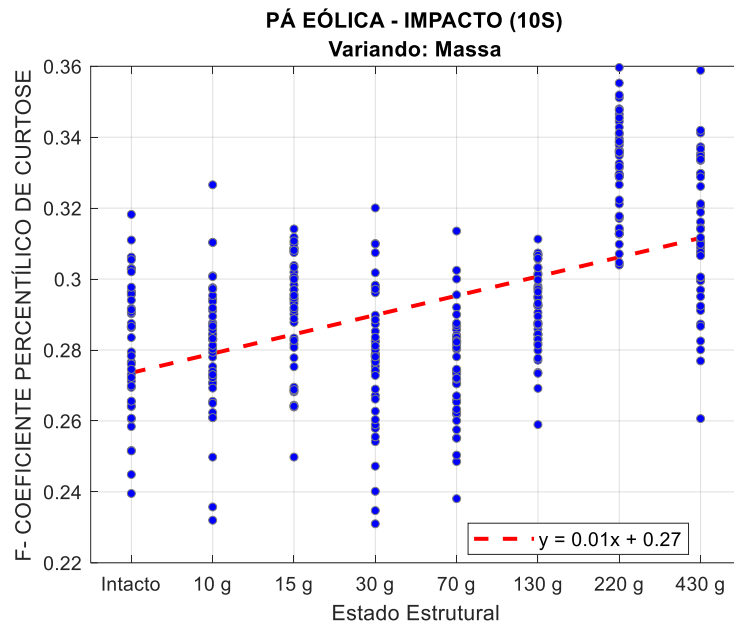


Figura G.181 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

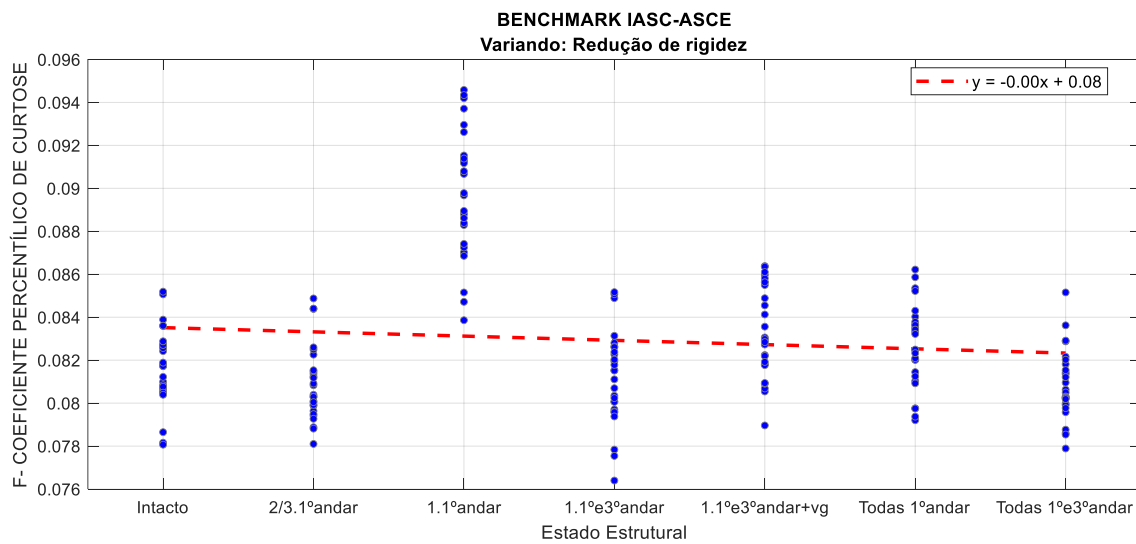
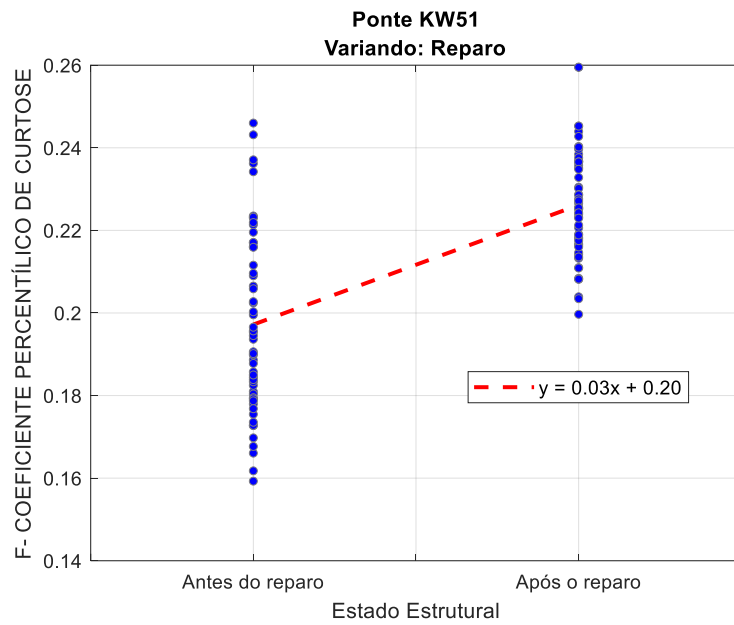


Figura G.182 – Gráfico de tendência do Coeficiente Percentílico de Curtose, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.6. Fator de Crista

