



Universidade de Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo

ACÚSTICA DE BAIXO CARBONO: PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAMBU

Joelma da Mota Louredo

Brasília / DF: Junho, 2025



Universidade de Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo

ACÚSTICA DE BAIXO CARBONO: PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAMBU

Joelma da Mota Louredo

Tese apresentada no Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito à obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: João da Costa Pantoja

Linha de pesquisa: Tecnologia Ambiente e Sustentabilidade

Área: Tecnologia de Produção do Ambiente Construído

Brasília / DF: Junho, 2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

ACÚSTICA DE BAIXO CARBONO: PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAMBU

ARQUITETA: Ms.: JOELMA DA MOTA LOUREDO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, DA FACULDADE DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ARQUITETURA E URBANISMO.

APROVADA POR:

João da Costa Patoja (UnB)
(Orientador)

Jaime Gonçalves de Almeida (UnB)
(Examinador interno)

Rudybert Barros Von Eye (Ministério da Justiça e Segurança Pública)
(Examinador externo)

Anelizabeth Alves Teixeira (UEG)
(Examinadora externa)

BRASÍLIA/DF, 30 DE JUNHO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

LOUREDO, JOELMA DA MOTA

Acústica de Baixo Carbono: Painéis Aglomerados de Bambu [Distrito Federal] 2025.

(PPG/FAU/UnB, Doutora, Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, 2025).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Curso de Mestrado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

1. Painéis aglomerados de bambu
2. Absorção acústica
3. Compósitos de cimento;

I. PPG/FAU/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOUREDO, J. M. (2025). Acústica de Baixo Carbono: Painéis Aglomerados de Bambu. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília,DF. 201p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: JOELMA DA MOTA LOUREDO

TÍTULO: Acústica de Baixo Carbono: Painéis Aglomerados de Bambu.

GRAU: Doutora

ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Email: joelmamotalouredo@gmail.com

AGRADECIMENTOS

O processo de construção de uma tese de doutorado é complexo e apresenta muitas facetas. Não só pela sua natureza de investigação científica, mas também pelo fator humano que permeia todas as nossas ações. Investigar a viabilidade da produção de painéis de bambu e cimento para fins de absorção sonora, é um diálogo com a minha história e com as pessoas que a protagonizaram. Sem elas eu não chegaria até aqui.

Gostaria de agradecer sobretudo a minha família. Eles são o alicerce da minha existência. A minha mãezinha Rosilene, que nunca duvidou de mim e sempre esteve ao meu lado nos mais diversos desafios materiais e psicológicos. Ao meu pai Joel, que foi exemplo de dedicação e me ofereceu suporte na elaboração de todas as estratégias de superação dos obstáculos da minha vida. Ao meu irmão Lucas, que se tornou um grande amigo e parceiro, uma pessoa que eu realmente admiro e que me desperta motivos para continuar, nas muitas vezes que pensei em desistir.

Gostaria de agradecer a minha grande referência de vida, Aninha. Por ter me apresentado o bambu e a lealdade, por ter demonstrado para mim que doçura, competência e firmeza podem compor de forma impressionante uma personalidade. Ao Professor Jaime, que além da incrível habilidade de dialogar através de metáforas, se tornou nossa referência sobre trajetória acadêmica de realizações, sensibilidade artística e atenção com as pessoas.

Ao meu orientador João Pantoja, por me dar um voto de confiança num dos momentos que eu mais precisei e me guiar com conselhos firmes e assertivos. Foi, de fato, singular que nesta etapa crucial da trajetória acadêmica eu fosse presenteada com a figura genuína de um professor.

Ao Laboratório de Produtos Florestais, na figura da Ana Nakamura que me abriu as portas do laboratório, do Rogério Marcos Magalhães que com sua gentileza me acolheu e apoiou na permanência por lá. Laboratório de Energia da Biomassa (Aenbio) na figura do Bruno Sant'Anna Chaves e do Greg, que deram todo o apoio necessário acompanhado de muita empatia.

A professora Maria Alzira de Araújo Nunes que acreditou no meu trabalho e não poupou esforços para me apoiar com o seu conhecimento e a estrutura do Laboratório de Acústica e Vibrações localizado na Universidade de Brasília (UnB), Campus Gama (FGA) na caracterização acústica dos meus painéis. Ao Rudybert Barros Von Eye, por me dar um voto de confiança e dedicar a participar da minha banca com todas as intercorrências que estou vivendo.

Agradeço a Deus e a Espiritualidade que nos cerca por nunca me abandonar.

RESUMO

A presente tese dedica-se a investigação da viabilidade de elaboração de um novo compósito que resultará em um painel aglomerado de bambu a partir de uma espécie de baixa densidade e sem aplicabilidade estrutural. Trata-se de um estudo experimental voltado para investigação das propriedades acústicas de painéis aglomerados de média e alta densidade realizados com partículas de *bambusa vulgaris var vitatta*, utilizando o cimento Portland CPV-ARI Estrutural como aglutinante. Adoção de CaCl_2 como acelerador de pega, tratamento das partículas com solução alcalina de NaOH . Variou-se o percentual de cimento, densidade e granulometria afim de verificar como esses parâmetros influenciam no desempenho acústico do compósito. Identificou-se que a variação da densidade é o principal fator que influencia a absorção sonora do material.

Palavras-chave: Painéis Aglomerados de Bambu; Absorção Acústica; Compósitos de cimento;

ABSTRACT

This thesis investigates the feasibility of developing a new composite that will result in a bamboo particleboard panel from a low-density species with no structural applications. It is an experimental study focused on investigating the acoustic properties of medium- and high-density particleboard panels made with particles of **Bambusa vulgaris var. vitatta**, using Portland cement CPV-ARI Estrutural as a binder. CaCl_2 was used as a setting accelerator, and the particles were treated with an alkaline NaOH solution. The percentage of cement, density, and particle size were varied to verify how these parameters influence the acoustic performance of the composite. It was identified that the variation in density is the main factor influencing the sound absorption of the material.

Keywords: Bamboo Panel; Acoustic Absorption; Cement Panel

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama de ilustração do efeito da propagação sonora direta e por reflexão em recintos fechados	19
Figura 2: Esquema simplificado do mecanismo de reflexão e absorção da energia sonora .	20
Figura 3: Esquema simplificado do mecanismo de reflexão e absorção da energia sonora .	20
Figura 4: Diagrama de distribuição geográfica de empresas especializadas em acústica no território brasileiro	21
Figura 5: Materiais testados: (a) palha, (b) feno, (c) broom (d) plant litter, (e) aparas de madeira de castanheiro de grão grosso e (f) aparas de madeira de choupo de grão fino.	24
Figura 6: Fluxograma de metodologia de construção da tese	32
Figura 7: a) Edifício b) Espaço de escritórios. Ambos referentes ao Philadelphia Saving Fund Society Building, 1932. Arquivo PSFS, Caixa 3, Pasta: Open Office Espaço. Cortesia do Museu e Biblioteca Hagley.....	36
Figura 8: Ilustração da propagação da onda sonora.....	39
Figura 9: Ilustração da frequência sonora	40
Figura 10: Representação do comportamento da onda sonora em contato com o material .	41
Figura 11: Ilustração da diferença morfológica entre estruturas de materiais de porosidade fechada (superior) e aberta (inferior).	43
Figura 12: Mecanismos principais que se acredita ocorrer nos materiais absorvedores de som: a) perdas viscosas no ar canais e (b) fricção mecânica causada por fibras esfregando juntos.	44
Figura 13: Materiais porosos celulares, fibrosos e granulares.....	45
Figura 14: Imagens microscópicas de absorvedores. a) Absorvedor celular, espuma. b) Material granular, areia. c) Absorvedor fibroso, fibra de algodão. d) material de dupla porosidade.	47
Figura 15: Imagens microscópicas de carvão aditivado. À esquerda observa-se o grão e a direita uma perspectiva mais aproximada mostrando os poros microscópicos que compõe o material.	47
Figura 16: Pegada de carbono de diferentes materiais em kg CO ₂ eq/t.....	50
Figura 17: Esquema ilustrativo do fenômeno de absorção sonora em materiais porosos.....	52
Figura 18: Comparação de fibra de sisal(a) com fibra de vidro (b).....	54
Figura 19: Comparação das propriedades de absorção sonora de quatro diferentes materiais de madeira de a mesma espessura (em 8 mm)	56
Figura 20: Micrografias SEM da estrutura composta (a: $\phi = 5\%$, b: $\phi = 30\%$, c: $\phi = 60\%$, d: $\phi = 70\%$, 1: seção transversal, 2: superfície).....	57

Figura 21: Representação esquemática em corte transversal da impregnação da estrutura fibrosa em diferentes teores de porosidade. As fibras são representadas em preto, lamelas médias em cinza, matriz em vermelho e porosidade em branco.	58
Figura 22: Coeficientes de absorção acústica normais para biocompósitos moldados em diferentes teores de porosidade e composto de linho/PP injetado em função da onda sonora frequência.	58
Figura 23: Imagens SEM de painéis de (a) 4 MPa e (b) de 2,5 MPa. (c) Coeficiente de absorção sonora em relação à frequência para os painéis.....	60
Figura 24: Morfologia da seção transversal de (a) fibra de sisal e (b) fibra de vidro.....	60
Figura 25: Estrutura multi-escala e lúmen oco de fibras de sisal em diferentes ampliações.	61
Figura 26: (a) Da esquerda para a direita têm-se cânhamo, casca de girassol, grão de girassol, linho e palha. (b) Coeficiente de absorção sonora das amostras de partículas sendo representadas pelas cores azul para cânhamo, vermelha para casca de girassol, verde para grão de girassol, preta para linho e amarelo para palha.	62
Figura 27: Os espectros do coeficiente de absorção sonora do cedro do Japão em diferentes condições de umidade conteúdo.	63
Figura 28: (a) imagem do microscópio digital do controle Oak e (b) imagem do microscópio digital da amostra tratada com ampliação de 200×.....	65
Figura 29: Efeito da alcalinização no desempenho de absorção sonora de tecidos PP/Hemp/PP; (a) tratado à temperatura ambiente e (b) tratado à temperatura de ebulição .	67
Figura 30: (a) Amostra de cânhamo a granel testada mecanicamente. Painéis com diferentes proporções de dosagem de aglutinante sendo elas (b) alta, (c) intermediária e (d) baixa. ...	69
Figura 31: Biomassas avaliadas	70
Figura 32: Uma amostra do bioconcreto de bambu	86
Figura 33: Infográfico acerca das vantagens de cultivo do bambu.....	87
Figura 34: Distribuição da floresta de bambu e a sobreposição com as zonas climáticas	87
Figura 35: Diagrama da Cadeia de Valor do Bambu.....	88
Figura 36: Probabilidade de adaptação para cultivo da espécie <i>Bambusa vulgaris</i>	89
Figura 37: olhas, galhos e colmos de <i>B. vulgaris</i> var. <i>vittata</i> , Tatuí-SP.....	91
Figura 38: (a) Bambu dividido com paredes internodais do colmo ao redor da lacuna e nós de partição. (b) Células epidérmicas mais externas cobertas por uma camada cutinizada em <i>Bambusa Vulgaris</i> . (c) Revestimento de cera sobre a epiderme com estômatos em <i>Phyllostachys viridiglaucescens</i>	91
Figura 39: Vista tridimensional do tecido do colmo com feixes vasculares embutidos em parênquima fundamental na espécie <i>Oxytenanthera abyssinica</i> (1.500X).....	92
Figura 40: (a) Feixe vascular Tipo III com um feixe de fibras isolado. (b) Feixe vascular Tipo IV com dois feixes de fibras isolados.....	93

Figura 41: (a) Ilustração de anastomoses vasculares dentro da região nodal. (b) Corte transversal de um diafragma com estruturas de feixes vasculares irregulares (Ph - floema, Xy - xilema) na espécie <i>Schizostachyum pseudolima</i>	94
Figura 42: Fibras de bambu tratadas em solução de NaOH e orientadas de forma randômica.	98
Figura 43: Propriedades físicas das amostras de bambu (a) espessura, (b) largura e (c) densidade; microestrutura da seção transversal das amostras de bambu camada externa (d) e camada interna (e) tratadas por solução alcalina em várias concentrações (barra de escala = 200 μ m).	99
Figura 44: A microestrutura da fibra e da célula do parênquima externas e internas das amostras bambu quando tratadas com várias concentrações. (a) Seção transversal externa das amostras de bambu; zoom nas (b) fibras e (c) células de parênquima da face externa das amostras bambu tratadas; (d) Seção transversal interna das amostras bambu; zoom das (e) fibras e (f) células de parênquima da face interna das amostras bambu tratadas.	100
Figura 45: Imagem de microscopia eletrônica de varredura do bambu Portland painel de partículas de cimento tratado com diferentes concentrações de álcali. (a) Painel de partículas de cimento tratado com 1% de álcali. (b) Partícula de cimento placa tratada com álcali 2%. (c e d) Painel de partículas de cimento tratado com 3% alcalino.....	102
(a) Figura 46: Granulometria das partículas a: Lã, b: média, c: fina.	108
Figura 47: Granulometria das partículas a: Lã, b: média, c: fina. Coeficientes de absorção sonora em baixa e média densidade para as granulometrias estudadas.....	109
Figura 48: Coeficientes de absorção sonora para variação de parâmetros das amostras a: espessura; b: densidade; c: diâmetro da fibra; d: espaço de ar entre a amostra e a superfície rígida.	110
Figura 49: (a) Touceira de retirada do bambu; (b) Colmo seccionado preparado para transporte.....	114
Figura 50: Exsicata <i>Bambusa vulgaris</i> var. <i>vittata</i> Rivière & C. Rivière, n° 66.709, herbário UFG.	115
Figura 51: Colmos de bambu seccionados em peças de comprimento de 5cm	116
Figura 52: Moinho de martelo	116
Figura 53: Peneira de classificação	117
Figura 54: (a) Parte do colmo de bambu; Caracterização das partículas selecionadas (b) G1; (c) G2;	118
Figura 55: Fotos da imersão das partículas G1 em solução de NaOH (1%). (a) Imediatamente após a imersão. (b) 14h após a imersão.	118
Figura 56: Fotos da imersão das partículas G2 em solução de NaOH (1%). (a) Imediatamente após a imersão. (b) 10h após a imersão.	119
Figura 57: Processo de secagem das partículas granulometria G1. (a) Imediatamente após a lavagem. (b) Sexto dia de secagem.....	120

Figura 58: Processo de secagem das partículas granulometria G2. (a) Imediatamente após a lavagem. (b) Sexto dia de secagem.....	120
Figura 59: Esquema das prensas manuais para painéis	121
Figura 60: (a) Fabricação da peça 1. (b) Proteção da peça 1. (c) Fabricação das peças 2 e 3. (d) Proteção das peças 2 e 3.	122
Figura 61: Prensa manual 8cm x 8cm x 1,5 cm	122
Figura 62: Fluxo de produção dos painéis.....	123
Figura 63: Ilustração dos procedimentos de beneficiamento dos corpos de prova.....	124
Figura 64: Demarcação dos pontos de aferição das espessuras das amostras	125
Figura 65: Equipamento de aferição de coeficientes de absorção sonora	128
Figura 66: Bateria de ensaios das amostras	129
Figura 67: Gráfico de coeficientes de absorção das amostras analisadas.....	137
Figura 68: Gráficos de coeficientes de absorção sonora aferidos para todas as amostras.....	138
Figura 69: Curvas Referência	140
Figura 70: Gráficos de comparação dos coeficientes de absorção sonora aferidos (α) para cada amostra e sua comparação com a curva referência do coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) para a classificação E.....	141
Figura 71: Gráficos de análise de significância da variável proporção cimento:bambu por banda de frequências	144
Figura 72: Gráficos de análise se significância da variável granulometria por banda de frequências	146
Figura 73: Gráficos de análise se significância da variável densidade por banda de frequências	148
Figura 74: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 1)	149
Figura 75: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 2)	150
Figura 76: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 3)	151
Figura 77: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 4)	151
Figura 78: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 5)	153
Figura 79: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 6)	154

Figura 80: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 7)	155
Figura 81: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 8)	155
Figura 82: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 9)	156
Figura 83: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 10)	157
Figura 84: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 11)	158
Figura 85: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 12)	158
Figura 86: Infográfico de apresentação do painel convencional de fibra de madeira e cimento e o painel convencional estudado de grânulos de bambu e cimento	159
Figura 87: Gráfico comparando os coeficientes de absorção sonora aferidos para as amostras deste estudo e de painel de lã de madeira e cimento	161
Figura 88: Gráfico comparando os coeficientes de absorção sonora aferidos para as amostras deste estudo de painel aglomerado de bambu e resina.....	162
Figura 89: Localização da Escola do Futuro do Estado de Goiás em Artes Basileu França	164
Figura 90: Curva do tempo ótimo de reverberação conforme Bolt e Beraneck and Newman	164
Figura 91: Planta de layout e imagens 3D do auditório sem intervenção acústica	166
Figura 92: Gráfico de Tempo de Reverberação calculado para o auditório sem intervenção	168
Figura 93: Diagrama de proposta de sistema de execução das nuvens acústicas de painéis de bambu-cimento.....	170
Figura 94: Diagrama de proposta de sistema de execução do revestimento acústico de painéis de bambu-cimento.....	171
Figura 95: Diagrama paginação de painéis conforme as amostras selecionadas	172
Figura 96: Gráfico de Tempo de Reverberação calculado para o auditório após a aplicação dos painéis de bambu-cimento	173
Figura 97: Esquema de instalação das camadas de absorção de acordo com as bandas de frequência de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz	175
Figura 98: Resultados de cálculo do Tempo de Reverberação para o Auditório	176
Figura 99: Diagrama de etapas de produção do painel de bambu e cimento	177

Figura 100: Apresentação do procedimento de produção de painéis de bambu e cimento para absorção sonora.....	178
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos de classificação de desempenho de materiais absorvedores de som .	24
Tabela 2: Dados de pegada de carbono para materiais de absorção sonora convencionais	28
Tabela 3: Comparação dos impactos ambientais dos materiais acústicos naturais e tradicionais.....	49
Tabela 4: Propriedades de materiais absorvedores minerais e biomassas	54
Tabela 5: Propriedades das amostras de fibras naturais	55
Tabela 6: Características Porosimétricas de amostras de Painel.....	59
Tabela 7: Características das partículas vegetais ($\alpha_{\max}$: coeficiente máximo de absorção sonora, ρ_v : densidade da amostra, ϕ_{inter} : porosidade interpartícula, ϕ_{intra} : porosidade intrapartícula, ϕ_{tot} : porosidade total, ρ_p : densidade de partículas, ρ_s : densidade da estrutura)	62
Tabela 8: Porcentagem de celulose, hemicelulose e lignina e extrativos de madeira dura Mala e fibras de coco	65
Tabela 9: Resultados do NRC e coeficiente médio de absorção sonora para cada faixa de frequência das espécies de madeira dura Mala e fibras de coco com desvio padrão.	65
Tabela 10: Informações de resistividade do fluxo de ar e parâmetros de estrutura de tecidos PHP alcalinizados.....	66
Tabela 11: Avaliação das características acústicas do concreto de cânhamo.....	69
Tabela 12: Principais propriedades dos materiais estudados neste trabalho e suas medidas de absorção acústica em bandas de um terço de oitava.	70
Tabela 13: Densidades de compósitos relativas ao uso destinado	80
Tabela 14: Comparação de estoques de biomassa e carbono de bambu em vários países.	84
Tabela 15: Comparação com outros sistemas de uso da terra em várias zonas ecológicas em Gana	84
Tabela 16: Dimensões de fibras de espécies de bambu.....	93
Tabela 17: Composição química de espécies de Bambu	95
Tabela 18: Teste Duncan de propriedades físicas	97
Tabela 19: Resultados das análises físico-químicas das partículas lignocelulósicas	97
Tabela 20: Teor de sacarídeos solúveis em água e Ácido carboxílico nas aparas de bambu tratadas com Diferentes concentrações de álcalis	101
Tabela 21: Propriedades Mecânicas do Bambu Portland Painel de Partículas de Cimento Tratado com Diferentes Concentrações de álcalis	101
Tabela 22: Propriedades físicas e mecânicas para painéis de bambu e cimento em diferentes proporções.....	104

Tabela 23: Compilado de dados de desempenho físico e mecânico para painéis de cimento e bambu	106
Tabela 24: Propriedades Mecânicas do Bambu Portland Paineis de Partículas de Cimento com diferentes aditivos.....	107
Tabela 25: Planejamento experimental	112
Tabela 26: Planejamento experimental	130
Tabela 27: Coeficientes de absorção sonora da amostra 1	131
Tabela 28: Coeficientes de absorção sonora da amostra 2	131
Tabela 29: Coeficientes de absorção sonora da amostra 3	132
Tabela 30: Coeficientes de absorção sonora da amostra 4	132
Tabela 31: Coeficientes de absorção sonora da amostra 5	133
Tabela 32: Coeficientes de absorção sonora da amostra 6	133
Tabela 33: Coeficientes de absorção sonora da amostra 7	134
Tabela 34: Coeficientes de absorção sonora da amostra 8	134
Tabela 35: Ordem de classificação dos materiais absorvedores conforme ISO 11654:1997	140
Tabela 36: Fatores adotados no planejamento fatorial	142
Tabela 37: Requisitos de determinação do TR ideal DIN 18041:2016	165
Tabela 38: Dados de dimensionais do ambiente antes da intervenção	166
Tabela 39: Tempo de Reverberação Ideal para o Auditório	167
Tabela 40: Coeficientes de absorção sonora adotados para as superfícies do auditório sem intervenção	167
Tabela 41: Coeficientes de absorção das amostras selecionadas	168
Tabela 42: Área de aplicação dos materiais e seus coeficientes de absorção sonora	172
Tabela 43: Tempo de Reverberação Ideal para o Auditório	173
Tabela 44: Cálculo da distância ideal entre o absorvedor e a parede rígida.....	174

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
---------------------	----

1.1 Contextualização.....	18
1.1.1 Demanda por qualidade acústica nos espaços.....	18
1.1.2 Acústica e Construção Civil no Contexto Brasileiro	21
1.1.3 Pesquisas em desenvolvimento de produtos de absorção sonora, responsabilidade ambiental e o uso da Biomassa	22
1.2 Justificativa	25
1.2.1 Materiais absorvedores convencionais e o aquecimento global.....	25
1.2.2 O potencial do bambu	28
1.2.2 O cimento como ligante.....	30
1.2.3 Metodologia adotada.....	32
1.3 Objetivos.....	33
1.3.1 Objetivo Geral.....	33
1.3.2 Objetivos específicos	33
2. REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1 Relevância, características e aplicação de componentes com fins de absorção sonora	35
2.1.1 Condicionamento de recintos.....	36
2.1.2 Absorvedores sonoros	39
2.2 Painéis aglomerados de biomassa como alternativa sustentável na produção de materiais acústicos.....	47
2.2.1 O contexto de busca por tecnologias sustentáveis e as deficiências de absorvedores acústicos fibrosos tradicionais	47
2.2.2 Potencial da adoção de biomassa como matéria-prima para componentes de absorção sonora.....	51
2.3 Painéis aglomerados de cimento e matéria-prima lignocelulósica e suas características.....	71
2.3.1 Início da adoção de aglutinante hidráulico na produção de painéis aglomerados através dos painéis cimento-madeira	71
2.3.2 Considerações sobre as variáveis na produção de painéis de biomassa e madeira com o cimento como aglutinante	72
2.4 O bambu como matéria-prima promissora	83
2.4.1 O bambu como aliado no combate às emissões de CO ₂	84
2.4.2 Potencial econômico do bambu	87
2.5 Considerações sobre as variáveis adotadas no estudo	94
2.5.1 Definição da espécie	94

2.5.3 Aglutinante e aditivo	103
2.5.4 Granulometria e densidade	108
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	111
3.1 Planejamento Experimental	111
3.2 Coleta da Matéria-Prima e Caracterização da Espécie	113
3.2.1 Processamento da Biomassa	116
3.2.2 Classificação da biomassa	116
3.2.3 Tratamento das partículas	118
3.3 Produção dos corpos de prova	121
3.3.1 Sistema de prensagem	121
3.3.2 Produção dos painéis e dos corpos de prova	123
3.4 Caracterização física dos corpos de prova	124
3.4.1 Caracterização de variações dimensionais	124
3.4.2 Caracterização da densidade aparente	125
3.5 Caracterização dos coeficientes de absorção sonora	126
4. RESULTADOS	130
4.1 Apresentação dos dados de absorção sonora	130
4.2 Verificação da viabilidade da aplicação do material desenvolvido para fins de absorção sonora	135
4.2.1 Classificação das amostras conforma a ISO 11654:1997	139
4.3 Análise Estatística	142
4.4 Análise qualitativa das amostras	149
4.5 Estudos de aplicação	162
4.5.1 Projeto de condicionamento acústico Auditório do complexo da Escola do Futuro do Estado de Goiás em Artes Basileu França – EFGABF	163
4.5.2 Projeto de cartilha de instrução de produção dos painéis de bambu e cimento	176
5. conclusão	178

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.1.1 Demanda por qualidade acústica nos espaços

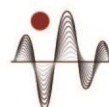
A qualidade acústica dos recintos é muito relevante para as relações de comunicação e atividades humanas rotineiras. Um exemplo significativo se dá no processo de ensino-aprendizagem, onde a inteligibilidade é essencial. Pinheiro et al, (2017) declaram que o ruído de fundo ou ambiental dificulta ou impede a concentração e compreensão dos conteúdos transmitidos. De modo a atrair a atenção dos ouvintes o professor

reage com a elevação da sua intensidade vocal, o que implica de forma preponderante no prejuízo da sua qualidade vocal assim como da performance de atenção dos alunos.

O conforto acústico extrapola a questão de saúde e atinge âmbitos mais subjetivos como a estética dos ambientes e a performance dos usuários nas atividades que executam. Costa e Santos (2019) indica que a partir da ótica do design de serviços a estética ambiental é preponderante na tomada de decisão do consumidor pela permanência no espaço e consequentemente efetuação do ato da compra.

Após a pandemia que ocorreu no ano de 2020, houve uma popularização massiva de produção e consumo de conteúdo digital. Inclusive os ambientes que sediam as relações de trabalho migraram em grande parte para o virtual. A necessidade de qualidade acústica para comunicação e produção de conteúdo levou a demanda por conforto acústico para o cotidiano geral das pessoas.

As implicações do ruído para a saúde humana são reconhecidas, e cada vez mais tornam-se um fator importante nas relações sociais, de trabalho e consumo. Nesse sentido a acústica aplicada aos espaços e os materiais que dão suporte a ela ganham protagonismo.



Nos recintos a percepção acústica é resultado do som direto da fonte ou fontes, e das reflexões indiretas de superfícies e outros objetos. Tanto para o som direto quanto para as reflexões as propriedades das superfícies das paredes, piso e teto são determinantes na qualidade acústica.

O fenômeno da propagação sonora em recintos fechados está representado esquematicamente na figura 1. As flechas com linhas preenchidas representam as primeiras reflexões do som após a emissão pela fonte, chamadas reflexões diretas. Já as flechas com linha pontilhada indica as reflexões indiretas, que a onda sonora continua a efetuar no espaço após a fonte ser cessada até que a energia decaia e seja dissipada.

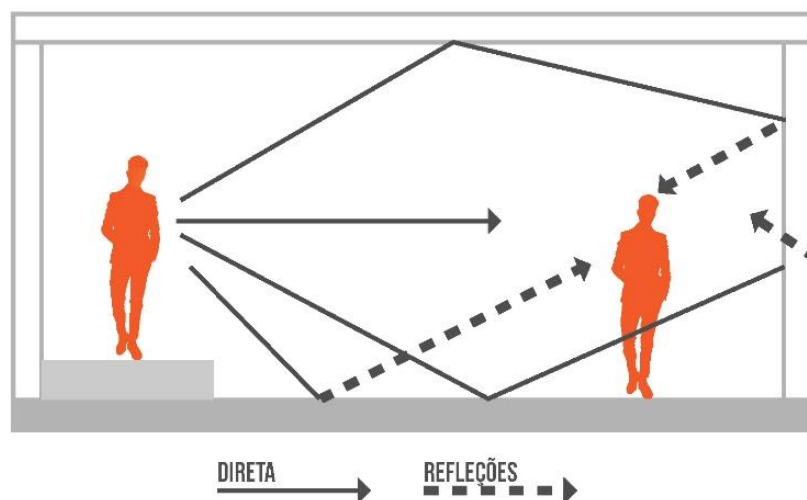
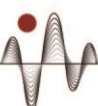


Figura 1: Diagrama de ilustração do efeito da propagação sonora direta e por reflexão em recintos fechados

Fonte: Fonte: Elaboração própria

Ao incidir sobre uma superfície a onda sonora tem parte de sua energia refletida pela superfície e parte de sua energia é absorvida pelo material. A figura 2 ilustra o mecanismo de reflexão e absorção da energia sonora.



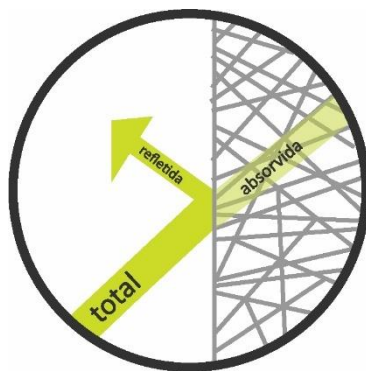


Figura 2: Esquema simplificado do mecanismo de reflexão e absorção da energia sonora

Fonte: Fonte: Elaboração própria

Quanto mais energia tem as ondas que são refletidas para o interior do ambiente mais ruído de fundo é gerado, o que pode implicar déficit de inteligibilidade, clareza, entre outros fatores. A estratégia adotada é revestir as superfícies com materiais que possam cumprir o papel de absorver parte da energia das ondas sonoras incidentes nos espaços e melhorar a qualidade acústica do espaço.

A fenômeno da absorção sonora nos materiais se dá através da conversão da energia sonora em energia térmica. As ondas sonoras precisam percorrer por materiais de porosidade aberta e através de sucessivas reflexões em seu interior e ressonância da estrutura que passa a vibrar a energia sonora é dissipada em energia térmica. A figura 3 ilustra o mecanismo de perda energética da onda sonora ao percorrer o material poroso, o fluxo laranja indica a incidência da onda sonora e os símbolos em vermelho indicam os efeitos de sucessivas reflexões e ressonância da estrutura porosa.

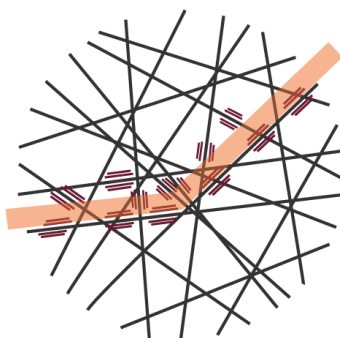
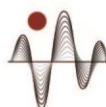


Figura 3: Esquema simplificado do mecanismo de reflexão e absorção da energia sonora

Fonte: Fonte: Elaboração própria



1.1.2 Acústica e Construção Civil no Contexto Brasileiro

Além do novo comportamento da sociedade digital, outros fatores contribuíram para popularizar a necessidade de qualidade acústica de ambientes internos nas edificações brasileiras como por exemplo as normas, ABNT NBR 10152:2017 que define os níveis recomendados de ruído em diferentes ambientes internos, visando conforto acústico para os usuários e a ABNT NBR 12179:1992 que estabelece critérios de medição e definição de Tempo de Reverberação ideal, apresentando requisitos para qualidade acústica interna aos recintos e se encontra em revisão.

Por se tratar de um país com dimensões continentais, o Brasil apresenta desafios em relação ao acesso a produtos e serviços em diversas regiões. A figura 3 ilustra o cenário da distribuição geográfica das empresas especializadas em acústica no país através de consultorias, laudos, distribuição de produtos e execução com base no banco de dados de associados da Associação Brasileira para a Qualidade da Acústica - Proacústica.

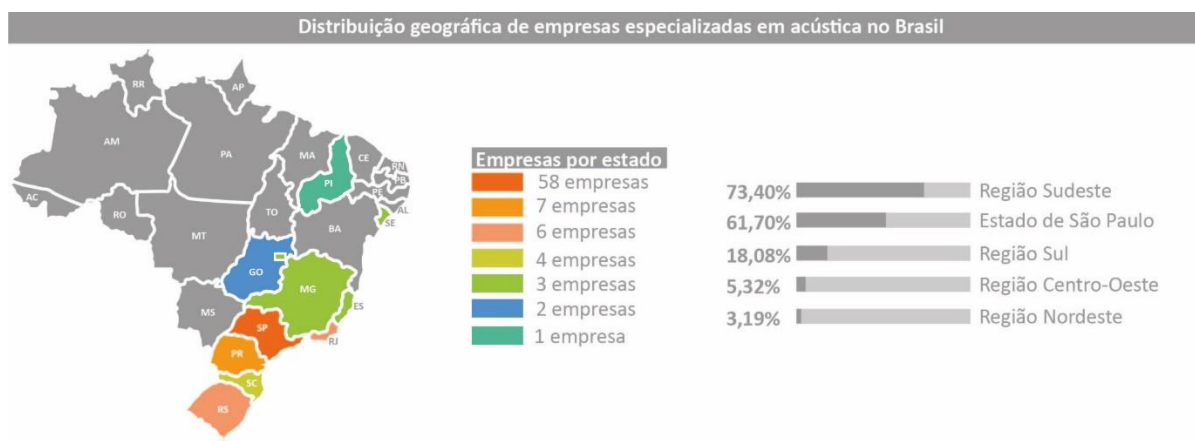
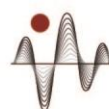


Figura 4: Diagrama de distribuição geográfica de empresas especializadas em acústica no território brasileiro

Fonte: Proacústica (2025) e elaboração própria

A maior concentração de empresas do setor se dá na região sudeste, com maior presença no Estado de São Paulo. As regiões Centro-Oeste e Nordeste apresentam um quantitativo pouco expressivo de agentes do setor e na região norte do país não houve registro. Das 94 empresas registradas, em torno de 31,9% são dedicadas a



comercialização e distribuição de materiais com propriedades acústicas, sendo que com exceção de iniciativas no Distrito Federal, quase todas elas são sediadas na região sudeste e sul do país.

1.1.3 Pesquisas em desenvolvimento de produtos de absorção sonora, responsabilidade ambiental e o uso da Biomassa

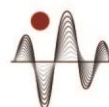
Na última década do século XIX Sabine, no empenho de aprimorar os auditórios Fogg Lecture Room e Sanders Theatre em Harvard, concebe de forma empírica uma relação matemática entre o tempo de reverberação e as características do recinto como o volume e a capacidade de absorção sonora dos materiais previstos nesse ambiente. (COX; D'ANTONIO, 2016).

Desde então têm sido empregado esforços ao estudo das propriedades de absorção sonora em materiais. Ao longo deste tempo, uma biblioteca considerável de coeficientes de absorção sonora foi tabulada com base em padrões de medição normatizados e um entendimento razoável de como os absorvedores devem ser projetados e empregados foi alcançado. (COX; D'ANTONIO, 2016).

Atualmente ainda há muito o que avançar no desenvolvimento e caracterização de novos materiais acústicos de modo que o acesso possa ser ampliado e as questões ambientais possam ser enfrentadas com devido rigor.

O clima e a ecologia sofrem, desde a revolução industrial, impactos de efeitos diversos devido ao aquecimento global. Reconhecendo a importância do tema, países em todo o mundo chegaram a acordos políticos em torno do consenso da necessidade de se controlar o CO₂ atmosférico, como a conclusão e assinatura da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris. (ZENG *et al.*, 2023)

No contexto de busca por estabilizar a temperatura, ganha evidência as Tecnologias de Emissões Negativas (NETs) que removem dióxido de carbono da atmosfera e configuram uma alternativa estratégica para atingir as metas climáticas internacionais.



A ótica transversal da discussão sobre NETs está intimamente relacionada com a emergência de um novo conjunto de cenários de mitigação das mudanças climáticas a partir de modelos de avaliação integrados (IAMs) que apresentam BECCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono) como uma opção explícita de remoção de dióxido de carbono no portfólio de tecnologia. (CHEW et al., 1992)

A compilação das chamadas pegadas de carbono é um método que dá subsídios para as empresas traçarem estratégias de modo a cumprirem suas responsabilidades de reduzir as emissões de CO₂. Quantificar as emissões de dióxido de carbono ajuda a encontrar maneiras de reduzi-las durante as fases de projeto, produção e fornecimento de produtos. Além disso permite um maior protagonismo dos consumidores que através desses dados podem pesquisar e comprar produtos ou serviços de baixo carbono.

O potencial de sequestro de carbono dos produtos florestais é reconhecido, e recentemente, têm-se estudado a pegada de carbono resultante de sua aplicação na construção civil, em diferentes escalas e nas perspectivas nacional e regional. Os produtos de bambu com função de estoque de carbono podem ser uma chave na concepção de NETs.

Painéis aglomerados de madeira de média densidade têm propriedades acústicas reconhecidas e aplicação em grande escala no mercado do setor de condicionamento acústico de recintos. A vanguarda da pesquisa, no entanto, se dedica a investigar novas matérias-primas lignocelulósicas, biomassa, com potencial de originar componentes com propriedades acústicas.

Um exemplo é a caracterização empírica de partículas de biomassas diversas. Iannace (2017) avaliou os coeficientes de absorção e valores de resistividade ao fluxo de ar para cada amostra compostas somente de biomassa, variando a espessura em 40mm, 80mm e 120mm. Na figura 5 são apresentadas as biomassas que foram objeto de análise de absorção acústica in natura, a fim de identificar o potencial acústico das mesmas para a fabricação de absorvedores granulares.

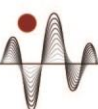


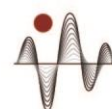


Figura 5: Materiais testados: (a) palha, (b) feno, (c) broom (d) plant litter, (e) aparas de madeira de castanheiro de grão grosso e (f) aparas de madeira de choupinho de grão fino.
Fonte: Iannace (2017)

A norma que classifica os materiais de absorção sonora em classes conforme seu coeficiente de absorção é a ISO 11654:1997, Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption. Essa norma fornece um método padronizado para avaliar e classificar materiais usados para absorção sonora em ambientes internos. A classificação baseia-se no coeficiente de absorção acústica ponderado (α_w), que varia de 0 (nenhuma absorção) a 1 (absorção total).

Tabela 1: Requisitos de classificação de desempenho de materiais absorvedores de som

Classe	Intervalo do Coeficiente de Absorção Ponderado (α_w)	Nível de Desempenho Acústico
--------	--	------------------------------



A	0,90 – 1,00	Altíssimo
B	0,80 – 0,85	Muito alto
C	0,60 – 0,75	Alto
D	0,30 – 0,55	Médio
E	0,15 – 0,25	Baixo
Não classificado	< 0,15	Muito baixo / não classificado

Fonte: ISO 11654 (1997)

O desempenho das biomassas se revelou-se promissor pois as amostras apresentaram em sua grande maioria coeficientes acima de 0,4 nas frequências acima de 400 Hz, sendo considerado de médio desempenho mesmo em médias frequências.

1.2 Justificativa

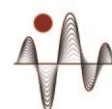
1.2.1 Materiais absorvedores convencionais e o aquecimento global

A pegada de carbono, é um indicador que mensura o total de gases de efeito estufa (GEE) gases como CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), HFCs, entre outros. A emissão dos gases é realizada direta e indiretamente por ações individuais, atividades empresariais, fabricação de produtos, execução de eventos ou serviços. Normalmente o índice é expresso em toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e).

O quadro 1 descreve documentos técnicos e seus respectivos escopos, que determinam as diretrizes para a quantificação de emissão de gases de efeito estufa, em alguns casos voltados especificamente para a caracterização de produtos destinados à construção civil como o GHG Protocol – Product Standard e a norma europeia EN 15804+A2:2019.

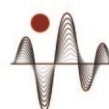
Quadro 1: Documentos técnicos que endossam o cálculo de pegada de carbono

Documento técnico:	Escopo:
ISO 14067:2018	ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.



	Define princípios e requisitos para quantificação da pegada de carbono de produtos (PCP). Inclui uso de dados primários e secundários, alocação, incertezas e comunicação.
ISO 14040:2006	ISO 14040:2006. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Fundamenta a Análise do Ciclo de Vida (ACV), método base para cálculo de impactos ambientais, incluindo GEE. Usada em conjunto com a ISO 14067.
ISO 14044:2020	ISO 14044:2020. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Especifica requisitos e fornece diretrizes para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).
GHG Protocol – Product Standard	Guia internacional desenvolvido pelo World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Documento voltado para contabilizar emissões ao longo do ciclo de vida de produtos. Os procedimentos são compatíveis com a ISO 14067:2018.
PAS 2050:2011 (BSI)	Especificação britânica para avaliação de ciclo de vida de GEE associados a bens e serviços.
BS EN 15804:2019	BS EN 15804:2019. Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products. Norma europeia que estabelece regras básicas para categorias de produtos (PCR) para declarações ambientais para qualquer produto e serviço de construção. Inclui as regras para o cálculo do Inventário do Ciclo de Vida e da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.
Fonte: ISO 14067(2018); ISO 14040 (2006); ISO 14044 (2020); WRI e WBCSD (2025); PAS 2050 (2011); BS EN 15804 (2019)	

O quadro 2 apresenta de forma resumida alguns dos principais materiais convencionais aplicados para absorção sonora na construção civil assim como uma breve descrição dos processos de produção. Observa-se que os materiais, em geral, componentes exigem alta tecnologia em sua produção, além de adotar em sua maioria matérias-primas de origem não renovável. Há que se considerar o alto gasto energético em alguns procedimentos como a fundição em altas temperaturas, necessária para fabricação de materiais como lâ de vidro e lâ de rocha, por exemplo.

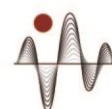


Quadro 2: Materiais convencionalmente adotados para absorção sonora na construção civil

Material Absorvente	Matérias-Primas Principais	Resumo do Processo de Produção
Lã de vidro	Areia sílica, carbonato de sódio, calcário, vidro reciclado	Mistura dos materiais é fundida a ~1400 °C. A massa é fibrada por centrífugas ou sopragem, formando mantas ou painéis. Recebe ligantes e é curada em estufas.
Lã de rocha	Basalto, diabásio, escória de alto-forno	As rochas são fundidas a ~1500 °C e fibradas por centrífugas. As fibras são coletadas, compactadas, aditivadas com ligante e curadas termicamente.
Espuma de poliuretano	Polióis, isocianatos, agentes de expansão	Reação química dos componentes forma uma espuma flexível ou rígida. A mistura é expandida, curada e cortada em blocos ou moldada em formas específicas.
Espuma melamínica	Melamina, formaldeído	Polimerização da melamina com formaldeído em solução aquosa, seguida de expansão e reticulação térmica para formar espuma com estrutura celular aberta.
Painéis de madeira mineralizada	Fibras ou partículas de madeira, cimento Portland, água	A madeira é triturada e mineralizada com solução de cimento e água. A mistura é prensada em formas e curada, formando painéis rígidos e leves.
Painéis de lã de PET	Garrafas PET recicladas	O PET é lavado, triturado, derretido e fibrado. As fibras são compactadas e termofixadas em forma de mantas ou painéis acústicos.
Gesso perfurado com lã mineral	Gesso, papel cartão, lã de vidro ou rocha	Chapas de gesso são perfuradas e acopladas a mantas de lã mineral, que são coladas ou encaixadas por trás das perfurações, criando um sistema acústico passivo.

Fonte: Fonte: Elaboração própria

A United States Environmental Protection Agency (EPA) calculou as intensidades de emissão de carbono através de dados do ano de 2019 para as fábricas de fibra de vidro sediadas nos Estados Unidos com base nas emissões diretas totais. Os dados são oriundos de fábricas de fibra de vidro reportadas ao Programa de Relatórios de Gases de Efeito Estufa (GHGRP) da EPA dos EUA e refletem as emissões diretas do uso de combustível no local e das emissões do processo. O relatório identificou que a emissão de CO₂ se dá no intervalo de 0.381 CO₂e por tonelada de vidro, considerada baixa emissão a 0.748 CO₂e, considerada alta emissão. (EPA, 2022)



A tabela 2 apresenta dados de pegada de carbono para materiais convencionais aplicados para absorção sonora na construção civil. De acordo com os dados apresentados as espumas de poliuretano são as que mais geram passivos ambientais. Os painéis de madeira que adotaram a resina como ligante se aproximaram do impacto gerado pelos materiais inorgânicos. A performance obtida com painéis de madeira mineralizada gerou impacto negativo, já os indicando o potencial de mitigação de danos ambientais de painéis de biomassa em base cimentícia.

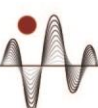
Tabela 2: Dados de pegada de carbono para materiais de absorção sonora convencionais

Material	Pegada de Carbono (kg CO ₂ e/kg)	Referência bibliográfica
Lã de vidro	1,75 kg CO ₂ e	Rockwool (2023)
	0,6 a 1,2 kg CO ₂ e	Grazieschi et al (2021)
Lã de rocha	1,4 a 4,2 kg CO ₂ e	Grazieschi et al (2021)
Espuma de poliuretano	2,95 e 3,56 kg CO ₂ e	Getzner Werkstoffe (2019)
Lã de PET	3,68 kg CO ₂ e (Material virgem)	Armacell (2025)
	1,30 kg CO ₂ e (Material reciclado)	Armacell (2025)
Painéis de madeira mineralizada	Negativa (Nota 1)	The Beck Group (2023)
Painéis de madeira de resina formaldeído	1,259 kg CO ₂ e	Athena Sustainable Materials Institute (2022)

Nota 1: Esse desempenho foi obtido através da utilização de cimento com menor intensidade de carbono chamado FUTURECEM. De acordo com a Troldekt, o material é feito a partir de um processo patenteado pela Aalborg Portland: ele combina argila calcinada com carga de cal, substitui uma grande parte do clínquer queimado no cimento e reduz a pegada de carbono do cimento em 30%.

Fonte: Rockwool (2023); Grazieschi et al (2021); Getzner Werkstoffe (2019); The Beck Group (2023); Athena Sustainable Materials Institute (2022)

1.2.2 O potencial do bambu



O bambu é uma gramínea amplamente presente no território nacional, de cultivo perene e rápido crescimento. O quadro 3 apresenta de forma resumida as aplicações que o bambu pode ter em vários setores importantes da economia desde a fase do cultivo através do sequestro de CO₂ e controle de erosões. Após as fases de processamento, a produção de madeira laminada colada e painéis aglomerados de partículas são de grande valia para a construção civil. São inúmeras as aplicações da planta, o que implica que a sua adoção pode fomentar uma complexa cadeia produtiva.

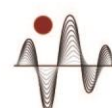
Quadro 3: Descrição simplificada das possibilidades de aplicação do bambu conforme os setores da economia

Setor da Economia:	Exemplos de aplicação:
Construção civil	Estruturas, madeira laminada, painéis laminados, painéis aglomerados, pisos
Design e mobiliário	Móveis, utensílios
Têxtil e vestuário	Fibra de celulose regenerada, tecidos respiráveis e antibacterianos
Produção de alimentos	Fertilizante – Biochar, regeneração de áreas de erosão
Energético	Biomassa, carvão vegetal, biogás e etanol a partir do resíduo lignocelulósico
Alimentos	Brotos comestíveis ricos em fibra, antioxidantes e baixa caloria
Papel e celulose	Produção de papel
Cosmético e farmacêutico	Extratos com sílica, antioxidantes e propriedades anti-inflamatórias

Fonte: Louredo et al (2025)

A China é o maior país exportador de pisos de bambu no mundo. Em 2019, Gu et al., (2019) publicaram uma pesquisa de avaliação da pegada de carbono de processos de produção de pisos de bambu para uso em área externa. Os resultados demonstraram que para produzir 1 m³ de piso de bambu, ao subtrair a pegada pelo estoque de carbono infere-se que a pegada de carbono da produção dos pisos é de - 14,89 kg CO₂ eq, ou seja, emissão negativa.

Apesar do potencial de sequestro de carbono do bambu, poucos estudos na área de ciências aplicadas se dedicaram a verificar o potencial de painéis aglomerados de partículas de bambu para a utilização em absorvedores sonoros.



Em 2012 foi realizado um estudo que atualmente ainda é muito referenciado por abordar de forma pioneira essa temática. Avaliou-se o desempenho de painéis aglomerados de bambu de média densidade da espécie *Dendrocalamus Asper*, utilizando como adesivo o diisocianato de difenilmetano [MDI]. (KARLINASSARI et al., 2012)

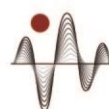
As pesquisas realizadas em torno de painéis aglomerados de partículas sejam eles unicamente de bambu ou com adição de partículas de outras espécies são de forma geral dedicados a avaliação das propriedades dos painéis aglomerados que utilizam como aglutinante resinas termorrígidas como ureia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído. (BRITO et al., 2020); (DE MELO et al., 2014).

No entanto, os aglomerantes termorrígidos acrescentam um gasto energético significativo na produção de painéis através do procedimento de prensagem a quente. Podem apresentar fragilidades em relação a cura visto que o período necessário para a cura do adesivo no interior do painel pode implicar em degradação das partículas superficiais, além de darem origem a complexas plantas industriais.

1.2.2 O cimento como ligante

O cimento é um aglomerante hidráulico e um dos materiais mais consumidos no mundo. Em relação a produção de painéis aglomerados, apresenta vantagens como menor gasto energético na produção e cura dos painéis devido a prensagem a frio, etapa com maior emissão de CO₂, alternativa para a emissão de formaldeído e atuação como proteção das partículas contra ataques xilófagos.

Sua cadeia produtiva incorre em um gasto energético significativo, principalmente na fabricação do clínquer. Buscando atuar de modo a minimizar os impactos ambientais e alinhar-se as estratégias de desenvolvimento sustentável a indústria cimenteira têm lançado mão de combustíveis alternativos em suas linhas de produção, sendo eles, resíduos sólidos urbanos e industriais assim como resíduos oriundos do sistema de saneamento básico.



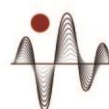
Estima-se que 1% de aumento na substituição dos insumos para energia térmica resulta numa redução de 2 a 3 kg de CO₂ por tonelada de cimento, além de contribuir de maneira significativa para um grande problema urbano que é a destinação de resíduos. (CHATTERJEE; SUI, 2019)

A indústria cimenteira brasileira apresenta um dos menores índices de emissão específica de CO₂ no mundo, graças a ações mitigadoras que vêm sendo implementadas pelo setor nas últimas décadas. Enquanto a produção de cimento aumentou 273% entre 1990 e 2014 (de 26 Mt para 71 Mt), a emissão total cresceu apenas 223% nesse intervalo, em virtude da redução de 18% das emissões específicas (de 700 kg CO₂/t cimento para 564 kg CO₂/t cimento). (VISEDIO; PECCHIO, 2019)

Ao se tratar de compósitos de madeira e cimento, há evidências de que o biocompósito de bambu e cimento se configura como um material que não gera passivos ambientais em relação ao clima. Araújo et al (2025) conduziram uma avaliação de bioconcretos com adição de biomassa. Em adições de 50% do volume da mistura, o bioconcreto feito de biomassa de eucalipto obteve uma pegada de carbono de -109 kg CO₂-eq./m³. O compósito o produzido a partir do bambu gerou um impacto negativo ainda maior, de -113 kg CO₂-eq./m³.

Ressalta-se que assim como bambu, o cimento é um material que serve como base para a indústria da construção civil brasileira devido a suas diversas aplicações desde fundações, estruturas, elementos de vedação, elementos de cobertura, revestimentos, pisos entre outros.

Nesse contexto a presente tese se dedica à investigação na área de acústica e materiais alternativos através do desenvolvimento de painéis aglomerados de partículas de bambu como biomassa e cimento como aglutinante. Os painéis tem por objetivo serem aplicados na construção civil para fins de absorção sonora e, portanto, sem aplicabilidade estrutural.



1.2.3 Metodologia adotada

A metodologia de construção do estudo o qual se dedica esta tese foi organizada em quatro fases. A figura 6 apresenta um fluxograma das etapas de desenvolvimento metodológico.

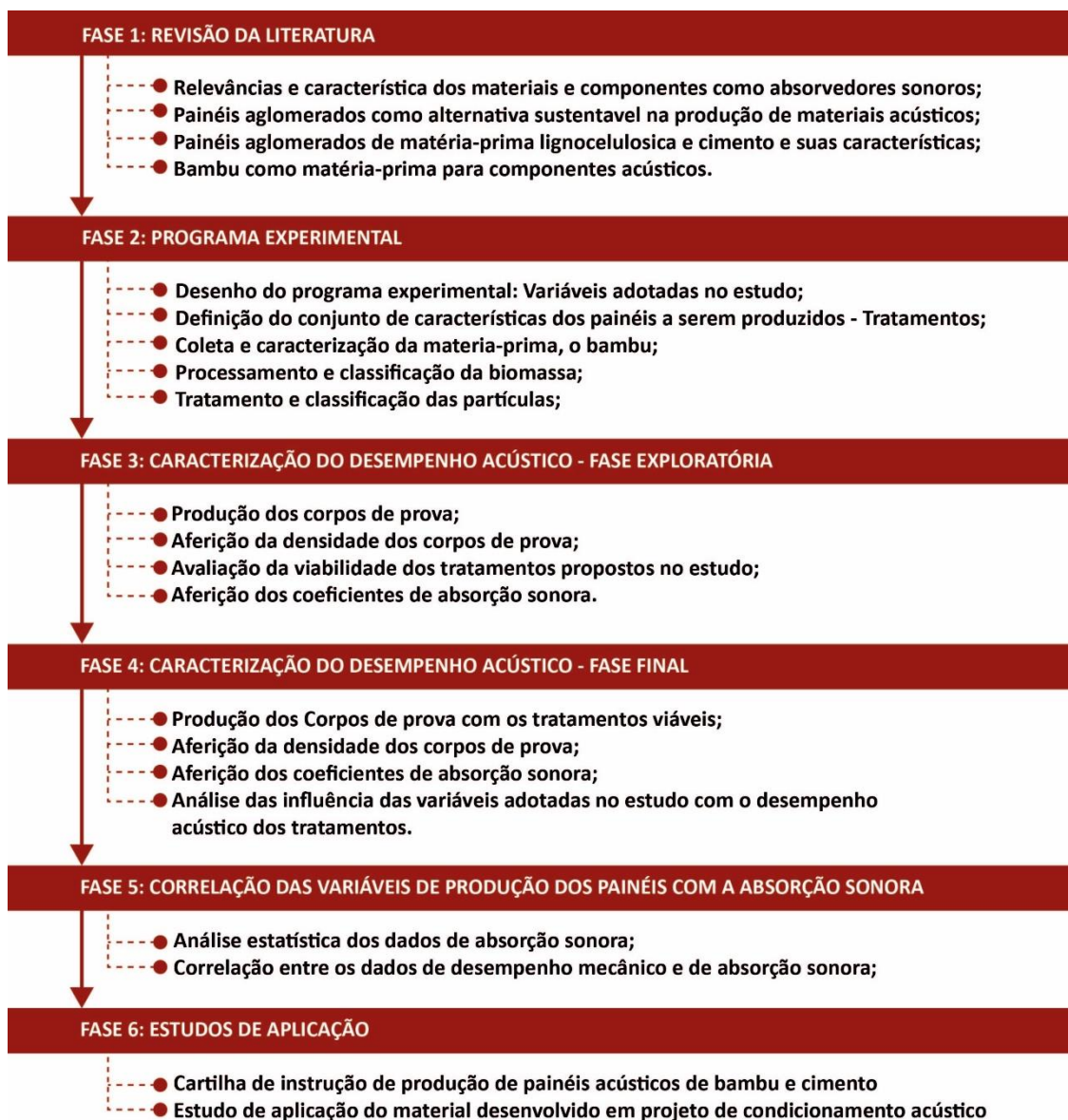
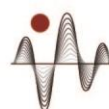


Figura 6: Fluxograma de metodologia de construção da tese

Fonte: Fonte: Elaboração própria

O estudo se iniciou com a revisão da literatura que endossou a elaboração do programa experimental. A execução do programa experimental se deu em duas fases. Na fase exploratória foram validados os procedimentos de fabricação e a viabilidade da produção dos painéis a partir dos compósitos propostos. Na fase final houve a



produção e avaliação dos corpos de prova de compuseram o planejamento experimental para a análise estatística.

Após a produção e ensaios os dados foram analisados e as correlações entre as propriedades de absorção sonora e as variáveis de composição do painel. Por fim, buscou-se elaborar estudos de aplicação do produto através de aplicação. Foi elaborada uma cartilha de instruções de produção dos painéis e o teste de aplicação dos painéis na elaboração de projetos acústicos.

1.3 Objetivos

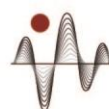
1.3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo experimental de desenvolvimento de painéis aglomerados adotando como matéria-prima partículas de *bambusa vulgaris* var. *vitatta*, não tratadas e tratadas com hidróxido de cálcio (NaOH). Como aglutinante Cimento Portland CPV-ARI, e como acelerador de pega Cloreto de Cálcio (CaCl_2). Investigar a influência da densidade, granulometria e tratamento das partículas e percentual de cimento na absorção sonora dos painéis, para incidência direta de acordo com a ISO 10534-2:2023. Analisar estatisticamente os dados de desempenho acústico de modo a identificar a influência de cada variável de produção do desempenho acústico dos painéis.

1.3.2 Objetivos específicos

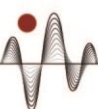
A. Verificar a viabilidade da produção de painéis aglomerados de *bambusa vulgaris* var. *vitatta* e cimento Portland CPV-ARI em procedimento simplificado de produção e cura a frio.

B. Verificar a influência da densidade na propriedade de absorção sonora dos painéis aglomerados de bambu e cimento.



- C. Verificar a influência da granulometria na propriedade de absorção sonora dos painéis aglomerados de bambu e cimento.
- D. Verificar a influência do percentual de cimento na propriedade de absorção sonora dos painéis aglomerados de bambu e cimento.
- E. Realizar estudo de aplicação do material desenvolvido em projeto de condicionamento acústico.
- F. Elaborar uma cartilha com instruções para a produção do material desenvolvido e disponibilizar para uso público.

2. REFERENCIAL TEÓRICO



2.1 Relevância, características e aplicação de componentes com fins de absorção sonora

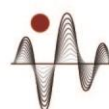
A audição é um dos principais sentidos de percepção. Ela auxilia ao indivíduo na leitura e identificação do ambiente em que está inserido e suas variações. Através dela podemos experimentar sensações agradáveis ou não, nos orientar em relação a caminhos a serem adotados e possíveis perigos a serem prevenidos.

Schafer (2001) define que paisagem sonora é qualquer campo acústico de estudo. Pode-se interpretar como paisagem sonora as características sonoras de qualquer ambiente, bem como podemos tratá-la a nível de composição musical ou mídias de comunicação. Os principais sons observados em uma dada localidade a conferem uma identidade acústica, podendo ser expressos de formas distintas, no entanto, sempre presentes naquele espaço acústico e servindo de instrumentos de sua caracterização.

Outro fator interessante de ser observado, é que a percepção sonora não está vinculada somente com a sensação de quantidade de energia acústica produzida pela fonte. Além da sensação de “volume” o usuário experimenta sensações em outras dimensões como de força, altura, rugosidade, características do timbre entre outros. (ACCOLTI, 2014)

Thompson (2004) descreve que após a revolução industrial o significado dos ruídos produzidos pelas máquinas adquiriu diferentes conotações subjetivas. Aqueles que viveram suas idades produtivas na transição drástica do período de industrialização do final do século XIX para o início do século XX encaravam o “barulho” das máquinas como um sinal positivo do progresso. Já aqueles que se desenvolveram no século XX, passaram a encarar esse “barulho” como um indicativo de baixa performance nas máquinas e equipamentos, como um gasto desnecessário de energia e, portanto, um inimigo do progresso.

Historicamente a preocupação com o conforto acústico é recente e começou a ganhar dimensões sociais no século XX. Em território norte-americano a adoção de



estratégias de minimização de ruído surgiu junto ao movimento de modernização na arquitetura. Além do aspecto funcional, os americanos buscaram alcançar um resultado estético nas soluções acústicas.

O condicionamento acústico realizado na torre de escritórios para a Sociedade do Fundo de Poupança da Filadélfia, o primeiro edifício moderno em grande escala na América, e o primeiro arranha-céu a ser construído no mundo é um exemplo emblemático. O edifício não era apenas arquitetura moderna de última geração, era também pioneiro em tecnologia acústica. Foi revestido em grande parte com materiais de absorção de som, reverenciados visualmente como um elemento crucial do interior moderno. A figura 7 apresenta imagens do edifício e seu interior. (THOMPSON, 2004)

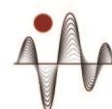


Figura 7: a) Edifício b) Espaço de escritórios. Ambos referentes ao Philadelphia Saving Fund Society Building, 1932. Arquivo PSFS, Caixa 3, Pasta: Open Office Espaço. Cortesia do Museu e Biblioteca Hagley.

Fonte: Thompson (2004) com intervenção da autora

2.1.1 Condicionamento de recintos

A problemática do ruído têm estado cada vez mais presente no cotidiano contemporâneo. Um exemplo amplamente conhecido é o prejuízo nas relações de ensino-aprendizagem. A comunicação oral sofre interferências do ruído, um fator competitivo com a voz do professor, que compromete a inteligibilidade da fala, sendo capaz de prejudicar tanto os alunos quanto os professores. Os professores necessitam aumentar seu volume de voz para serem compreendidos e, ao mesmo



tempo, o esforço dos alunos para compreender a mensagem falada é muito maior. (RABELO et al., 2014)

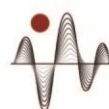
A qualidade da acústica de recintos é avaliada por parâmetros subjetivos e objetivos. Os parâmetros objetivos mais comumente avaliados para recintos destinados a palavra falada são o Nível de Pressão Sonora Equivalente (Leq), o Tempo e reverberação (TR), e o Índice de transmissão de fala (STI).

o Nível de Pressão Sonora Equivalente (Leq) corresponde à energia sonora média aferida ao longo do tempo. O Tempo e reverberação (TR), é o tempo que a energia de um campo sonoro reverberante estacionário leva para decair 60 dB, após a interrupção da fonte. Já o Índice de transmissão de Fala (STI) é a classificação métrica, variando entre 0 e 1, que representa a qualidade da transmissão da fala em relação à inteligibilidade de um canal de transmissão da fala.

A inteligibilidade da fala é a avaliação da proporção da fala que é compreendida e está atrelada a percepção clara das palavras. Carvalho (2010) argumenta que a inteligibilidade é uma das mais importantes características acústicas dos ambientes pois, indica o grau de entendimento das comunicações nos ambientes. Quando nos referimos à comunicação em um ambiente, a inteligibilidade é definida como inteligibilidade acústica da linguagem.

Quanto maior o tempo de reverberação, menor o STI. Isto acontece porque as reflexões fazem com que o som vivifique o ambiente. Ou seja, quando a palavra falada permanece muito tempo no ambiente, devido às múltiplas reflexões, as palavras seguintes são interpostas e não são claramente reconhecidas pelos ouvintes que recebem diversas sílabas ao mesmo tempo em seus ouvidos.

Entende-se como reverberação a permanência de um determinado som emitido em uma sala depois que sua emissão foi cessada. Essa permanência ocorre devido as reflexões sofridas pelas ondas sonoras nas superfícies que compõem os recintos. Essa propriedade pode ser utilizada a favor do aumento da inteligibilidade dos ambientes quando o prolongamento do som emitido se faz necessário. Isso ocorre



mais comumente em ambientes fechados aptos a abrigarem maior volume interno, tanto em dimensão, quanto em número de usuários.

Cada ambiente possui um tempo ótimo de reverberação conforme seu uso. Caso seja muito curto, a percepção dos sons emitidos se torna incipiente, ao passo que, quando muito longo incorre em sobreposição de sons prejudicando a inteligibilidade.

De acordo com Bistafa (2011), Wallace Sabine efetuou muitos estudos em recintos fechados e a partir das suas análises identificou-se uma relação intrínseca entre os índices de absorção dos materiais aplicados e a geometria interna do recinto. Assim como a absorção sonora, o tempo de reverberação varia conforme a frequência. A partir dessa conclusão, foi elaborada empiricamente a equação 1 para determinar o cálculo do tempo de reverberação:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{\sum (S_i \alpha_i)} \quad (1)$$

Onde:

T_{60} = Tempo de reverberação;

V = Volume interno do recinto em m^3 ;

A = Absorção total da sala em sabines;

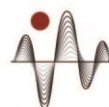
0,161 = constante de precisão;

S_i = Área da superfície do material em m^2 ;

α_i = coeficiente de absorção sonora do material;

O condicionamento adequado dos recintos consiste em promover boas condições de audibilidade, evitar que ruídos externos prejudiquem o entendimento das comunicações e evitar que os sons emitidos pela utilização do ambiente prejudiquem os espaços vizinhos. Para tratar acusticamente um recinto deve-se avaliar a locação do imóvel, os índices de pressão sonora interna máximos recomendados por norma, dos materiais que compõem as superfícies e dos objetos do interior, bem como sua arquitetura (volume do ambiente e seu formato, geometria).

As ações relativas à melhora do conforto acústico se fazem segundo algumas intervenções como: a distribuição equânime dos sons emitidos no recinto, com a utilização de superfícies refletoras, e a correção do tempo de reverberação através da aplicação de superfícies de absorção sonora.



Busca-se através materiais com propriedades de absorção sonora a regulação das reflexões sonoras do recinto, tornando o tempo de reverberação adequado ao uso proposto e consequentemente promover conforto sonoro e a inteligibilidade.

2.1.2 Absorvedores sonoros

A onda sonora é toda vibração ou onda mecânica gerada por um corpo quando vibra, pode ser caracterizada como a perturbação de partículas presentes no ar que se propaga a partir de estruturas vibrantes. É denominada som, quando perceptível pelo ouvido humano.

A propagação da onda sonora, ilustrada na figura 8, necessita de um meio material para ocorrer. Os diversos sons que ouvimos no cotidiano, apresentam a propagação mais representativa na forma de ondas esféricas. A velocidade de propagação da onda sonora é dada conforme o meio elástico, sendo que para o ar têm-se 340 m/s.

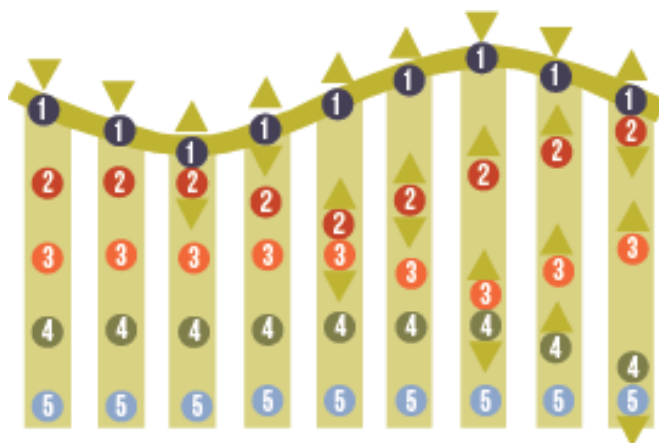
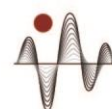


Figura 8: Ilustração da propagação da onda sonora.
Fonte: Carvalho (2010) adaptado

Ao se exercer pressão em meio elástico, têm-se como resultado oscilações cíclicas de pressão e depressão em determinados intervalos de tempo. Denomina-se frequência a quantidade de oscilações, ou ciclos de pressão e depressão por unidades de tempo (período). A figura 9 apresenta a representação gráfica da frequência sonora, onde têm-se que quanto mais oscilações por período, maior a frequência e mais agudo o som é percebido pelo ouvido humano.



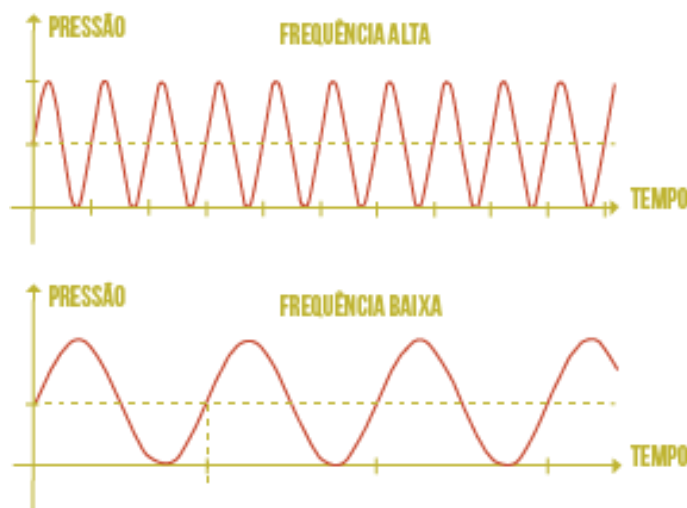


Figura 9: Ilustração da frequência sonora
Fonte: Carvalho (2010) adaptado

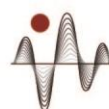
A frequência é descrita na unidade de medida denominada Hertz (Hz), que implica na quantidade de ciclos realizados em 1 segundo. A energia com a qual a onda sonora chega ao receptor é denominada intensidade sonora, sendo que esta característica não interfere na frequência do som. Os sons são perceptíveis, ou não, pelos seres humanos conforme sua frequência de acordo com o quadro 4.

Quadro 4: Classificação das ondas sonoras conforme a frequência

Infrasons	Abaixo de 20Hz	Não perceptíveis ao ouvido humano
Baixas frequências	De 20Hz a 200Hz	Sons graves
Médias frequências	De 200Hz a 2.000Hz	Sons médios
Altas frequências	De 2.000Hz a 20.000Hz	Sons agudos
Ultrasons	Acima de 20.000Hz	Não perceptíveis ao ouvido humano

Fonte: Carvalho (2010)

A onda sonora, ao incidir sobre qualquer material se comporta de quatro formas distintas ilustradas na figura 10 onde: parte da energia incidente é absorvida pelo obstáculo, parte é propagada através dele, parte é transmitida por meio do material (via aérea) e o restante é refletido para o ambiente de onde a fonte originou as ondas.



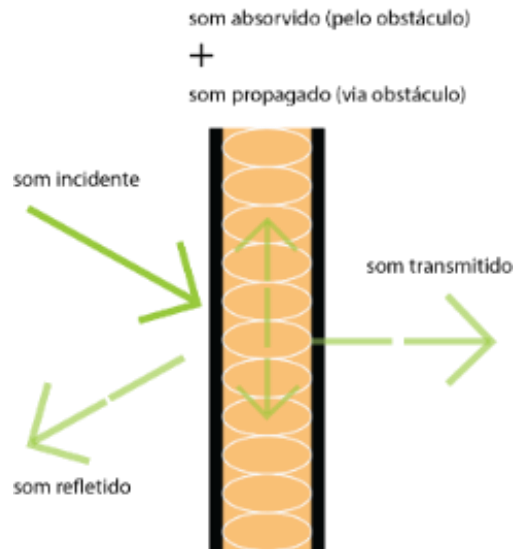


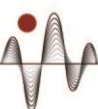
Figura 10: Representação do comportamento da onda sonora em contato com o material
Fonte: Elaboração própria

A lei de conservação de energia afirma que a mesma não pode ser criada nem destruída, no entanto, pode sofrer alteração de forma. Caso haja energia sonora em excesso em uma sala, essa energia em si não poderá ser eliminada, porém pode ser convertida em uma forma inócua. Esta é a função da absorção de som dos materiais.

Todos os tipos de absorvedores operam fundamentalmente da mesma maneira. O som é a energia vibratória das partículas de ar e através da utilização dos absorvedores, a energia vibratória pode ser dissipada na forma de calor e consequentemente a energia sonora é reduzida, sendo importante salientar que a quantidade de calor gerada por esse processo é irrisória. (EVEREST, POHLMANN, 2015)

Todos os materiais absorvem em certa medida a energia sonora incidente, no entanto convencionou-se chamar materiais absorvedores aqueles que apresentam valores altos de absorção, sendo que comumente esses materiais apresentam melhor desempenho em altas frequências. (EVEREST, POHLMANN; 2015) (ARENAS, CROCKER; 2010) (TANG, YAN; 2017).

Tang & Yan (2017) colocam que o coeficiente de absorção sonora é definido como a razão da energia sonora absorvida e da energia sonora total incidente, conforme as equações que seguem:



$$\alpha = \frac{E_{\alpha}}{E_i} = \frac{E_i + E_r + E_t}{E_i}$$

$$\alpha = \frac{I_i}{I_r} = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \frac{4n}{(n+1)^2}$$

$$n = \frac{P_{max}}{P_{min}}$$

(2)

Onde:

α é coeficiente de absorção acústica,

E_{α} é o som absorvido energia,

E_i é a energia total do som incidente,

E_r é a energia refletida energia sonora e

E_t é a energia sonora transmitida.

I_i intensidade incidente das ondas acústicas

I_r intensidade refletida das ondas acústicas

n é a taxa de onda estacionária de máxima

(P_{max}) pressão máxima da onda acústica

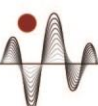
(P_{min}) pressão mínima da onda acústica

O coeficiente de absorção sonora dos materiais varia conforme a frequência da onda sonora incidente, sendo que, geralmente esse índice aumenta segundo a espessura e a densidade dos materiais. A espessura do componente, por sua vez, deve ser no mínimo um décimo do comprimento de onda do som incidente.

Outro fator de influência é a fixação. Junto às paredes de fixação dos componentes a pressão sonora é máxima e a velocidade das partículas é zero. A pressão sonora mínima e a velocidade de propagação é máxima, e ocorre a uma distância da parede equivalente a $\frac{1}{4}$ do comprimento da onda incidente.

Os materiais de absorção acústica podem ser classificados como absorvedores ressonantes e absorvedores porosos. Absorvedores ressonantes são aqueles onde a energia acústica é consumida pelo efeito de ressonância interna.

Os componentes de absorção por ressonância podem ser divididos em ressonadores, painéis perfurados, microperfurados e membranas absorventes. Essas estruturas tem



uma vantagem única para reduzir baixa frequência, no entanto o espectro de absorção nas bandas de frequência é estreito e por vezes a usinabilidade do componente é complexa. (TANG, YAN; 2017)

Bistafa (2011) descreve que os materiais absorventes mais utilizados são porosos ou fibrosos, onde a absorção se dá essencialmente pela dissipação da energia sonora por atrito oriundo da movimentação das partículas sonoras no interior do material.

O desempenho elevado ocorre quando o material “respira”, ou seja, quando ele permite que as partículas do ar se movimentem em seu interior. Sendo assim, a propriedade fundamental dos materiais absorventes é a resistência ao fluxo de ar, onde “a maximização da absorção sonora requer uma resistência ótima através do material”.

De acordo com Arenas & Crocker (2010) um material poroso é aquele que contém cavidades, interstícios ou canais que permitam que as ondas possam permear seu interior. Essa composição altera características macroscópicas do material como densidade aparente, resistência mecânica e condutividade.

Os poros quando isolados dos vizinhos são classificados como fechados, e são significativamente menos eficientes que poros abertos na absorção sonora, sendo que os poros abertos apresentam um canal contínuo de conexão com a superfície externa do material, conforme pode ser observado na figura 11.

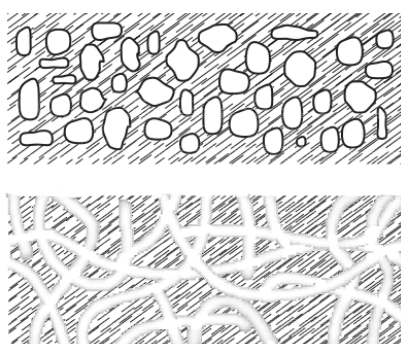
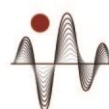


Figura 11: Ilustração da diferença morfológica entre estruturas de materiais de porosidade fechada (superior) e aberta (inferior).

Fonte: Cox et al.; (2017)



A onda sonora, ao propagar-se por pequenos espaços como os poros dos materiais absorventes apresentam uma perda na sua energia de propagação. Essa perda se dá principalmente pela viscosidade da camada de ar limite e pelo atrito ocasionado nas paredes internas dos poros, bem como através da condução térmica.

Sendo assim, para que os mecanismos citados tenham eficácia é imprescindível que os caminhos entre os poros sejam interconectados o que ocorre em uma estrutura de poros abertos. Em materiais fibrosos, grande parte da energia também pode ser absorvida pela dispersão oriunda da vibração causada nas fibras individualmente. As fibras do material se “movimentam” sob a influência das ondas sonoras e perdem energia devido ao trabalho realizado pelas forças de atrito, como pode ser observado na Figura 12 (COX; D'ANTONIO, 2004)

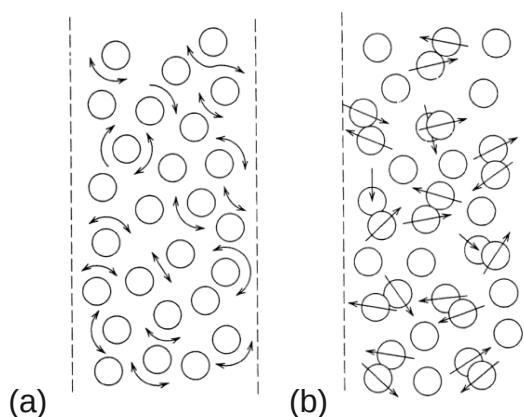
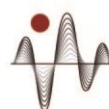


Figura 12: Mecanismos principais que se acredita ocorrer nos materiais absorvedores de som: a) perdas viscosas no ar canais e (b) fricção mecânica causada por fibras esfregando juntos.

Fonte: Arenas e Crocker (2010)

Os absorvedores fibrosos são aqueles constituídos de fibras naturais ou sintéticas. Já os granulares são estruturas macroscópicas relativamente rígidas (aglomerados), sendo que os agregados são frouxamente compactados e suas partículas individuais são mantidas. Eles são realizados através de compósitos de concreto, asfalto, cerâmica, argilas granulares, e etc. e representam uma importante alternativa para o controle de propagação sonora em ambientes externos. A figura 13 ilustra os tipos de absorvedores celulares, fibrosos e granulares nas escalas macroscópica e mesoscópica, assim como, a representação geométrica da conformação dos poros.



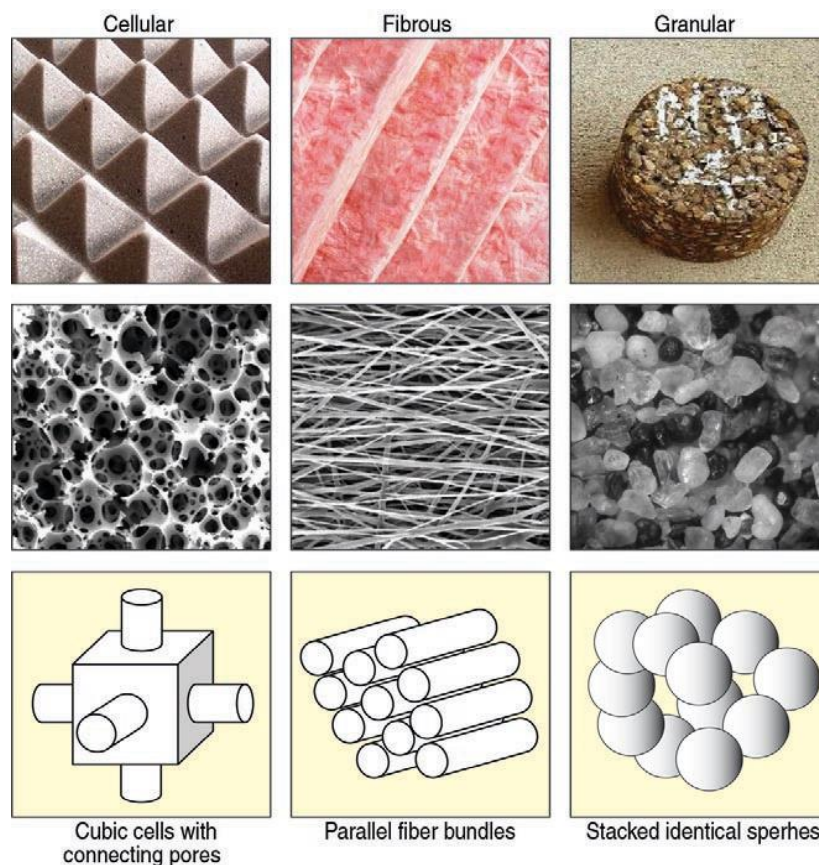
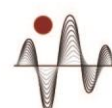


Figura 13: Materiais porosos celulares, fibrosos e granulares
Fonte: Arenas e Crocker (2010)

As diferenças de comportamento acústico dos materiais fibrosos e dos materiais granulares se dá principalmente em relação ao agrupamento das partículas que geralmente incorrem em uma porosidade menor nos materiais granulares se comparados aos fibrosos.

Cox et al. (2017) alertam para uma questão a ser levada em consideração. O desempenho absorvedor de material granulado apresenta uma espessura crítica em que ao acrescentar espessura adicional ao material não há aumento do seu desempenho.

Os poros são formados a partir de estruturas interconectadas em escala mesoscópica a partir de fibras, grânulos ou estruturas celulares, conforme pode ser observado na figura 14. Há diferenças estruturais entre os diferentes absorvedores. O material celular é composto de uma matriz interconectada com a presença dos sulcos em seu interior.



Já os absorvedores fibrosos e granulares são estruturas formadas a partir de aglomerados de partículas que podem ser unidas por aglutinante. Há também a possibilidade do material que forma o aglomerado seja ele granular ou fibroso apresentar a dupla porosidade, sendo a mesoscópica onde os vazios são aqueles oriundos da conformação estrutural do aglomerado. Já a microscópica são os vazios intrínsecos a estrutura das partículas que compõem o aglomerado.

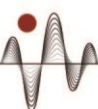
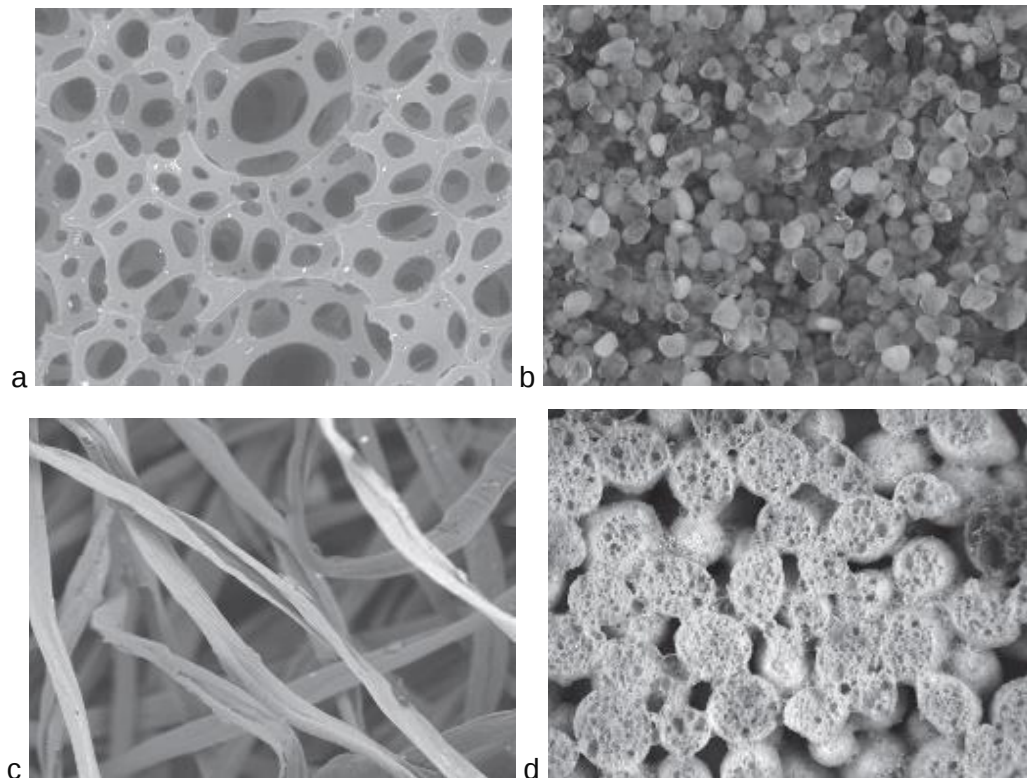


Figura 14: Imagens microscópicas de absorvedores. a) Absorvedor celular, espuma. b) Material granular, areia. c) Absorvedor fibroso, fibra de algodão. d) material de dupla porosidade.