Figura G.183 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

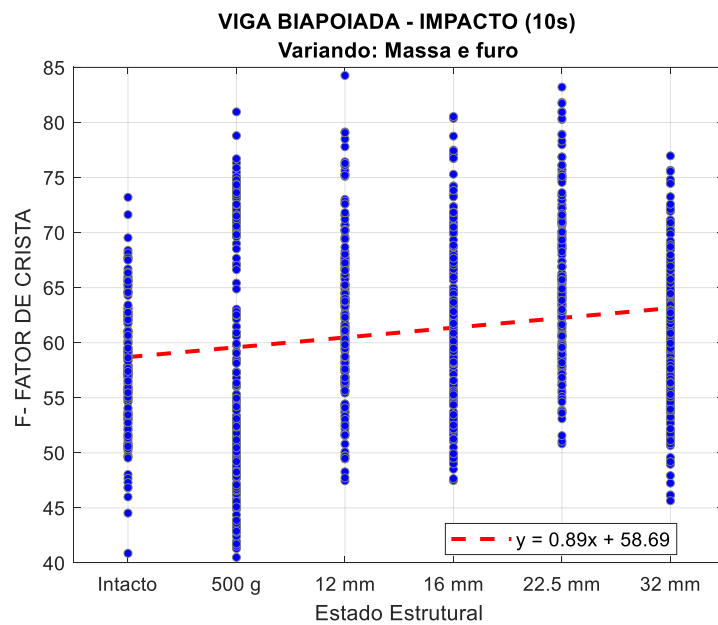


Figura G.184 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

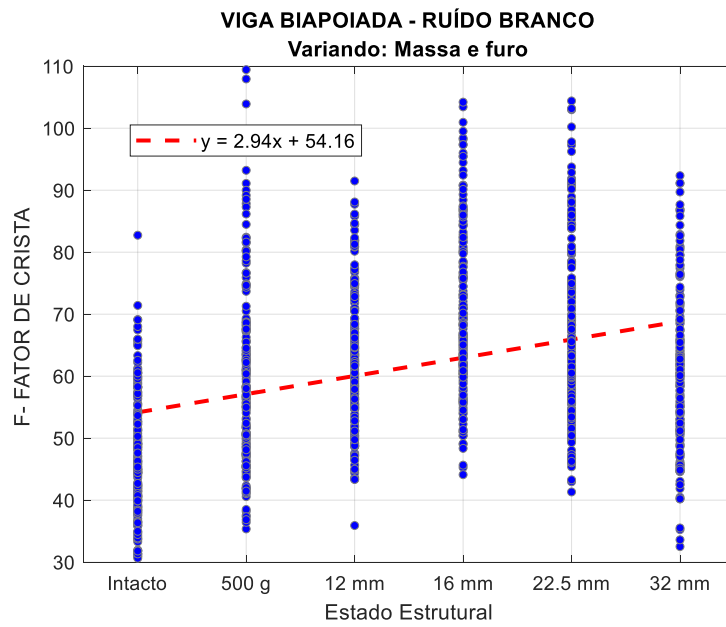


Figura G.185 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

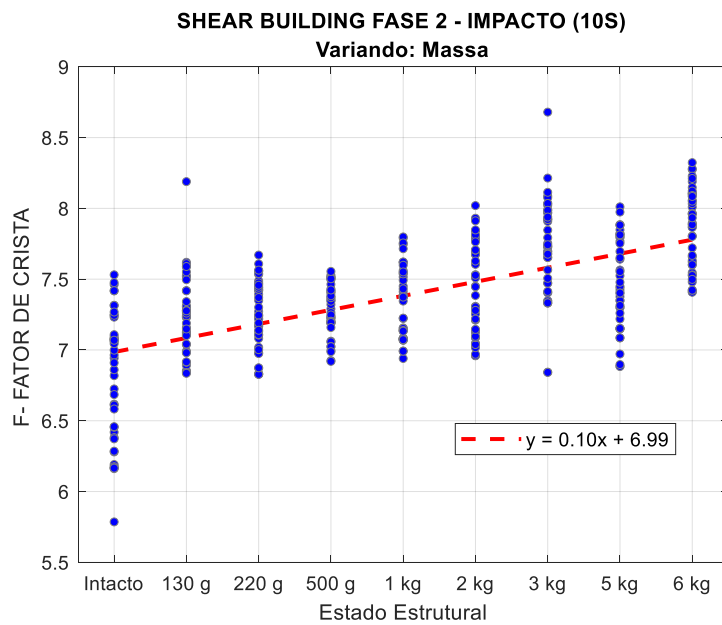


Figura G.186 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

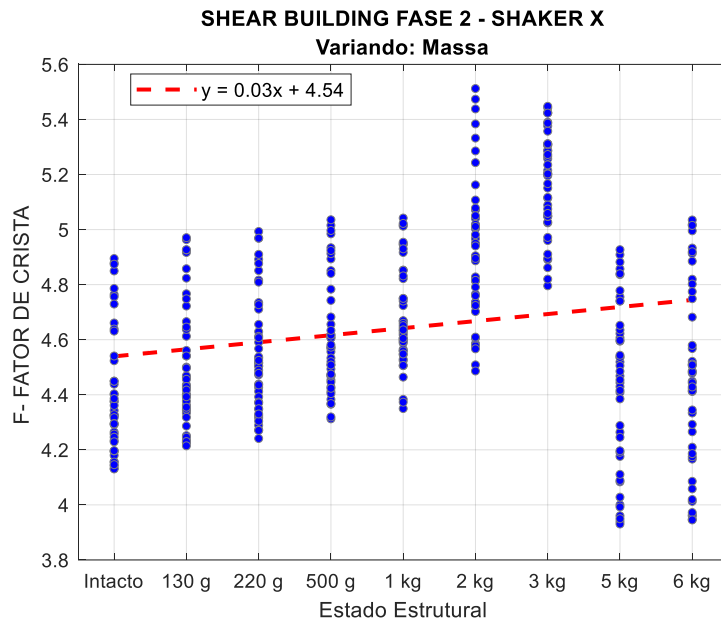


Figura G.187 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

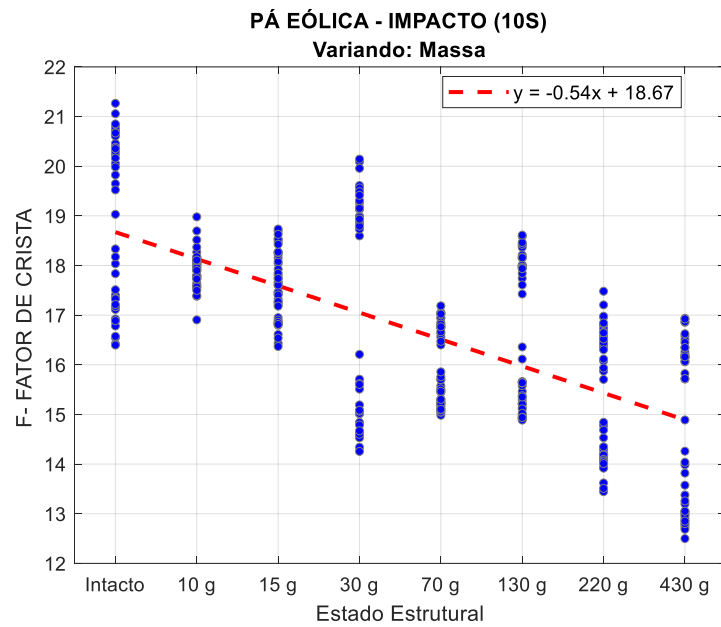


Figura G.188 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

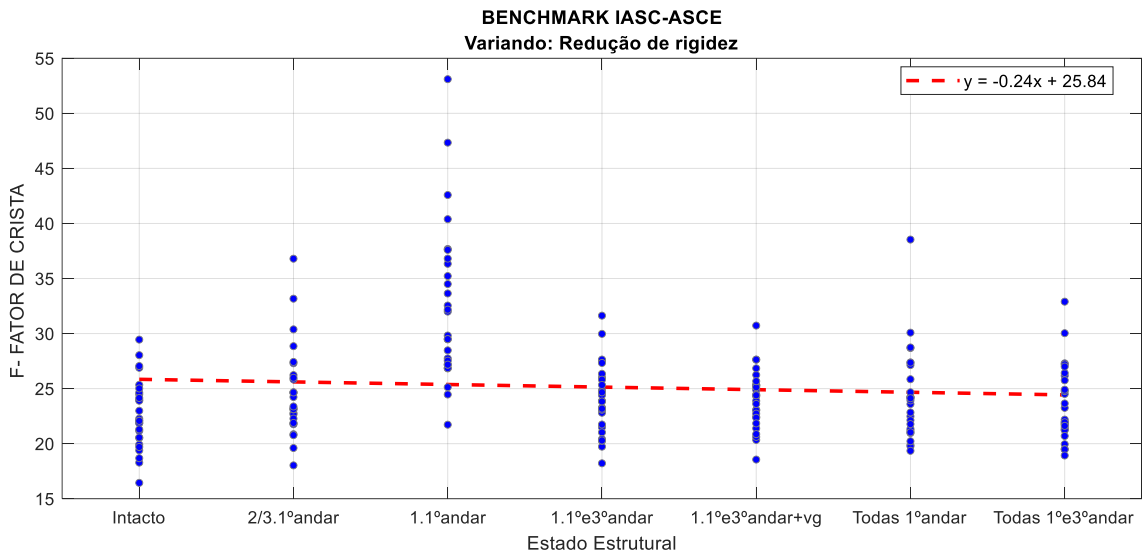
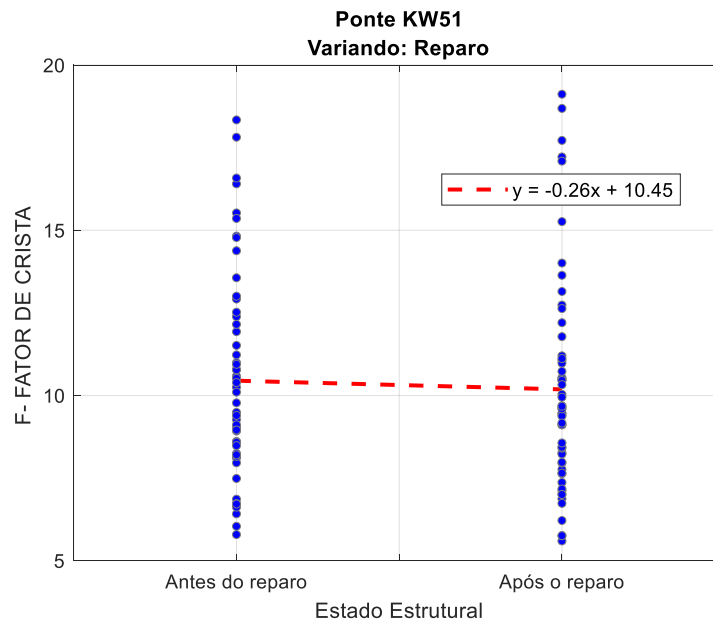