Fonte: Cox *et al.* (2017)

Os casos em que o material apresenta a denominada dupla porosidade se dá quando a razão entre o tamanho característico dos poros microscópicos, e o tamanho dos poros mesoscópicos é da ordem de 10^{-3} . A Figura 15 ilustra o exemplo do carvão aditivado como material de dupla porosidade. (COX *et al.*, 2017)

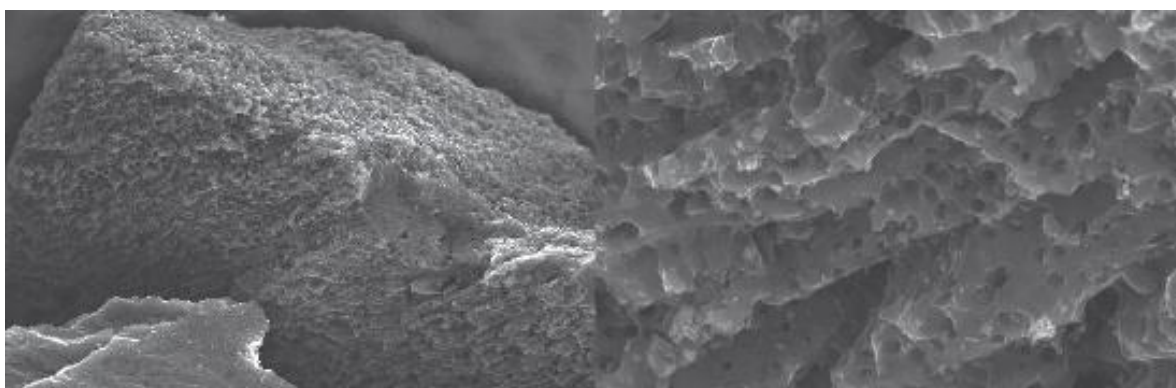


Figura 15: Imagens microscópicas de carvão aditivado. À esquerda observa-se o grão e a direita uma perspectiva mais aproximada mostrando os poros microscópicos que compõe o material.

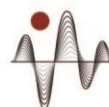
Fonte: Cox *et al.* (2017)

2.2 Painéis aglomerados de biomassa como alternativa sustentável na produção de materiais acústicos

2.2.1 O contexto de busca por tecnologias sustentáveis e as deficiências de absorvedores acústicos fibrosos tradicionais

As implicações do ruído para saúde humana são reconhecidas, e cada vez mais tornam-se um fator importante nas relações sociais, de trabalho e consumo. Nesse sentido a acústica aplicada aos espaços e os materiais que dão suporte a ela, ganham protagonismo.

Parte-se do princípio de que a era de recursos aparentemente abundantes e baratos do século 20 está chegando ao fim. A redução da utilização de recursos não renováveis e dos impactos ambientais implica por exemplo na tomada de decisões



orientadas para desenvolvimento e consumo de produtos resultantes em baixa emissão de carbono e resilientes ao clima.

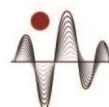
Ngo (2018), alerta que essa crescente consciência ambiental, despertou o interesse de usar fibras naturais como matriz de vários produtos, destacando-se entre eles os que apresentam função de absorção sonora, que se expandiu consideravelmente no mercado consumidor e no desenvolvimento de setores da indústria nos últimos anos.

Del Rey *et al.* (2019) descreve que ao longo dos anos, os pesquisadores conduziram numerosos estudos para avaliar as propriedades acústicas e térmicas de uma infinidade de fibras e materiais reciclados, investigando as propriedades físicas e acústicas e elaborando modelos analíticos de previsão de seu comportamento acústico que possibilite a otimização da confecção do componente. Essa tendência na busca por materiais sustentáveis, reciclados e recicláveis, que são amigáveis ao meio ambiente e à saúde humana, vem ganhando cada vez mais força.

Koeller *et al.* (2020) representando o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) compilaram um texto para discussão denominado: Ecoinovação: revisitando o conceito. Em seu escopo, destaca-se que nas propostas de “esverdeamento da economia”, a discussão acerca do papel das inovações e do desenvolvimento tecnológico tem sido reconhecida como caminho para alcançar uma produção verde.

Há no Brasil um respaldo legal já que a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) – Lei Federal no 6.938, de 31 de agosto de 1981 – reconhece a importância da tecnologia em um de seus princípios fundamentais, nos seus objetivos e nos instrumentos. Nesse contexto, a inovação que incorpora a dimensão ambiental surge como um instrumento relevante rumo à produção verde.

Nesse contexto aspectos relativos ao meio ambiente devem ser levados em consideração na escolha e valorização de um determinado material. Em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas desenvolveu o conceito de projeto sustentável e o trouxe para o discurso público através do documento Relatório Brundtland, que ficou amplamente



conhecido como "Our Common Future". Seu conteúdo coloca que “O desenvolvimento sustentável atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de futuras gerações para atender às suas próprias necessidades.” (BEUS; CARUS; BARTH, 2019) (ASDRUBALI; SCHIAVONI; HOROSHENKOV, 2012) (ONU, 2020)

Os impactos ambientais causados pelos materiais são apresentados em algumas variantes de análise: uso de energia não renovável, potencial de aquecimento global e potencial de acidificação. O ciclo de vida é avaliado em todas as fases do produto onde extração, produção, transporte, construção, operação e gestão, desconstrução e eliminação, reciclagem e reutilização devem, portanto, ser levados em consideração.

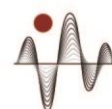
Asdrubali; Schiavoni; Horoshenkov (2012) apresentam informações oriundas de agências de análise e compilação de dados que investigam os impactos de diversos produtos e práticas a fim de compreender impactos ambientais em âmbito global. Conforme os dados da Ecoinvent, as fibras de origem natural apresentam menor impacto comparadas as demais. Como pode ser observado na tabela 3, as matérias-primas sintéticas como a geram um impacto ambiental significativamente maior.

Tabela 3: Comparação dos impactos ambientais dos materiais acústicos naturais e tradicionais

Material	Densidade (kg/m ³)	Energia não renovável (MJ/kg)	Potencial de aquecimento global (kg CO ₂ eq.)	Potencial de acidificação (kg SO ₂ eq.)
Borracha natural	6.4 (kg/m ²)	40	2.4	0.0086
Fibras de coco	50	42	0	0.0250
Fibras de linho	25	4.4	0	0
Lã de ovelha	30	12.3	-0.3	0.0046
Flocos de celulose	35-70	4.2	0.2	0.0025
Poliestireno expandido	30	95	2.3	0.0201
Espuma a base de vidro	130	67	3.7	0.0229
Fibra de vidro	34	43	2.1	0.0155
Lã mineral	50-60	17	1.2	0.0052

Fonte: Asdrubali; Schiavoni; Horoshenkov (2012)

Os dados da tabela 3 indicam que, enquanto os flocos de celulose apresentam um gasto de energia não renovável em torno de 4.2 MJ/kg e um potencial de aquecimento global de 0.2 kg CO₂ eq., a fibra de vidro apresenta um gasto energético e potencial



de aquecimento global dez vezes maior, sendo 43 MJ/kg e 2.1 kg CO₂ eq. respectivamente.

As fibras a base de material fóssil apresentam maiores emissões de gases estufa em comparação com as fibras naturais. A produção de fibra de vidro tem um impacto de 2,5 toneladas de CO₂-eq por tonelada, já as fibras naturais têm emissões de gases de efeito estufa entre 0,3–0,7 toneladas de CO₂-eq por tonelada. (WERNET *et al.*, 2016)

(Beus; Carus; Barth, 2019) apresentam um gráfico comparativo entre fibras de carbono, vidro, naturais e madeira mineralizada. A madeira mineralizada, que contempla o impacto da indústria cimenteira, apresenta impacto menor que a fibra de vidro.

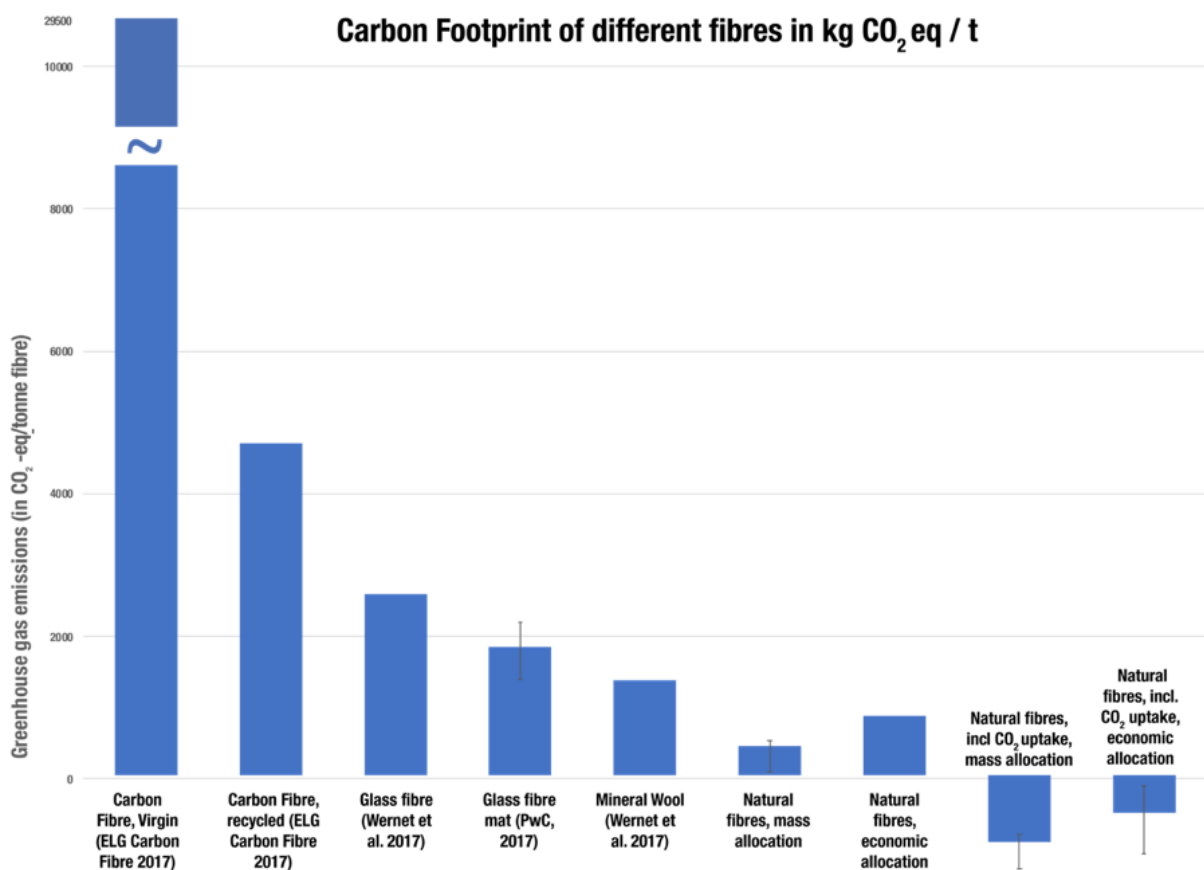


Figura 16: Pegada de carbono de diferentes materiais em kg CO₂eq/t
Fonte: Beus; Carus; Barth (2019)

Para além das questões ambientais, no que tange aos absorvedores sonoros também se dá uma preocupação de saúde. Os absorvedores sonoros oriundos de lãs minerais são largamente utilizados. Ocorre que ao inalar fibras de vidro, as fibras maiores podem ficar presas nas vias aéreas superiores e as menores podem ser inaladas mais profundamente e atingir os pulmões.

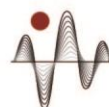
As fibras inaladas são removidas do corpo parcialmente por meio de espirros ou tosse e através dos mecanismos de defesa do corpo. No entanto, a parcela que chega aos pulmões pode permanecer nos pulmões ou na região torácica. O contato direto com a fibra de vidro ou poeira respirável contendo o material pode irritar a pele, olhos, nariz e garganta. Os sintomas de irritação geralmente são inespecíficos, podem incluir coceira, tosse ou respiração ofegante. Altos níveis de exposição à fibra de vidro transportada pelo ar podem agravar a asma existente ou condições semelhantes às da bronquite. (WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF HEALTH, 2024)

Os resultados de experiências com animais levaram a classificações conservadoras de certas fibras minerais sintéticas como possíveis carcinógenos em humanos. Especificamente, a lã de vidro, o filamento de vidro contínuo, a lã de rocha e a lã de escória não são classificáveis quanto à sua carcinogenicidade para os seres humanos. (OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, 2024)

2.2.2 Potencial da adoção de biomassa como matéria-prima para componentes de absorção sonora

As variáveis que determinam as características dos componentes absorvedores sonoros de biomassa são a densidade básica da espécie adotada, dimensão das fibras e/ou partículas, geometria e tratamento das partículas; densidade do componente, aglutinante, taxa de compactação e a consequente tortuosidade obtidas.

O desempenho acústico de um material se dá através de uma série de propriedades relativas à estrutura mesoscópica, poros, do material como a resistência ao fluxo de ar e resistividade da estrutura porosa formada pelas partículas obtidas da matéria-prima e a porosidade da estrutura.



A estrutura mesoscópica do material por sua vez, é determinada pela relação entre as características intrínsecas a matéria-prima, como densidade básica da espécie adotada, assim como pelos processos de beneficiamento e tratamento das partículas, densidade do componente e aglutinantes utilizados.

De modo a discutir o potencial da aplicação de biomassa como matéria-prima para absorvedores sonoros, os resultados das pesquisas científicas nesta área serão apresentados de acordo com as propriedades da estrutura e da matéria-prima.

2.2.2.1 Resistência ao fluxo de ar e Resistividade

Arenas; Crocker (2010) descrevem que quando um material poroso é exposto a ondas sonoras incidentes, as moléculas de ar na superfície do material e dentro de seus poros vibram, e conseqüentemente perdem parte da sua energia original. Isso ocorre porque parte da energia das moléculas de ar é convertida em calor devido a perdas térmicas e viscosas nas paredes dos poros e túneis dentro do material.

A figura 17 é um diagrama elaborado pela autora que ilustra o processo de perda de energia por parte das ondas sonoras ao percorrerem um meio poroso fibroso ou granular onde além das sucessivas reflexões no interior dos poros há a vibração das partículas que compõem a estrutura do material.

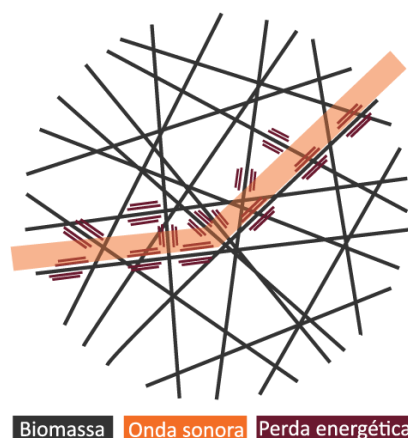
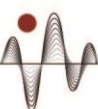


Figura 17: Esquema ilustrativo do fenômeno de absorção sonora em materiais porosos
Fonte: Elaboração própria



Tang; Yan (2020) declaram que a resistência ao fluxo de ar é um parâmetro chave para avaliar as propriedades acústicas de materiais fibrosos pois determina quão facilmente o ar pode entrar nos poros do absorvedor. A resistência ao fluxo de ar é dependente da frequência para aplicações em absorção sonora. Este parâmetro desempenha um papel crítico no cálculo de vários parâmetros acústicos de materiais fibrosos, como impedância característica, constante de propagação e coeficiente de absorção sonora.

A resistência ao fluxo de ar é a resistência de uma partícula de ar passando por um material, que pode ser expressa pela razão do gradiente de pressão no interior de um material pela a velocidade linear do fluxo de ar. A resistividade por sua vez, é definida como a razão entre o gradiente de pressão por unidade de espessura e a velocidade linear do fluxo de ar na placa que é vertical ao fluxo de ar do exterior em condições estáveis.

A propriedade de absorção sonora tende a melhorar com o aumento da resistividade do material, no entanto é necessário observar algumas circunstancias. Quando a resistência ao fluxo de ar é muito pequena, a atenuação da energia acústica causada pelo atrito interno é menor e o efeito de absorção é ruim. Nos casos em que a resistência é muito grande, a maioria das ondas acústicas são refletidas e a absorção torna-se também é incipiente. (PENG, 2017)

As fibras naturais tem o mesmo mecanismo de absorção acústica de materiais fibrosos sintéticos convencionais, como fibra de vidro e lã mineral. Asdrubali; Schiavoni; Horoshenkov (2012) já apresentavam os potenciais de biomassa na produção de materiais absorvedores.

A tabela 4 indica dados de coeficiente de absorção para fibras naturais e sintéticas na frequência de 500 Hz. A absorção tende a ser mais alta em frequências mais altas, porém na frequência média de 500 Hz as partículas de kenaf para a mesma apresentaram um alto coeficiente de 0.74.

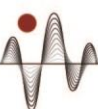


Tabela 4: Propriedades de materiais absorvedores minerais e biomassas

Material	Coefficiente de absorção sonora em 500 Hz
Cânhamo	0.6 (30 cm)
Kenaf	0.74 (5 cm)
Fibra de côco	0.42
Lã de ovelha	0.38 (6 cm)
Lã de madeira	0.32
Cortiça	0.39
Celulose	1 (6 cm)
Lã de vidro	1 (5 cm)
Lã de rocha	0.9 (5 cm)
Poliestireno expandido	0.5

Fonte: Asdrubali; Schiavoni; Horoshenkov (2012)

Testes do comportamento de absorção de som de fibras naturais mostraram que seus lúmens celulares permitem que eles abranjam mais modos diversificados para atenuar a energia das ondas sonoras. A Figura 18 (esquerda) compara as seções transversais de fibras naturais e fibras sintéticas. Verifica-se que uma única fibra de sisal figura 18 (a) é composta por um feixe de subfibras ocas que possuem lúmens dentro delas. No entanto, a fibra de vidro figura 18 (b) tem a mesma construção regular e sólida.

A figura 18 (direita) indica ainda as características estruturais únicas das fibras naturais. Portanto, as fibras naturais são porosas e contêm muitas cavidades de ar conectadas, e essas cavidades de ar podem ser os principais contribuintes da absorção de energia sonora. (YANG; LI, 2012) (ZHU *et al.*, 2014).

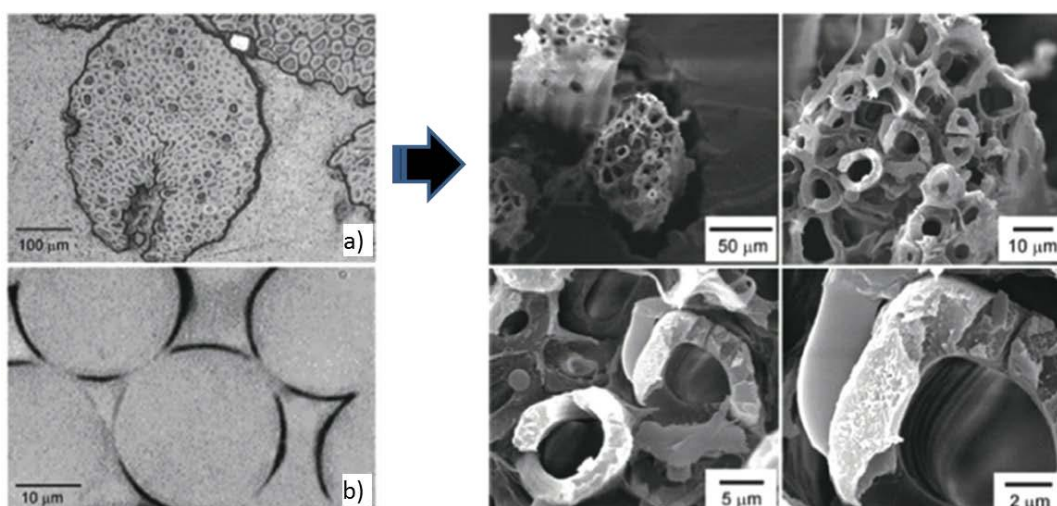
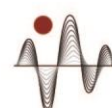


Figura 18: Comparação de fibra de sisal(a) com fibra de vidro (b).

Fonte: Yang e Li (2012) e Zhu *et al.*, (2014)



Koizumi; Tsujiuchi; Adachi (2002) observaram que a diminuição do diâmetro da fibra gera um aumento do coeficiente de absorção sonora. Isso ocorre porque fibras finas são mais suscetíveis a mover-se com a passagem das ondas sonoras do que as fibras mais grossas gerando um incremento na dissipação da energia sonora em energia térmica.

Além disso, adotando-se fibras mais finas uma maior quantidade de massa é necessária para atingir a mesma densidade o que resulta em uma conformação microestrutural mais tortuosa e conseqüentemente uma maior resistência ao fluxo de ar.

Berardi e Iannace, (2015) realizaram um estudo comparativo da resistividade ao fluxo de ar em fibras naturais, cujos dados são apresentados na tabela 5 demonstrou que as fibras de madeira mineralizadas apresentam uma maior resistividade ao fluxo de ar mesmo com a diminuição da espessura da amostra em comparação com a análise somente das fibras.

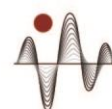
Tabela 5: Propriedades das amostras de fibras naturais

Material	Densidade (kg/m ³)	Espessura (m)	Resistividade (Rayl/m)
Kenaf em baixa densidade	50	0.06	2700 (±290)
Kenaf em alta densidade	100	0.04/0.06	3500 (±240)
Madeira somente as fibras	100	0.04	1600 (±300)
Madeira mineralizada	260	0.03	1800 (±450)
Cânhamo	50	0.03	1400 (±170)
Côco	60	0.04/0.06	1500 (±200)
Cortiça	100	0.03	1000 (±150)
Fibra de bagaço de cana e madeira	400	0.04	850 (±130)
	470	0.04	1000 (±125)
	145	0.04	800 (±40)
Lã de ovelha	40	0.04/0.06	2100 (±150)

Fonte: Berardi e Iannace (2015)

2.2.2.2 Porosidade do material

Liu et al. (2007) e Peng (2017) mediram e compararam as características de absorção sonora de madeira maciça (pinho), compensado, aglomerado e placa de fibra de média densidade em um método de tubo de onda estacionária. A comparação das



curvas do coeficiente de absorção sonora da madeira e painéis de madeira reconstituída da mesma espessura são mostradas na figura 19.

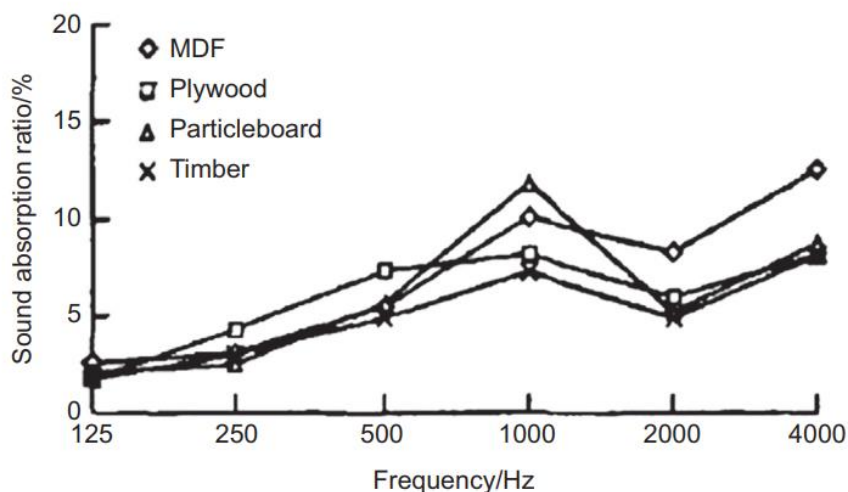
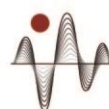


Figura 19: Comparação das propriedades de absorção sonora de quatro diferentes materiais de madeira de a mesma espessura (em 8 mm)
Fonte: Liu *et al* (2007) in Peng (2017)

Pode-se concluir que os padrões de espectro de absorção sonora de diferentes materiais de madeira são semelhantes, os coeficientes de absorção aumentam com o aumento da frequência, e os valores de pico são próximos a 1000 Hz. Destaca-se o fato de que os painéis particulados apresentam melhor desempenho, apesar da taxa de absorção de som dos quatro tipos de materiais não ser maior que 20%, e os coeficientes médios de absorção menores do que 0,1.

Embora haja abundância de cavidades na madeira sólida, a porosidade é de cerca de 50%. A conectividade entre os lúmens é ruim e é difícil para uma onda acústica motivar a vibração de partículas de ar desconectadas. Assim, a madeira maciça e os painéis de madeira convencionais não são bons materiais de absorção.

Merotte *et al.* (2016) adotou fibras de Linho (*Linum usitatissimum* L.) como fibras de reforço combinadas com fibras de polipropileno em compósito cimentício. A faixa de porosidade foi obtida ajustando a espessura da placa a um valor constante através do empilhamento de diferentes quantidades de camadas não tecidas no molde (de 2 a 8



camadas), o número de camadas compostas foi ajustado para atingir os teores de porosidade: 5, 30, 60, 70%.

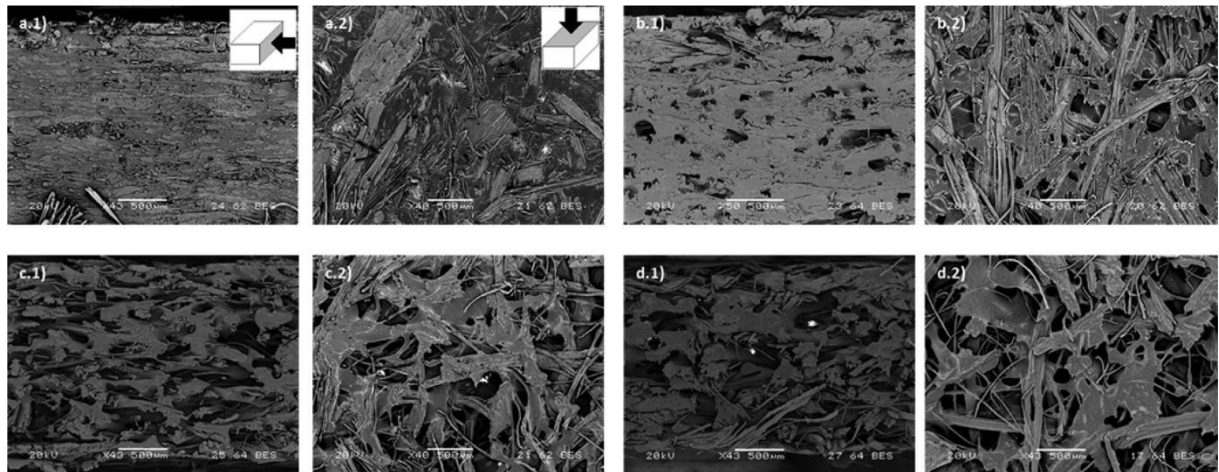
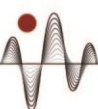


Figura 20: Micrografias SEM da estrutura composta (a: $\phi = 5\%$, b: $\phi = 30\%$, c: $\phi = 60\%$, d: $\phi = 70\%$, 1: seção transversal, 2: superfície).

Fonte: Merotte *et al* (2016)

As fibras são ligadas entre si por pontes de hidrogênio em seu ponto de contato. Com porosidade de $\phi = 60\%$ (figura 20c) a matriz começa a incorporar as fibras, porém, os poros ainda se conectam através do plano. Em $\phi = 30\%$ (figura 20a) os poros param de se conectar. Em um nível de baixa porosidade $\phi = 5\%$ (figura 20b), apenas poros muito pequenos são encontrados e localizados na interface fibra/matriz e na matriz. Com 70% de porosidade os poros se conectam uns aos outros, a maioria das fibras estão ligadas a outras por aglomerados de matriz como “pontos de cola”, ou seja, uma pequena área incorporada de fibra/matriz.

A figura 21 ilustra o processo de desenvolvimento da microestrutura a partir dos procedimentos de moldagem e prensagem. O fundo branco indica os espaços de ar no aglomerado, a cor preta representa as partículas e envermelho é apresentado o aglutinante. O aumento da compactação elimina em grande medida os poros e faz com que o aglomerado seja predominantemente ocupado pelas partículas e matriz como fica evidente na representação da figura 21.



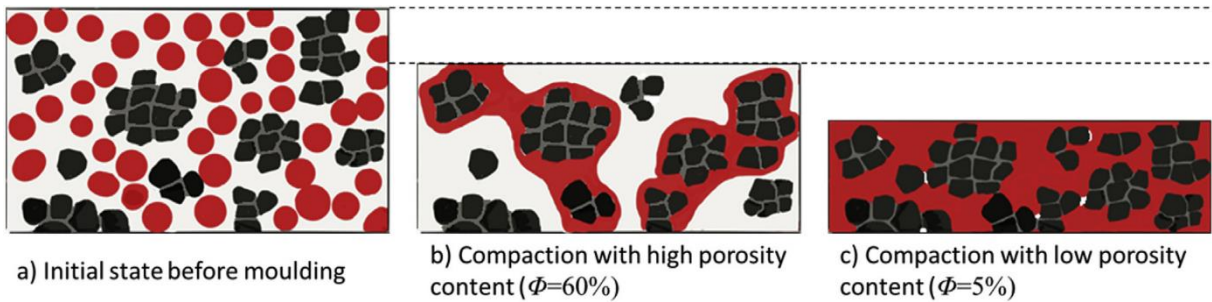


Figura 21: Representação esquemática em corte transversal da impregnação da estrutura fibrosa em diferentes teores de porosidade. As fibras são representadas em preto, lamelas médias em cinza, matriz em vermelho e porosidade em branco.

Fonte: Merotte *et al* (2016)

Os coeficientes de absorção sonora foram avaliados para os diferentes percentuais de porosidade e são apresentados na figura 22. Os resultados indicam que em porosidades menores que 30% há reflexão sonora visto que os poros são fechados. No caso de percentuais superiores a 60% a rede de poros se torna mais aberta e tortuosa o que leva a maior absorção de energia sonora. E por fim a porosidade de 70% revelou uma queda na capacidade de absorção e isso se explica pela diminuição da tortuosidade da microestrutura que consequentemente diminui a perda energética por atrito.

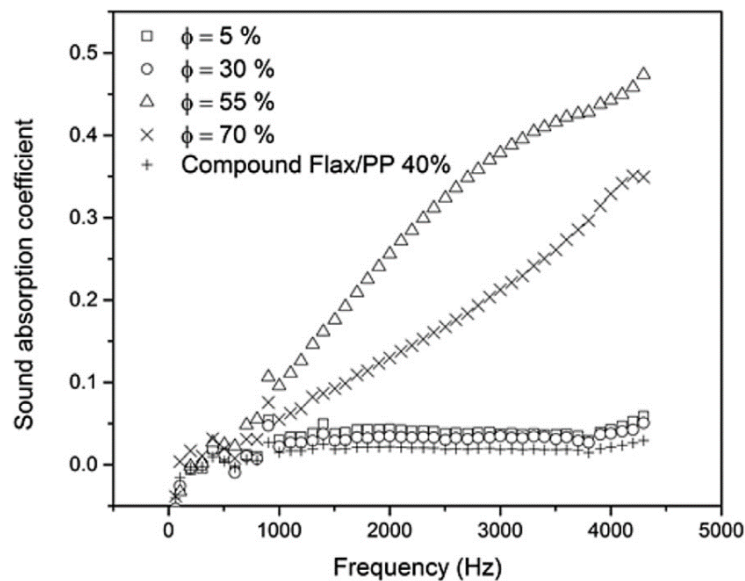
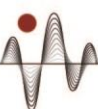


Figura 22: Coeficientes de absorção acústica normais para biocompósitos moldados em diferentes teores de porosidade e composto de linho/PP injetado em função da onda sonora frequência.

Fonte: Merotte *et al* (2016)



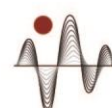
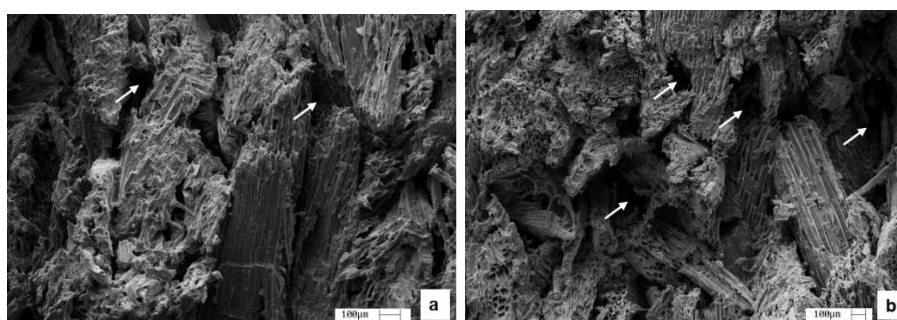
Bertolini *et al.* (2019) avaliaram o efeito da porosidade nos painéis de partículas de *Pinus sp.*, dois valores de pressão foram aplicados durante o processo de fabricação 2,5 MPa e 4 MPa, produzindo três painéis para cada situação. Os dados de porosidade são apresentados na tabela 6 indicam que o aumento da pressão diminui a dimensão dos poros.

Tabela 6: Características Porosimétricas de amostras de Painei

Características Porosimétricas	Amostras	
	Painéis de 2.5 MPa	Painéis de 4 MPa
Área total de poros (m ² /g)	14.12	9.23
Diâmetro médio dos poros (µm)	30.02	19.15
Porosidade (%)	55.7	53.64

Fonte: Bertolini *et al* (2019)

Na figura 23 o gráfico de coeficientes de absorção sonora dos painéis indica que os painéis de pressão inferior (2,5 MPa) alcançaram coeficientes de absorção mais altos em frequências mais baixas (100 Hz e 200 Hz) e na maior frequência analisada (3200 Hz) o que pode estar relacionado com a maior porosidade deste material em comparação com amostras de 4 MPa. Outro fator importante é que as imagens ampliadas da amostra demonstram que além dos poros interpartículas indicados pelas setas brancas há a presença significativa de poros intrapartículas nas amostras.



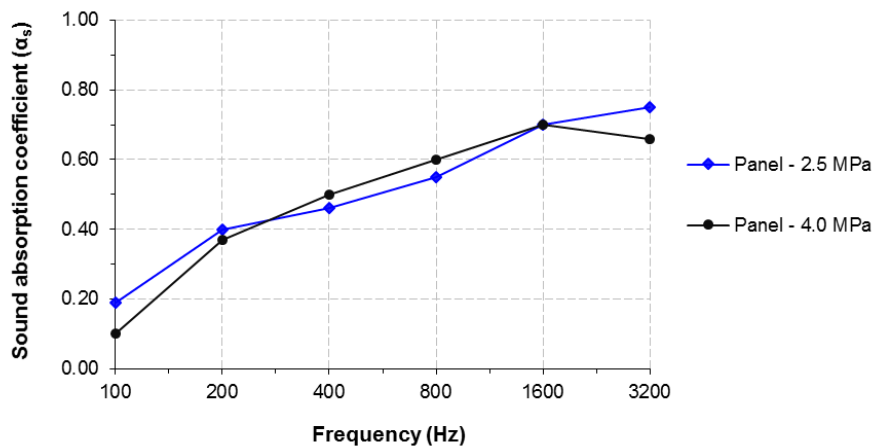


Figura 23: Imagens SEM de painéis de (a) 4 MPa e (b) de 2,5 MPa. (c) Coeficiente de absorção sonora em relação à frequência para os painéis
Fonte: Bertolini *et al* (2019)

2.2.2.3 Estrutura anatômica e a geometria das partículas

A dissipação da energia sonora em meios porosos ocorre através dos efeitos viscoelásticos que ocorrem em seu interior. A estrutura anatômica e a geometria das partículas têm um papel fundamental nesse comportamento visto que a estrutura anatômica influencia diretamente a vibração das fibras e a geometria das partículas o formato e dimensão dos poros.

Weidong e Yan (2012) verificaram que uma única fibra de sisal é composta por um feixe de subfibras ocas compostas de lúmen em seu interior. No entanto, a fibra de vidro tem construção regular e sólida. A figura 24 compara as seções transversais das fibras natural e sintética. A figura 24 (a) mostra a seção transversal de uma única fibra de sisal a figura 24 (b) mostra a seções transversais de várias fibras de vidro.

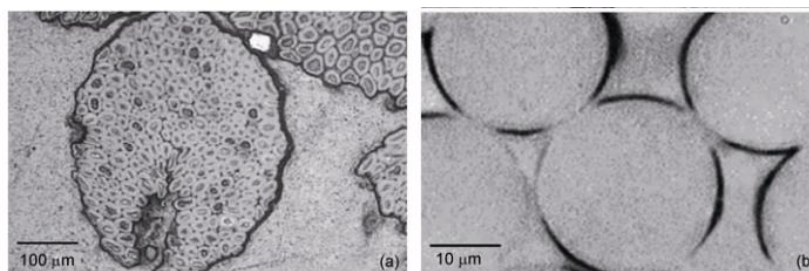
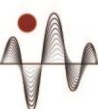


Figura 24: Morfologia da seção transversal de (a) fibra de sisal e (b) fibra de vidro.
Fonte: Weidong e Yan (2012)



A onda sonora pode se propagar por vibração através dos espaços aéreos e dentro dos lúmens das fibras, nas quais o efeito de fricção entre a parede celular e fluxo de ar transforma a energia sonora em calor. Assim, a estrutura de lúmen dotou de maior capacidade de absorção as fibras naturais em comparação com fibras de vidro e carbono.

A figura 25 têm-se retratadas as características estruturais das fibras de sisal demonstrando que a sua constituição contém muitas cavidades conectadas as cavidades de ar e que esse fato pode ser um dos principais contribuintes da absorção de energia sonora.

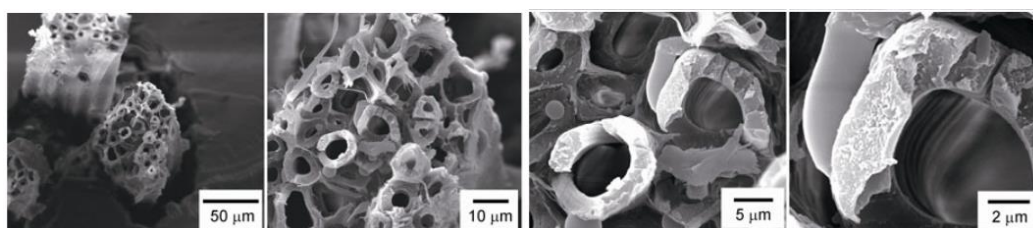
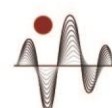


Figura 25: Estrutura multi-escala e lúmen oco de fibras de sisal em diferentes ampliações.
Fonte: Weidong e Yan (2012)

Ainda apresentando o potencial de absorção sonora das biomassas, têm-se o estudo realizado por Chabriac *et al.*; (2016) que avaliou as propriedades acústicas das partículas de cânhamo, linho, girassol (grão e casca) e palha, conforme ilustrado na figura 26. As propriedades foram aferidas e comparadas sem adição de aglutinante de modo a verificar o desempenho apenas da biomassa.



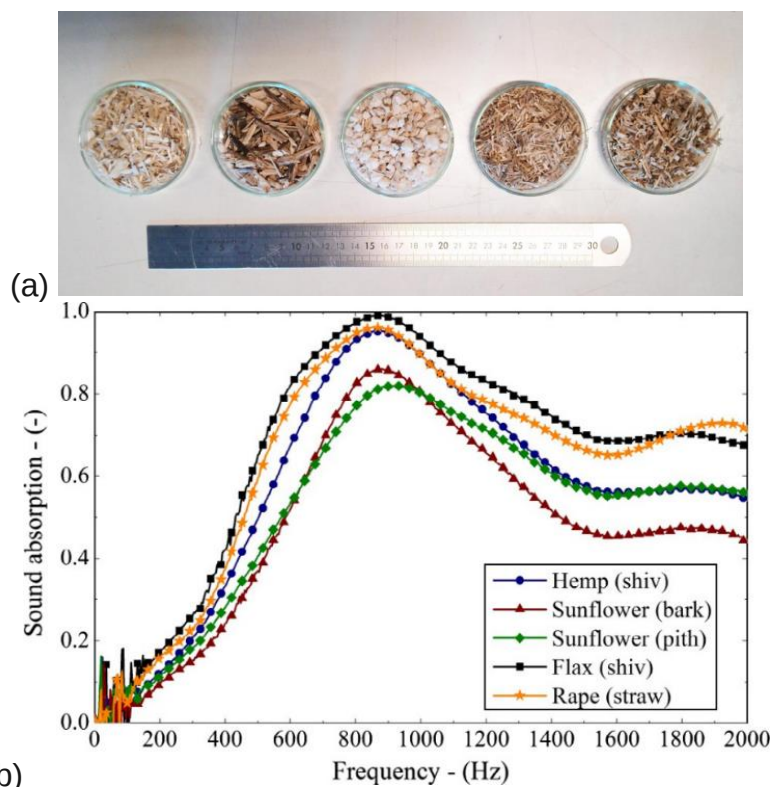
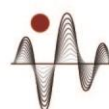


Figura 26: (a) Da esquerda para a direita têm-se cânhamo, casca de girassol, grão de girassol, linho e palha. (b) Coeficiente de absorção sonora das amostras de partículas sendo representadas pelas cores azul para cânhamo, vermelha para casca de girassol, verde para grão de girassol, preta para linho e amarelo para palha.
 Fonte: Chabriac *et al.*; (2016)

Conforme os dados apresentados na tabela 7, a palha e o linho obtiveram os melhores resultados onde as densidades das amostras (115 kg/m^3) foram iguais e porosidade interpartículas foi semelhante, 78,1% e 82,6% respectivamente. A amostra que obteve o menor desempenho apresenta a densidade das partículas menor que as de maior desempenho, porém, a porosidade interparticular é mais baixa indicando que a geometria e dimensão maior das partículas impediu a maior formação de poros.

Tabela 7: Características das partículas vegetais ($\alpha_{\max}$: coeficiente máximo de absorção sonora, ρ_v : densidade da amostra, ϕ_{inter} : porosidade interpartícula, ϕ_{intra} : porosidade intrapartícula, ϕ_{tot} : porosidade total, ρ_p : densidade de partículas, ρ_s : densidade da estrutura)

Partícula	$\alpha_{\max}$ (-)	ρ_v (kg/m^3)	ϕ_{tot} (%)	ϕ_{inter} (%)	ϕ_{intra} (%)	ρ_p (kg m^{-3})	ρ_s (kg m^{-3})
-----------	---------------------	------------------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------------	---------------------------------



Cânhamo	0.95	133	87	66.2	61.5	394	1020
Girassol casca	0.86	168	82.5	62.5	53.3	448	460
Girassol grão	0.82	34	99	76.3	95.8	144	3400
Linho	0.99	115	90.5	82.6	45.3	663	1120
Palha	0.97	115	90	78.1	54.3	526	1150

Fonte: Chabriac *et al.*; (2016)

2.2.2.4 Umidade

A porosidade aberta é essencial para a dissipação da energia sonora, sendo assim é necessário que os poros estejam preenchidos de ar e interconectados. Os poros de materiais porosos como madeira são reduzidos quando absorvidos ou durante a absorção de água. O conteúdo de ar em vazios e microporos são substituídos por água, e a porosidade diminui de modo que a propriedade de absorção sonora também é diminuída.

Peng (2017) aferiu os espectros do coeficiente de absorção sonora do cedro do Japão em diferentes condições de umidade. A figura 27 mostra os espectros do coeficiente de absorção sonora do cedro do Japão (*Cryptomeria fortune* Hooibrenk ex Otto et Dietr) em diferentes teores de umidade (6%, 19%, 24% e 64%). As propriedades de absorção sonora diminuem com o aumento do teor de umidade, e o impacto do teor de umidade é significativo em altas frequências.

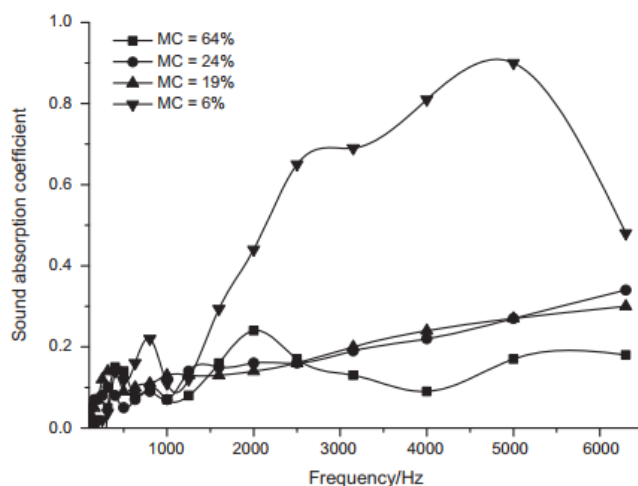
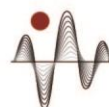


Figura 27: Os espectros do coeficiente de absorção sonora do cedro do Japão em diferentes condições de umidade conteúdo.

Fonte: Peng (2017)



2.2.2.5 Tratamento da biomassa

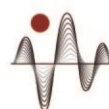
O tratamento da biomassa é realizado com o objetivo de minimizar a ação das substâncias inibidoras do processo de hidratação do ligante mineral. Esses tratamentos podem implicar em danos na estrutura da biomassa e consequentemente prejudicar ou otimizar o desempenho acústico da biomassa.

A porosidade do material lignocelulósico pode ser investigada medindo a permeabilidade ao ar, relacionada ao tamanho e ao conteúdo dos poros abertos. Nos últimos anos, os pesquisadores investigam tratamentos que podem mudar a composição da parede e a arquitetura dos poros afim melhorar a permeabilidade ao ar da madeira longitudinalmente.

As paredes celulares de materiais lignocelulósicos contém celulose, glicose, particularmente na forma de microfibrilas cristalinas, mas também em uma forma amorfa. Além disso, hemiceluloses, lignina, proteínas e ácido galacturônico contendo polissacarídeos pécticos são também presente nas paredes. (KOLYA; HASHITSUME; KANG, 2022)

Kolya; Hashitsume; Kang (2022) investigaram o tratamento de madeira com persulfato de amônio (APS), $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$. O sistema oxidante APS foi amplamente utilizado para produzir nanocelulose e nanocristal de celulose porque o APS é um poderoso agente oxidante, altamente solúvel em água, apresenta baixo custo e menor toxicidade.

A figura 28 (a) demonstra os poros da madeira antes do tratamento, e a Figura 28 (b) demonstra a diferença da estrutura de poros da madeira Oak wood (*Quercus mongolica*) após o tratamento mencionado. Percebe-se que há um aumento e interligação dos poros após o tratamento.



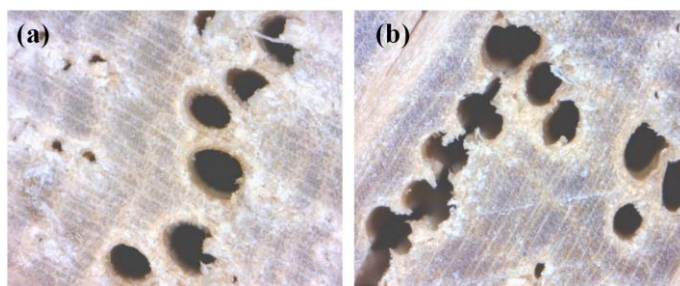


Figura 28: (a) imagem do microscópio digital do controle Oak e (b) imagem do microscópio digital da amostra tratada com ampliação de 200×.

Fonte: Kolya e Kang (2022)

Kolya; Hashitsume; Kang (2022) e Kolya; Kang (2022) avaliaram o efeito da oxidação dos componentes de parede celular de materiais lignocelulósicos na capacidade de absorção sonora desses materiais. A tabela 8 indica o percentual de celulose, hemicelulose e teor de lignina para as biomassas pesquisadas e a tabela 9 os coeficientes de absorção sonora aferidos antes e depois do tratamento. A diminuição dos extrativos, celulose, hemicelulose e lignina no material lignocelulósico de alta e de baixa densidade estudados resultou em uma melhora nos coeficientes de absorção sonora.

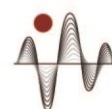
Tabela 8: Porcentagem de celulose, hemicelulose e lignina e extrativos de madeira dura Mala e fibras de coco

Espécie	Amostras:	Extrativos (%):	Hemicelulose (%):	Celulose (%):	Lignina (%):
Malas (Homalium foetidum Roxb.)	Não tratadas	5.6 ± 0.51	21.1 ± 0.51	46.5 ± 0.50	25.3 ± 0.79
	Tratadas	4.3 ± 0.2	19.5 ± 0.72	44.5 ± 0.51	24.8 ± 0.73
Côco (Cocos nucifera L.)	Não tratadas	6.0	34.9	27.0	29.3
	Tratadas	5.0	32.8	25.5	28.6

Fonte: Kolya; Hashitsume; Kang (2022b) e Kolya e Kang (2022)

Tabela 9: Resultados do NRC e coeficiente médio de absorção sonora para cada faixa de frequência das espécies de madeira dura Mala e fibras de coco com desvio padrão.

Espécie	Amostras	NRC médio	500–1000 (Hz)	1 K–2 K (Hz)	2 K–4 K (Hz)	500–6.4 K (Hz)
Malas (Homalium foetidum Roxb.)	Controle	0.032 ± 0.09	0.116 ± 0.02	0.201 ± 0.03	0.339 ± 0.05	0.346 ± 0.12
	Tratada	0.034 ± 0.10	0.119 ± 0.02	0.211 ± 0.04	0.398 ± 0.07	0.418 ± 0.17
	Melhoria (%)	5.0	2.6	4.9	17.4	20.8
Coco (Cocos nucifera L.)	Controle	0.065 ± 0.017	0.048 ± 0.006	0.052 ± 0.009	0.062 ± 0.010	0.067 ± 0.015
	Tratada	0.109 ± 0.036	0.074 ± 0.018	0.093 ± 0.009	0.121 ± 0.013	0.122 ± 0.025



Melhoria (%)	68.5	60.4	80.8	96.2	83.0
--------------	------	------	------	------	------

Fonte: Kolya; Hashitsume; Kang (2022b) e Kolya e Kang (2022)

Moura (2019) avalia tratamentos de fibras de bambu e argumenta que entre os tratamentos químicos de fibras naturais, o método alcalino vem sendo utilizado para modificar a superfície das fibras e melhorar suas propriedades. Este método consiste em fazer a imersão da fibra em uma solução alcalina de proporções específicas.

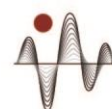
Dentre os benefícios deste método alcalino pode-se destacar o aumento da rugosidade superficial, a maior exposição micro fibrilar e a remoção de parte da lignina externa. O resultado deste tratamento são fibras mais empacotadas e alinhadas, o que melhora as propriedades mecânicas.

Em relação às fibras e partículas de bambu a imersão em solução alcalina adotada como o tratamento químico é amplamente utilizada e menos dispendiosa. O procedimento remove além de uma quantidade de lignina, cera e óleo que cobrem a superfície externa da parede celular, resultando em um aumento da rugosidade da superfície e redução da agregação das fibras, o que melhora o intertravamento entre as fibras e a matriz.

Yilmaz *et al.*; (2012) investigou o efeito do tratamento alcalino no incremento de resistividade ao fluxo do ar e desempenho em absorção sonora para fibras de cânhamo. Investigou-se além do percentual de NaOH, a influência da temperatura. Os dados obtidos são apresentados na tabela 10.

Tabela 10: Informações de resistividade do fluxo de ar e parâmetros de estrutura de tecidos PHP alcalinizados

Procedimento em temperatura ambiente				
Amostra	Massa inicial (kg.m ⁻²)	Espessura (mm)	Porosidade (1 - ρ_w/ρ_f)	Resistividade do fluxo ar
Controle	0.12	0.66	0.015	2.60
2.5%	0.06	0.21	0.003	1.71
5%	0.01	0.32	0.003	2.82
7.5%	0.07	0.29	0.005	1.50
10%	0.01	0.41	0.003	1.95
15%	0.06	0.37	0.004	1.26
Amostra	Massa inicial (kg.m ⁻²)	Espessura (mm)	Porosidade (1 - ρ_w/ρ_f)	Resistividade do fluxo ar



Controle	0.12	0.66	0.015	2.60
2.5%	0.14	0.83	0.008	1.24
5%	0.05	0.23	0.005	2.17
7.5%	0.07	0.55	0.003	2.12
10%	0.09	0.35	0.006	2.42
15%	0.08	0.57	0.005	2.47

Fonte: Yilmaz *et al.*; (2012)

Observou-se que no procedimento realizado em temperatura ambiente, somente o percentual de 5% resultou em aumento da resistividade ao fluxo de ar aumento da concentração da solução de tratamento. Nos casos de imersão a quente a resistividade aumentou com o aumento do percentual da solução, no entanto os valores não superaram ao da amostra controle.

A alcalinização não aumentou o coeficiente de absorção sonora conforme pode ser observado na figura 29. Ao contrário, os valores diminuíram com o tratamento, o que também foi observado no estudo de resistividade do fluxo de ar. Através desses dados é possível inferir que a concepção de uma estrutura porosa mais tortuosa através de geometrias mais finas das fibras limita-se ao excesso de perda de massa através do tratamento o que impede o aprimoramento dos coeficientes de absorção sonora do material.

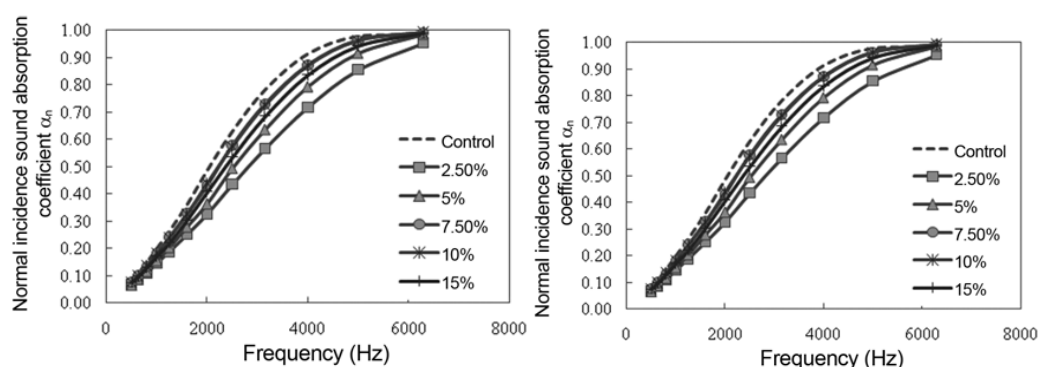
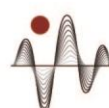


Figura 29: Efeito da alcalinização no desempenho de absorção sonora de tecidos PP/Hemp/PP; (a) tratado à temperatura ambiente e (b) tratado à temperatura de ebulição

Fonte: Yilmaz *et al.*; (2012)

2.2.2.6 Biomassa e cimento como aglutinante na aplicação em absorvedores sonoros

Os absorvedores sonoros a partir de matéria-prima lignocelulósica e cimento os já citados WWCB têm seu desempenho descrito e sua produção é consolidada no



mercado de produtos acústicos. As pesquisas vêm se debruçando o comportamento de outros formatos de biomassa como as granulares de modo a aumentar o espectro de materiais possíveis.

Cerezo (2005) estudou o comportamento de concreto com adição de partículas de cânhamo. Além da aferição do potencial de absorvedores granulares de biomassa, observa-se duas grandes contribuições. A primeira se dá em relação identificação da forte coesão intragranular mesmo sem adição de aglutinante através de ensaios de compressão estática como pode ser vislumbrado na figura 30.

A segunda trata da avaliação da influência da proporção de aglutinante na resistência física e mecânica da amostra assim como a porosidade obtida ilustrada na figura 30. A tabela 11 apresenta os dados que indicam uma diminuição progressiva da porosidade e absorção sonora com o aumento do percentual de aglutinante, porém que nas dosagens intermediárias obtém-se uma porosidade e coeficientes de absorção sonora próxima a obtida em baixas dosagens.

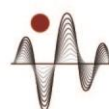


Figura 30: (a) Amostra de cânhamo a granel testada mecanicamente. Painéis com diferentes proporções de dosagem de aglutinante sendo elas (b) alta, (c) intermediária e (d) baixa.

Fonte: Cerezo (2005)

Tabela 11: Avaliação das características acústicas do concreto de cânhamo

Dosagens	ρ seca (kg/m ³)	Concentração em volume de aglutinante	porosidade total ϕ	Permeabilidade ao ar (m ²)	α (NRC)
baixas	250	9 %	0,80	-	> 0,60
intermediárias	350 – 500	19 % - 29%	0,70 – 0,79	3.10^{-9} – 6.10^{-9}	0,50 – 0,90
altas	600 - 660	40%	0,67	-	0,30 – 0,55
Revestimento	700	51%	0,59	2.10^{-9}	0,35 – 0,55

Fonte: Cerezo (2005)

Berardi e Iannace (2015) Realizaram em seu estudo um comparativo entre o desempenho acústico e resistividade ao fluxo de biomassas ilustradas na figura 31. Os dados de todas as amostras avaliadas são apresentados na tabela 12.

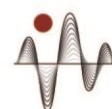


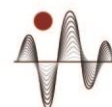


Figura 31: Biomassas avaliadas
Fonte: Berardi e Iannace (2015), adaptado

Tabela 12: Principais propriedades dos materiais estudados neste trabalho e suas medidas de absorção acústica em bandas de um terço de oitava.

Material	Densidade (kg/m³)	Espessura (m)	Resistividade (Rayl/m)	Frequência (Hz)								
				125	160	200	250	315	400	500	1000	2000
Kenaf	50	0.06	2700 (±290)	0.09	0.09	0.09	0.14	0.21	0.25	0.31	0.67	0.87
	100	0.04	3500 (±240)	0.08	0.12	0.16	0.16	0.20	0.30	0.34	0.73	0.93
		0.06	3500 (±240)	0.10	0.17	0.20	0.25	0.36	0.53	0.63	0.94	0.93
Madeira mineralizada	100	0.06	1600 (±300)	0.20	0.26	0.29	0.31	0.57	0.75	0.79	0.64	0.91
	260	0.03	1800 (±450)	0.05	0.07	0.08	0.15	0.06	0.10	0.07	0.16	0.45
Cânhamo	50	0.03	1400 (±170)	0.01	0.03	0.05	0.11	0.16	0.18	0.21	0.47	0.75
Côco	60	0.05	1500 (±200)	0.10	0.19	0.26	0.16	0.16	0.29	0.34	0.68	0.77
		0.10	1500 (±200)	0.25	0.36	0.29	0.32	0.58	0.78	0.82	0.76	0.97
Palha de arroz	60	0.10	410 (±120)	0.21	0.26	0.24	0.25	0.36	0.50	0.63	0.96	0.92
Cana (Misturado)	400	0.04	850 (±130)	0.05	0.10	0.12	0.15	0.09	0.17	0.22	0.49	0.57
Cana (interior)	470		1000 (±125)	0.01	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.10	0.49	0.42
Cana (casca)	145		800 (±40)	0.10	0.11	0.13	0.16	0.12	0.22	0.28	0.72	0.62
Papelão	140	0.115	250 (±50)	0.10	0.13	0.19	0.19	0.39	0.53	0.47	0.50	0.75
Lã de ovelha	40	0.04	2100 (±150)	0.10	0.13	0.11	0.13	0.17	0.26	0.33	0.71	0.95
Cortiça	100	0.03	1000 (±150)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.21	0.78

Fonte: Berardi e Iannace (2015)



De acordo com os dados apresentados a amostra de painel aglomerado de madeira mineralizada de baixa densidade (100 kg/m^3) apresentou o melhor desempenho em absorção sonora, inclusive em baixas frequências.

2.3 Painéis aglomerados de cimento e matéria-prima lignocelulósica e suas características

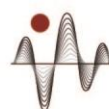
2.3.1 Início da adoção de aglutinante hidráulico na produção de painéis aglomerados através dos painéis cimento-madeira

Por volta de 1920, após a invenção do cimento Portland, o aglutinante mineral foi misturado com lã de madeira dando origem a placa de cimento e lã de madeira, Wood Wool Cement Board (WWCB). Em meados de 1970 uma empresa suíça foi uma das primeiras fabricantes a produzir um painel de construção composto por pequenas partículas de madeira ligadas em uma matriz de cimento. (FRYBORT *et al.*, 2008)

Matthew (2008) relata que no início, a pesquisa e produção dos compósitos aglomerados ligados por cimento se deu particularmente na forma de painéis de baixa densidade usados principalmente para fins de isolamento acústico e consistem em aglomerados de partículas de tamanhos diferentes (fios, flocos, lascas, fibras) unidas por diferentes aglutinantes minerais, incluindo cimento Portland, magnesita e gesso, que originam placas com diferentes propriedades.

De acordo com Latorraca (2000), a composição do painel WWCB é relativamente simples. Ele é composto basicamente de partículas de madeira, cimento (Portland) e água, numa proporção de 1:3:1,5 (com base no peso). Aditivos químicos têm sido empregados com o propósito de reduzir o tempo de endurecimento do cimento, acelerando o desenvolvimento da resistência.

Painéis dessa natureza que possuem densidades na faixa de 300 a 500 kg/m^3 . São adotados para uso como forração e revestimento quando se necessita de materiais mais seguros em relação a flamabilidade e com propriedades de absorção de sonora. (WOLFE e GJINOLLI, 1996)



2.3.2 Considerações sobre as variáveis na produção de painéis de biomassa e madeira com o cimento como aglutinante

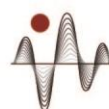
Compósitos de matriz cimentícia incluem todos os compósitos feitos de partículas vegetais ligadas por uma matriz à base de cimento, podem ser elaborados em diferentes configurações de componentes construtivos.

Akkaoui (2014) descreve que a configuração denominada concreto vegetal na qual os agregados são substituídos, parcial ou totalmente, por partículas vegetais de dimensão equivalentes ou inferiores às dos agregados tradicionais. São caracterizados por baixas propriedades mecânicas, o que implica que sua utilização se dá em sistemas não-estruturais e com o objetivo de explorar seu comportamento termoacústico e/ou sua leveza.

A partir do compósito de partículas vegetais e cimento é possível implementar a pré-fabricação e fabricar componentes construtivos diversos como blocos de dimensões variadas e tijolos. Misturas com baixo percentual de água, sem adição de areia e submetidos a conformação em chapas e pressão assumem a configuração painéis aglomerados que podem ser elaborados em densidades, baixa, média e alta.

Os painéis aglomerados de matéria-prima lignocelulósica são produzidos a partir de biomassa processada na forma de fibras ou partículas e se diferenciam pelas variáveis de formulação dos painéis sendo elas: tipo de processamento e composição química da biomassa, granulometria das partículas, tipo e proporção de aglutinantes, tipos e percentuais de aditivos, composição das camadas do painel e densidade aparente final.

O exercício de formulação de compósitos de biomassa e cimento consiste em definir as variáveis citadas de modo que o painel obtenha propriedades finais específicas. Akkaoui (2014) ressalta que atualmente não existe um método que defina as características das partículas a serem utilizadas, seu processo de produção ou o ligante mais adequado.



A grande variedade de espécies que podem ser utilizadas não permite o estabelecimento de regras de formulação. Nesse sentido para cada tipo de partícula é necessário definir um nível de requisitos a atingir que viabilize a utilização do componente para um determinado fim. Os tópicos que seguem apresentam as variáveis da produção de painéis aglomerados de cimento e biomassa as particularidades que orientam a formulação.

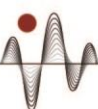
2.3.2.1 Cimento Portland

Aglutinantes hidráulicos adotados na fabricação de painéis de madeira reconstituída devem caracterizar-se por boas propriedades no estado fresco. O comportamento da mistura nesse estado condiciona a sua correta implantação na estrutura de conformação dos painéis e mantém a sua homogeneidade ao longo de todo o processo de implementação. Além disso é importante que o compósito tenha desempenho mecânico mínimo após a etapa de prensagem.

O cimento é um dos materiais mais consumidos no mundo. Em relação a produção de painéis aglomerados, apresenta vantagens como menor gasto energético na produção e cura dos painéis, etapa com maior emissão de CO₂, alternativa para a emissão de formaldeído e atuação como proteção das partículas contra ataques xilófagos.

O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais.

Taylor (1997) descreve que a hidratação do cimento se dá através de reações exotérmicas. Em geral, grande parte do calor de hidratação é atribuído aos componentes alita (C₃S) e aluminato (C₃A). A alita é o componente mais expressivo da constituição do cimento (50% a 70%). O aluminato tricálcico reage rápido com a água e através das substituições iônicas tem sua composição e estrutura substancialmente modificadas.



Sendo assim, cimentos com altos teores de C_3S e C_3A potencialmente apresentarão alto calor de hidratação. O Cimento Portland de alta resistência inicial é aquele com classe de resistência ARI que alcança resistência a compressão em 7 dias de 34 MPa. (ABNT NBR 16697:2018)

A resistência do cimento depende principalmente das taxas de alita (C_3S) e belita (C_2S). Nesse sentido, ao se adicionar qualquer substância a uma mistura de cimento e água o tempo decorrido das fases e a magnitude das reações de hidratação em detrimento do volume de sólidos da mistura serão afetados.

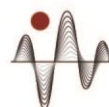
Latorraca (2000) indica que nos primeiros estágios da hidratação do cimento, as reações de hidratação da alita (C_3S) e belita (C_2S) aumentam o pH da pasta de cimento para aproximadamente 12,5, produzindo uma pasta altamente alcalina que pode implicar em inchaço e dissolução das estruturas da madeira.

O autor analisou o desempenho diferentes cimentos na fabricação de painéis cimento:madeira e o cimento CP V-ARI se demonstrou superior nas avaliações de temperatura máxima de hidratação, menor tempo para atingir a temperatura máxima de hidratação, e maior resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

2.3.2.2 Composição química das partículas de biomassa

Em compósitos de materiais lignocelulósicos e cimento, a partícula vegetal deve ser quimicamente inerte em relação ao ligante. Ela não deve conter substâncias que possam comprometer sua hidratação. As características químicas da biomassa vegetal adotada na produção de painéis aglomerados com cimento como aglutinante são muito importantes, visto que aspectos como o teor de extrativos podem prejudicar ou até inviabilizar a adesão cimento-partícula.

Castro (2015) descreve mecanismos de inibição da cura do cimento. O primeiro é a absorção, onde os açúcares cobrem os grãos de cimento e criam uma camada



impedindo a absorção de água. Sendo assim, a partícula de cimento, sob forças moleculares, perde a capacidade de coesão e endurecimento.

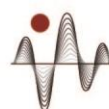
A precipitação se dá quando os inibidores orgânicos, em contato com o meio alcalino do cimento, formam componentes insolúveis. Açúcares e ácidos de alto peso molecular seriam os responsáveis pela formação destes elementos que atuam como barreira para o transporte, solubilidade e precipitação da água durante a cura do cimento. Como a precipitação não explica a aceleração inicial da reação de cura, entende-se que esse processo apenas exige maior quantidade de água na reação do que propriamente a inibe.

Na cura do cimento, a maioria dos íons metálicos reage com doadores de pares de elétrons para formar complexos. Elementos inibitórios possuem átomos de oxigênio que podem se atrair. Isso indica que pode ocorrer quelação com íons de metal e que a complexação é um importante mecanismo na inibição.

Inibidores orgânicos podem influenciar a morfologia e a quantidade de cristais de hidróxido de cálcio formado em pastas de C_3S . A inibição da nucleação do cristal de $Ca(OH)_2$ ocorre naturalmente na presença de íons de Si presentes no cimento. O crescimento do cristal é pausado até ocorra uma saturação de $Ca(OH)_2$. A adição de elementos orgânicos incrementa a inibição pois são mais reativos que os íons de Si e são presentes em maior quantidade na mistura.

A matéria-prima lignocelulósica tem como principais constituintes a celulose, as hemiceluloses e a lignina e provavelmente a celulose não reaja com o cimento, já que sua estrutura é parcialmente cristalina. Contudo, hemiceluloses podem se dissolver em água ou em meio alcalino.

Miller e Moslemi (1991) estudaram a reação de inibição do cimento em relação a 10 diferentes elementos isolados que normalmente estão presentes na madeira: ácido acético, celulose, esterol, ácido graxo, terpeno, lignina, ácido abiético (resina), glicose, hemicelulose e tanino. Entre os resultados, eles apontaram que celulose, lignina,



ácido graxo, resina, esterol e terpeno em concentração menor do que 1% da mistura não afeta a resistência do produto final.

O principal causador da inibição foi a glicose, reduzindo cerca de 40% da resistência à tração. Em menor grau de inibição, a hemicelulose, tanino e ácido acético também afetaram esta característica. Já as propriedades de hidratação foram afetadas pela glicose, tanino e hemicelulose, sendo os dois últimos os que apresentaram maior efeito.

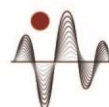
Young (2008) explica que extrativos é um termo geral que compreende toda uma gama de materiais orgânicos solúveis em água e solventes que podem ser extraídos por procedimentos simples. A solubilidade da madeira em vários solventes é a medida da quantidade de extrativos. Os extrativos solúveis em água quente são apontados como um dos principais inibidores do cimento. Entre esses extrativos pode-se destacar a presença dos taninos hidrolisados, compostos por açúcares e ácidos gálico e elágico.

Outro aspecto importante é que em solução alcalina, hemiceluloses podem ser dissolvidas e degradadas em açúcares simples, tais como, glucose, manose e xilose.

A dissolução da hemicelulose causa uma redução de massa e uma mudança nas dimensões do compósito. Consequentemente, ocorrerá um aumento da instabilidade dos painéis de IWAKIRI et al., 2000). devido às mudanças dimensionais das partículas promovidas pelo ataque alcalino. (FAN et al.; 2000).

Hachmi e Moslemi (1990), esses autores relatam que extrativos da madeira com pH ácido, podem inibir a cristalização de cimento muito menos que extrativos mais alcalinos. Isto ocorre, provavelmente, devido à falta de reações complexas entre íons de cálcio e extrativos ácidos, resultando num menor efeito sobre o nível crítico de concentração de íons de cálcio requeridos para a cristalização de cimento.

Madeiras que apresentam uma quantidade de extrativos em água quente acima de 7% normalmente são consideradas inaptas para a mistura com o cimento. No entanto, a espécie *Acacia mollissima*, que continha baixo conteúdo de extrativos (7,7 %),



apresentou um resultado de incompatibilidade, enquanto que a espécie *Quercus suber* (Mamora virgin-cork), com alto teor de extrativos (10,8 %), foi considerada apta ao uso. Isso indica, que o conhecimento da concentração, a composição química das substâncias que compõem os extrativos é importante. (HACHMI; MOSLEMI, 1990)

2.3.2.3 Massa e densidade

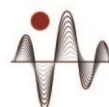
A densidade básica da madeira para uso como elemento destes compósitos deve ser de média a baixa, a fim de assegurar a razão de compactação da chapa dentro de níveis adequados, garantindo assim a apropriada densificação e consolidação do material (IWAKIRI et al., 2000) (ZUCCO, 1999)

Painéis aglomerados apresentam densidade aparente 40% superior à densidade básica da madeira empregada. A razão de compactação é a relação matemática entre a densidade aparente do painel e a densidade básica da madeira, indica o grau de densificação das partículas durante o processo de prensagem. Quanto maior a razão de compactação, maior a compactação das partículas e, conseqüentemente, maior a densidade final do painel. (BRITO, 2024)

Para a produção de painéis de média densidade, entre 750 e 800 kg/m³ a razão de compactação recomendada é de 1,4 a 1,6. A densidade básica da biomassa utilizada para esta finalidade deve estar aproximadamente entre 500 a 650 kg/m³. Segundo os autores, se a madeira for exageradamente leve, as partículas não apresentarão a resistência adequada. (FEFC, 2023)

2.3.2.3 Granulometria

Outro fator que exerce influência acentuada sobre as propriedades das chapas é a dimensão das partículas utilizadas. Iwakiri et al.; (2012) indica que, sobretudo no que se refere à flexão, a dimensão ótima das partículas deve estar entre 2 a 20 mm de comprimento, 0,2 a 2,5 mm de largura e 0,3 a 0,9 mm de espessura.



Segundo Matoski (2005), o consumo de cimento também é afetado pelo tamanho das partículas. Sendo assim, quanto menores as partículas e, portanto, maior a superfície específica das mesmas, maior a quantidade de pasta de cimento para recobri-las e, por conseguinte, maior a quantidade de água utilizada para essa pasta.

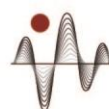
Castro (2015) Pondera que há uma correlação direta entre a massa específica final do compósito e a massa específica básica da madeira utilizada para sua produção. Uma vez que a massa específica básica da madeira e a área superficial de suas partículas são correlacionadas, também pode-se afirmar que quanto menor a área superficial das partículas, maior será a massa específica do compósito.

O tamanho das partículas influencia diretamente na área sua superficial que é exposta e coberta pelo cimento. Nguyen (2014) ao estudar compósitos com partículas de cânhamo inferiu que componentes de partículas maiores apresentaram, em geral, melhor desempenho a compressão. Entende-se que esse resultado se dá pela menor área superficial das partículas e consequentemente melhor cobertura das mesmas pelo cimento. Essa maior cobertura também contribui para a minimização da absorção de água.

2.3.2.6 Porosidade

Compósitos cimentícios são fabricados através da mistura de elementos sólidos (agregado, ligante) e vários famílias de vazios cujo tamanho varia de algumas dezenas de Angstrom ($\text{\AA}$). Os agregados possuem uma porosidade intrínseca chamada ϕ_g , devido à presença de ar intrapartícula. Tendo em conta o tamanho característico dos capilares (da ordem de dez de μm), a porosidade do agregado será descrita como porosidade microscópica. Os agregados naturalmente porosos são de origem vegetal.

A matriz aglutinante também contém vazios de ar que aparecem no momento da fixação de hidratos e secagem do material. Falamos de ar intra-ligante que permite definir a porosidade intrínseca do ligante ϕ_l . O tamanho característico dos poros presentes entre os hidratos de Ca(OH)_2 ou C-S-H, varia entre 0,01 μm e 5 μm e o



tamanho dos poros gerados por um o arrasto de ar varia entre 5 μm e 1 mm. (CEREZO, 2005)

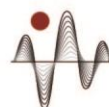
A disposição e compactação dos diferentes constituintes do compósito cria vazios adicionais, gerando porosidade mesoscópica do material. Essa porosidade é um fator importante dependendo do desempenho almejado. Em concretos celulares, por exemplo, a grande proporção de vazios de ar no material é um fator essencial no nível de desempenho. Existem dois tipos de poros: macroporos (diâmetro maior que 60 μm) e microporos (diâmetro < 60 μm) com distribuição de $\frac{3}{4}$ macroporos para $\frac{1}{4}$ microporos.

2.3.2.7 Tratamentos e aditivos

A relação entre a composição química da biomassa influencia significativamente na adesão das partículas com o cimento. Os tratamentos são aplicados com a intenção de minimizar o teor de extrativos e propiciar uma melhor reação de hidratação do compósito.

Na secagem do material lignocelulósico na forma de partículas ocorre a migração dos componentes orgânicos para a superfície e formações cristalinas de açúcares são desenvolvidas quando a água é acrescentada na mistura madeira-cimento. Água quente extrai alguns sais inorgânicos e polissacarídeos de baixo peso molecular, como açúcares e amido. Água também remove certas hemiceluloses como a arabinogalactose.

Aditivos químicos ou aceleradores de cura também podem ser utilizados no tratamento das partículas de madeira. Enquanto alguns aditivos (cloreto de cálcio – CaCl_2) estão diretamente relacionados à cura do cimento, outros (cloreto férrico – FeCl_3 , sulfato férrico – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, cloreto de magnésio – MgCl_2 , hidróxido de sódio – NaOH e hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) possuem ação mais efetiva na minimização do efeito inibidor da madeira sobre a cura do cimento. (MOSLEMI, GARCIA E HOFSTRAND, 1983).



Fan *et al.*; (2012) que soluções salinas, como cloretos (cloreto de cálcio e cloreto de magnésio), sulfatos (sulfato de alumínio) e silicatos (silicato de sódio) atuam mineralizando as partículas de madeira, melhorando assim a compatibilidade entre madeira e cimento.

Segundo Zucco (1999), os aditivos podem atuar como aceleradores, provocando o endurecimento mais rápido da mistura. Isto ocorre pela rápida formação da estrutura cristalina do cimento, que dessa forma antecede a liberação de substâncias inibidoras, contidas na madeira, e que sejam solúveis em água, em quantidades importantes, que seriam impeditivas para a ocorrência da reação exotérmica do cimento.

Os aditivos cloreto de cálcio e magnésio, silicato de sódio ou potássio em uma mistura de sulfato de alumínio e cal hidratado, são mais comumente utilizados em uma solução diluída de 1 a 5%, e, em relação ao cimento variam numa faixa de 0,5 a 3%. (BRAHMIA e ALPAR, 2021) (ASHORI *et al.*; 2020)

2.3.2.8 Densidade

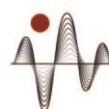
Primeiramente as densidades aparentes dos compósitos de cimento e biomassa influenciam diretamente sua resistência mecânica. Nesse sentido a definição de densidades se dá através do uso a qual destina-se os componentes.

Nguyen (2014) cita as definições para construção com cânhamo francesas que são muito pertinentes. São descritas quatro densidades que são destinadas ao uso para os quais são destinados os componentes sendo eles: forro, piso, divisórias, envoltória externa e blocos pré-fabricados. A tabela 13 indica as densidades.

Tabela 13: Densidades de compósitos relativas ao uso destinado

Uso:	Forro	Piso	Divisórias	Envoltória externa	Blocos
Densidade:	250 kg/m ³	500 kg/m ³	420 kg/m ³	800 kg/m ³	380 kg/m ³

Fonte: Nguyen (2014)



2.3.2 Formulações

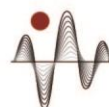
2.3.2.1 Relação biomassa-cimento

Comercialmente a relação da quantidade de madeira e cimento dos painéis incorporam 1 parte de madeira para 2,75 a 3,0 partes de cimento, com base no peso. Para uma dosagem elevada de ligante (concentração volumétrica em torno de 40%), o comportamento é semelhante à de uma matriz aglutinante contínua na qual as partículas vegetais são submersas, o desempenho mecânico aumenta e tende ao do ligante puro.

Akkaoui (2014) descreve o comportamento relativo à compressão do compósito de madeira e cimento. No início do ensaio, este comportamento é elástico linear, qualquer que seja a dosagem de ligante. O limite deste domínio elástico depende, por sua vez, da quantidade aglutinante no material. Quanto maior for esta quantidade, mais amplo é o domínio de elasticidade. Este resultado pode ser explicado pelo fato de o carregamento ser suportado em grande parte pelo aglutinante no início do teste, em particular para formulações com alta dosagem de ligante.

A curva tensão/deformação de um compósito de madeira e cimento com baixo teor de ligante não apresenta pico de tensão. O platô correspondente à compactação das partículas e está geralmente localizado no nível de tensões máximas. Essa ausência de pico pode advir do fato de que, com baixo teor de ligante, apenas uma camada ligante fina envolve o agregado e não permite um maior suporte do carregamento pelo aglutinante. Com um teor constante de partículas de biomassa a resistência a compressão aumenta à medida que o teor de aglutinante aumenta.

No que tange às propriedades elásticas, em compósitos de cimento e cânhamo, nas misturas com menor percentual de ligante (cimento:1,25 / biomassa:1) o desempenho tende a cair com o tempo de cura. Presume-se que esse efeito se dá, pois, a camada de ligante entre as partículas é fina e perde adesão com o passar do tempo. Para as formulações com maior percentual de ligante (cimento: 1,75 / biomassa: 1) e (cimento: 2,75 / biomassa: 1) o módulo de elasticidade aumentou entre 28 e 104 dias com crescimento mais significativo para a proporção (cimento: 1,75 / biomassa: 1).



2.3.2.2 Relação água:cimento

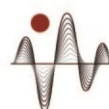
Em compósitos cimentícios com materiais lignocelulósicos a relação água e cimento apresenta algumas particularidades. Primeiramente, depende da geometria das partículas de madeira. Partículas menores e mais finas possuem uma maior área superficial e, por consequência, uma maior superfície de absorção de água.

Cerezo (2005) coloca a questão da fase de sucção das partículas. Quando o agregado está insaturado, ele absorve a água presente na argamassa e sua taxa de saturação aumenta pelo período de 1 a 2 horas. Após atingir a taxa de saturação (S_r) máxima a água sai do agregado, que desempenha, portanto, um papel de “reservatório de água”. Por outro lado, no caso de agregados saturados de água, a fase de sucção deixa de existir. Durante algumas horas, a taxa de concentração (S_r) permanece constante em 100% (platô). Então, a taxa de concentração (S_r) diminui porque o agregado libera a água.

A hidratação do cimento que controla a secagem dos agregados. Este comportamento em relação à água indica que os agregados leves devem ser previamente saturados, de modo a permitir que a reação de hidratação do aglutinante se inicie com a água disponível na mistura. A absorção de água pelas partículas também pode implicar em possíveis variações dimensionais do material, induzido em particular pelo inchamento dos agregados.

2.3.2.3 Métodos de mistura dos constituintes do compósito de biomassa e cimento

De modo a promover uma umidificação homogênea e impedir a formação de embolamentos. O protocolo mais comumente utilizado consiste em primeiro pulverizar a água com o aditivo químico diluído sobre partículas no misturador. A mistura é realizada por 5 minutos. (LATORRACA 2000) (CEREZO, 2005) (NGUYEN, 2014) (CASTRO, 2015) (LILGE, 2018)



2.3.2.4 Compactação e prensagem

A compactação envolve uma força compressiva sobre o material que reduz sua porosidade e ao mesmo tempo provoca aumento de sua massa relacionada ao volume aparente.

Três parâmetros dependem diretamente da taxa de compactação: a densidade inicial do corpo de prova, a restrição de compactação relativa à espessura mínima e a dosagem de agregados no material compactado, refletindo a quantidade de agregado compressível por unidade de volume de material.

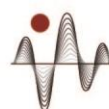
Em geral os painéis de madeira e cimento são prensados a frio e a pressão de em média 40 kg/cm^2 é aplicada de modo a acomodar o colchão de partículas nas barras de aço que limitam a espessura previamente delimitada. Após a prensagem as formas são grampeadas por um período de 24 horas.

2.3.2.5 Cura

Akkaoui (2014) analisou efeitos de cura endógena produzidas com o envolvimento das amostras em filme plástico. A razão entre a cura endogênica e a cura por dessecação ($R_{\text{endogênica}} / R_{\text{dessecação}}$), e identificou que para o material estudado a resistência à compressão condições endógenas atinge $2/3$ do que deveria ser nas condições de dessecação descritas. A secagem dos constituintes contribui, portanto, com pelo menos $1/3$ para a resistência à compressão compósitos de madeira e cimento.

O protocolo recomendado para cura em regime de dessecação é a manutenção dos corpos de prova em câmara de climatização a uma temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e a $65 \pm 5\%$ de umidade relativa.

2.4 O bambu como matéria-prima promissora



2.4.1 O bambu como aliado no combate às emissões de CO₂

O ciclo do carbono tornou-se recentemente um importante devido à mudança climática, sendo que as estimativas do potencial de sequestro de carbono pelas florestas e seus estoques desempenham um papel essencial na formulação estratégias para reduzir as emissões de CO₂.

Adu-Poku *et al.*; (2023) realizaram um estudo em Gana no continente africano que teve como objetivo estimar o armazenamento de carbono da biomassa de povoamentos naturais de *Bambusa vulgaris* na Reserva Florestal Bobiri, incluindo biomassa localizada acima e abaixo do solo, detritos lenhosos grosseiros e folhagens. Além disso realizaram uma comparação de estoques de biomassa e carbono de espécies de bambu em outros países. Os dados são apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Comparação de estoques de biomassa e carbono de bambu em vários países

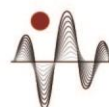
Espécie	Colmos por ha ⁻¹	Número de amostras	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Estoque de Carbono (Mg ha ⁻¹)	Localização
B. Vulgaris	3710	2114	90	43	Gana
B. Vulgaris	7904	18	55	-	Thailândia
B. Vulgaris	2933	12	97	50	Bangladesh
B. Vulgaris	2296	-	63	30	Camarões
B. Vulgaris	6257	15	115	51	Gana
B. Vulgaris	17900	80	258	139	Nigéria
B. Vulgaris var Vitatta	7171	15	71	83	Gana

Fonte: Adu-Poku *et al.*; (2023)

Observa-se que no mesmo território, Gana, a variedade *Bambusa Vulgaris var Vitatta* apresentou um estoque maior que a espécie similar *Bambusa Vulgaris*, fato que se repetiu para os demais países considerados exceto na Nigéria. A tabela 15 apresenta a avaliação do estoque de carbono de florestas naturais, plantações de teca, terras em descanso e terras cultivadas em quatro zonas ecológicas de Gana.