Figura G.189 – Gráfico de tendência do Fator de Crista, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.7. Fator K

Figura G.190 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

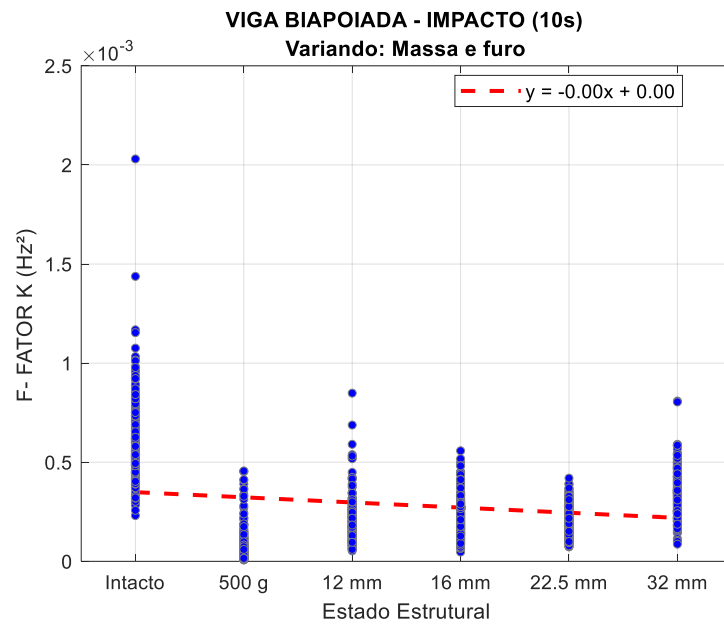


Figura G.191 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

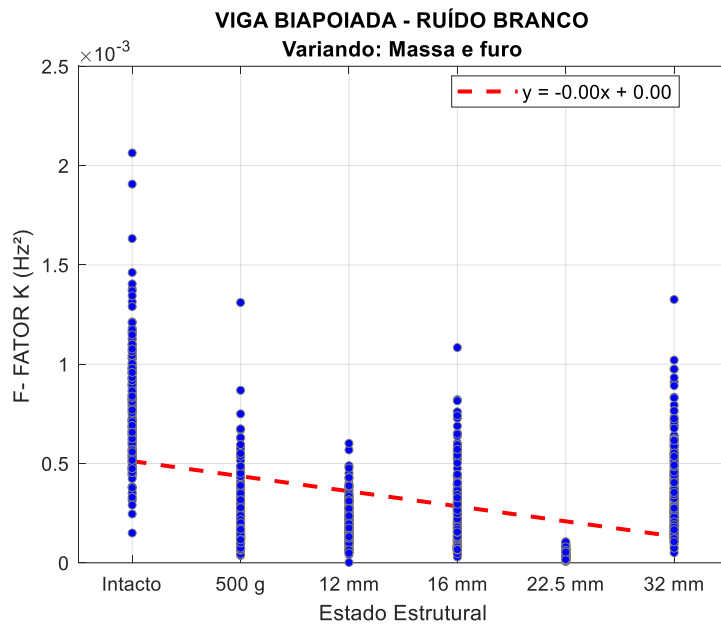


Figura G.192 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

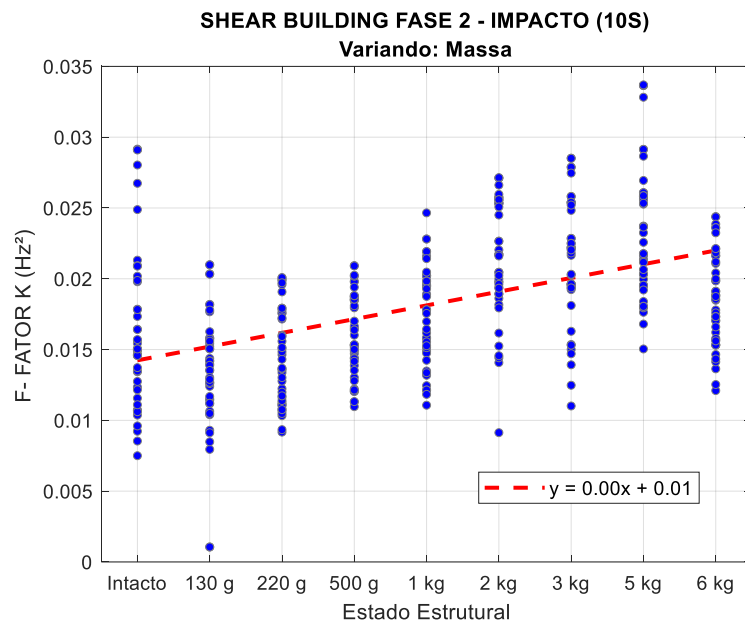