Tabela 15: Comparação com outros sistemas de uso da terra em várias zonas ecológicas em Gana

Espécie	Eco-Zona	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Estoque de Carbono (Mg ha ⁻¹)	Referências
Bambu	MSDF	90.4	42.9	Adu-Poku (2023)
	Savana	1.9	1	



Terras em descanso	DSDF	3.4	1.7	44
	MEF	5.1	2.6	
Cultivos gerais	DSDF	1.6	0.8	44
	MSDF	4.5	2.2	
	Savana	52.2	26.1	
Cultivo de Teca	DSDF	51.2	25.6	44
	MSDF	195.4	97.7	
	Savana	31.8	15.9	
Florestas naturais	DSDF	356.6	178.3	44 e 45
	MEF	458.8	229.4	
	EF	284	142	
	MSDF	254	127	
	DF	202	101	
	WS	124	62	

MSDF: Floresta Semi-Decídua Úmida / DSDF: Floresta Seca Semidecidual; / MEF: Floresta Perene Úmida; / EF: Floresta Perene; / WS: Savana Arborizada.

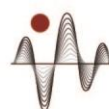
Fonte: Adu-Poku et al. (2023)

Novamente o bambu se destacou e as áreas ocupadas pela gramínea acumularam mais carbono em biomassa do que terra utilizada em cultivos gerais e em descanso.

Em todo o mundo, os edifícios são responsáveis por cerca de 40% das emissões de CO₂ relacionadas com energia e processos, 50% de todos os materiais extraídos, 33% do consumo de água e 35% dos resíduos gerados. Outros impactos ambientais incluem esgotamento de recursos; poluição do ar, da água e da terra e perda de biodiversidade. (WGBC, 2023)

Yen e Lee (2011) avaliaram que componentes e sistemas construtivos de bambu apresentam um potencial alto de sequestro de carbono. O bambu Moso, por exemplo, tem uma capacidade de sequestro de carbono de cerca de 5,09 t/hm², o que é 1,46 vezes a das florestas de abetos e 1,33 vezes a das florestas tropicais. Além disso o bambu é de cultivo perene com ciclo de crescimento curto, em média 3 a 6 anos, consideravelmente mais rápido que o das florestas de madeira.

Xu *et al.*; (2022) Selecionaram empresas representativas em toda a indústria da construção com bambu chinesa de um dos principais materiais produtos industriais de bambu que consiste na madeira laminada de bambu (LBL). Avaliaram que o potencial de armazenamento de carbono refere-se principalmente à quantidade de carbono armazenado na fase de plantio. O tratamento do bambu pelo método carbonização é



o processo que mais contribui para as emissões de carbono, seguido pelo tratamento antimoho, anticorrosão e secagem e aplicação do adesivo.

No contexto brasileiro, Caldas *et al.*; (2019) argumenta que desde 2015, o Brasil está comprometido com determinados metas de redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) por suas Contribuições Nacionais Determinadas Pretendidas - iNDC. Nesse contexto o uso de materiais de biomassa pode ser um importante agente no cumprimento desses objetivos, especialmente na construção civil.

Alinhado com essa perspectiva, foi desenvolvido o bioconcreto de bambu, substituindo parte do OPC para metacaulim (MK) e cinza volante (FA), reduzindo o teor de água usando aditivo superplastificante e melhorando o desempenho mecânico usando cloreto cálcio (CaCl_2) como aditivo de ajuste do acelerador. A figura 32 ilustra o compósito.



Figura 32: Uma amostra do bioconcreto de bambu
Fonte: Caldas *et al.*; (2019)

Em termos da soma de todos os impactos instantâneos no aquecimento global (GWI_{cum}), o bioconcreto com maior percentual cinzas volantes e adição de partículas de bambu apresentou até 77% melhor desempenho quando comparado aos 100% em massa de concreto de cimento Portland comum. A figura 33 ilustra as vantagens do cultivo de bambu que para além das características de manejo e fixação de CO_2 mencionadas atua no combate a erosões.

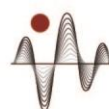




Figura 33: Infográfico acerca das vantagens de cultivo do bambu.
Fonte: Elaboração própria

2.4.2 Potencial econômico do bambu

De acordo com dados do INBAR (2024), o bambu é uma gramínea atua como matéria-prima para diversos usos, fornecendo uma vasta gama de produtos sustentáveis, opções de subsistência e serviços ecossistêmicos. Se pudermos aproveitar o potencial do bambu, o Sul Global estará mais perto de alcançar seus ambiciosos objetivos de desenvolvimento, clima e meio ambiente, incluindo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, as metas de REDD+, os compromissos do Acordo de Paris e as Metas de Biodiversidade de Aichi. A figura 34 apresenta a distribuição de bambus no planeta correlacionando-os com as zonas climáticas. (UNFCCC, 2026)

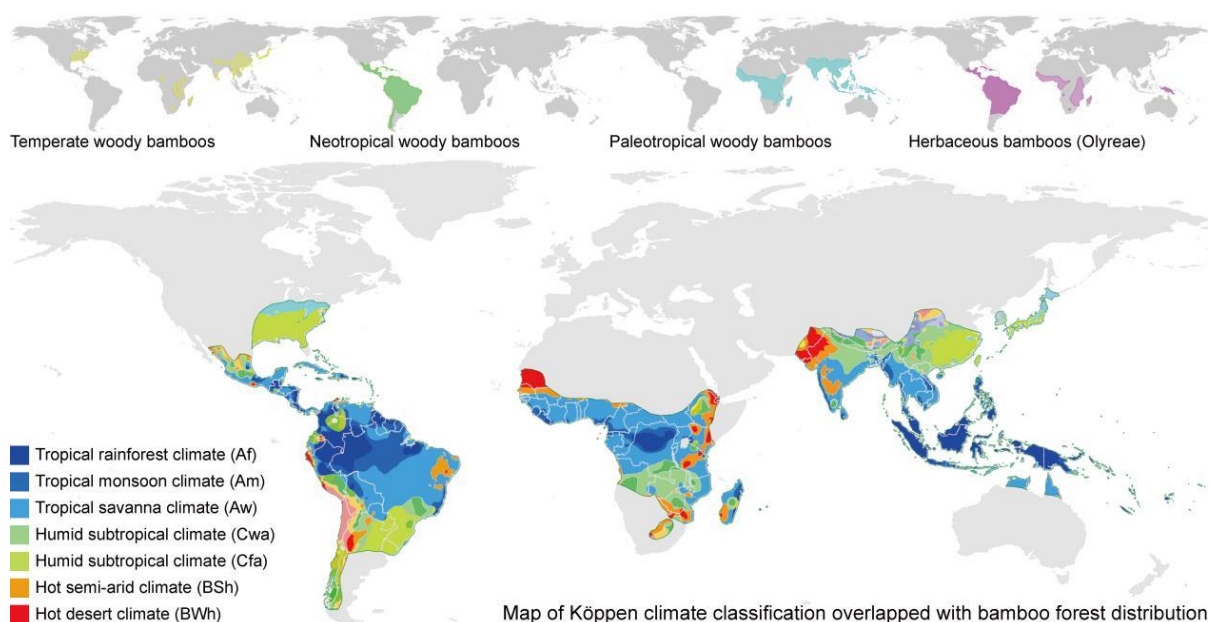
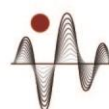


Figura 34: Distribuição da floresta de bambu e a sobreposição com as zonas climáticas
Fonte: Huang; Sun e Musso; (2017)



Canavan *et al.*; (2017) coloca que o Bambu é um recurso com potencial único para combater a pobreza e os desafios dos recursos naturais pois se trata de uma espécie endêmica em várias das regiões mais pobres do mundo, nos trópicos e subtrópicos, sendo que o Brasil fica em segundo lugar em quantidade de espécies presentes no território.

Uma singularidade do bambu em detrimento de outras espécies de biomassa é que o mesmo configura como uma matéria-prima protagonista de uma cadeia produtiva. A aplicabilidade da gramínea no beneficiamento primário com a utilização dos colmos como peças estruturais e matéria-prima para cestaria e mobiliário e alimentação. No que se denomina beneficiamento secundário com a produção das chapas de Bambu Laminado Colado tem-se aplicações estruturais e na produção de piso, revestimento, utensílios em geral. A cadeia de valor do bambu é ilustrada na figura 35.

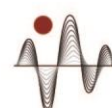


Figura 35: Diagrama da Cadeia de Valor do Bambu

Fonte: Elaboração própria

Outro fato que merece destaque é a contribuição para a cadeia produtiva no meio rural, pois as plantações de bambu crescem em um ritmo consideravelmente maior que árvores e pode ser colhido em ciclos. Em uma mesma touceira, os colmos podem ser encontrados em diferentes idades e estágios de crescimento.

Isso implica que o manejo e extração dos colmos se dá de maneira constante promovendo a fixação da mão-de-obra do campo. No entanto, a abrangência de



empregabilidade da cadeia produtiva do bambu não se limita ao âmbito rural, pois o mesmo serve de matéria-prima para diversos produtos e muitos deles com alto valor de conhecimento e beneficiamento agregado.

O endemismo no Brasil conta com 12 gêneros e 175 espécies, além de tratar-se de uma cultura perene. Um estudo avaliou a probabilidade de adaptação de algumas espécies de bambu em território brasileiro, o resultado verificado para *Bambusa Vulgaris* foi uma área com probabilidade de adaptação de aproximadamente 600 000 km², a distribuição no território nacional se dá de forma significativa na região Amazônica pode ser observado na Figura 36. (SANTOS, 2017)

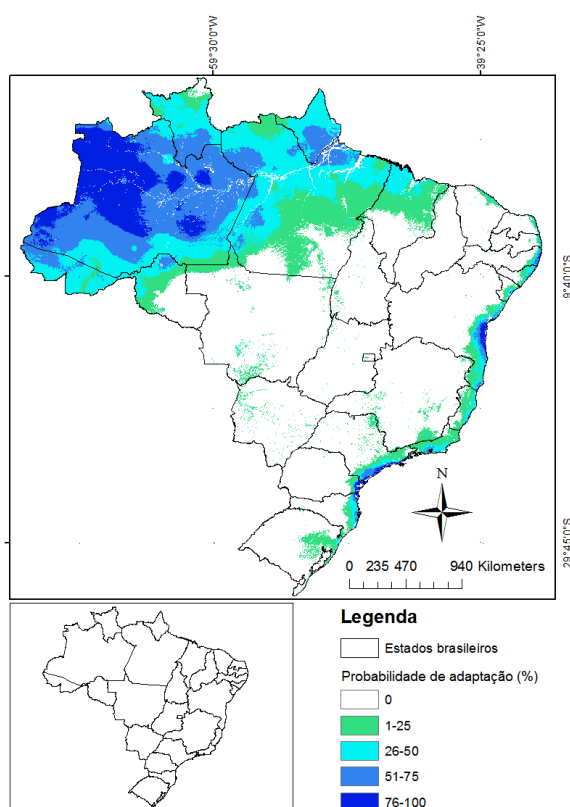
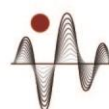


Figura 36: Probabilidade de adaptação para cultivo da espécie *Bambusa vulgaris*
Fonte: Santos (2017)

Conforme Salgado (2014), na região amazônica são encontradas florestas nativas de bambu cobrindo uma área de 180.000km², metade no Brasil. Essa ocupação significativa da espécie em território nacional não se restringe aos Estados pertencentes a região Amazônica, sendo que o Brasil é o país da América Latina com maior índice de florestas endêmicas.



Segundo Bayma *et al.*; (2023) ocorrência de bambu *Guadua* no Estado do Acre, é de aproximadamente 21,8 bilhões de hastes perfazendo um total de 800,1 milhões de m³ de bambu distribuídos por tipologias florestais distintas. Nesse sentido, Bayma; Pereira; Amaral (2023) realizaram um estudo de modo a precificar o potencial econômico do bambu na região. Foram escolhidos sete municípios como parcelas amostrais para coleta de dados.

Com base nos dados apresentados, a oferta natural de bambu a ser destinada como matéria prima para a produção de placas de bambu, tem um valor total estimado de 4,4 bilhões de dólares, de acordo com os preços praticados no mercado internacional e no cenário local. E para a produção de carvão de bambu, considerando que no inventário realizado foi estabelecida a utilização de 35% do volume total da biomassa do estado, teve seu volume estimado em 778,5 milhões de dólares. (BAYMA; PEREIRA; AMARAL; 2023)

2.4.2.1 Características botânicas: Morfologia

A riqueza e a diversidade morfológica dos bambus são a base do conhecimento sobre sua taxonomia, e seu entendimento é crucial para o confiável reconhecimento de espécies. O bambu pode ser dividido em raiz, caule, folhas e inflorescências

Filgueiras e Viana (2017) Indicam que a *Bambusa Vulgaris var. Vitatta* é uma espécie tropical de origem incerta. A porção subterrânea do caule, denominada rizoma é do tipo paquimorfo ou entouceirante. Suas touceiras têm grande porte sendo que os colmos (parte aérea do caule) podem ter até 25 m de altura, e 12 cm de diâmetro na base. A espécie é popularmente conhecida como bambu brasileiro devido a coloração amarela com listras verticais verde escuras, conforme ilustrado na figura 37.

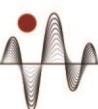




Figura 37: olhas, galhos e colmos de *B. vulgaris* var. *vittata*, Tatuí-SP
Fonte: Filgueiras e Viana (2017)

2.4.2.2 Características botânicas: Anatomia

Liese (1998) é reconhecido pela sua detalhada descrição botânica do bambu. Em se tratando de *Bambusa Vulgaris* var. *Vitatta* o colmo é caracterizado por estruturas denominadas nós e entrenós que apresentam uma parede de colmo com espessura variável circundando uma grande cavidade denominada lacuna. O córtex (casca), forma a parte externa do colmo. As células epidérmicas são muitas vezes cobertas externamente por uma camada cutinizada de celulose e pectina com lamelação tangencial que oferecem proteção contra acúmulo e perda de água. As estruturas mencionadas são ilustradas na figura 38.

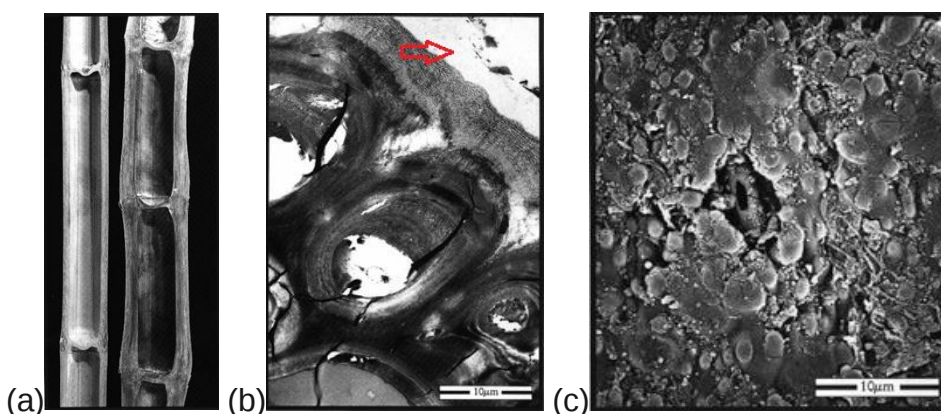
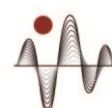


Figura 38: (a) Bambu dividido com paredes internodais do colmo ao redor da lacuna e nós de partição. (b) Células epidérmicas mais externas cobertas por uma camada cutinizada em



Bambusa Vulgaris. (c) Revestimento de cera sobre a epiderme com estômatos em *Phyllostachys viridiglaucens*.
Fonte: Liese (1998)

O tecido fundamental de um colmo consiste em células de parênquima com feixes de vasos, compostos por vasos de metaxilema, tubos crivados com células companheiras e fibras, ilustrado de forma tridimensional na figura 39.

Em média, um colmo consiste em cerca de 52% de parênquima, 40% de fibras e 8% de tecido condutor (vasos, tubos crivados, células companheiras). A parte superior de um colmo contém igual ou mais fibras por unidade de área do que o parênquima, em contraste com a parte basal que tem um maior conteúdo de parênquima.

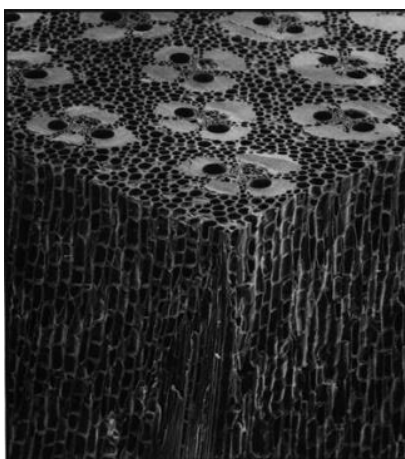
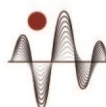


Figura 39: Vista tridimensional do tecido do colmo com feixes vasculares embutidos em parênquima fundamental na espécie *Oxytenanthera abyssinica* (1.500X)
Fonte: Liese (1998)

Anatomicamente a *Bambusa Vulgaris* var. *Vitatta* apresenta duas configurações de feixes vasculares. O primeiro denominado Tipo III apresenta além da cadeia vascular central, um cordão de fibras separado, localizado no lado interno do feixe vascular central. A bainha de fibra no protoxilema é geralmente menor que as demais.

Nos entrenós basais, é frequentemente encontrado em combinação com o Tipo IV, que consiste em três partes: o cordão vascular central com pequenas bainhas de esclerênquima e dois filamentos de fibras isolados localizados no floema e no lado do protoxilema. A figura 40 ilustra os Tipos III e IV com demarcação em vermelho para



indicar o posicionamento dos filamentos de fibras separados, em amarelo as bainhas de fibra.

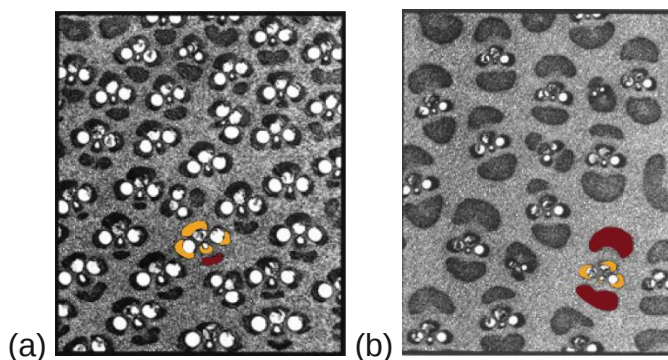


Figura 40: (a) Feixe vascular Tipo III com um feixe de fibras isolado. (b) Feixe vascular Tipo IV com dois feixes de fibras isolados.

Fonte: Liese (1998)

A estrutura anatômica da *Bambusa Vulgaris* var *Vitatta* indica que a presença dos feixes vasculares resulta em uma biomassa com porosidade intrapartícula significativa e que há uma concentração maior de fibras nos entrenós mais próximos a base do colmo.

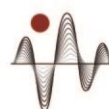
Filgueiras e Viana (2017) descrevem que as células parenquimáticas exercem funções no colmo, como o armazenamento e mobilização de compostos energéticos, sendo o amido a principal substância energética armazenada e seus teores variam de acordo com idade, altura, fase fisiológica da planta e estação do ano.

Em colmos de *Bambusa Vulgaris* Schard. a fração fibrosa é muito maior em colmos jovens, sendo de 824,08 g/kg em colmos com 1 ano de idade e 75,22 g/kg em colmos com 5 anos de idade. (AZZINI; GONDIM-TOMAZ, 1996)

As fibras são caracterizadas por sua forma esbelta, longas e afiladas em ambas as extremidades e em alguns casos bifurcada. É importante salientar que o comprimento das fibras não é homogêneo visto que ele aumenta em direção a parede externa do entrenó. Os valores de comprimento e largura da fibra de algumas espécies são dados na tabela 16.

Tabela 16: Dimensões de fibras de espécies de bambu

Espécie	Comprimento (mm)	Largura (µm)
<i>Bambusa tulda</i>	1.45	24.0



Bambusa vulgaris	2.64	10.0
Dendrocalamus strictus	2.23	22.0
Guadua angustifolia	1.60	11.0
Phyllostachys bambusoides	2.15	15.0

Fonte: Liese (1998)

Durante o crescimento do colmo, os feixes vasculares de uma bainha estão conectados com aqueles na zona periférica do colmo. No tempo de maturação, uma camada de abscisão é formada na base da bainha. Quando a bainha é descamada, uma cicatriz circunferencial das extremidades fechadas dos feixes vasculares permanece ao redor do nó.

A maioria dos principais feixes vasculares axiais passa diretamente de um entrenó através o nó para o próximo entrenó. No diafragma, a estrutura vascular típica do bambu desaparece e há uma maior concentração de fibras e poros. A estrutura tridimensional da região nodal é apresentada na figura 41.

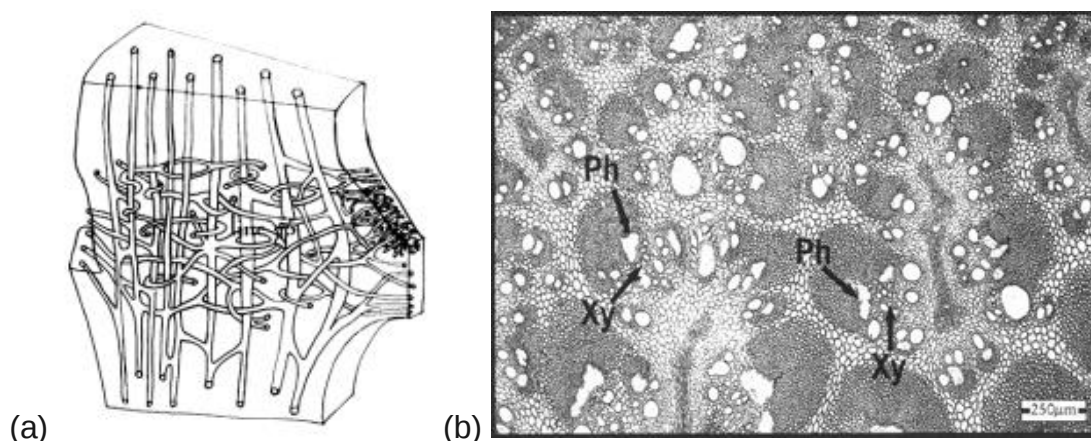


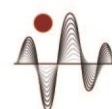
Figura 41: (a) Ilustração de anastomoses vasculares dentro da região nodal. (b) Corte transversal de um diafragma com estruturas de feixes vasculares irregulares (Ph - floema, Xy - xilema) na espécie *Schizostachyum pseudolima*

Fonte: Liese (1998)

2.5 Considerações sobre as variáveis adotadas no estudo

2.5.1 Definição da espécie

A determinação da compatibilidade é um importante fator na determinação da viabilidade da produção de painéis. A biomassa contém composições químicas não



estruturais conhecidas como substâncias extrativas, componentes não pertencentes à parede celular que funcionam como reservas alimentares e resistência à decomposição. Geralmente, o bambu contém materiais extrativos como resinas, lipídios, ceras, taninos, pentosana, amido e sílica.

Hartono *et al.*; (2022) declara que a holocelulose é uma fração polissacarídica da parede celular da estrutura vegetal, celulose é a parte resistente, comumente chamada de α -celulose. A lignina atua na como matriz em torno dos componentes polissacarídeos o que fornece rigidez e resistência à compressão, tornando as paredes celulares hidrofóbicas e impermeáveis à água.

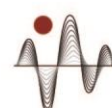
Ao avaliar a composição química de três espécies de bambu amplamente presentes em território brasileiro, sendo que dentre elas a única destinada a aplicação estrutural para edifícios é a *Dendrocalamus Asper*. Os dados na apresentados Tabela 17 permitem observar que a espécie *Bambusa Vulgaris* var *Vitatta* apresenta menores teores de lignina e α -cellulose em todas as partes do colmo, assim como os menores teores de extrativos.

Tabela 17: Composição química de espécies de Bambu

Espécie	Parte do colmo	Teor de extrativos (%)	Holocelulose (%)	α -Cellulose (%)	Lignina (%)
Dendrocalamus asper	Base	4.27	71.99	48.59	28.96
	Meio	5.92	73.22	49.64	28.14
	Topo	4.83	71.72	44.55	26.98
Bambusa Vulgaris var Vitatta	Base	2.46	73.81	36.77	23.60
	Meio	1.93	68.87	37.70	23.16
	Topo	2.53	62.01	37.91	26.22
Bambusa Vulgaris	Base	4.67	77.16	54.88	33.52
	Meio	5.56	75.90	51.56	29.08
	Topo	5.41	75.00	51.43	28.76

Fonte: Hartono *et al.*; (2022)

O coeficiente de aptidão ou compatibilidade (A) entre biomassa e cimento é determinado de acordo com a Equação 1 adotada por Vieira *et al.*; (2003) Sendo que classifica-se a compatibilidade como muito boa quando o percentual de compatibilidade está acima de 80%, boa quando o percentual está entre 60% e 79%, Razoável quando o percentual está entre 50% e 59% e ruim quando o coeficiente de compatibilidade estiver abaixo de 50%.



$$A = \frac{T_m - T_0}{T_M - T_0} \times 100$$

(3)

Equação 1: Coeficiente de compatibilidade entre partículas lignocelulósicas e cimento

onde:

A = Coeficiente de compatibilidade (%)

T_m = Temperatura máxima da amostra

T₀ = Temperatura ambiente

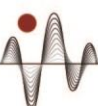
T_M = Temperatura máxima da amostra padrão

Baracho Jr (2020) Determinou a compatibilidade entre os resíduos de *Bambusa vulgaris* var. *vulgaris*, anatomicamente semelhante a *Bambusa Vulgaris* var. *Vitatta*, e o cimento foi feita a partir da obtenção da temperatura máxima de hidratação de amostras padrão (cimento puro + água) tratadas com NaOH a 2% em um sistema adiabático. Para a preparação dos compostos formados a partir do uso de cimento+madeira+areia+água, optou-se por adotar a relação 1:0,05:3,0:0,4 respectivamente. O coeficiente de compatibilidade obtido para bambu foi de 64,14%, considerado nível boa compatibilidade.

Os teores de extrativos da espécie *bambusa vulgaris* var *vitatta*, são bem menores que o limite de 7% recomendado para a fabricação de painéis de cimento e madeira. Além disso a compatibilidade verificada entre o cimento e a espécie *bambusa vulgaris* é um indicativo do aspecto promissor da variedade *bambusa vulgaris* var *vitatta*.

A razão de compactação, é a relação entre a densidade do painel e a densidade básica da madeira. Para que haja área de contato satisfatória entre as partículas do painel, a razão de compactação deve ser de no mínimo 1,3. A densidade da biomassa é um dos requisitos básicos na escolha de espécies para produção de painéis aglomerados, por ser o principal parâmetro que influencia a razão de compactação. (MOSLEMI, 1974)

Santos *et al.*; (2016) avaliaram a densidade básica da espécie da *bambusa vulgaris* var *vitatta*, como sendo 0,462 g/cm⁻³. Hartono *et al.*; (2022) verificou a densidade da



espécie como $0,61 \text{ g/cm}^3$ no meio do colmo. Os valores de densidade básica observada na Tabela 18 para a espécie *Bambusa Vulgaris* var *Vitatta* é bem menor comparada com a *Dendrocalamus Asper* e *Bambusa Vulgaris*, o que representa um elemento promissor sua adoção na confecção de painéis com função de absorção sonora.

Como o fenômeno da absorção advém da dissipação energética ocasionada em grande parte pela resistência ao fluxo de ar da estrutura porosa e sua tortuosidade. Menor densidade de biomassa implica em um maior volume de partículas na estrutura do painel, o que pode incorrer em melhora das propriedades dos meios porosos.

Tabela 18: Teste Duncan de propriedades físicas

Espécie	Parte do colmo	Densidade (g/cm^3)	Teor de umidade (%)
Dendrocalamus asper	Base	0.84	122.12
	Meio	0.82	87.58
	Topo	0.83	85.78
Bambusa Vulgaris var Vitatta	Base	0.60	223.75
	Meio	0.61	211.96
	Topo	0.66	126.07
Bambusa Vulgaris	Base	0.79	79.54
	Meio	0.77	66.42
	Topo	0.78	62.32

Fonte: Hartono et al.; (2022)

2.5.2 Tratamento da biomassa

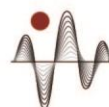
O percentual de extrativos é um fator crucial para a compatibilidade entre biomassa e cimento. A caracterização físico-química de partículas de *Bambusa Vulgaris* foi realizada para partículas in natura e partículas que sofreram imersão por 1h em água em temperaturas entre 80°C e 100°C . Os resultados podem ser observados na tabela 19.

Tabela 19: Resultados das análises físico-químicas das partículas lignocelulósicas

Material	Absorção (%)	Umidade (%)	Densidade (g/cm^3)	Extrativos (%)	Lignina (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)
BN	757,14	21,08	0,68	6,14	20,57	51,90	18,95
BL	833,75	40,58	0,64	4,84	20,78	51,72	19,17

BN: Bambu sem tratamento; / BL: Bambu com tratamento;

Fonte: Miranda et al.; (2022)



Os dados indicam que o teor de extrativos encontrado é menor que 7%, o teor máximo recomendado para painéis de madeira-cimento. A ação de lavagem implicou em uma redução do percentual de extrativos em 2%, sem prejuízo da densidade, lignina, celulose e hemicelulose.

Manalo et al.; (2015) investigou o efeito do tratamento alcalino em diferentes percentuais de NaOH em fibras de bambu. As fibras foram orientadas aleatoriamente, conforme ilustrado na Figura 42 com comprimentos variando de 40 a 60 mm e diâmetro médio de 161,52 nm, tratadas com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 4%, 6% e 8% em volume de água.



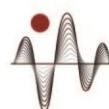
Figura 42: Fibras de bambu tratadas em solução de NaOH e orientadas de forma randômica.

Fonte: Manalo et al.; (2015)

As fibras de bambu foram embebidas em solução de NaOH por 3 h à temperatura ambiente, em seguida foram lavadas em água corrente, secas em temperatura ambiente por 8 h, e secas em estufa a 50 °C por mais 6h.

Análises de desempenho mecânico dos compósitos com fibras tratadas e sem tratamento indicaram que compósitos com fibras tratadas em solução com 6% em peso de NaOH exibiram a maior resistência à flexão, 44,2 MPa, que é 7% maior do que os compósitos não tratados.

Esse aprimoramento se deve à remoção de hemicelulose, ceras, lignina e outras impurezas, criando uma topografia de superfície áspera nas fibras de bambu e oferecendo uma melhor adesão interfacial fibra/matriz. No entanto para compósitos com fibras tratadas em solução de 8% em peso de NaOH, a resistência foi menor



comparada ao tratamento com percentual de 6%. Esse resultado indica que tratamentos em solução com percentual acima de 6% incorre em perda de hemicelulose e lignina na região interfibrilar e consequente processo de degradação estrutural da biomassa.

A partícula de bambu é uma unidade específica, diferente da fibra de bambu, consiste em fibras distribuídas na matriz (parênquima). Em pesquisa anterior, descobriu-se que as células do parênquima reagiram diferentemente com álcali em comparação com fibras de bambu. (RAY *et al.*; 2005) (CHEN *et al.*, 2021)

Chen *et al.* (2021) investigaram as alterações físicas de partículas longilíneas de bambu Moso (*Phyllostachys pubescens*) imersas em soluções de NaOH com várias concentrações (2, 5, 10, 15 e 25%) à temperatura ambiente por 2 h. As partículas de bambu tratadas foram lavadas com água para remover o álcali e secas em forno a 50 °C por 8 h. A Figura 43 ilustra as alterações físicas das amostras de bambu tratado e não tratado com álcali.

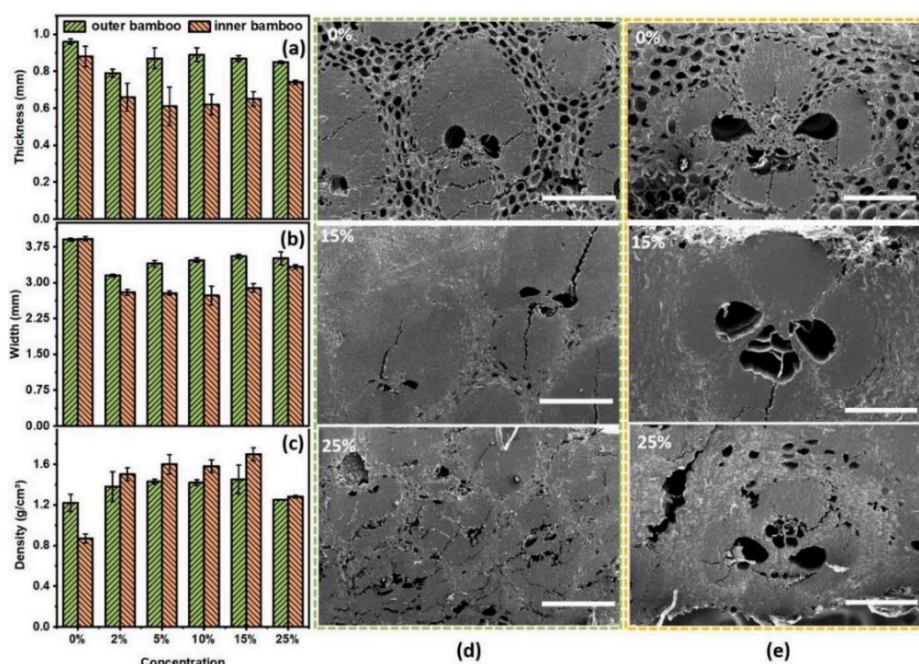
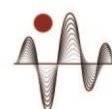


Figura 43: Propriedades físicas das amostras de bambu (a) espessura, (b) largura e (c) densidade; microestrutura da seção transversal das amostras de bambu camada externa (d) e camada interna (e) tratadas por solução alcalina em várias concentrações (barra de escala = 200 μm).

Fonte: Chen *et al.*; (2021)



Nas camadas externa e interna observou-se um encolhimento dos poros significativo durante o processo de secagem das amostras tratadas por álcali na concentração de 15%. Já na concentração de 25% há a uma desconfiguração das estruturas de lumens porem com maior porosidade que a amostra resultante do percentual de 15%.

O mais provável é que a porosidade maior observada no maior percentual seja consequência de processos de degradação da estrutura. Em todas as amostras tratadas observou-se uma perda de peso, largura e espessura das partículas, porém sem alteração no comprimento.

A mudança na microestrutura é ilustrada na figura Figura 44, antes e depois do tratamento alcalino. Nos percentuais de 5% e 15% da solução observou-se que houve pouca mudança na estrutura da fibra. As células do parênquima por sua vez, sofreram menor alteração na face externa do que na interna para o percentual de 5% e nos percentuais de 15 e 25% praticamente colapsaram em ambas as faces.

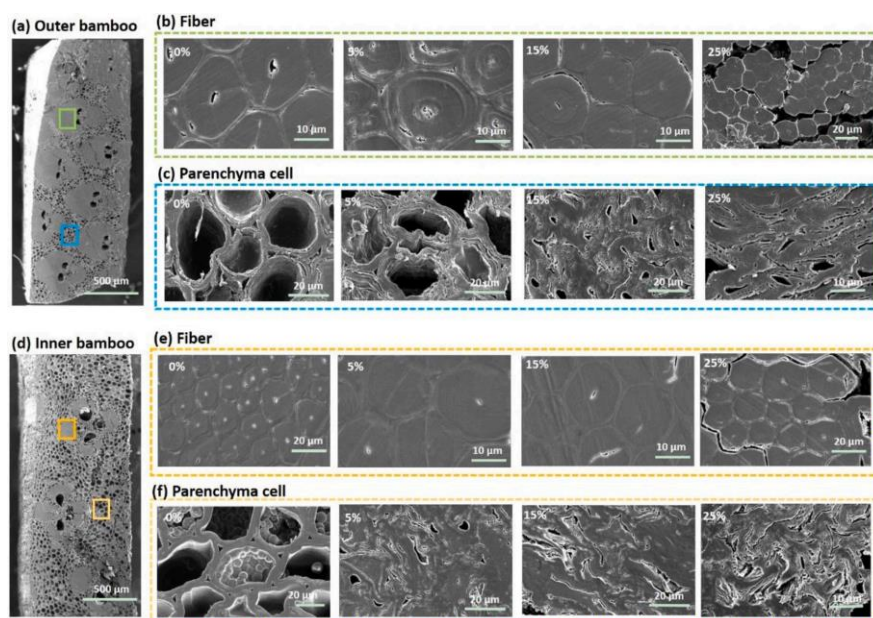
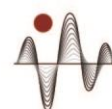


Figura 44: A microestrutura da fibra e da célula do parênquima externas e internas das amostras bambu quando tratadas com várias concentrações. (a) Seção transversal externa das amostras de bambu; zoom nas (b) fibras e (c) células de parênquima da face externa das amostras bambu tratadas; (d) Seção transversal interna das amostras bambu; zoom das (e) fibras e (f) células de parênquima da face interna das amostras bambu tratadas.

Fonte: Chen *et al.*; (2021)



Yin e Li (2022) avaliaram a influência de tratamentos alcalinos em painéis particulados de bambu e cimento. Aferiu-se o teor de extrativos e propriedades físicas e mecânicas para tratamentos com percentuais de 0%, 1%, 2% e 3%. Os dados de teores de extrativos são apresentados na tabela 20. Os dados de desempenho mecânico na tabela 21.

Tabela 20: Teor de sacarídeos solúveis em água e Ácido carboxílico nas aparas de bambu tratadas com Diferentes concentrações de álcalis

Tratamento das partículas	Sacarídeos solúveis em água (g/100g)	Ácido fórmico (g/100g)	Ácido acético (g/100g)
Não tratadas	7.225	293.4	830.7
Tratamento alcalino (1%)	4.390	0	0
Tratamento alcalino (2%)	4.308	0	0
Tratamento alcalino (3%)	2.428	0	0

Fonte: Yin; Li (2022)

Tabela 21: Propriedades Mecânicas do Bambu Portland Paineis de Partículas de Cimento Tratado com Diferentes Concentrações de álcalis

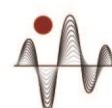
Tratamento partículas	Flexão estática (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Ligação interna (MPa)	Inchamento em espessura (24h)
Não tratadas	4.60	1300	0.18	2.1
NaOH (1%)	7.24	2456	0.19	2.1
NaOH (2%)	8.90	3015	0.24	1.8
NaOH (3%)	10.3	3402	0.51	1.5
Padrão mínimo	≥ 9	≥ 3000	≥ 0.3	≤ 2
Padrão superior	≥ 10	≥ 3000	≥ 0.5	≤ 2

Padrão normativo para painéis aglomerados conforme GB/T24312-2009

Fonte: Yin; Li (2022)

O percentual de 3% obteve o melhor desempenho em todas as circunstâncias, efeito gerado não só pela dissolução de parte dos sacarídeos solúveis em água, mas também devido à eliminação do ácido fórmico e ácido acético que melhora a adaptabilidade e a ligação Interfaces da hidratação do Bambu e Cimento Portland.

Os principais produtos de hidratação do cimento Portland incluem C-S-H gel, Ca(OH)_2 , hidratos de sulfoaluminato de cálcio trissulfurado (etringita e Aft) e sulfoaluminato de cálcio monoenofofre hidratos (AFm). O gel C-S-H apresenta forma irregular semelhante ao algodão, uma forma de agulha, haste, fibra, e assim por diante e desempenha um papel de liderança em desenvolver a força dos produtos de hidratação.



Ca(OH)_2 é um cristal hexagonal. Aft formada na fase inicial da hidratação apresenta forma de bastão com duas pontas retas e não duplas e por fim AFm em forma de placa irregular cresce com forma semelhante a cacho ou flor e finalmente se torna assume a forma de placa hexagonal.

A figura 45 ilustra que principalmente para os compósitos com tratamento alcalino em solução de 3% há a formação de todos esses compostos resultantes da hidratação do cimento. A Figura 45d indica que há uma boa interface na condição de colagem das partículas de bambu e dos produtos de hidratação do cimento Portland para o tratamento NaOH 3%, além de poucas fissuras entre as partículas de bambu e os produtos de hidratação.

Esse fato implica que as partículas de bambu podem efetivamente transferir o estresse de quebra e alcançar um efeito favorável no fortalecimento da mesoestrutura, resultando melhor desempenho físico e mecânico como de fato observado nos dados apresentados na tabela 21.

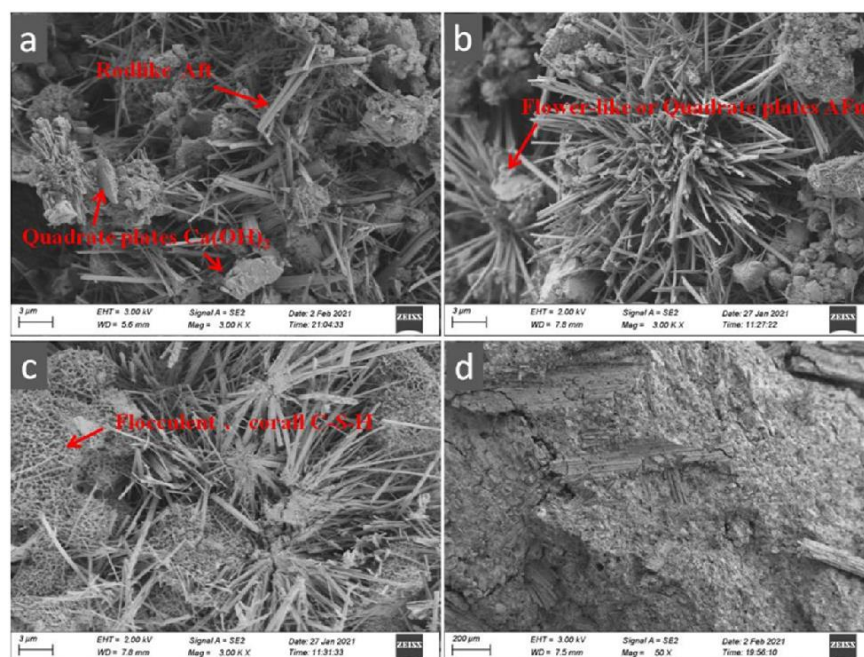


Figura 45: Imagem de microscopia eletrônica de varredura do bambu Portland painel de partículas de cimento tratado com diferentes concentrações de álcali. (a) Painel de partículas de cimento tratado com 1% de álcali. (b) Partícula de cimento placa tratada com álcali 2%. (c e d) Painel de partículas de cimento tratado com 3% alcalino.

Fonte: Yin e Li (2022)

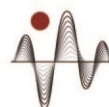
O aumento do desempenho mecânico alcançado com o tratamento alcalino verificado para as partículas longilíneas avaliadas por Manalo *et al.*; (2015) e no compósito bambu:cimento estudado por Yin e Li, (2022) pode ser explicado pela minimização do percentual de extrativos e cera assim como também pode ser entendido a partir das mudanças estruturais causadas no bambu relatadas por Chen *et al.* (2021) de modo que a o tratamento álcali incorre em uma minimização da porosidade interpartícula a partir da compactação dos poros do parênquima.

No entanto é necessário atentar-se ao percentual de modo que a degradação não comprometa estruturalmente as partículas. Os dados indicam que um percentual de 3% não implica em degradação que comprometa a melhora do desempenho físico e mecânico. Além disso, em painéis de bambu e cimento, é importante atentar-se para a lavagem e retirada dos resíduos do tratamento álcali e neutralização do PH de modo que não haja interferência nas reações de hidratação do cimento, assim como a minimização dos teores de extrativos.

2.5.3 Aglutinante e aditivo

Conforme relatado no item 2.1.1 os cimentos com altos teores de C_3S e C_3A potencialmente apresentarão alto calor de hidratação. O Cimento Portland de alta resistência inicial é aquele com classe de resistência ARI que alcança resistência a compressão em 7 dias de 34 MPa. (ABNT NBR 16697:2018)

O Cimento Portland estrutural é constituído de clínquer Portland branco, onde, as adições (sulfato de cálcio ou outras) não geram alterações em sua coloração. Sua classe de resistência é, no limite inferior em 28 dias, de 40 MPa. Afim de investigar alternativas de aglutinantes, é uma alternativa promissora visto que a resistência alcançada pelo cimento branco é maior que os cimentos comuns e apresenta a possibilidade de produtos cimentícios com variação de coloração através da adição de pigmentos inorgânicos.



Em relação ao percentual de cimento e biomassa Das *et al.*; (2012) investigou e correlacionou o desempenho físico e mecânico para os percentuais cimento-bambu para painéis com partículas bambu misturadas das espécies *Bambusa Balcooa*, *Bambusa Vulgaris* e *Melocanna bacífera*. A Tabela 22 apresenta os resultados para painéis que ficaram sob pressão por 24h sem nenhum tratamento das partículas. Através dos dados infere-se que quanto menor o percentual de cimento, menor o desempenho físico e mecânico dos painéis.

Tabela 22: Propriedades físicas e mecânicas para painéis de bambu e cimento em diferentes proporções.

Percentual Bambu:cimento	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	MC (%)	TS (%)	WA (%)
20:80	2,46	106,11	2,90	6,00	12,50
30:70	0,98	44	3,40	6,40	12,35
40:60	1,60	28,81	7,20	14,40	17

Onde: MOR = Módulo de Ruptura; MOE = Módulo de Elasticidade; MC = Teor de umidade; TS = Inchaço em espessura; WA = Absorção de água

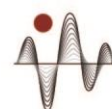
Fonte: Das *et al.*; (2012)

A Tabela 23 apresenta dados de desempenho físico e mecânico de painéis de cimento e bambu com diferentes espécies, densidade, proporções cimento:bambu e tratamentos.

No estudo que avaliou a espécie *D. Strictus* a proporção cimento:bambu de 2,5:1 obteve melhores resultados em todas as propriedades avaliadas comparadas a proporção 2:1. A proporção de 3:1 obteve resultados, apesar de maiores, muito próximos a proporção de 2,5:1 o que indica que o aumento da proporção cimento que consequentemente diminui a porosidade do painel não implica em ganhos significativos.

A aplicação de aditivos ocorre com o objetivo de se obter endurecimento rápido, obtido através do aumento na formação da estrutura cristalina do cimento. Além disso, busca-se aumentar a velocidade das reações de hidratação de modo que a liberação de substâncias inibidoras oriundas da biomassa não as impeça.

A avaliação que observou a influência do percentual de adição de CaCl₂ (%) na mistura de proporção cimento:bambu de 2,5:1, indicou que o aumento do percentual de CaCl₂, implicou na diminuição do Módulo de Ruptura, e aumento do teor de



umidade. Já nas propriedades de Módulo de elasticidade, inchaço em espessura e absorção de água verificou-se melhora dos parâmetros com percentual de (2%), exceto em absorção de água que o percentual de (4%) foi ligeiramente menor.

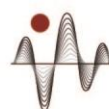


Tabela 23: Compilado de dados de desempenho físico e mecânico para painéis de cimento e bambu

Espécie	Tratamento	Percentual Cimento:bambu	Densidade (g/cm ³)	MOR	MOE	MC	TS	WA (%)	Referência
D. Strictus	Na ₂ SiO ₃ (2%)	2:1	1,16 (g/cm ³)	5,97 (N/mm ²)	2494 (N/mm ²)	12,15 (%)	(2h) 4,2 (%)	13,79 (%)	Ranjan; Khali, 2016
	Al ₂ (SO ₄) ₃ (2%)	2,5:1	1,19 (g/cm ³)	8,18 (N/mm ²)	3637 (N/mm ²)	11,59 (%)	(2h) 3,1 (%)	13,24 (%)	
		3:1	1,20 (g/cm ³)	9,68 (N/mm ²)	4028 (N/mm ²)	10,61 (%)	(2h) 2,2 (%)	12,38 (%)	
Guadua Magna	CaCl ₂ (0%)	2,5:1	1,18	7,66	3083 (N/mm ²)	7,92 (%)	(24h) 0,94 (%)	20,70 (%)	De Araújo et al., 2011
	CaCl ₂ (2%)		1,22	7,21	3114 (N/mm ²)	9,88 (%)	(24h) 0,87 (%)	19,61 (%)	
	CaCl ₂ (4%)		1,24	7,36	3022 (N/mm ²)	10,50 (%)	(24h) 0,92 (%)	19,28 (%)	
D. Asper (1-2 anos)	CaCl ₂ (2%)	1,5:1	0,85	74,38 kg/cm ⁻²	33,44 x 1000 kg/cm ⁻²	8,53	2,45		Bakri & Hasanuddin, 2017
D. Asper (3-4 anos)			0,86	68,58 kg/cm ⁻²	24,45 x 1000 kg/cm ⁻²	8,14	3,20		
D. Asper (> 4 anos)			0,91	73,44 kg/cm ⁻²	16,95 x 1000 kg/cm ⁻²	9,60	3,83		

Onde: MOR = Módulo de Ruptura; MOE = Módulo de Elasticidade; MC = Teor de umidade; TS = Inchaço em espessura; WA = Absorção de água

Fonte: Ranjan & Khali, (2016); Araújo *et al.*, (2011); Bakri e Hasanuddin; (2017)

Um fator a ser considerado é que conforme o estudo do Bakri e Hasanuddin (2017) para percentuais fixos de CaCl_2 (2%) e de cimento:bambu (1,5:1) a idade do bambu alterou o desempenho físico e mecânico dos painéis. Colmos jovens com idade de 1 a 2 anos e maduros com idade maior que 4 anos, resultaram em painéis com melhores desempenhos físicos e mecânicos. Esse resultado se dá pelo conteúdo de extrativos que na fase intermediária é maior.

Outro estudo recente avaliou a influência da inclusão do percentual de 2% dos aditivos cloreto de cálcio – CaCl_2 e sulfato de alumínio - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ em compósitos bambu-cimento com fibras de *Bambusa Vulgaris*. As partículas foram pré-tratadas com água quente em um recipiente de alumínio a 100°C por um período de uma hora. A relação cimento-madeira adotada na mistura foi de 3:1, e a densidade das placas foi de 1500 kg/m^3 . (IZEKOR E ERAKHRUMEN, 2015)

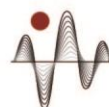
A partir dos dados da Tabela 24, a inclusão do percentual de 2% da massa do cimento do aditivo CaCl_2 apresentou, em relação às propriedades físicas, uma diminuição de mais de 12% no percentual de absorção de água, a menor dimensão de inchamento em espessura. Em relação à resistência proveu um incremento significativo em relação a amostra padrão, de $2,02 \text{ N/mm}^2$ a $10,20 \text{ N/mm}^2$ em relação ao MOR e de $253,88 \text{ N/mm}^2$ a $4942,60 \text{ N/mm}^2$ em relação ao MOE.

Tabela 24: Propriedades Mecânicas do Bambu Portland Painel de Partículas de Cimento com diferentes aditivos

Tratamento	Absorção de água (%)	Inchamento em espessura (24h) (mm)	Módulo de Ruptura - MOR (N/mm^2)	Módulo de elasticidade - MOE (N/mm^2)
Sem aditivo	24,97	5,58	2,02	253.88
CaCl_2 (2%)	12,08	1,13	10,20	4942.60
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (2%)	13,93	0,33	3,20	1772.44

Fonte: Izekor e Erakhrumen (2015)

No estudo com painéis bambu-cimento com partículas da espécie *Guadua Magna* a relação bambu:cimento utilizada foi de 1:2,75 e água:cimento foi de 1:2,5 e a densidade planejada das placas foi de 1.250 kg/m^3 . A adição de CaCl_2 aumentou o teor de umidade das placas de 7,92% em cimento de bambu com 0% de CaCl_2 a 10,5% em bambu-cimento com 4% de CaCl_2 , isso pode ter ocorrido devido ao caráter higroscópico do CaCl_2 .



Os painéis a serem estudados são destinados a revestimento interno e objetiva-se priorizar as propriedades acústicas, optando por densidades mais baixas. Nesse sentido é preferível o aprimoramento nas propriedades de módulo de elasticidade, inchaço em espessura e absorção de água o que implica na adoção dos parâmetros proporção cimento:bambu em 2,5:1 e aditivo de CaCl_2 a um percentual de (2%).

2.5.4 Granulometria e densidade

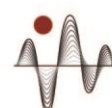
A pesquisa relacionada ao potencial de absorção sonora do bambu ainda é inicial e nota-se que a partir dos anos 2000 alguns estudos se dedicaram a essa temática e testaram esse potencial em diferentes formas de beneficiamento. Há a avaliação de amostras de painéis aglomerados em partículas granulares, partículas fibrosas, em forma de carvão consorciado a outras partículas de biomassa e colmos in natura.

Karlinassari *et al.*; (2012) avaliaram absorvedores granulares de bambu em relação a granulometria e densidade utilizando resina sintética como aglutinante. A figura 46 ilustra amostras das partículas estudadas compostas de granulometria pequena, média e lã. As densidades avaliadas foram a baixa $0,5 \text{ g/cm}^3$ e média $0,8 \text{ g/cm}^3$.



Figura 46: Granulometria das partículas a: Lã, b: média, c: fina.

Fonte: Karlinassari *et al.*; (2012)



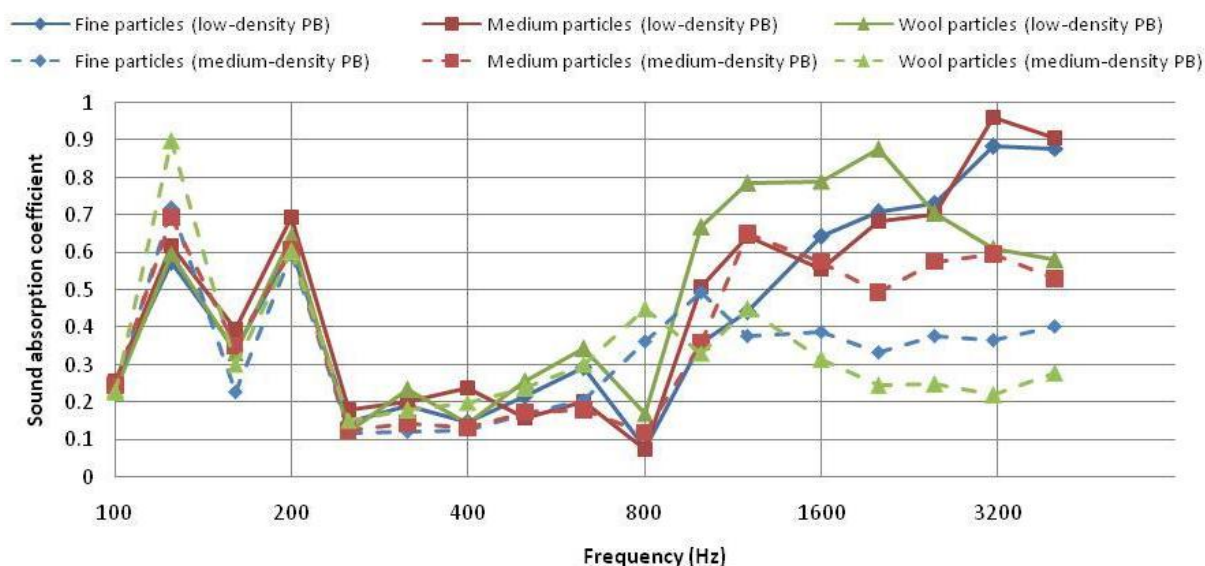
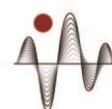
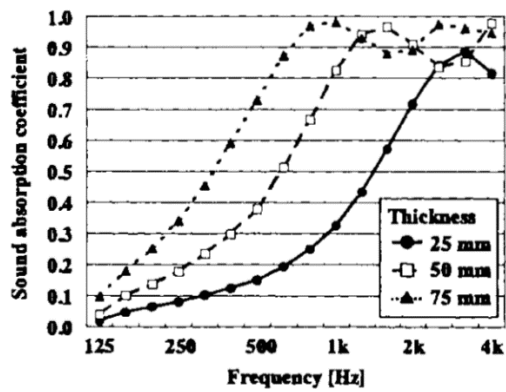


Figura 47: Granulometria das partículas a: Lã, b: média, c: fina. Coeficientes de absorção sonora em baixa e média densidade para as granulometrias estudadas.
Fonte: Karlinassari *et al.*; (2012)

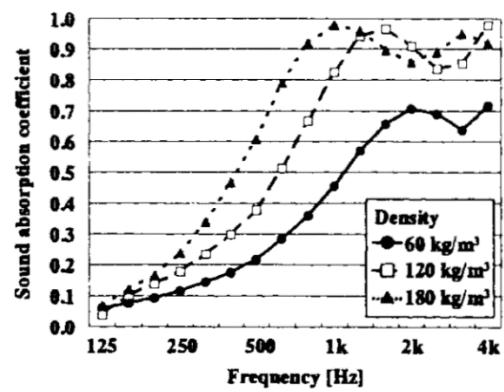
A partir do gráfico infere-se que as partículas médias em painéis de baixa densidade ($0,5 \text{ g/cm}^3$) promoveram melhores coeficientes de nas baixas e altas frequências. Os painéis de partículas lã com baixa densidade foram mais expressivos em médias frequências. Os painéis de partículas de média densidade e partículas médias também resultaram em coeficientes de absorção maiores que 0,6 em baixas e altas frequências.

Koizumi *et al.*; (2002) Avaliaram o coeficiente de absorção sonora em relação ao processamento na forma de partículas fibrosas em três diferentes diâmetros, variando a espessura e densidade aparente da amostra. A Figura 48 apresenta os gráficos de coeficientes de absorção sonora dos resultados comentados.

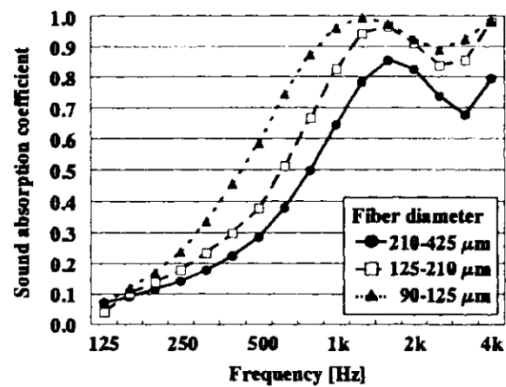




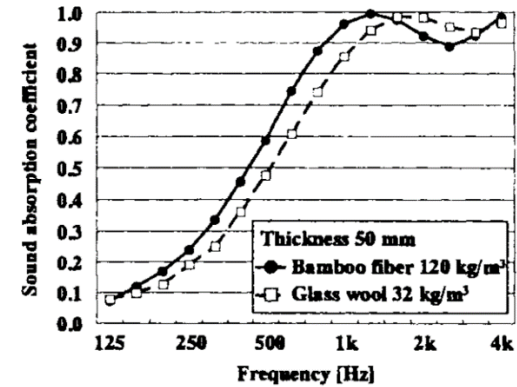
a



b



c



d

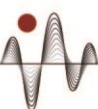
Figura 48: Coeficientes de absorção sonora para variação de parâmetros das amostras a: espessura; b: densidade; c: diâmetro da fibra; d: espaço de ar entre a amostra e a superfície rígida.

Fonte: Koizumi; Tsujiuchi; Adachi (2002)

Inferiu-se que o aumento da espessura dos painéis incorre no aumento da absorção sonora. Apesar de uma variação na banda de frequência de 2000 Hz o mesmo efeito é observado com o aumento da densidade.

Em relação ao diâmetro da fibra as menores seções obtiveram melhor desempenho. Além disso, o material de fibra de bambu apresentou características de absorção de som semelhantes à lã de vidro na atenuação do som dentro do material e na reflexão na superfície do material.

O estudo em questão trata de painéis granulares. Levando-se em consideração os resultados observados nos painéis granulares de bambu e resina sintética para as granulometrias e densidades baixa e média são promissoras.



3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Planejamento Experimental

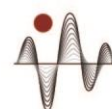
O planejamento experimental foi construído de modo a avaliar as correlações entre as variáveis de produção de painéis aglomerados elegidas neste estudo e o desempenho acústico do material final. A partir da revisão da literatura foi possível definir quais parâmetros permaneceram fixos e quais foram objeto de variação e avaliação deste estudo.

Nos estudos de produção exploratória foi identificado que não há viabilidade de produção dos painéis sem o tratamento prévio das partículas. O tratamento se mostrou essencial para a produção do compósito pois nas tentativas efetuadas os painéis não permaneceram estáveis e se desfizeram, o que implica que não houve adesão suficiente entre as partículas e a matriz cimentícia. Optou-se por fixar esse parâmetro e produzir todas as amostras com partículas de bambu tratadas.

O quadro 5 apresenta as definições de produção dos painéis que não sofreram variação em todas as amostras. As variáveis avaliadas neste estudo são apresentadas no quadro 6.

Quadro 5: Parâmetros de produção dos painéis que foram fixados neste estudo

Parâmetro:	Definição:
Espécie	Bambusa vulgaris var. vitatta
Tipo de cimento	Cimento Portland CPV-ARI
Tratamento	Imersão em solução de NaOH (1%) por 24h
Aditivo	CaCl ₂ (5% em relação ao peso do cimento)
Espessura	1,5 cm
Fonte: Elaboração própria	



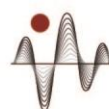
Quadro 6: Parâmetros de produção dos painéis que foram fixados neste estudo

Parâmetro:	Definição:
Densidade	D1 - 0,8 g/cm ³
	D2 - 1,2 g/cm ³
Granulometria	G1 – Partículas retidas entre as peneiras 10 (abertura 1,70 mm) e 24 mesh (abertura 0,71 mm)
	G2 – retidas entre as peneiras 07 mesh (abertura 2,80 mm) e 10 mesh (abertura 1,70 mm)
Percentual de cimento	P1 – Relação cimento-bambu 1:2,5
	P2 – Relação cimento-bambu 1:3
Fonte: Elaboração própria	

No planejamento experimental executou-se três repetições de cada amostra, o que implicou na produção de três corpos de prova para cada amostra. A tabela 25 apresenta a composição de cada amostra avaliada.

Tabela 25: Planejamento experimental

Amostras	Cimento:bambu	Granulometria	Densidade Planejada	CP
1	2,5:1	G1-10	0,8	CP1
				CP2
				CP3
2	3:1	G1-10	0,8	CP1
				CP2
				CP3
3	2,5:1	G2-7	0,8	CP1
				CP2
				CP3
4	3:1	G2-7	0,8	CP1
				CP2
				CP3
5	2,5:1	G1-10	1,0	CP1
				CP2
				CP3
6	3:1	G1-10	1,0	CP1
				CP2
				CP3
7	2,5:1	G2-7	1,0	CP1



				CP2
				CP3
				CP1
8	3:1	G2-7	1,0	CP2
				CP3

Fonte: Elaboração própria

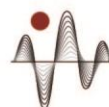
3.2 Coleta da Matéria-Prima e Caracterização da Espécie

Pereira; Beraldo (2016) descreve que a espécie adotada, *Bambusa vulgaris* var. *vittata* Rivière & C. Rivière, é considerada entouceirante. Os bambus não devem ser colhidos em períodos chuvosos, pois neles ocorre a fase de crescimento das espécies com características entouceirantes e o corte pode danificar os brotos.

Na estação seca, os colmos apresentam menor teor de umidade, o que além de contribuir para a sua durabilidade, torna os colmos mais leves e facilita seu transporte. No entanto, é necessária uma atenção com os colmos pois, nesse período, tendem a secar mais rapidamente aumentando as chances de ocorrência de defeitos. Uma questão importante é que no Brasil as estações secas coincidem com temperaturas mais baixas, período em que os insetos xilófagos estão em estado de hibernação ou se encontram menos ativos.

Outra vantagem de efetuar os cortes na estação seca, reside no fato de que, como as espécies entouceirantes apresentam suas brotações geralmente de dezembro a março, há um grande gasto energético para a sustentação e desenvolvimento da planta neste período, o que implica em uma menor quantidade de amido retido nos colmos. Considerando que o grau de amido presente nos colmos está diretamente proporcional a durabilidade dos mesmos, o período de extração indicado é muito vantajoso.

A primeira parte da matéria-prima foi colhida na Fazenda São José, no mês de agosto do ano de 2022, cujas coordenadas geográficas das duas touceiras são, latitude: 16°11'9.02"S e longitude: 48°47'43.44"O. A extração dos colmos foi realizada a 50 cm da base da touceira e o comprimento aproveitado dos colmos foi de 2,5m. Os colmos



foram inspecionados visualmente antes da colheita de modo a selecionar colmos que não apresentaram sinais de ataques xilófagos, mofo ou fissuras.

Após a extração as ramificações laterais foram retiradas e os colmos foram seccionados em partes de aproximadamente 1m de comprimento de modo a facilitar o transporte. A Figura 49 ilustra a touceira onde os colmos foram retirados e o primeiro beneficiamento realizado, o seccionamento dos colmos para viabilização do transporte.



Figura 49: (a) Touceira de retirada do bambu; (b) Colmo seccionado preparado para transporte.

Fonte: Elaboração própria

A identificação em campo foi realizada mediante a configuração anatômica da espécie *bambusa vulgaris* var. *vitata* é bastante particular devido a coloração amarelo sólida com faixas verdes na envoltória externa. No local foram coletadas amostras de folha, caule e bainha de modo a realizar a construção de exsicatas que foram submetidas no herbário da Universidade Federal de Goiás conforme ilustra a Figura 50.

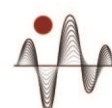




Figura 50: Exsicata *Bambusa vulgaris* var. *vittata* Rivière & C. Rivière, n° 66.709, herbário UFG.

Fonte: Graciano Ribeiro, Louredo (2019)

Os colmos foram levados do campo para uma oficina de carpintaria onde foram novamente seccionados de modo a viabilizar a trituração conforme ilustra a figura 51. Após o beneficiamento dos colmos em peças de comprimento de 5cm, a matéria-prima foi novamente inspecionada visualmente, armazenada em sacos plásticos pretos com 6 micras de espessura e armazenados em depósito livre de umidade e temperatura ambiente. As peças apresentaram uma espessura média de 1,5cm,

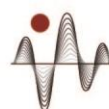




Figura 51: Colmos de bambu seccionados em peças de comprimento de 5cm
Fonte: Elaboração própria

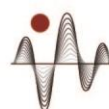
3.2.1 Processamento da Biomassa

As peças produzidas na etapa anterior foram transportadas para o Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA que se localiza na SCEN, Trecho 2, Bloco B, Brasília (DF). As partículas foram obtidas através da trituração dos colmos previamente seccionados, secos em temperatura ambiente, em moinho de martelo marca Lippel Metal Mecânica, com peneira acoplada de abertura 7mm. O equipamento é ilustrado na figura 52.



Figura 52: Moinho de martelo
Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Classificação da biomassa



O procedimento de classificação foi realizado no Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA que se localiza na SCEN, Trecho 2, Bloco B, Brasília (DF). O método de classificação se deu através da utilização do equipamento de seleção em potência máxima por 6 min, com a adição de 1,5 kg de partículas por etapa. A figura 53 ilustra o equipamento de classificação.



Figura 53: Peneira de classificação
Fonte: Elaboração própria

A classificação foi realizada com as seguintes especificações de partículas: retidas entre as peneiras 07 mesh (abertura 2,80 mm) e 10 mesh (abertura 1,70 mm), retidas entre as peneiras 10 (abertura 1,70 mm) e 24 mesh (abertura 0,71 mm). A granulometria adotada nesse estudo para a fabricação dos painéis serão aquelas retidas nas peneiras de 10 e 24 mesh (G1) e nas peneiras de 7 e 10 mesh (G2). Uma amostra das partículas obtidas foi representada na figura 54.

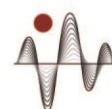
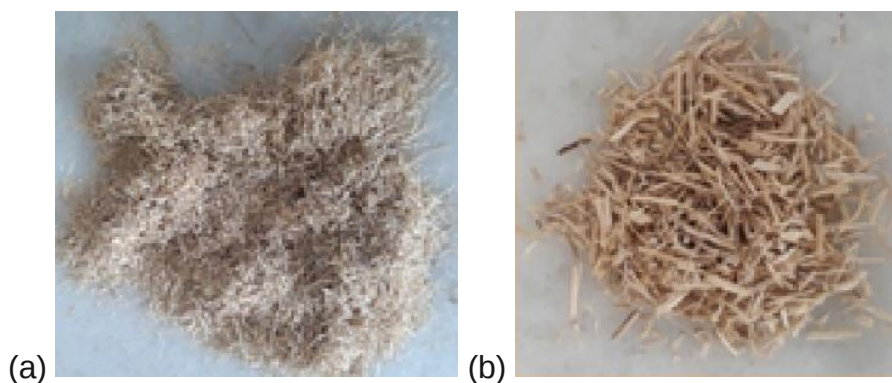


Figura 54: (a) Parte do colmo de bambu; Caracterização das partículas selecionadas (b) G1; (c) G2;
Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Tratamento das partículas

As partículas foram imersas em solução de 1% de NaOH em relação ao peso da água em temperatura ambiente por 24h. Após algumas horas de imersão já se torna perceptível a coloração âmbar solução, esse efeito indica a presença dos extrativos eliminados das partículas. A figura 55 apresenta a solução de imersão das partículas G1 imediatamente após a imersão e 14h após a imersão. A figura 56, apresenta a solução de imersão das partículas G2 imediatamente após a imersão e 10h após a imersão

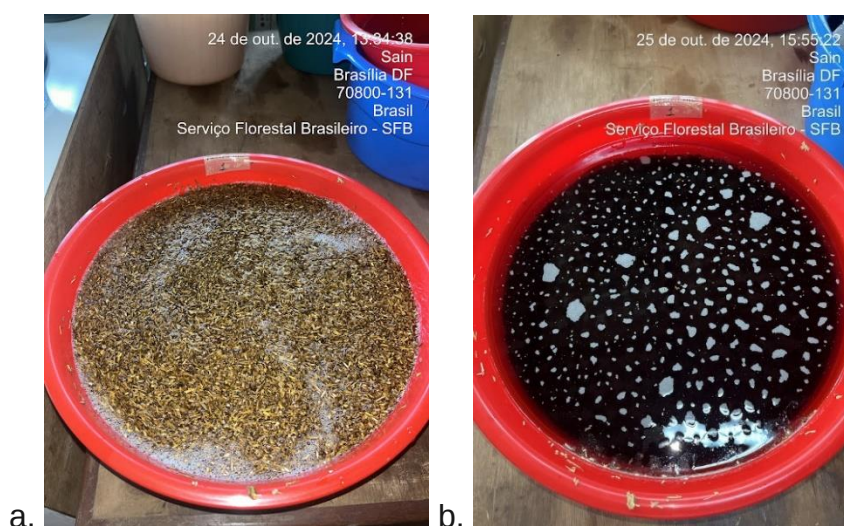
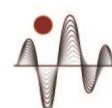


Figura 55: Fotos da imersão das partículas G1 em solução de NaOH (1%). (a) Imediatamente após a imersão. (b) 14h após a imersão.
Fonte: Elaboração própria



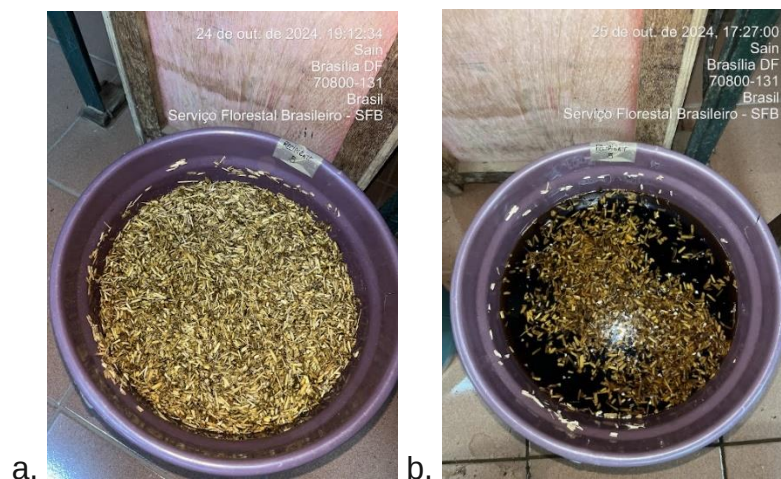
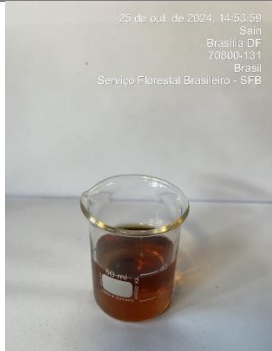
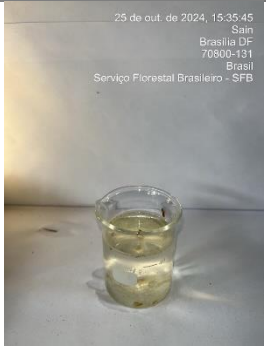
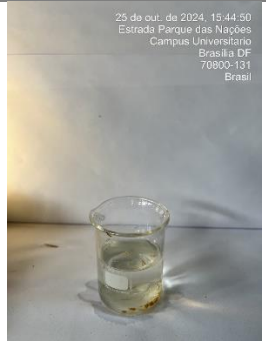


Figura 56: Fotos da imersão das partículas G2 em solução de NaOH (1%). (a) Imediatamente após a imersão. (b) 10h após a imersão.

Fonte: Elaboração própria

Após o tempo de imersão, foram efetuados três ciclos de lavagem utilizando o mesmo volume de água usado em cada série de imersão. A coloração da solução foi registrada em todas as etapas. Na medida que de efetuou as lavagens, a concentração diminuiu e após a terceira lavagem não houve diferença na coloração da água de imersão. O Quadro 7, apresenta a diluição da solução de NaOH (1%) após a sequência de três lavagens.

Quadro 7: Registro da diluição da solução de NaOH após as lavagens

Solução após 24h	Solução após Lavagem 1	Solução após Lavagem 2	Solução após Lavagem 3
			

Fonte: Elaboração própria

Após a lavagem, as partículas foram depositadas em peneiras cobertas por tecido voal e secas em temperatura e umidade ambiente por 2 semanas. A figura 57 e figura 58 apresentam o registro das partículas imediatamente após a lavagem e cinco dias de secagem em temperatura e umidade ambiente.

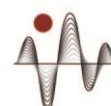




Figura 57: Processo de secagem das partículas granulometria G1. (a) Imediatamente após a lavagem. (b) Sexto dia de secagem.
Fonte: Elaboração própria

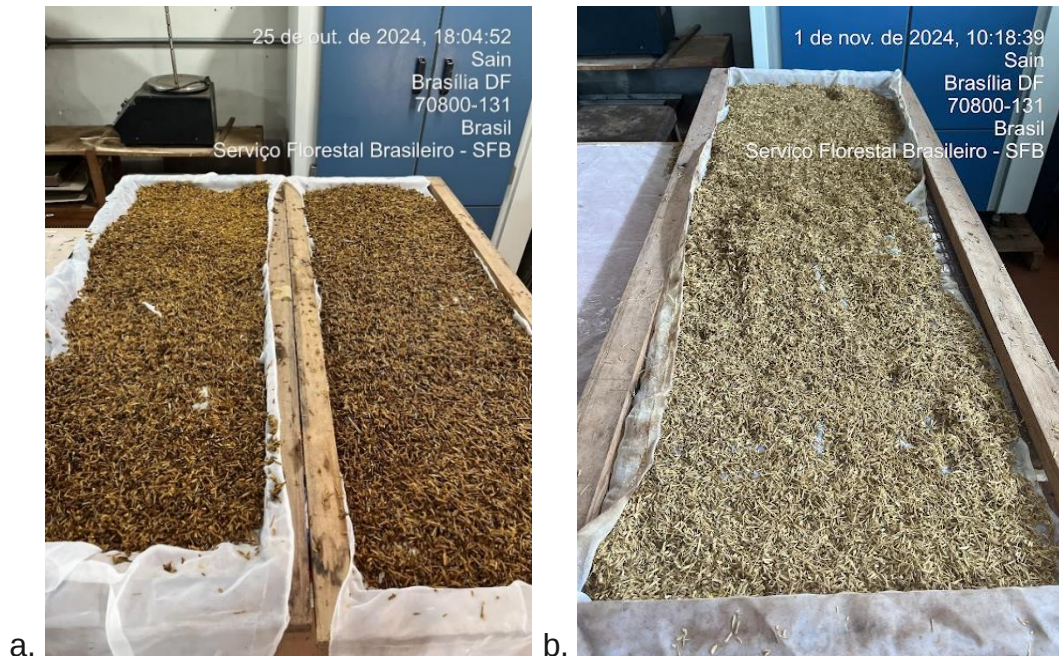
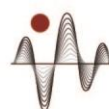


Figura 58: Processo de secagem das partículas granulometria G2. (a) Imediatamente após a lavagem. (b) Sexto dia de secagem.
Fonte: Elaboração própria



3.3 Produção dos corpos de prova

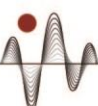
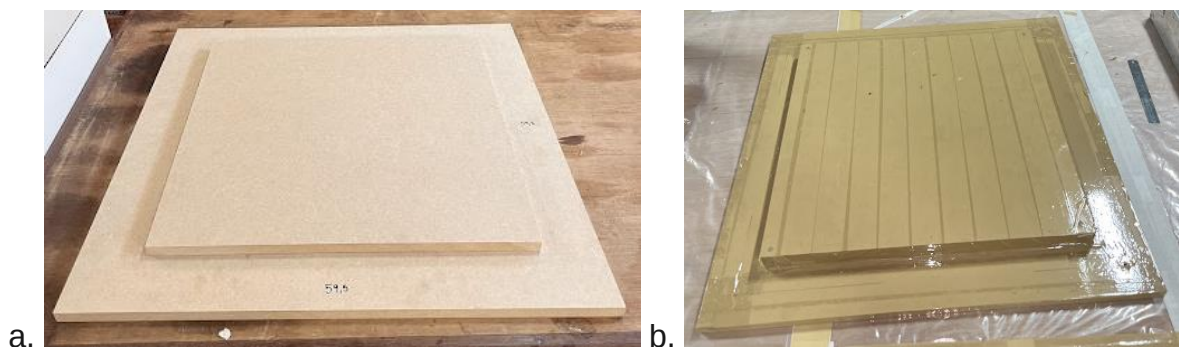
3.3.1 Sistema de prensagem

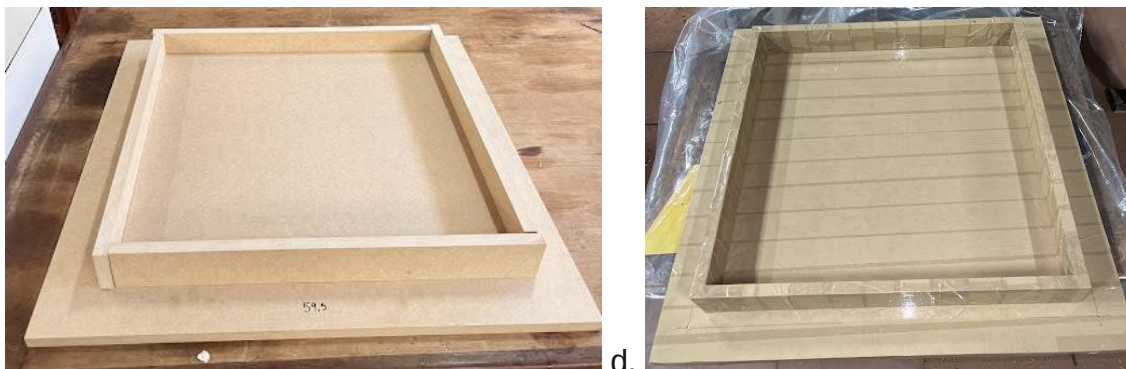
De modo a simplificar a produção de modo que possa ser replicada em situações de baixa infraestrutura, optou-se por realizar a prensagem dos painéis de forma manual e cura a frio. Nesse sentido, foram projetadas e construídas fôrmas que cumpriram o papel de prensas manuais para painéis.

Foi adotado como matéria prima o painel de MDF com espessura de 1,5cm. As peças que compõe o sistema foram parafusadas e a superfície foi completamente coberta com fita adesiva para aumentar a vida útil da fôrma, assim como auxiliar do desmolde os painéis. A cada processo de fabricação a cobertura plástica foi reparada de modo que não houvesse perda de água da mistura para a estrutura da forma. A figura 59 apresenta o modelo 3D do projeto do sistema de prensagem, e a figura 60 ilustra o sistema de prensagem finalizado.



Figura 59: Esquema das prensas manuais para painéis
Fonte: Elaboração própria





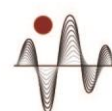
c. d.
 Figura 60: (a) Fabricação da peça 1. (b) Proteção da peça 1. (c) Fabricação das peças 2 e 3. (d) Proteção das peças 2 e 3.
 Fonte: Elaboração própria

Os painéis foram produzidos para ser possível extrair corpos de prova para ensaios de absorção sonora em incidência normal realizados em tubo de impedância, conforme a ISO 10534-2:2023 de modo a se identificar a performance acústica. Cada corpo de prova de cada amostra foi produzido inicialmente como um painel de 8cm x 8cm. Posteriormente, cada painel foi cortado e lixado em círculos com diâmetro de 6cm.

Após as aferições de absorção dos corpos de prova com diâmetro de 6 cm, eles foram novamente cortados e lixados e deram origem aos corpos de prova de 3 cm de diâmetro que novamente passaram por aferição de desempenho acústico. A figura 61 ilustra as prensas manuais dos painéis para caracterização acústica.



Figura 61: Prensa manual 8cm x 8cm x 1,5 cm
 Fonte: Elaboração própria



3.3.2 Produção dos painéis e dos corpos de prova

A produção se inicia com a pesagem dos insumos, os quantitativos adotados para cada amostra está descrito no Apêndice A. A mistura se inicia pela diluição do CaCl_2 na água que será responsável pela hidratação do cimento, aspersão do líquido sobre as partículas e posteriormente há o polvilhamento do cimento e mistura do compósito até que as partículas estejam completamente enluidas pelo cimento. A figura 62 apresenta a ilustração do fluxo de produção dos painéis. Após a formação do compósito o mesmo é acomodado nas fôrmas, previamente untadas com detergente neutro adotado como desmoldante, e prensados manualmente.



Figura 62: Fluxo de produção dos painéis

Fonte: Elaboração própria

Os corpos de prova foram armazenados, cortados e lixados conforme o diâmetro do tubo. A figura 63 ilustra os procedimentos de beneficiamento das amostras, sendo o corte e o lixamento.

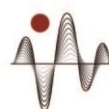




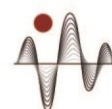
Figura 63: Ilustração dos procedimentos de beneficiamento dos corpos de prova
Fonte: Elaboração própria

Para cada corpo de prova é aferido a espessura em quatro pontos, o diâmetro em dois eixos e a massa. Com esses dados a densidade de cada corpo de prova é calculada.

3.4 Caracterização física dos corpos de prova

3.4.1 Caracterização de variações dimensionais

Os corpos de prova foram cortados e lixados conforme o diâmetro do tubo. Para determinar a densidade aparente dos corpos de prova primeiro foram aferidas espessuras em quatro pontos mensurada através da utilização de micrômetro com precisão 0,01mm seguida da aferição do diâmetro em dois eixos. O passo seguinte é a pesagem dos corpos de prova em balança de precisão de 0,01g. A figura 64 ilustra o mapa de pontos de aferição de dimensões.