Figura G.193 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

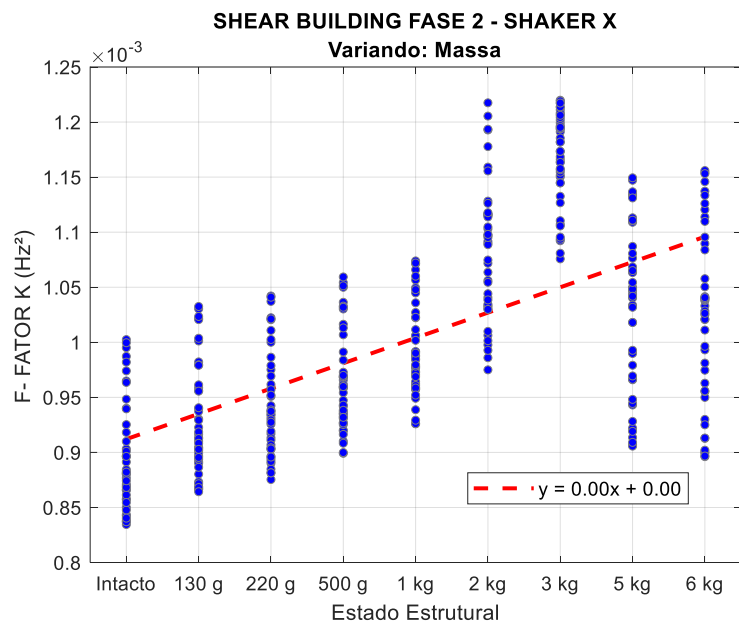


Figura G.194 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

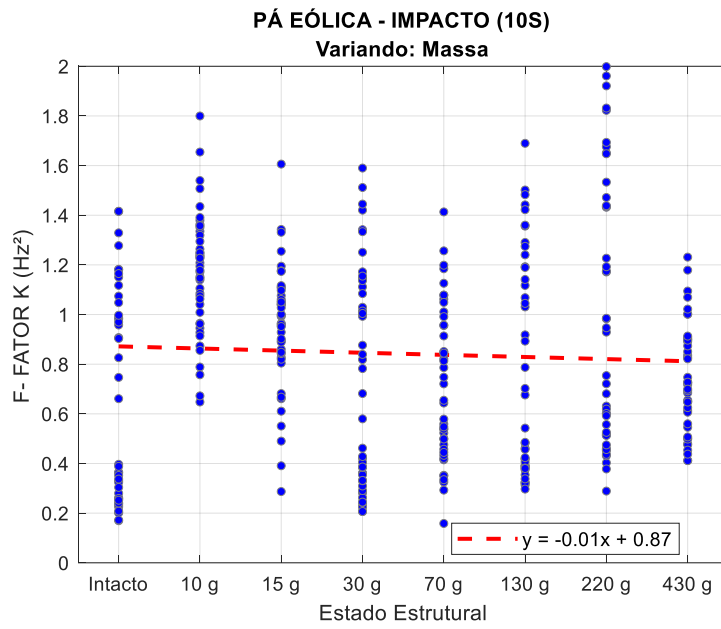


Figura G.195 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

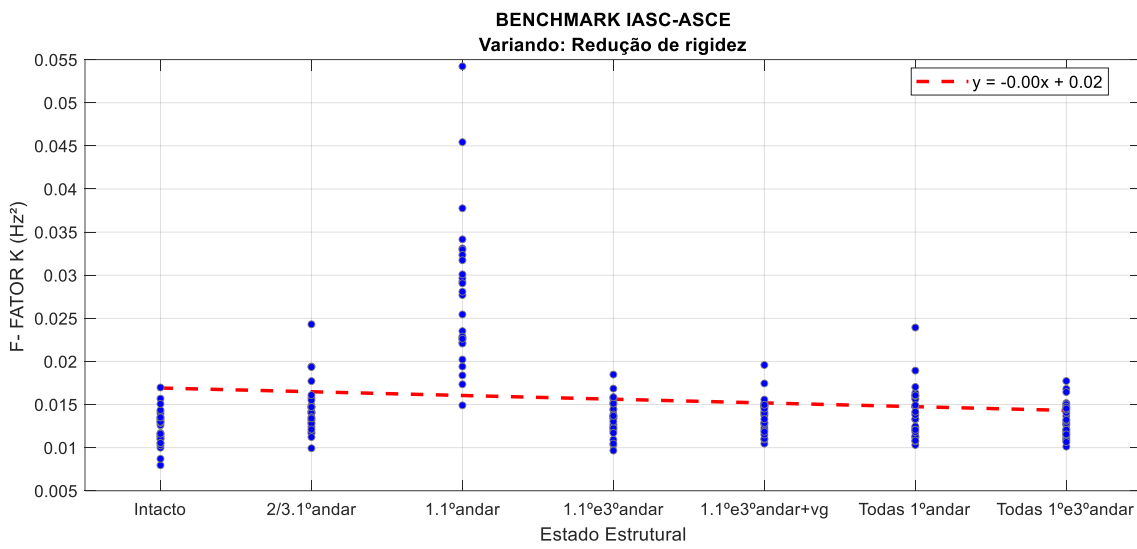
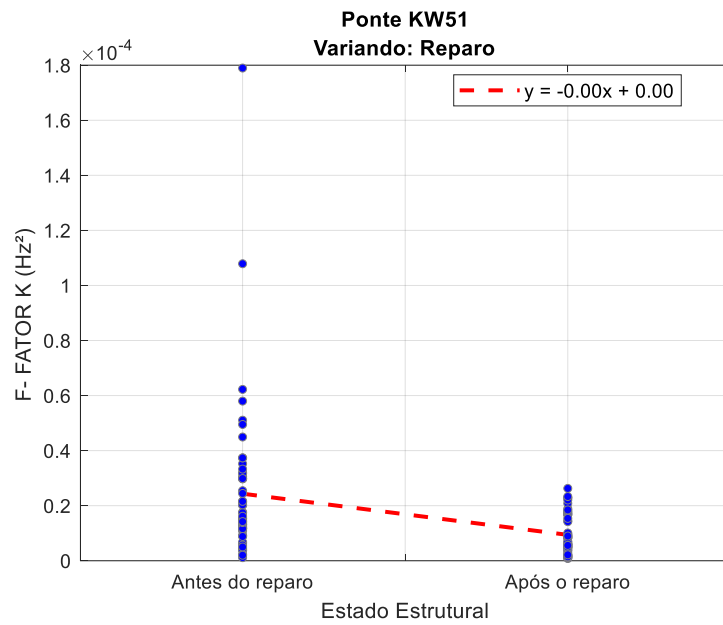


Figura G.196 – Gráfico de tendência do Fator K, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.8. Primeiro Coeficiente de Pearson

Figura G.197 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

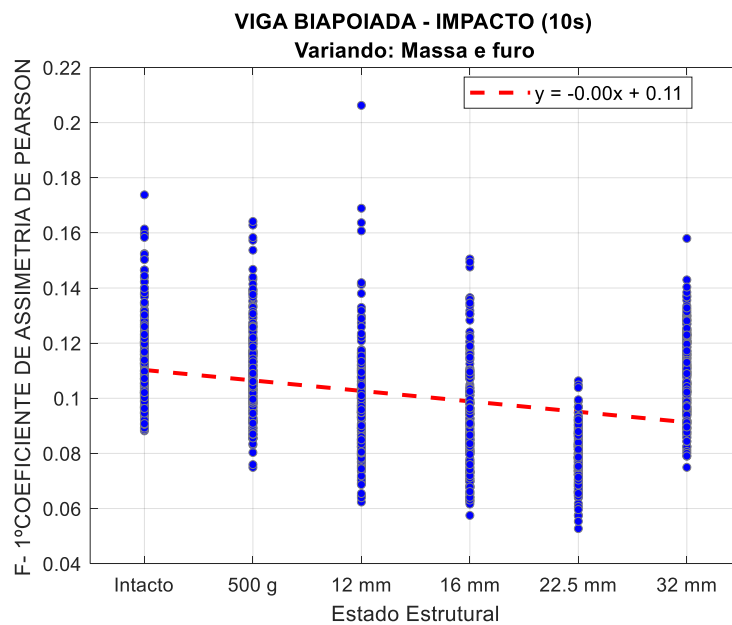


Figura G.198 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

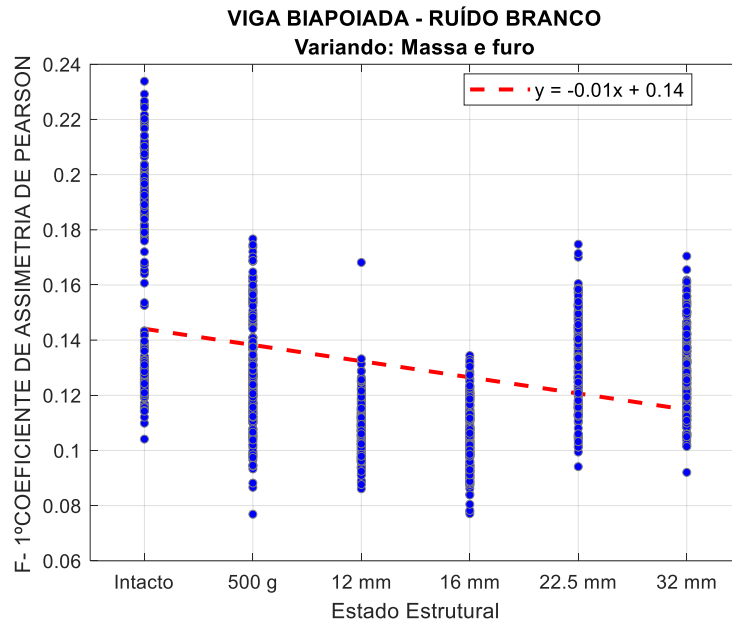


Figura G.199 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

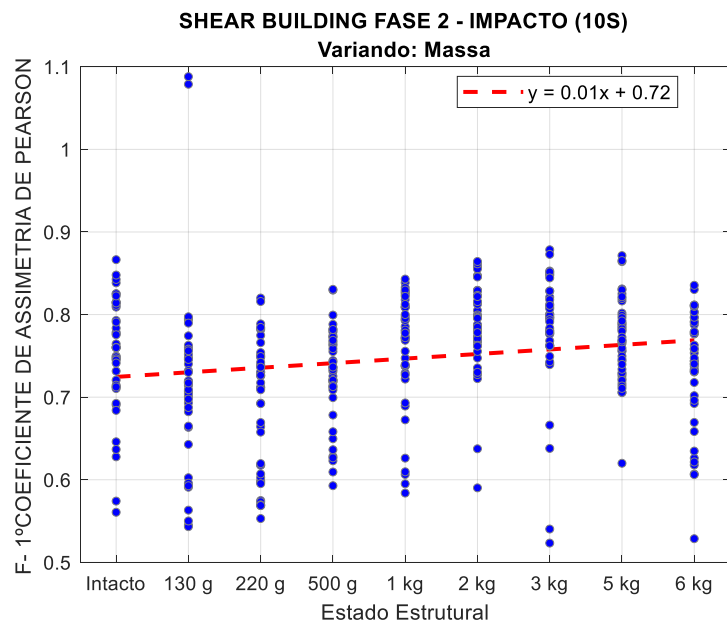


Figura G.200 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

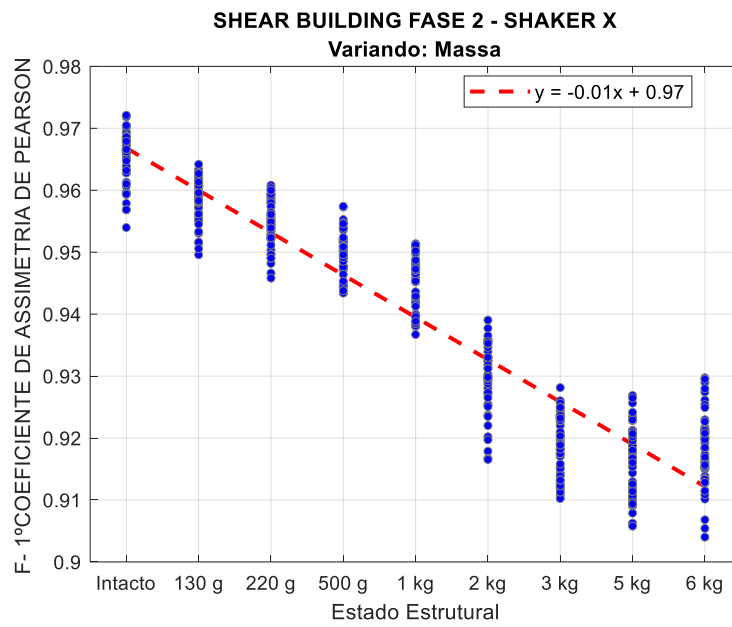


Figura G.201 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

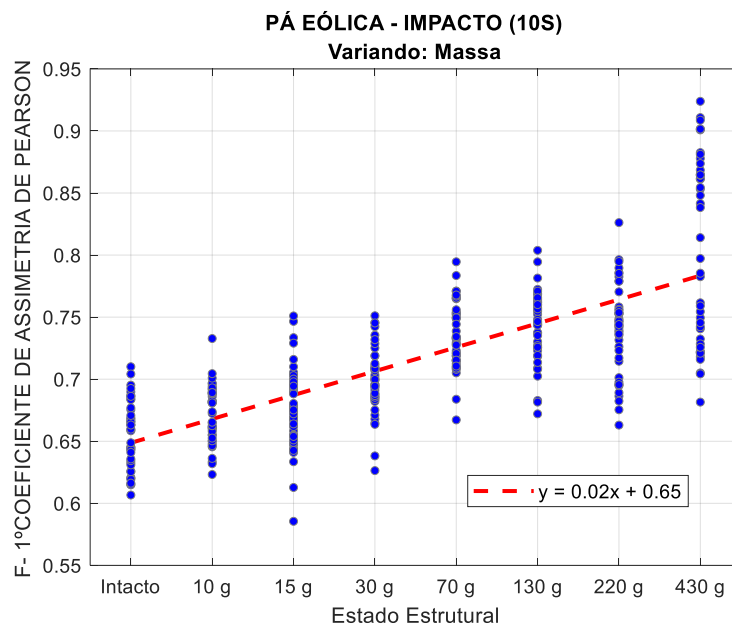


Figura G.202 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

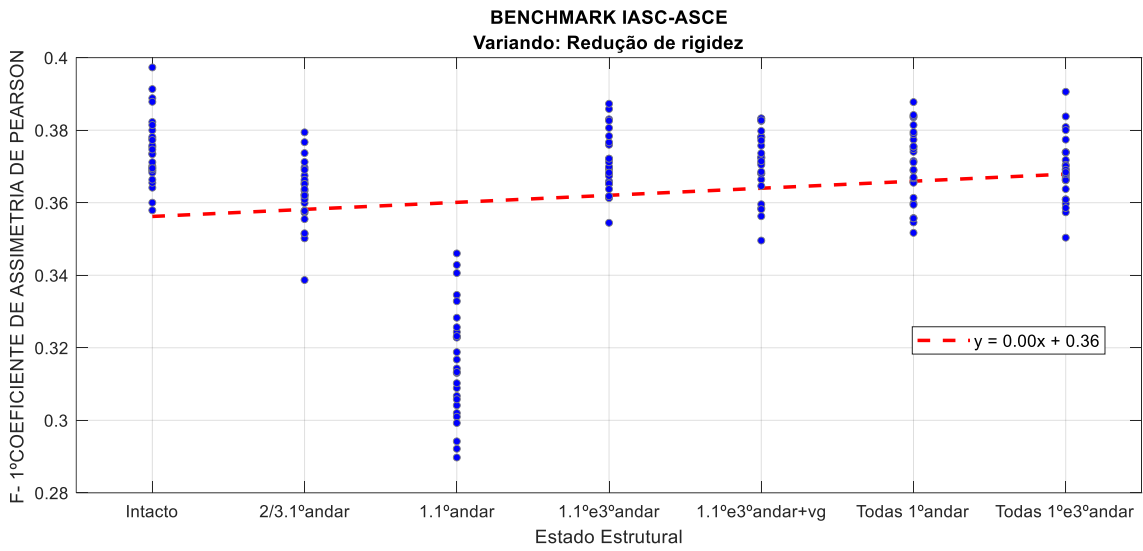
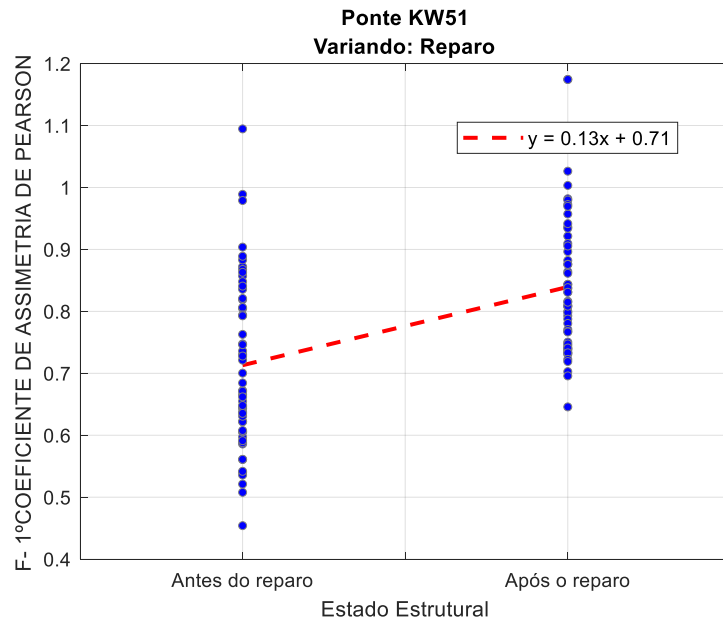