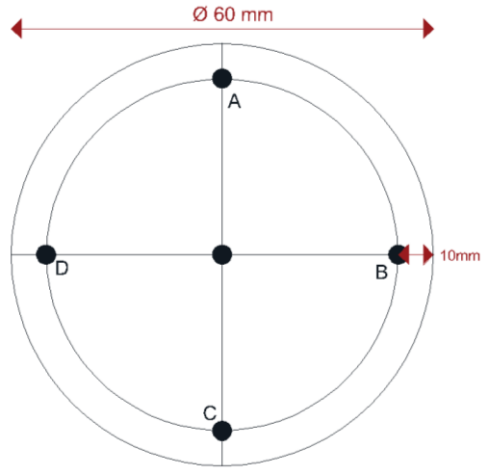


Figura 64: Demarcação dos pontos de aferição das espessuras das amostras
Fonte: Elaboração própria

A partir das espessuras medidas deve-se calcular a espessura média ($e_{média}$) e a variação da média da espessura ($\Delta e_{média}$) conforme a equação:

$$\Delta e_{média} = e_{média} - e_{nominal} \quad (4)$$

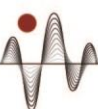
Para cada um dos diâmetros medidos deve-se calcular a variação do diâmetro (ΔD) conforme a equação:

$$\Delta D = D - D_{nominal} \quad (5)$$

3.4.2 Caracterização da densidade aparente

A aferição da massa dos corpos de prova foi realizada com a umidade de equilíbrio, que é alcançada quando o resultado de duas pesagens subsequentes do corpo de prova, em um intervalo de 24h, não diferir mais que 0,1% em massa. Em seguida calculou-se a densidade para cada corpo de prova seguindo as equações:

$$D = \frac{M}{V} \times 1\,000\,000 \quad (6)$$



$$V = b_1 \times b_2 \times e \quad (7)$$

onde:

D = densidade do corpo de prova expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³)

M = massa do corpo de prova expressa em gramas (g)

V = volume do corpo de prova expresso em milímetros cúbicos (mm³)

b₁ e b₂ = dimensões dos corpos de prova expressos em milímetros (mm)

e = espessura do corpo de prova expresso em milímetros (mm)

Após a aferição dos dados se deu o cálculo da densidade média (D_{média}) e expressão do resultado dada em gramas por centímetro cúbico (g/cm³). Por fim calculou-se a variação do percentual de densidade (D %) de cada um dos corpos de prova em relação a densidade média conforme a equação:

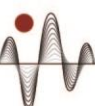
$$D\% = \frac{D - D_{m\acute{e}dia}}{D_{m\acute{e}dia}} \times 100 \quad (8)$$

3.5 Caracterização dos coeficientes de absorção sonora

Um dos meios para se verificar o coeficiente de absorção sonora de um material é o método do tubo de impedância (ou tubo de ondas estacionárias). Os métodos normatizados para medição de impedância acústica se referem à incidência sonora normal à superfície refletora, que pode ser determinada a partir da medição da função de transferência entre dois pontos, e se dá conforme a norma ISO 10534-2.

O experimento adota o ruído branco, um ruído com frequência de distribuição constante, que é gerado e aplicado no tubo. A pressão sonora dentro do tubo é identificada por dois microfones em posições predeterminadas. Os sinais dos microfones são processados simultaneamente por um analisador digital. No entanto, como o campo sonoro gerado no interior do tubo, pode ser considerado estacionário, os sinais dos microfones não precisam ser processados simultaneamente.

Entre os métodos capazes de calcular os coeficientes de absorção sonora de um material está a função de transferência entre dois microfones, utilizando as pressões sonoras obtidas por eles. Os coeficientes de absorção sonora podem ser facilmente



obtidos seguindo os conceitos apresentados pela ISO 10534-2:2023 a conforme a Equação:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (9)$$

O coeficiente de reflexão, r , do som é obtido conforme a Equação:

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jKx_1} \quad (10)$$

Onde:

H_{12} Função de transferência calculada pelo sinal obtido pelos microfones inseridos nas posições 1 e 2

H_I Função de transferência entre ondas incidentes

H_R Função de transferência entre ondas refletidas

K Número de onda

x_1 Distância entre a amostra e o microfone localizado na posição 1

x_2 Distância entre a amostra e o microfone localizado na posição 2

H_I e H_R são calculados pelas equações x e x respectivamente. H_{12} é calculado conforme a equação x.

$$H_I = e^{-jk(x_1-x_2)} = e^{-jks} \quad (11)$$

$$H_R = e^{jk(x_1-x_2)} = e^{jks} \quad (12)$$

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} \quad (13)$$

Onde:

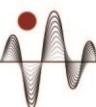
S_{12} Espectro cruzado entre os microfones 1 e 2

S_{11} Espectro próprio do microfone 1

H_I Função de transferência entre ondas incidentes

H_R Função de transferência entre ondas refletidas

K Número de onda



x1 Distância entre a amostra e o microfone localizado na posição 1

x2 Distância entre a amostra e o microfone localizado na posição 2

Os coeficientes de absorção sonora foram coletados em dois tubos, medindo 30 e 60 mm de diâmetro. No tubo de 60 mm foi possível modificar a posição dos microfones, o que gerou resultados na faixa de frequência de 100 a 2500 Hz, enquanto no tubo de 30 mm os valores obtidos ficaram na faixa de 1000 a 6300 Hz.

A figura 65 apresenta o tubo de impedância SW466, medindo 60 mm de diâmetro interno, com alto-falante acoplados à sua estrutura, duas válvulas de 30 mm, um amplificador PA50, uma placa de aquisição MC3242, três microfones e um computador com Software VA-Lab4. Equipamentos pertencentes ao Laboratório de Acústica e Vibrações - LabNVH, localizado na Universidade de Brasília (UnB), Campus Gama (FGA). A figura 65 ilustra a amostra 1 encaixada no equipamento para ser avaliada.

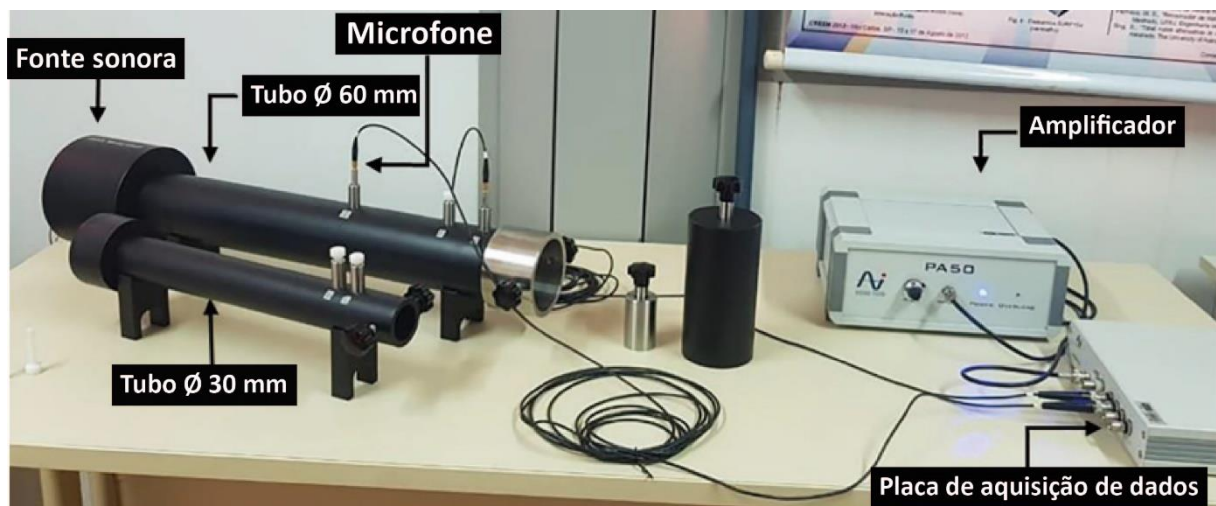


Figura 65: Equipamento de aferição de coeficientes de absorção sonora

Fonte: Mendes; Araújo; Nunes (2022)

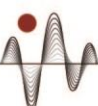
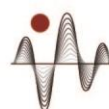




Figura 66: Bateria de ensaios das amostras
Fonte: Elaboração própria



4. RESULTADOS

4.1 Apresentação dos dados de absorção sonora

A aferição dos coeficientes de absorção sonora foi realizada segue o planejamento experimental apresentado na tabela 25.

Tabela 26: Planejamento experimental

Amostras	Cimento:bambu	Granulometria	Densidade Planejada	CP
1	2,5:1	G1-10	0,8	CP1
				CP2
				CP3
2	3:1	G1-10	0,8	CP1
				CP2
				CP3
3	2,5:1	G2-7	0,8	CP1
				CP2
				CP3
4	3:1	G2-7	0,8	CP1
				CP2
				CP3
5	2,5:1	G1-10	1,0	CP1
				CP2
				CP3
6	3:1	G1-10	1,0	CP1
				CP2
				CP3
7	2,5:1	G2-7	1,0	CP1
				CP2
				CP3
8	3:1	G2-7	1,0	CP1
				CP2
				CP3

Fonte: Elaboração própria

Os coeficientes de absorção sonora aferidos por corpo de prova e o cálculo de absorção média por banda de frequência são apresentados nas tabelas abaixo.

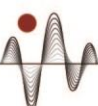


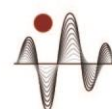
Tabela 27: Coeficientes de absorção sonora da amostra 1

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,03	0,01	0,07	0,03
125	0,03	0,01	0,04	0,02
160	0,03	0,04	0,02	0,03
200	0,02	0,02	0,03	0,03
250	0,04	0,03	0,05	0,04
315	0,05	0,04	0,04	0,04
400	0,06	0,06	0,04	0,05
500	0,05	0,08	0,05	0,06
630	0,08	0,04	0,05	0,06
800	0,13	0,09	0,09	0,10
1000	0,12	0,12	0,11	0,12
1250	0,17	0,15	0,16	0,16
1600	0,28	0,27	0,26	0,27
2000	0,47	0,46	0,44	0,45
2500	0,82	0,81	0,77	0,80
3150	0,76	0,89	0,92	0,86
4000	0,44	0,56	0,59	0,53
5000	0,33	0,41	0,38	0,37
6300	0,42	0,30	0,37	0,36

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28: Coeficientes de absorção sonora da amostra 2

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,04	0,02	0,04	0,03
125	0,03	0,03	0,01	0,02
160	0,02	0,05	0,00	0,02
200	0,05	0,04	0,02	0,04
250	0,02	0,03	0,03	0,03
315	0,04	0,03	0,06	0,04
400	0,06	0,03	0,05	0,05
500	0,06	0,06	0,05	0,05
630	0,08	0,04	0,05	0,06
800	0,10	0,04	0,03	0,06
1000	0,14	0,08	0,10	0,11
1250	0,20	0,12	0,16	0,16
1600	0,34	0,22	0,24	0,27
2000	0,56	0,40	0,37	0,44
2500	0,77	0,74	0,59	0,70
3150	0,61	0,87	0,91	0,79
4000	0,36	0,44	0,67	0,49



5000	0,23	0,37	0,46	0,35
6300	0,24	0,27	0,42	0,31

Fonte: Elaboração própria

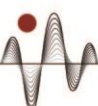
Tabela 29: Coeficientes de absorção sonora da amostra 3

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,02	0,09	0,07	0,06
125	0,05	0,05	0,04	0,05
160	0,05	0,04	0,03	0,04
200	0,05	0,05	0,04	0,04
250	0,01	0,05	0,03	0,03
315	0,05	0,05	0,04	0,04
400	0,06	0,05	0,06	0,06
500	0,08	0,08	0,08	0,08
630	0,07	0,08	0,08	0,07
800	0,08	0,11	0,10	0,09
1000	0,11	0,11	0,15	0,12
1250	0,14	0,18	0,25	0,19
1600	0,22	0,30	0,44	0,32
2000	0,42	0,55	0,65	0,54
2500	0,88	0,89	0,92	0,90
3150	0,59	0,65	0,74	0,66
4000	0,50	0,38	0,40	0,43
5000	0,46	0,67	0,50	0,54
6300	0,24	0,49	0,46	0,40

Fonte: Elaboração própria

Tabela 30: Coeficientes de absorção sonora da amostra 4

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,02	0,05	0,00	0,02
125	0,03	0,03	0,02	0,03
160	0,03	0,04	0,04	0,04
200	0,05	0,04	0,06	0,05
250	0,04	0,04	0,04	0,04
315	0,04	0,05	0,05	0,05
400	0,02	0,05	0,07	0,05
500	0,07	0,04	0,07	0,06
630	0,07	0,06	0,09	0,08
800	0,11	0,08	0,11	0,10
1000	0,13	0,09	0,14	0,12
1250	0,15	0,16	0,20	0,17
1600	0,25	0,30	0,33	0,29



2000	0,39	0,51	0,66	0,52
2500	0,57	0,63	0,82	0,67
3150	0,93	0,53	0,45	0,63
4000	0,55	0,28	0,28	0,37
5000	0,55	0,22	0,20	0,32
6300	0,35	0,18	0,33	0,29

Fonte: Elaboração própria

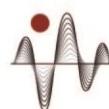
Tabela 31: Coeficientes de absorção sonora da amostra 5

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,02	0,02	0,06	0,03
125	0,03	0,03	0,04	0,03
160	0,03	0,03	0,04	0,04
200	0,04	0,04	0,04	0,04
250	0,05	0,05	0,04	0,05
315	0,06	0,07	0,05	0,06
400	0,08	0,12	0,06	0,09
500	0,11	0,21	0,08	0,13
630	0,14	0,45	0,11	0,23
800	0,19	0,71	0,17	0,36
1000	0,29	0,53	0,29	0,37
1250	0,45	0,36	0,51	0,44
1600	0,63	0,50	0,75	0,63
2000	0,55	0,45	0,86	0,62
2500	0,69	0,27	0,80	0,59
3150	0,77	0,19	0,46	0,47
4000	0,46	0,21	0,31	0,33
5000	0,22	0,23	0,36	0,27
6300	0,16	0,46	0,62	0,41

Fonte: Elaboração própria

Tabela 32: Coeficientes de absorção sonora da amostra 6

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,02	0,02	0,02	0,02
125	0,02	0,03	0,02	0,03
160	0,03	0,02	0,03	0,03
200	0,04	0,03	0,03	0,03
250	0,05	0,04	0,04	0,04
315	0,06	0,04	0,05	0,05
400	0,09	0,06	0,06	0,07
500	0,13	0,07	0,09	0,10
630	0,23	0,08	0,14	0,15



800	0,53	0,13	0,28	0,31
1000	0,87	0,23	0,61	0,57
1250	0,62	0,46	0,79	0,62
1600	0,44	0,77	0,54	0,58
2000	0,27	0,58	0,55	0,47
2500	0,21	0,30	0,42	0,31
3150	0,19	0,19	0,27	0,22
4000	0,31	0,28	0,30	0,30
5000	0,46	0,24	0,38	0,36
6300	0,42	0,22	0,38	0,34

Fonte: Elaboração própria

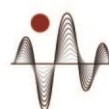
Tabela 33: Coeficientes de absorção sonora da amostra 7

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	-0,03	0,03	0,03	0,01
125	0,02	0,03	0,03	0,03
160	0,03	0,03	0,04	0,03
200	0,04	0,03	0,04	0,04
250	0,05	0,04	0,05	0,04
315	0,06	0,04	0,06	0,05
400	0,09	0,05	0,09	0,08
500	0,09	0,06	0,11	0,09
630	0,10	0,07	0,18	0,12
800	0,13	0,12	0,32	0,19
1000	0,19	0,24	0,67	0,37
1250	0,31	0,51	0,77	0,53
1600	0,63	0,50	0,52	0,55
2000	0,87	0,27	0,63	0,59
2500	0,51	0,18	0,50	0,40
3150	0,27	0,17	0,38	0,27
4000	0,23	0,34	0,48	0,35
5000	0,27	0,43	0,57	0,42
6300	0,58	0,52	0,80	0,63

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34: Coeficientes de absorção sonora da amostra 8

Frequências (Hz):	(α) - CP1	(α) - CP2	(α) - CP3	(α) - Médio
100	0,05	0,02	0,02	0,03
125	0,03	0,03	0,02	0,03
160	0,04	0,03	0,02	0,03
200	0,04	0,04	0,02	0,03
250	0,05	0,04	0,03	0,04



315	0,06	0,05	0,03	0,05
400	0,08	0,06	0,04	0,06
500	0,11	0,09	0,05	0,08
630	0,15	0,13	0,04	0,11
800	0,27	0,29	0,07	0,21
1000	0,55	0,69	0,14	0,46
1250	0,83	0,86	0,34	0,67
1600	0,76	0,47	0,73	0,65
2000	0,48	0,27	0,31	0,35
2500	0,28	0,19	0,16	0,21
3150	0,21	0,16	0,12	0,16
4000	0,24	0,28	0,10	0,21
5000	0,41	0,28	0,13	0,27
6300	0,11	0,29	0,42	0,27

Fonte: Elaboração própria

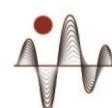
4.2 Verificação da viabilidade da aplicação do material desenvolvido para fins de absorção sonora

Long (2014) argumenta que em geral considera-se que um material possui propriedades significativas de absorção sonora quando apresenta coeficiente $\alpha \geq 0.30$ em uma ou mais faixas de frequência.

No mecanismo de absorção sonora, as ondas sonoras refletem e interagem com superfícies rígidas criando ondas estacionárias, com variações periódicas de pressão máxima junto à superfície rígida e velocidade do ar máxima a uma distância de cerca de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda afastado da superfície rígida de fechamento.

Na parede rígida essa velocidade é zero, portanto, uma absorção eficiente requer que o material seja colocado no ponto onde a velocidade das partículas é máxima, ou seja, a aproximadamente a uma distância de um quarto do comprimento de onda da superfície refletora, a parede rígida. (COX e D'ANTONIO, 2017)

Isso implica que um material poroso precisaria ter quase 1 metro de espessura para absorver eficazmente 100 Hz. Caso contrário, ele estará muito próximo da parede, onde a velocidade do ar é nula e será ineficaz para essa frequência. A absorção sonora em frequências graves é realizada por meio de outras estratégias como ressonadores, painéis de membrana entre outros, e não somente a aplicação de

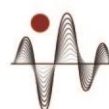


materiais nas superfícies. Sendo assim em geral, os materiais absorvedores necessitam de desempenho em frequências médias e agudas, ou seja, no intervalo de 500 Hz em diante.

Em se tratando de ambientes adequados a palavra falada, o Speech Transmission Index (STI) é um índice objetivo de inteligibilidade da fala, amplamente utilizado na acústica de edificações para quantificar a clareza da comunicação verbal em um ambiente. Ele considera a influência da reverberação, do ruído de fundo e da modulação do sinal da fala em diferentes bandas de frequência, proporcionando uma avaliação padronizada do desempenho acústico de espaços destinados à fala, como salas de aula, auditórios, entre outros. O STI varia de 0 (nenhuma inteligibilidade) a 1 (inteligibilidade perfeita).

A instalação de materiais absorventes nas superfícies dos recintos reduz a energia sonora refletida e a reverberação excessiva, fatores que afetam negativamente a inteligibilidade da fala. A inteligibilidade, por sua vez, depende mais de frequências mais altas acima de 1000 Hz, especialmente na região de 2000 Hz a 4000 Hz.

A figura 67 apresenta o gráfico com os coeficientes de absorção de todas as mostras analisadas. As amostras que apresentaram o maior intervalo de frequências em que houve absorção significativa foram a amostra 5 e a amostra 6. A absorção para a ocorrer de modo significativo a partir da frequência de 800 Hz, sendo $\alpha = 0.36$ e $\alpha = 0.31$ respectivamente. Isso indica que as amostras são aptas a absorção sonora em frequências médias e agudas.



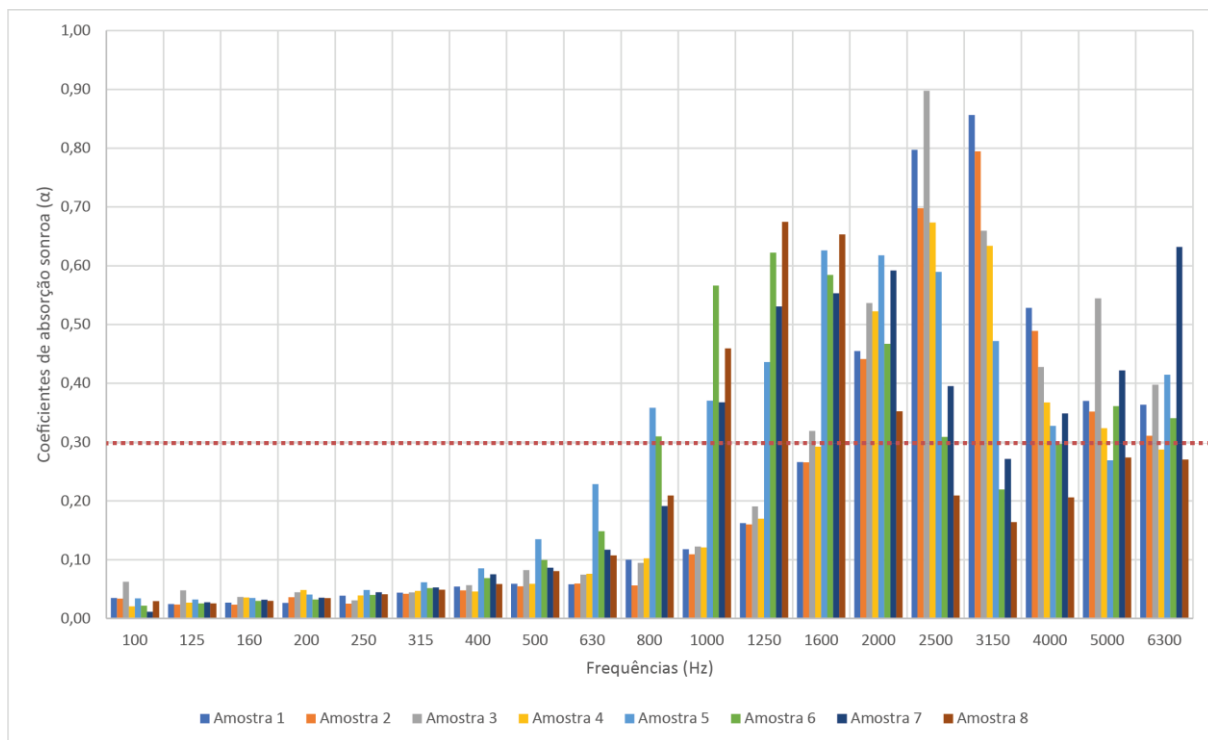
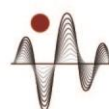


Figura 67: Gráfico de coeficientes de absorção das amostras analisadas
Fonte: Elaboração própria

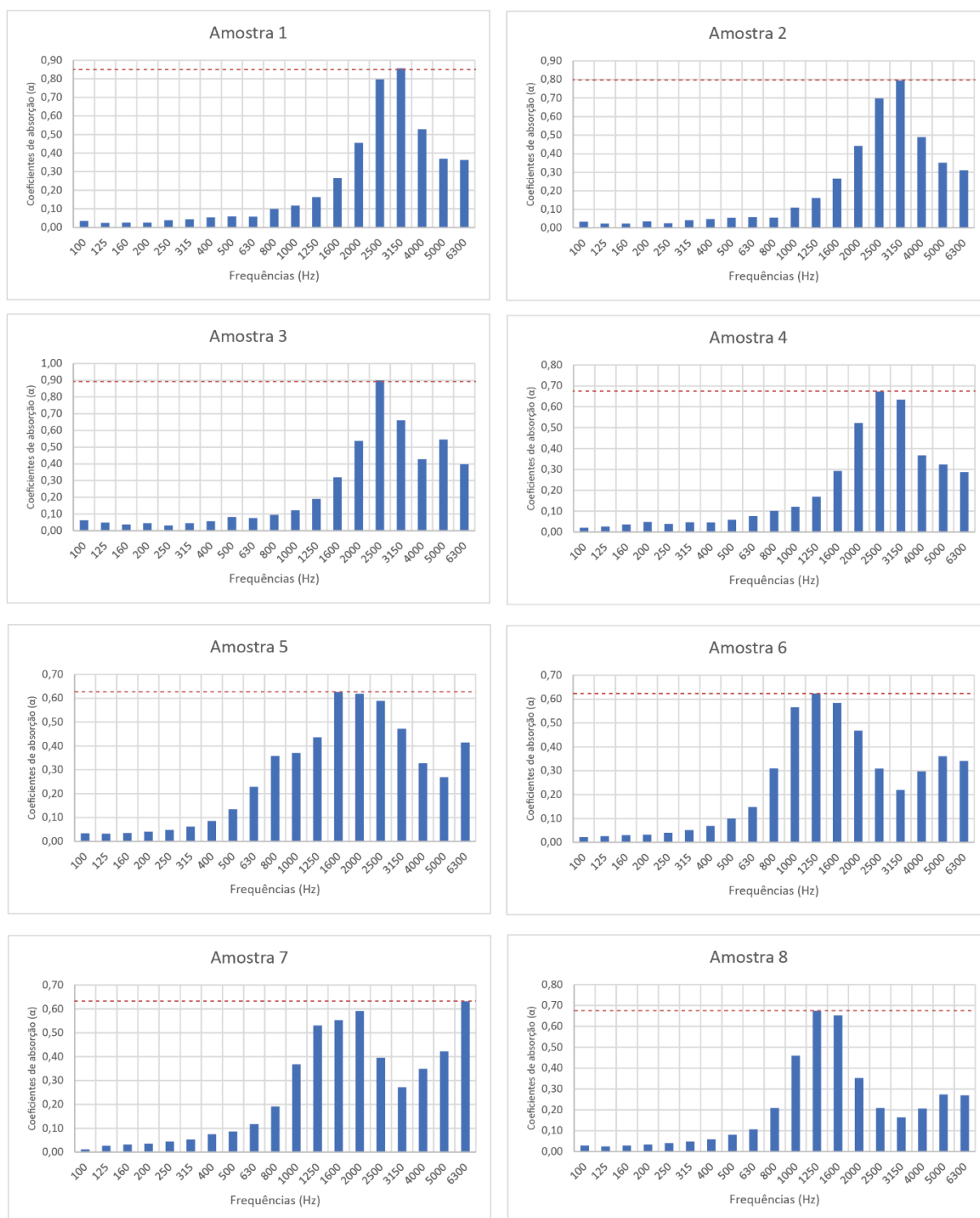
Em relação as amostras 7 e 8. A absorção passa a ocorrer de modo significativo a partir da frequência de 1000 Hz, sendo $\alpha = 0,37$ e $\alpha = 0,46$ respectivamente. A amostra 3 obteve absorção significativa a partir de 1600 Hz, e as amostras 1, 2 e 4 passaram a absorver som de modo significativo a partir de 2000 Hz, sendo que em 1600 Hz o coeficiente foi bem próximo de $\alpha \geq 0,30$, sendo $\alpha \geq 0,27$ para as amostras 1 e 2 e $\alpha \geq 0,29$ para a amostra 4.

De modo geral todas as amostras apresentaram comportamento absorvedor em frequências agudas e as amostras 5, 6, 7 e 8 performaram também em frequências médias. O que implica que o compósito desenvolvido é viável para aplicação com fins de absorção em todas as configurações testadas.

A figura 68 apresenta os gráficos dos coeficientes de absorção sonora aferidos para cada amostra individualmente. As amostras 1, 2 e 3 apresentaram os coeficientes de absorção mais elevados. Observou-se que as amostras 1 e 2 apresentaram picos de absorção na frequência de 3150 Hz sendo $\alpha = 0,86$ e $\alpha = 0,79$ respectivamente.

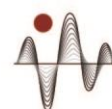


Destaca-se que na frequência de 2500 Hz, a absorção se manteve bastante elevada sendo $\alpha = 0.80$ e $\alpha = 0.70$ respectivamente.



----- Demarcação de picos de absorção

Figura 68: Gráficos de coeficientes de absorção sonora aferidos para todas as amostras
Fonte: Elaboração própria



As amostras 3 e 4 apresentaram picos de absorção na frequência de 2500 Hz, sendo $\alpha = 0.90$ e $\alpha = 0.67$ respectivamente. As amostras 6 e 8 apresentaram os picos de absorção na frequência de 1250 Hz, sendo $\alpha = 0.62$ e $\alpha = 0.67$ respectivamente.

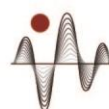
De modo geral, as amostras 5, 6, 7 e 8 alcançaram comportamento absorvedor em frequências médias e agudas, porém com performance menor em agudos em comparação com as amostras 1, 2, 3 e 4. Ao passo que as amostras 1, 2, 3 e 4 alcançaram coeficientes mais elevados nas frequências consideradas agudas.

4.2.1 Classificação das amostras conforma a ISO 11654:1997

A avaliação e classificação de materiais de absorção sonora são realizadas através de parâmetros normativos. A ISO 11654:1997 apresenta uma metodologia padronizada para a classificação de materiais de absorção sonora com base em seus coeficientes de absorção por bandas de frequência.

Após a obtenção dos coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência conforme a norma ISO 10534-2:2023, a curva real é comparada a curvas de referência normalizadas da ISO 11654:1997, as curvas são apresentadas na figura 69. A curva de referência mais próxima, sem ultrapassar os valores medidos em mais de uma banda define o valor de coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w).

O termo ponderado indica que o valor do índice não é uma média simples, mas sim um valor calculado com base na comparação do material testado com curvas de referência padronizadas. A ponderação se dá pela proximidade entre os coeficientes medidos e essas curvas de referência, priorizando faixas de frequência que têm maior relevância para o conforto acústico em geral entre 250 Hz e 4.000 Hz.



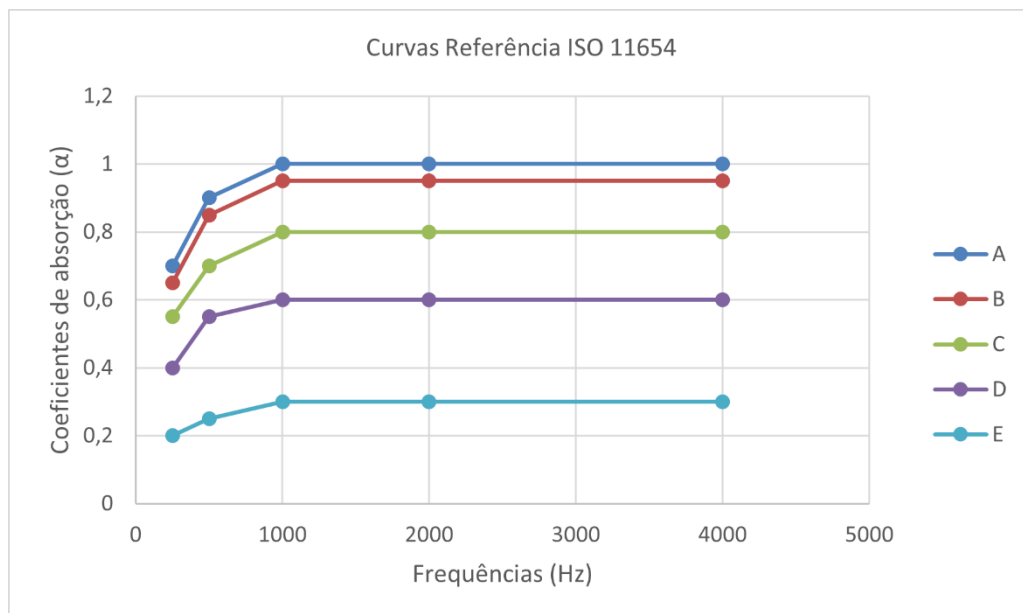


Figura 69: Curvas Referência
Fonte: ISO 11654 (1997)

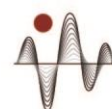
A partir da determinação coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) dos materiais, eles são classificados em categorias de A a E. A tabela 35 apresenta o intervalo dos valores de coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) para cada classificação apresentada.

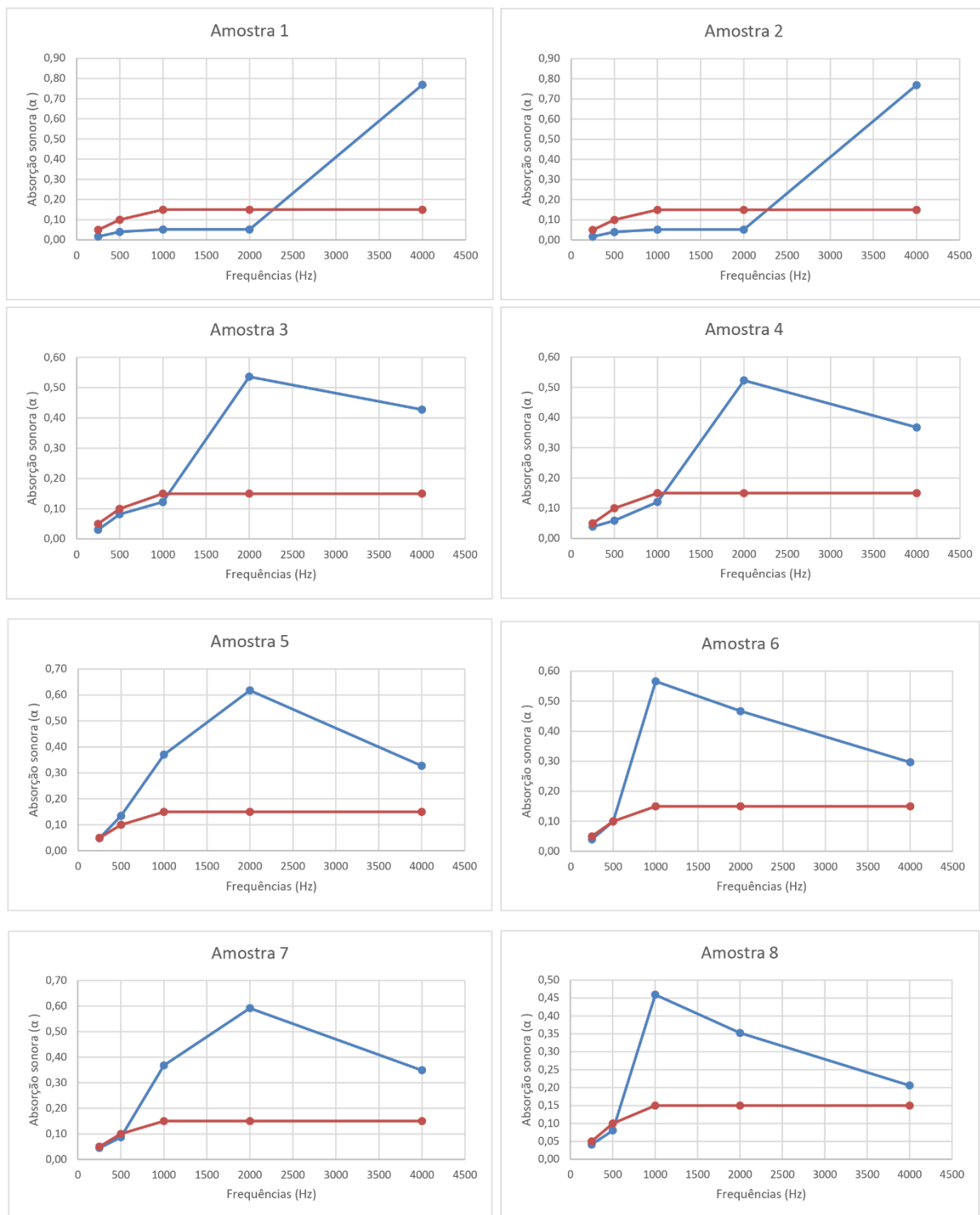
Tabela 35: Ordem de classificação dos materiais absorvedores conforme ISO 11654:1997

Classe	Intervalo de α_w
A	$\alpha_w \geq 0,90$
B	$0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$
C	$0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$
D	$0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$
E	$0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$
Não classificado	$< 0,10$

Fonte: ISO 11654 (1997)

A figura 70 apresenta os gráficos de comparação dos valores aferidos das amostras analisadas com a curva de referência correspondente ao coeficiente de absorção sonora ponderado para a classificação D. Observou-se que apenas as amostras 5, 6 e 7 apresentaram o coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) condizente com a classificação E.

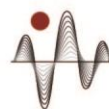




— Coeficientes de absorção sonora (α) aferidos
 — Valores da curva de referência ISO 11654

Figura 70: Gráficos de comparação dos coeficientes de absorção sonora aferidos (α) para cada amostra e sua comparação com a curva referência do coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) para a classificação E

Fonte: Elaboração própria



No entanto, deve-se considerar que pelo procedimento de determinação da classificação dos materiais, o desempenho alto em determinadas faixas de frequência é ignorado. E de forma recorrente há a necessidade de atenuação de frequências específicas em locais estratégicos na concepção dos projetos acústicos. E conhecer materiais que possam atender casos específicos é de grande valia para a eficiência e qualidade das soluções de condicionamento acústico.

4.3 Análise Estatística

As amostras desenvolvidas no procedimento experimental foram submetidas ao ensaio no tubo de impedância. Os coeficientes de absorção sonora e a perda de transmissão sonora foram adquiridos no software VA-Lab4 e foram gerados em bandas de frequências de um terço de oitava de 100 a 6300 Hz.

Para a construção do planejamento fatorial adotou-se os fatores: densidade, proporção de cimento e granulometria das amostras. As variáveis identificadas no estudo são os fatores considerados no planejamento fatorial deste estudo. Os fatores adotados no planejamento fatorial estão descritos na tabela 36.

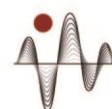
Tabela 36: Fatores adotados no planejamento fatorial

Proporção cimento:bambu	Granulometria	Densidade
2,5:1	G1	0,8
3:1	G2	1,4

Fonte: Elaboração própria

A análise de significância de variáveis é usada para identificar quais variáveis têm impacto estatisticamente relevante sobre um resultado ou variável dependente. O objetivo é avaliar se as variações observadas estão associadas a um fator real ou ocorrem por acaso.

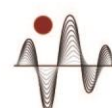
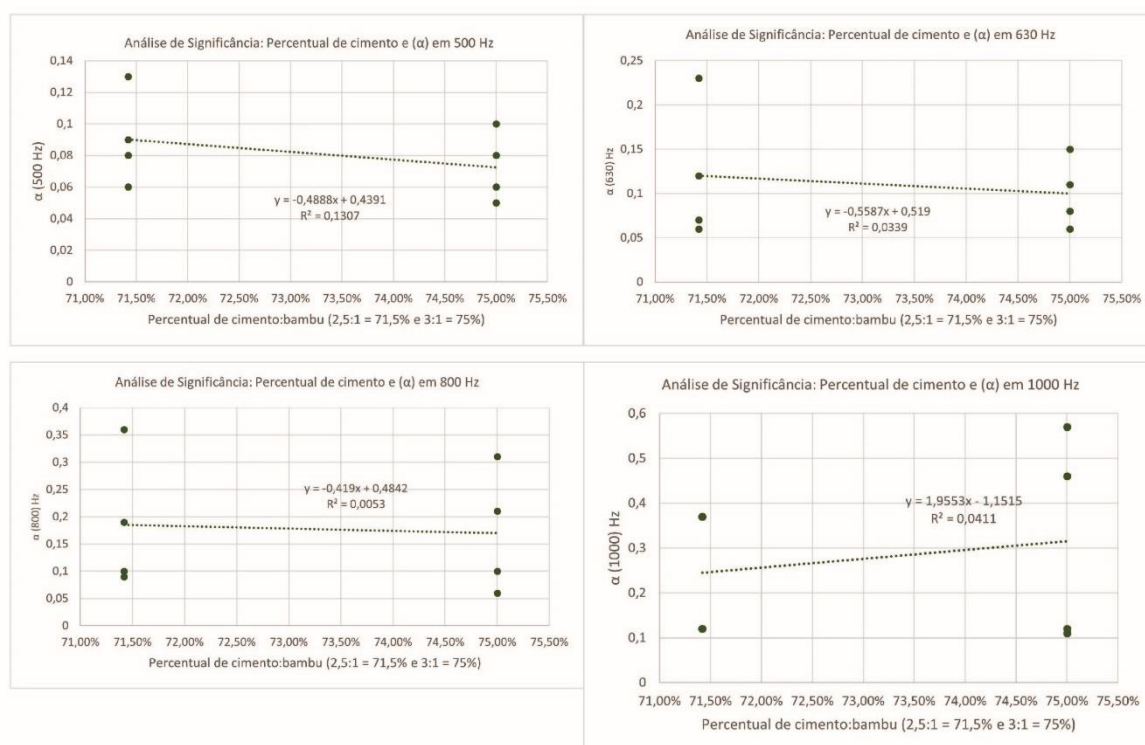
A análise de significância foi realizada através de regressão linear para cada banda de frequência de modo a identificar se as variáveis proporção de cimento, densidade e granulometria analisadas são significativas, ou seja, influenciam na absorção sonora



do componente. Na ANOVA identifica-se que uma variável é considerada significativa quando o valor-p é menor que 0,05.

Já o coeficiente de determinação R^2 indica a proporção da variação da variável resposta que é explicada pelos grupos ou fatores analisados. O valor do coeficiente de determinação R^2 próximo de 1 indica que o fator ou modelo explica bem a variação nos dados, e R^2 próximo de 0, indica que o fator tem pouca influência sobre a variável resposta.

A figura 71 apresenta os gráficos de dispersão que correlaciona a variável proporção cimento:bambu com os coeficientes de absorção sonora aferidos por banda de frequência. Os gráficos são apresentados em maior escala no Apêndice B.