Figura G.203 – Gráfico de tendência do 1º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.4.9. Segundo Coeficiente de Pearson

Figura G.204 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

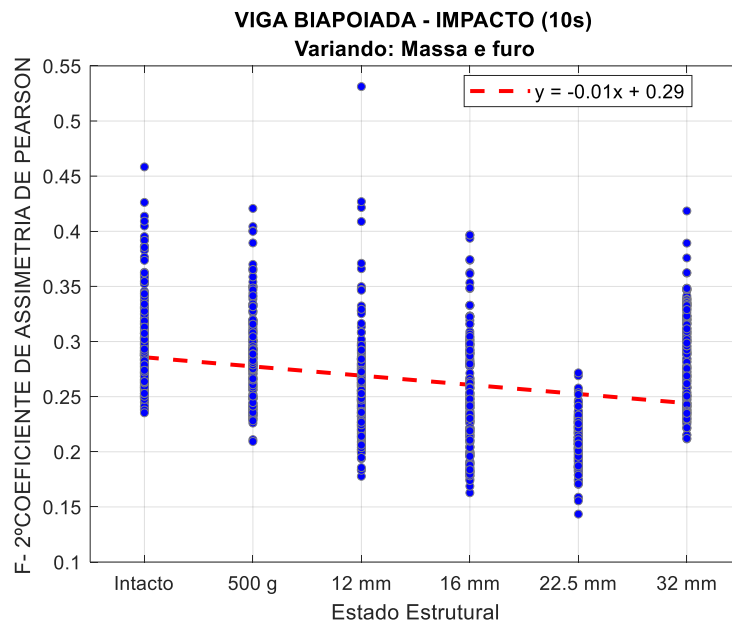


Figura G.205 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

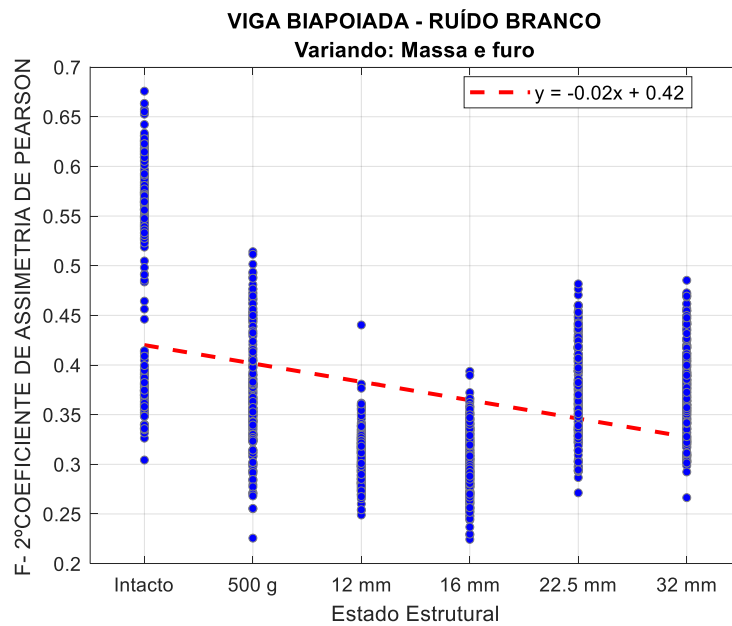


Figura G.206 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

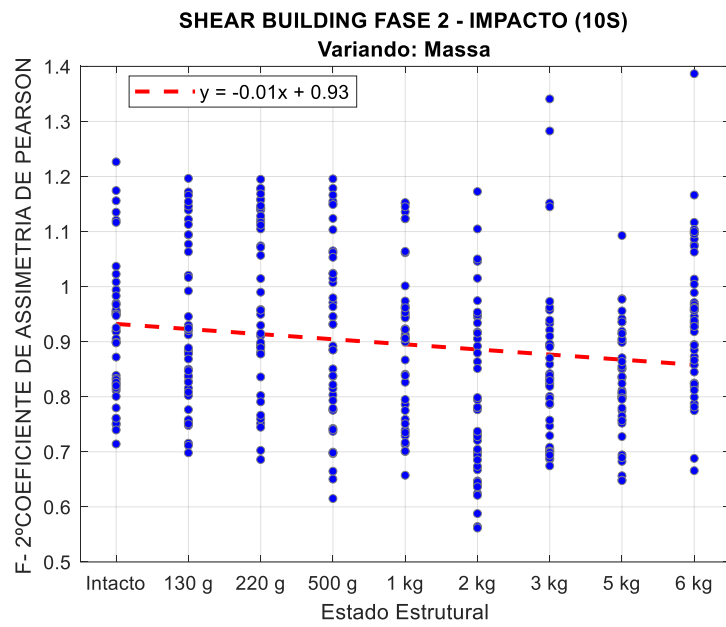


Figura G.207 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

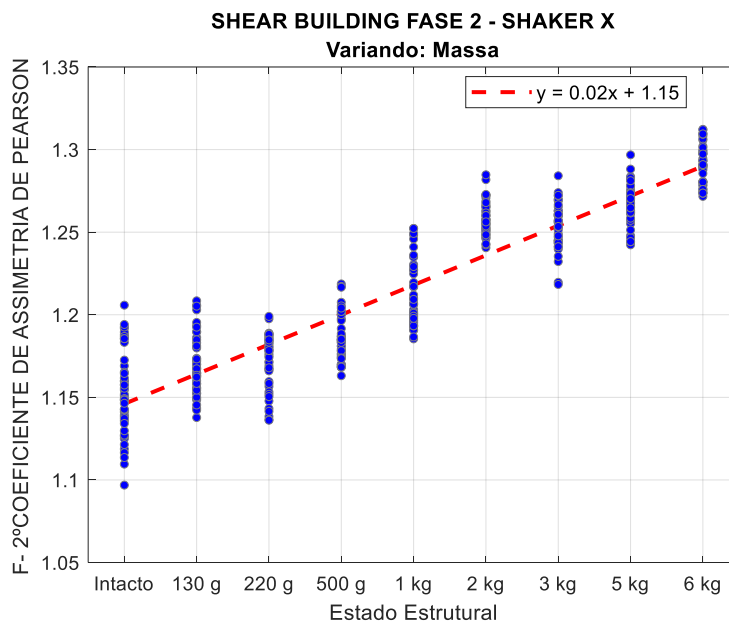


Figura G.208 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

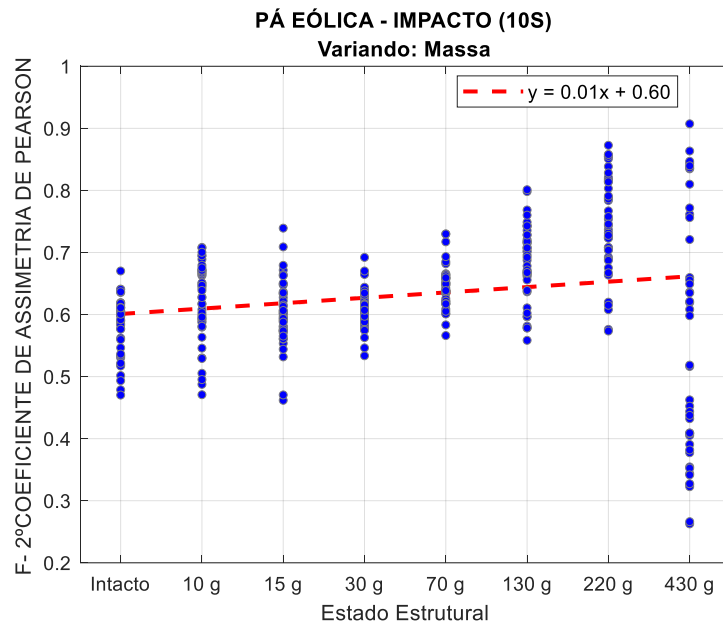


Figura G.209 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

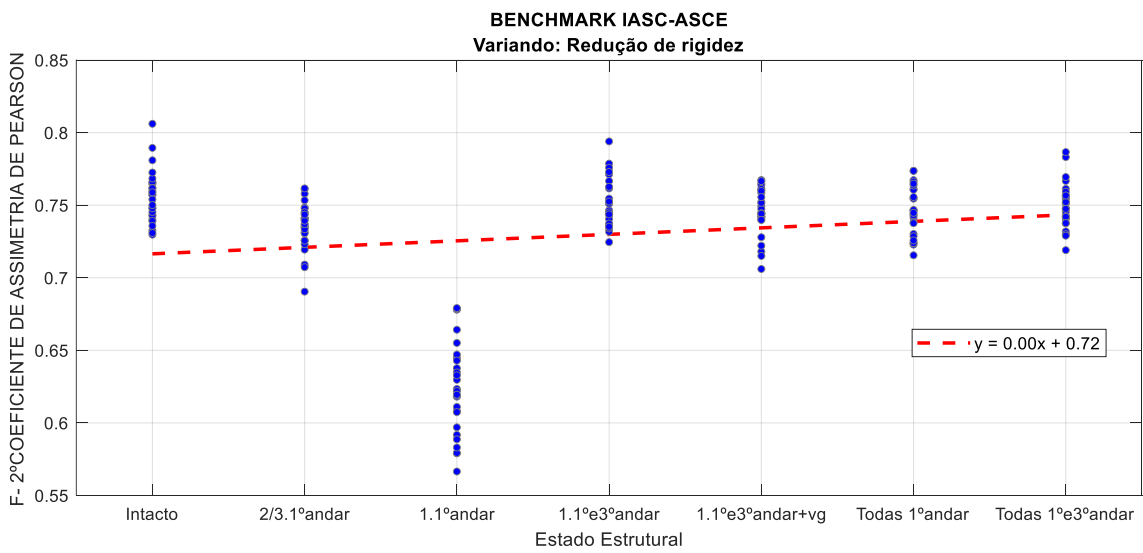
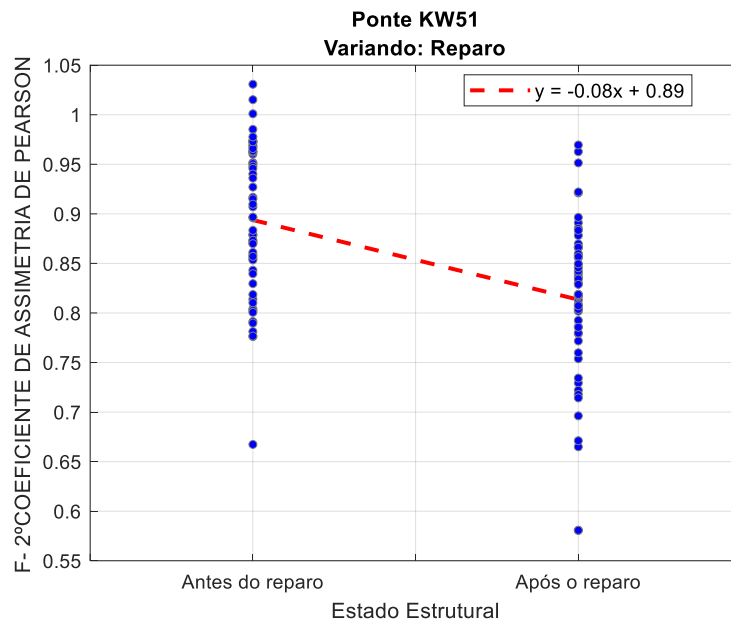


Figura G.210 – Gráfico de tendência do 2º Coeficiente de Pearson, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.



G.5. ADS

Para a análise dos dados simbólicos no domínio da frequência, foi escolhida apenas a primeira categoria, apresentada a seguir. Essa escolha se deve ao fato de essa categoria representar uma posição intermediária e, de modo geral, ter apresentado bons resultados de separação entre os estados estruturais nas diferentes estruturas analisadas.

Figura G.211 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de impacto a cada 10s.

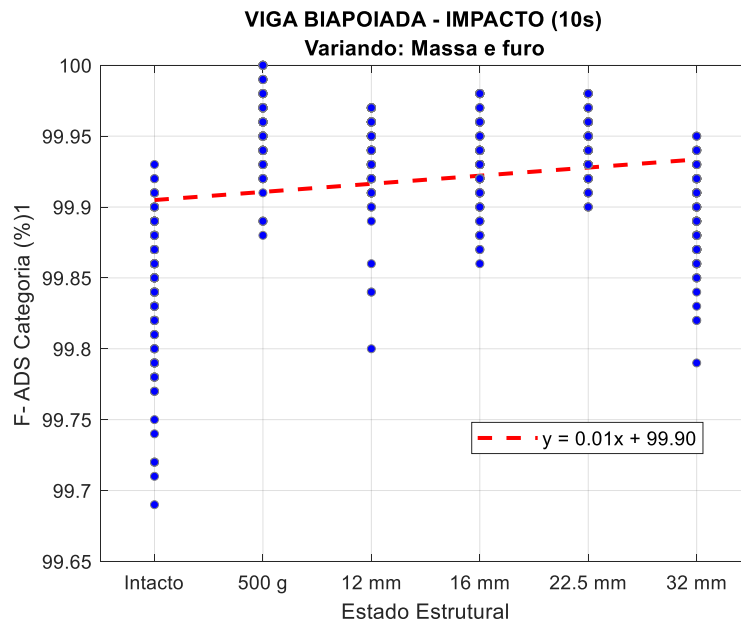


Figura G.212 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Viga Biapoiada, sob excitação de shaker (Ruído Branco).

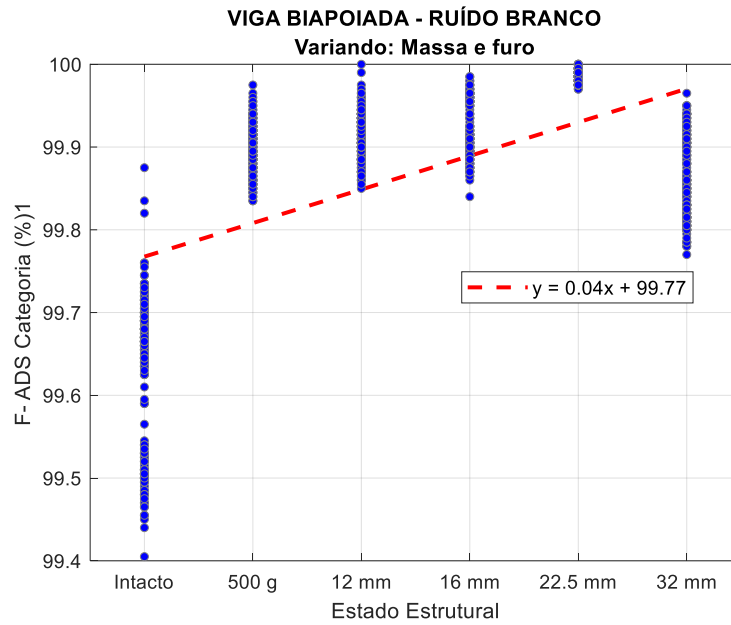


Figura G.213 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação de impacto a cada 10s.

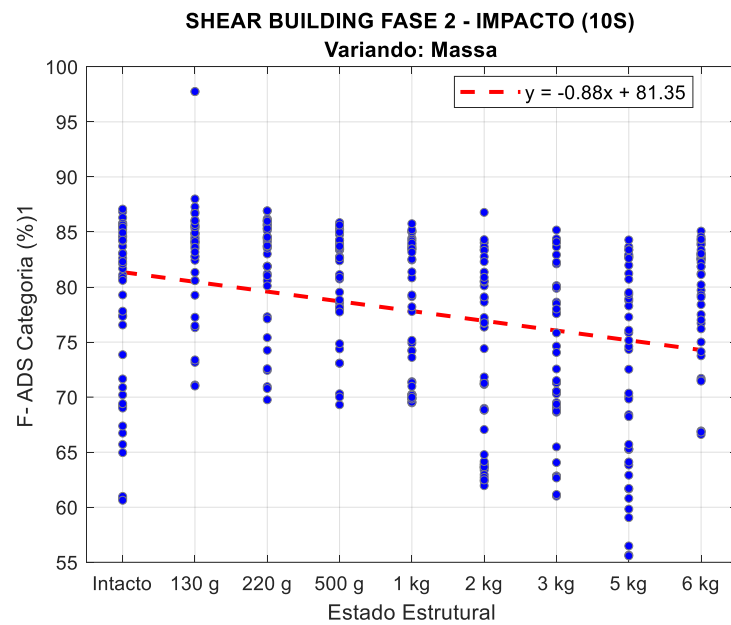


Figura G.214 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Shear Building (Fase 2), sob excitação do shaker (senoidal) na direção de x.

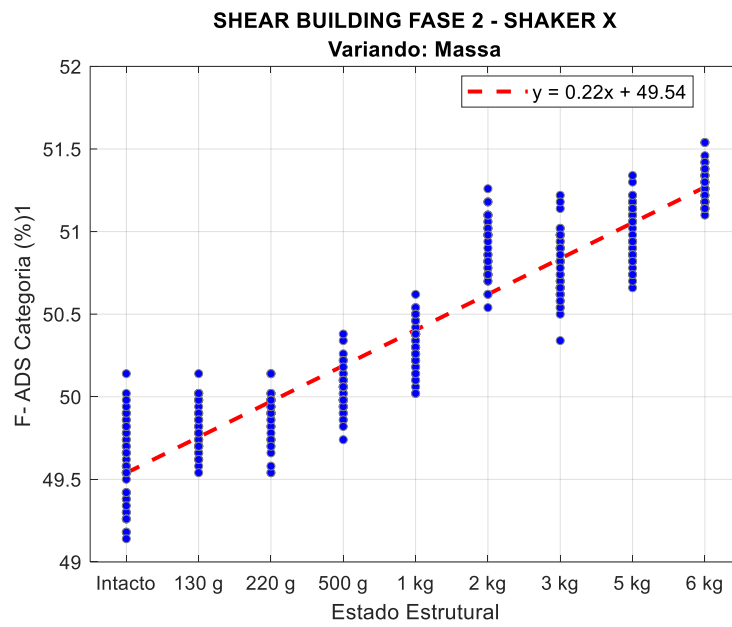


Figura G.215 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Pá Eólica, sob excitação por impacto a cada 10s.

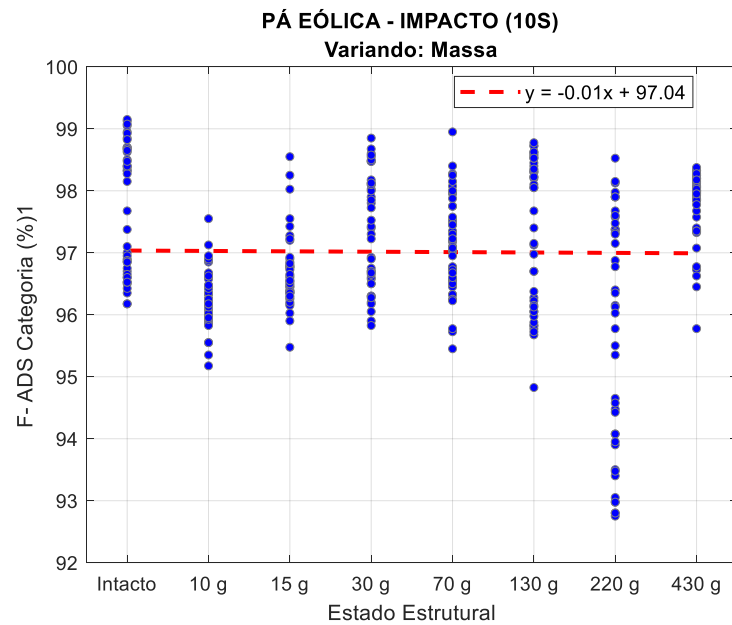


Figura G.216 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados do Benchmark IASC-ASCE, sob excitação do shaker.

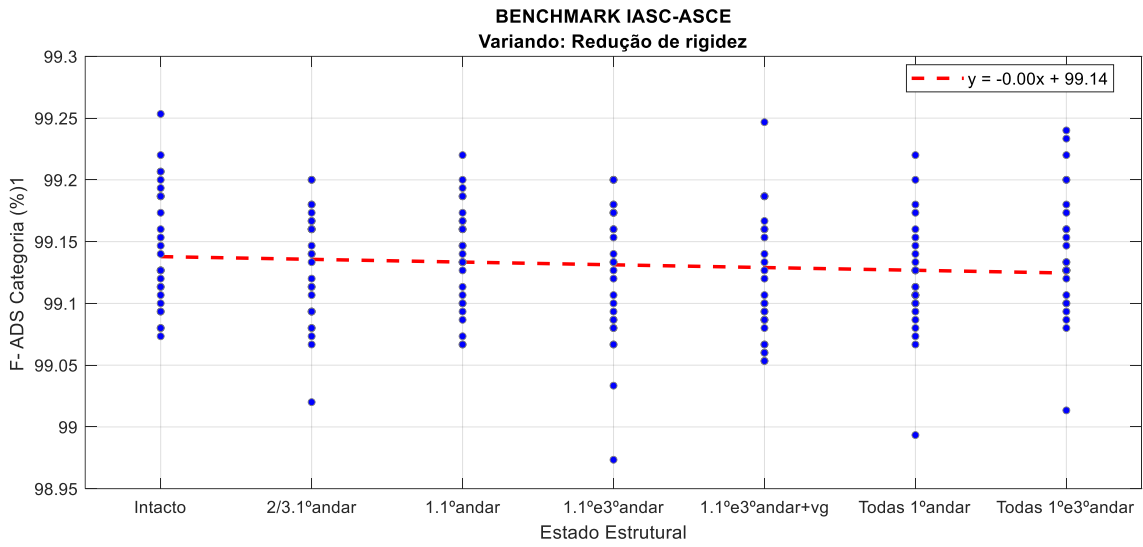


Figura G.217 – Gráfico de tendência da 1ª Categoria da ADS, no domínio da frequência, aplicado aos dados da Ponte KW51, sob excitação da passagem de um trem.