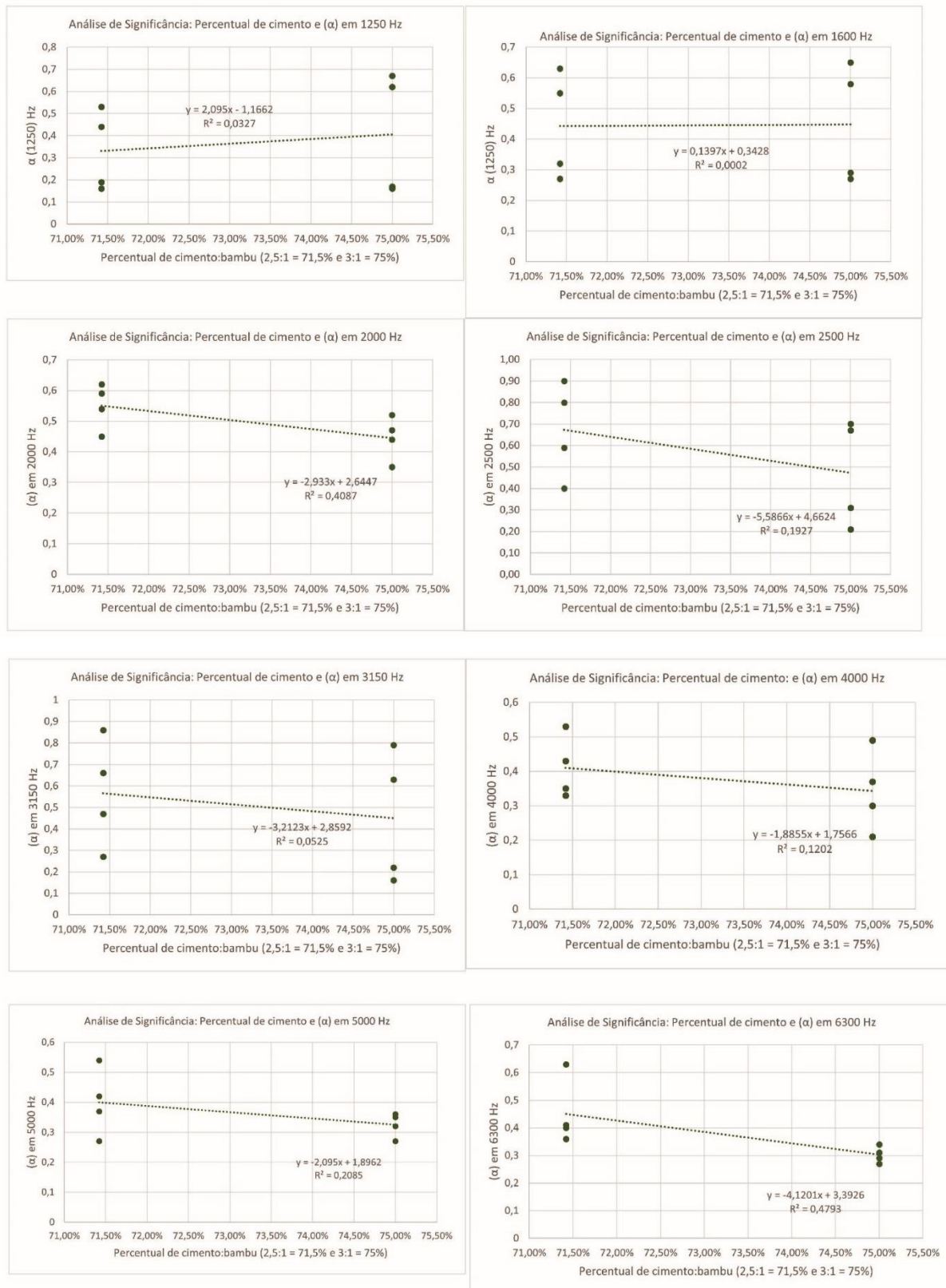
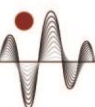
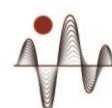
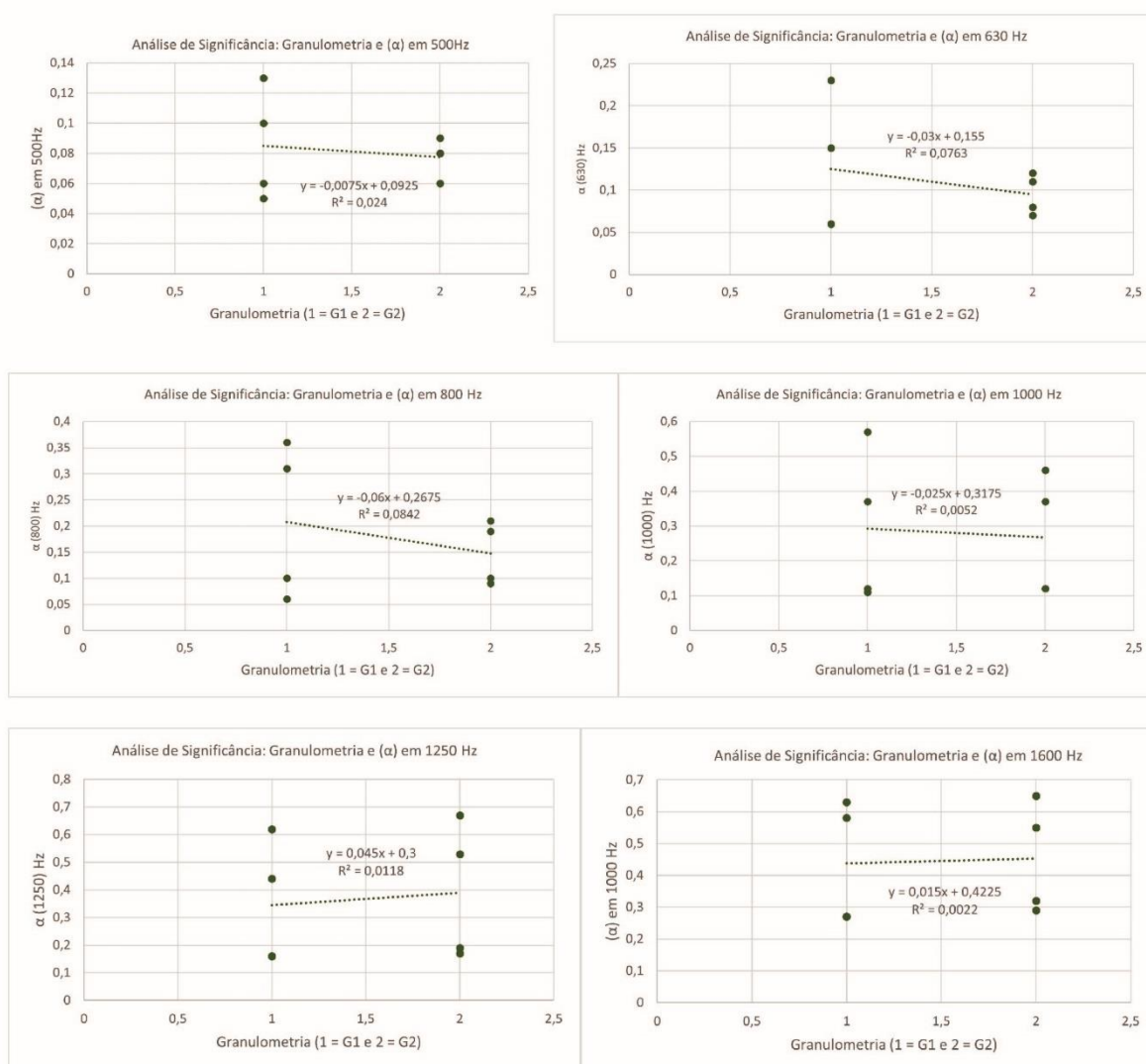


Figura 71: Gráficos de análise de significância da variável proporção cimento:bambu por banda de frequências
Fonte: Elaboração própria



O cálculo dos resultados estatísticos, apresentado no apêndice B, indicou que de modo geral, o percentual cimento:bambu é considerado significativo para a performance em absorção sonora visto que para todas as bandas de frequência o valor – p foi abaixo de 0,05. No entanto o cálculo do coeficiente de determinação R^2 indicou que a relevância dessa variável é muito baixa. Isso implica que a variação do percentual de cimento adotado para o compósito neste estudo é um fator secundário do desempenho acústico dos painéis.

A figura 72 apresenta os gráficos gerados no estudo de significância da variável granulometria, observou-se um comportamento semelhante ao verificado para o percentual de cimento. Os resultados indicam que essa variável é significativa na determinação da absorção sonora, porém com baixa relevância.



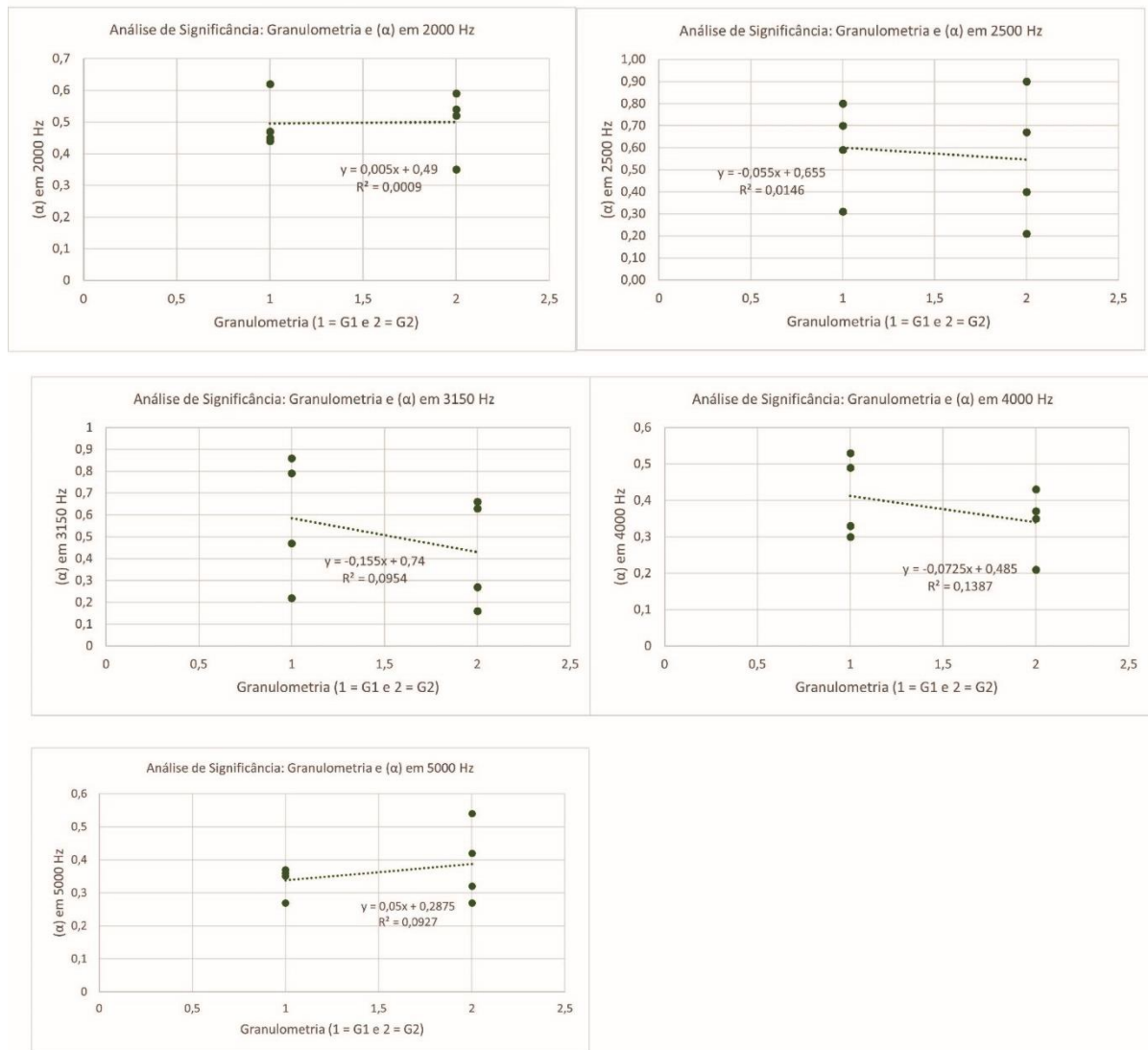
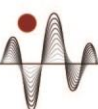


Figura 72: Gráficos de análise se significância da variável granulometria por banda de frequências

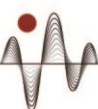
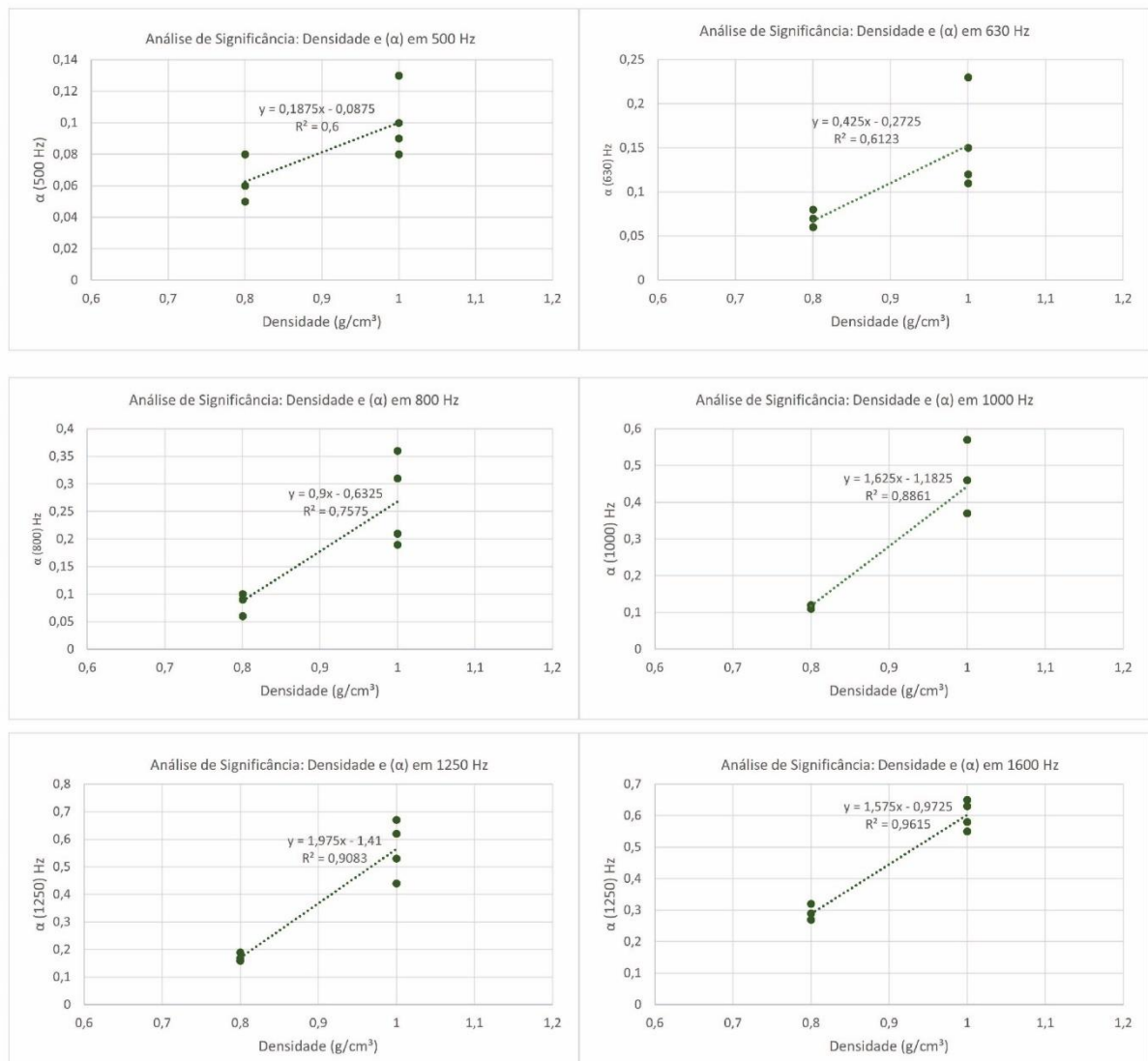
Fonte: Elaboração própria

No entanto, a análise estatística da variável densidade se mostrou um fator significativo e muito relevante para a determinação da absorção sonora no compósito estudado. A variável densidade é um fator signficante para todas as bandas de frequência. Em relação aos coeficientes de determinação R^2 nas bandas de frequência de 2000 Hz, 5000 Hz e 6300 Hz o coeficiente foi menor que 0,3 indicando que o fator densidade apresenta baixa relevância para a determinação da absorção nessas frequências.

Nas demais, a densidade é relevante para o aumento da absorção sonora do material, sendo que o coeficiente de determinação R^2 é maior que 0,6 em todos os casos.



Destaca-se que a densidade tem alta relevância para o aumento da absorção para as frequências de 1000 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz e 3150 Hz com $R^2 > 0,82$. Os gráficos de análise da significância da densidade por banda de frequência são apresentados na figura 73. Os dados são apresentados de forma mais detalhada no apêndice B.



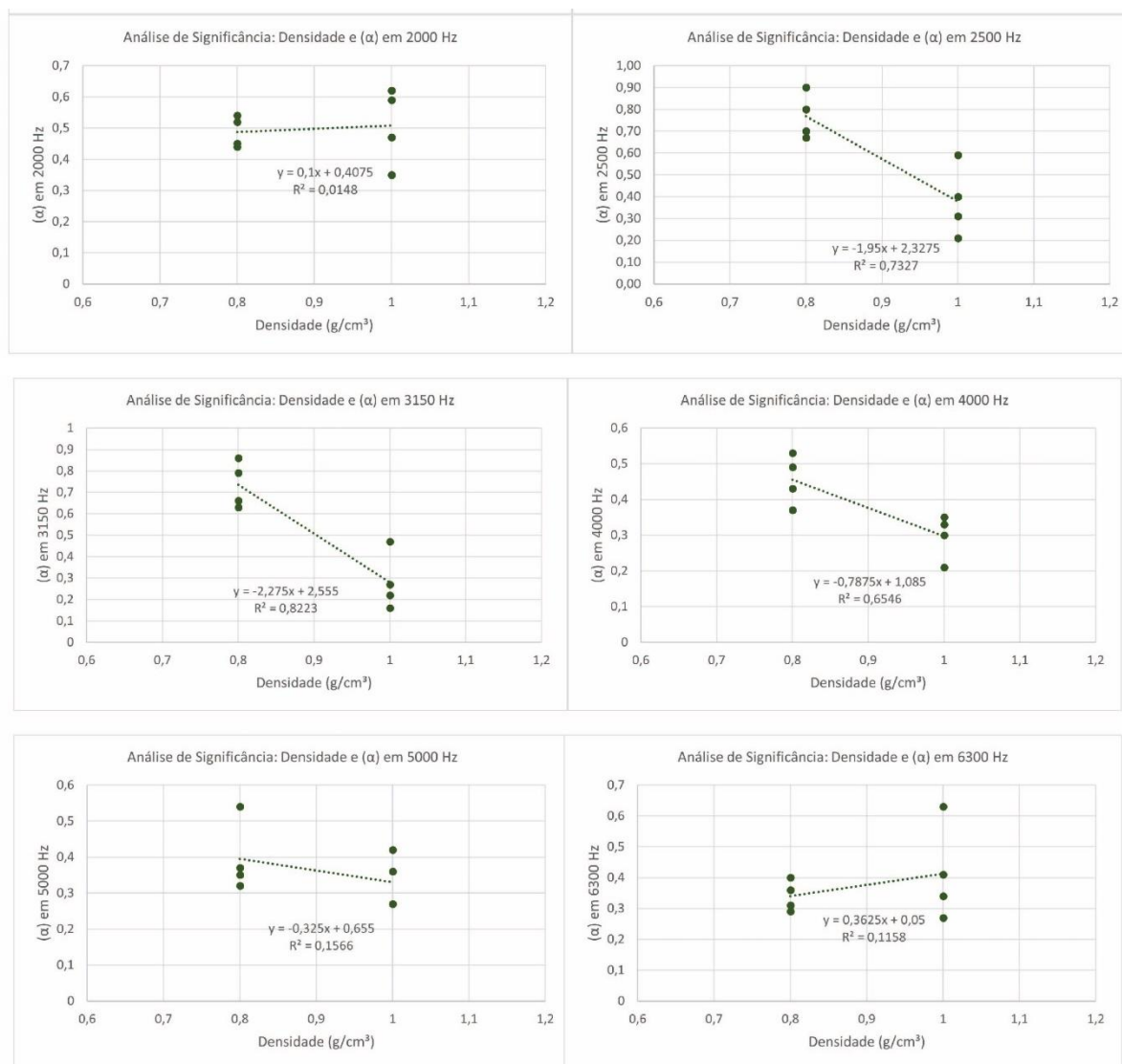
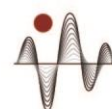


Figura 73: Gráficos de análise de significância da variável densidade por banda de frequências

Fonte: Elaboração própria



4.4 Análise qualitativa das amostras

De modo a compreender o comportamento de algumas interações de variáveis buscou-se avaliar a alteração dos resultados a partir de comparativos entre as amostras.

4.4.1 Influência do aumento do percentual de cimento

O primeiro comparativo se dá sobre as amostras 1 e 2 apresentam a granulometria (G1) e a densidade ($0,8 \text{ g/cm}^3$), o fator que as difere é o percentual de cimento. O gráfico que compara os coeficientes de absorção sonora por banda de frequência das amostras está apresentado na figura 74. Na maioria dos casos o aumento do percentual de cimento incorreu na diminuição do coeficiente de absorção sonora. A diminuição passou a ser maior a partir de 2500 Hz.

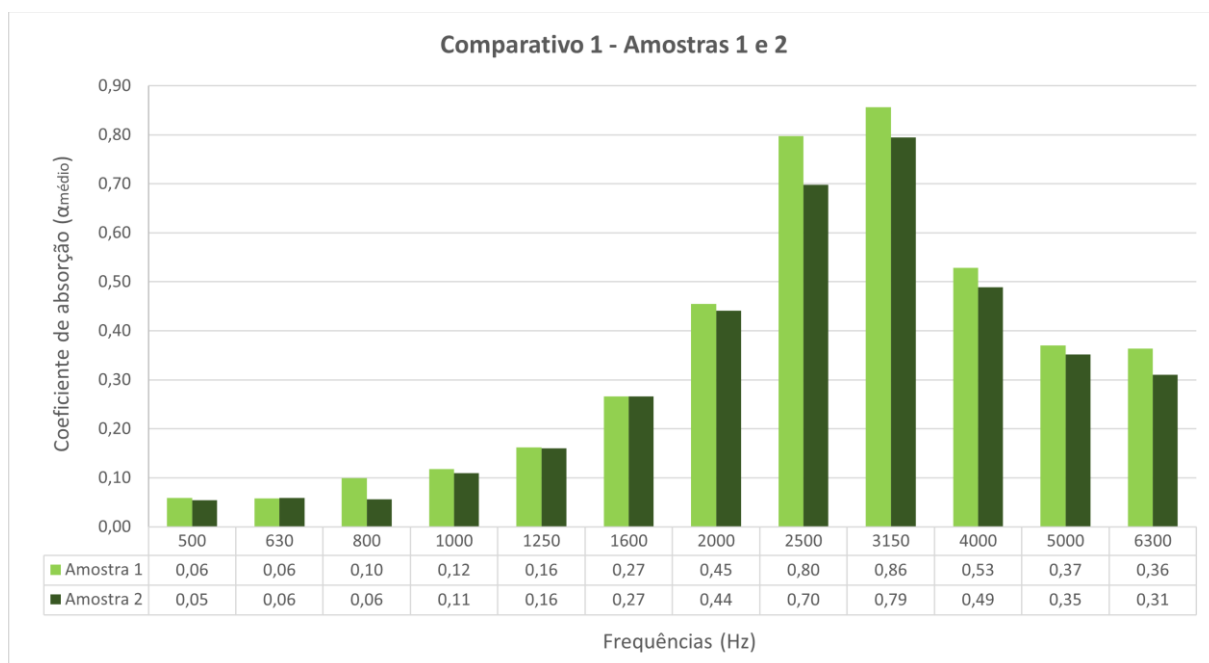
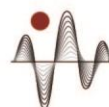


Figura 74: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 1)

Fonte: Elaboração própria

O comparativo 2 é entre as amostras 3 e 4 apresentam a granulometria (G2) e a densidade ($0,8 \text{ g/cm}^3$), o fator que as difere é o percentual de cimento. O gráfico que compara os coeficientes de absorção sonora por banda de frequência das amostras



está apresentado na figura 75. A dimensão da granulometria não alterou o comportamento observado anteriormente, na maioria dos casos o aumento da proporção de cimento diminui os coeficientes de absorção sonora, com maior relevância para frequências acima de 2500 Hz.

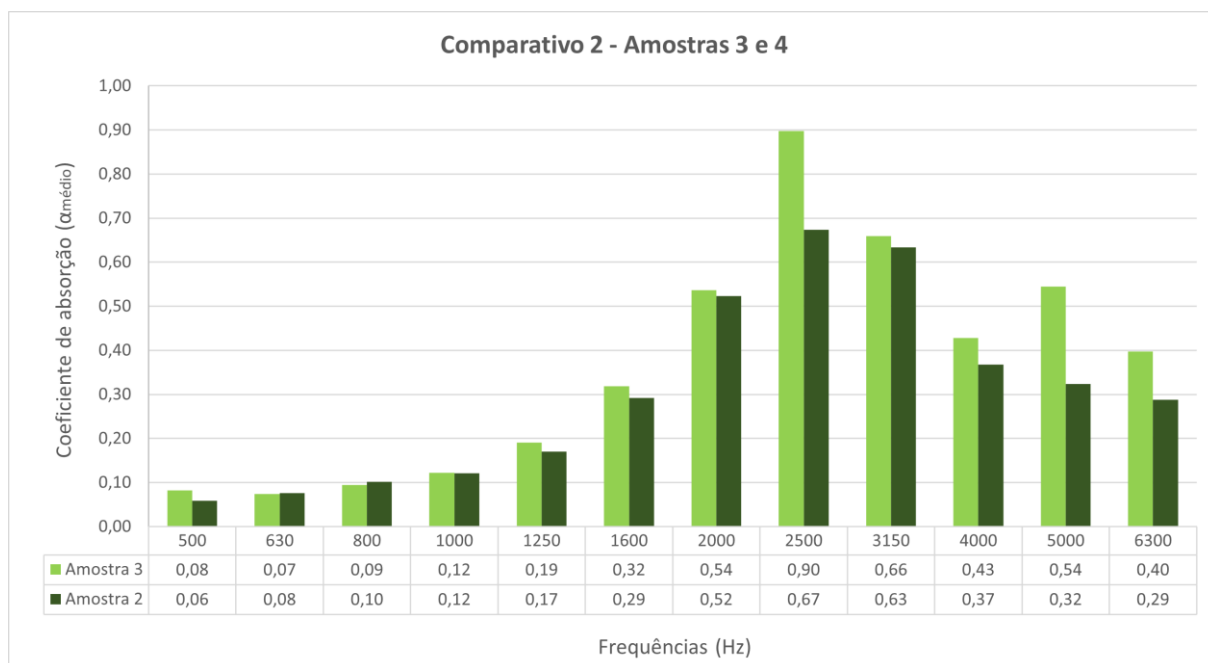
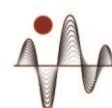


Figura 75: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 2)

Fonte: Elaboração própria

As amostras 5 e 6 apresentam a granulometria (G1) e a densidade (1 g/cm^3), o fator que as difere é o percentual de cimento. O gráfico que compara os coeficientes de absorção sonora por banda de frequência das amostras está apresentado na figura 76. De modo geral o aumento da proporção de cimento diminuiu a absorção sonora na maioria das frequências. No entanto é interessante observar que nesse comparativo, o aumento do percentual de cimento implicou em uma variação de picos de absorção em diferentes faixas de frequência. A amostra 5, que apresenta o menor percentual de cimento apresentou maior absorção nas frequências de 1000 Hz, 1250 Hz e 5000 Hz.



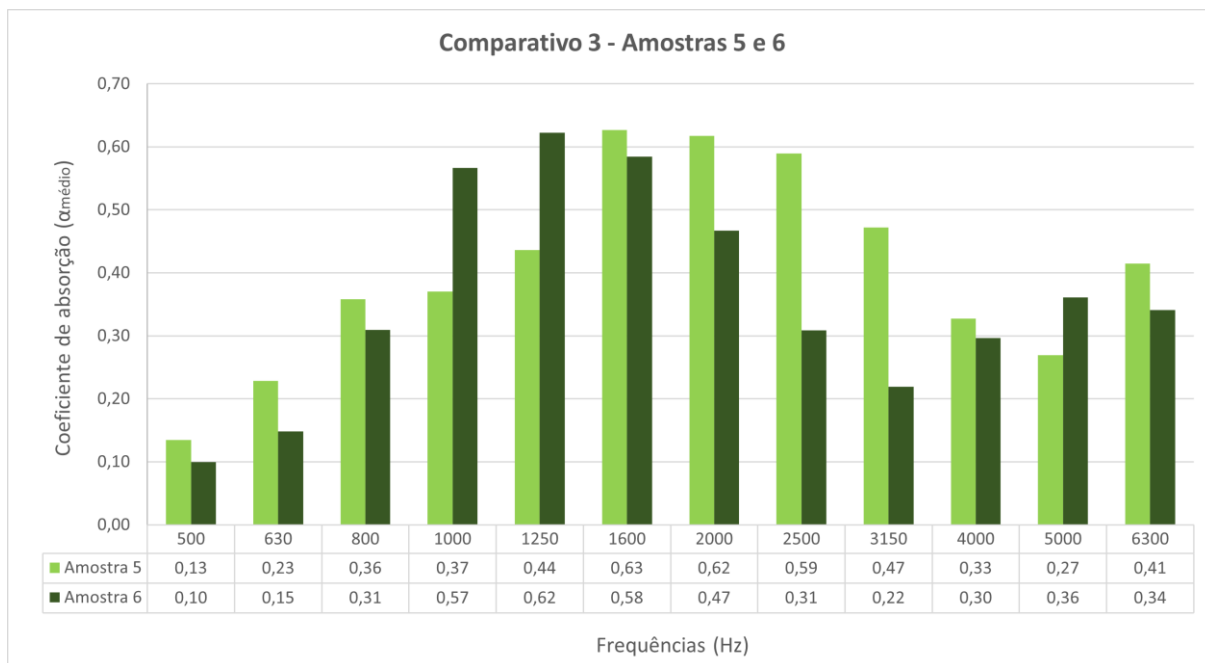


Figura 76: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 3)
Fonte: Elaboração própria

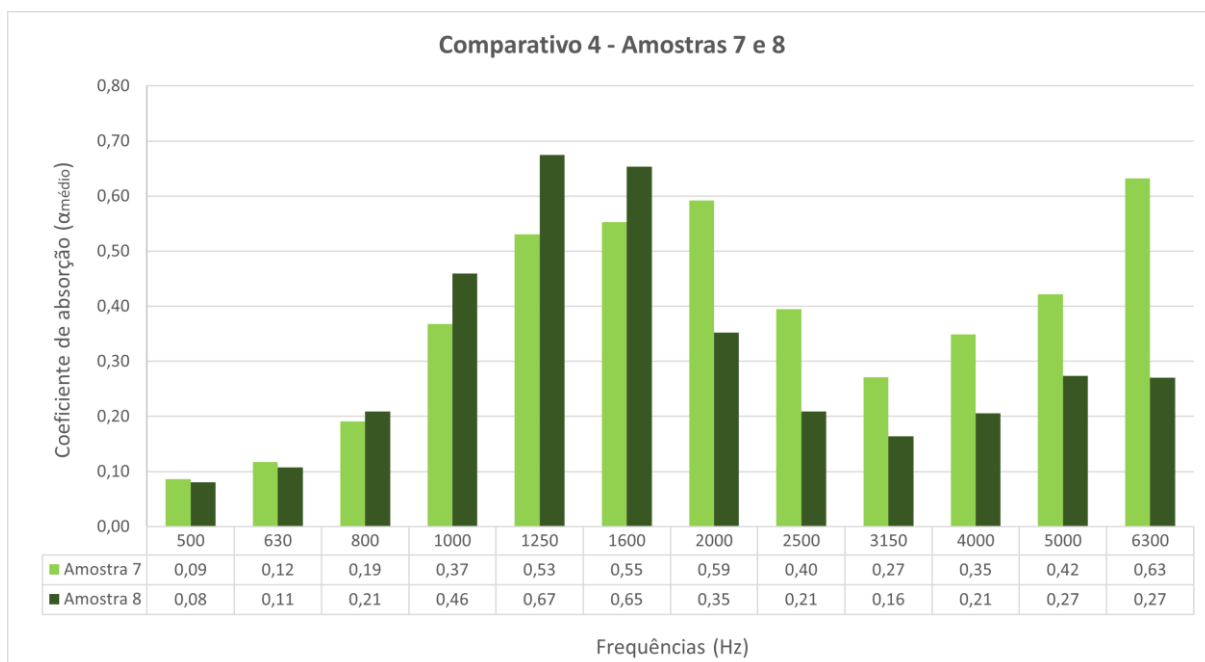
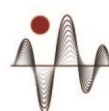


Figura 77: Gráficos de análise comparativa acerca da influência do percentual de cimento na absorção sonora (comparativo 4)
Fonte: Elaboração própria

As amostras 7 e 8 apresentam a granulometria (G2) e a densidade (1 g/cm³), o fator que as difere é o percentual de cimento. O gráfico que compara os coeficientes de absorção sonora por banda de frequência das amostras está apresentado na figura

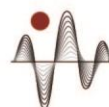


77. o aumento do percentual de cimento implicou em uma variação de picos de absorção em diferentes faixas de frequência. A amostra com maior percentual de cimento obteve mais absorção na faixa de 800 Hz a 1600 Hz, e a amostra com menor percentual de cimento obteve maior absorção de 2000 Hz em diante.

A variação dos picos de absorção que ocorreram nos painéis com densidade de 1 g/cm³, através da variação do percentual de cimento em ambas as granulometrias estudadas indica que o aumento do percentual de cimento pode ser uma estratégia para obter desempenho em maior em frequências específicas. Ou, seja, além de um elemento que tem a função de ligante, proteção química e térmica, o cimento também se mostrou como uma ferramenta de alterar qualitativamente o desempenho dos painéis.

4.4.2 Influência do aumento da granulometria

O comparativo 5 é feito entre as amostras 1 e 3 apresentam a proporção cimento:bambu = 2,5:1 e a densidade (0,8 g/cm³), o fator que as difere é a granulometria. Amostra 1 = G1 e a Amostra 2 = G2. O gráfico é apresentado na figura 78. A amostra 3 que foi confeccionada com a granulometria (G2) de partículas de maior dimensão apresenta melhor performance na maioria das frequências. No entanto, nas frequências de 3150 Hz e 4000 Hz, houve pico de absorção na amostra 1, confeccionada com a partícula (G1) de menor dimensão, com coeficientes de absorção de 0,86 e 0,53 respectivamente.



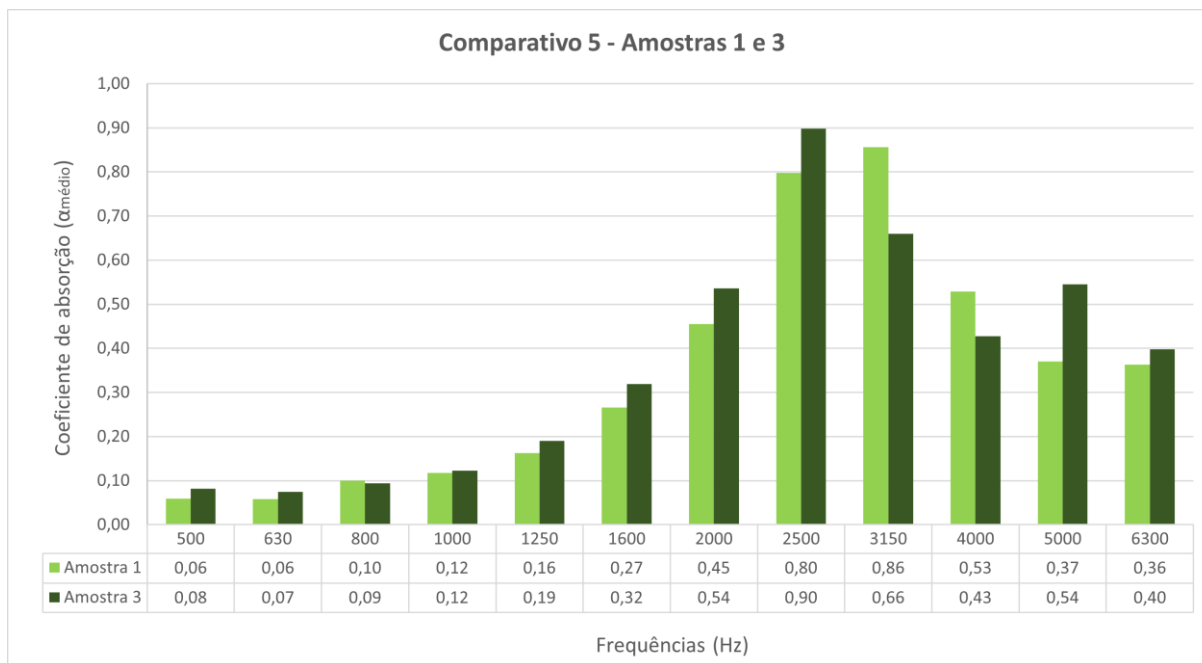
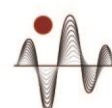


Figura 78: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 5)
Fonte: Elaboração própria

O comparativo 6 é feito entre as amostras 2 e 4 apresentam a proporção cimento:bambu = 3:1 e a densidade ($0,8 \text{ g/cm}^3$), o fator que as difere é a granulometria. Amostra 2 = G1 e a Amostra 4 = G2. O gráfico é apresentado na figura 79. A amostra 4 que foi confeccionada com a granulometria (G2) de partículas de maior dimensão apresenta melhor performance até a frequência de 2000 Hz, a partir dessa frequência a amostra 2 confeccionada com a partícula (G1) de menor dimensão, apresenta maiores coeficientes de absorção.

Infere-se das informações do gráfico que nessa situação a variação da granulometria foi um fator decisivo de alteração qualitativa do painel visto que ao adotar as partículas menores o desempenho é aprimorado em frequências agudas e ao adotar partículas de maior dimensão o compósito passa a performar melhor em frequências médias.



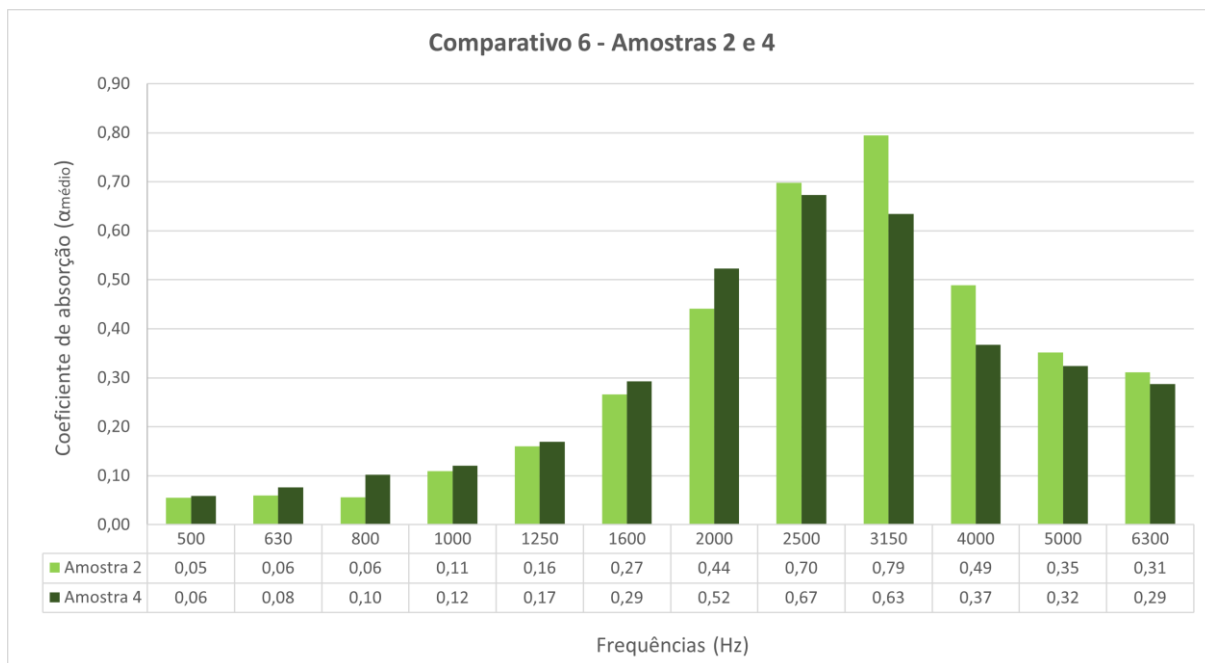
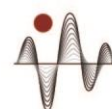


Figura 79: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 6)
Fonte: Elaboração própria

O comparativo 7 é feito entre as amostras 5 e 7 apresentam a proporção cimento:bambu = 2,5:1 e a densidade (1 g/cm^3), o fator que as difere é a granulometria. Amostra 5 = G1 e a Amostra 7 = G2. O gráfico é apresentado na figura 80. A amostra com partículas menores (G1) obteve melhor desempenho na faixa de médias frequências, e no intervalo de 1600 a 3150 Hz. A amostra 7, confeccionada com partículas maiores (G2) obteve em 1250 Hz, 5000 Hz e 6300 Hz absorção maior. A amostra 5, com partículas menores (G1), apresentou desempenho superior de modo geral.



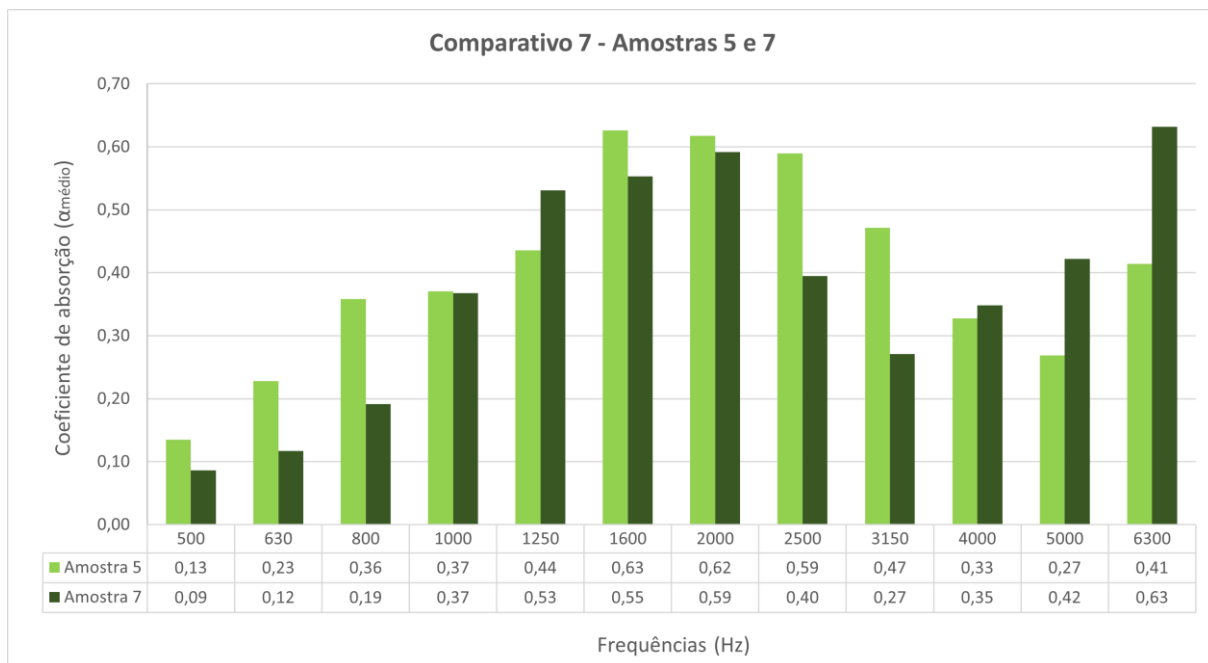


Figura 80: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 7)
Fonte: Elaboração própria

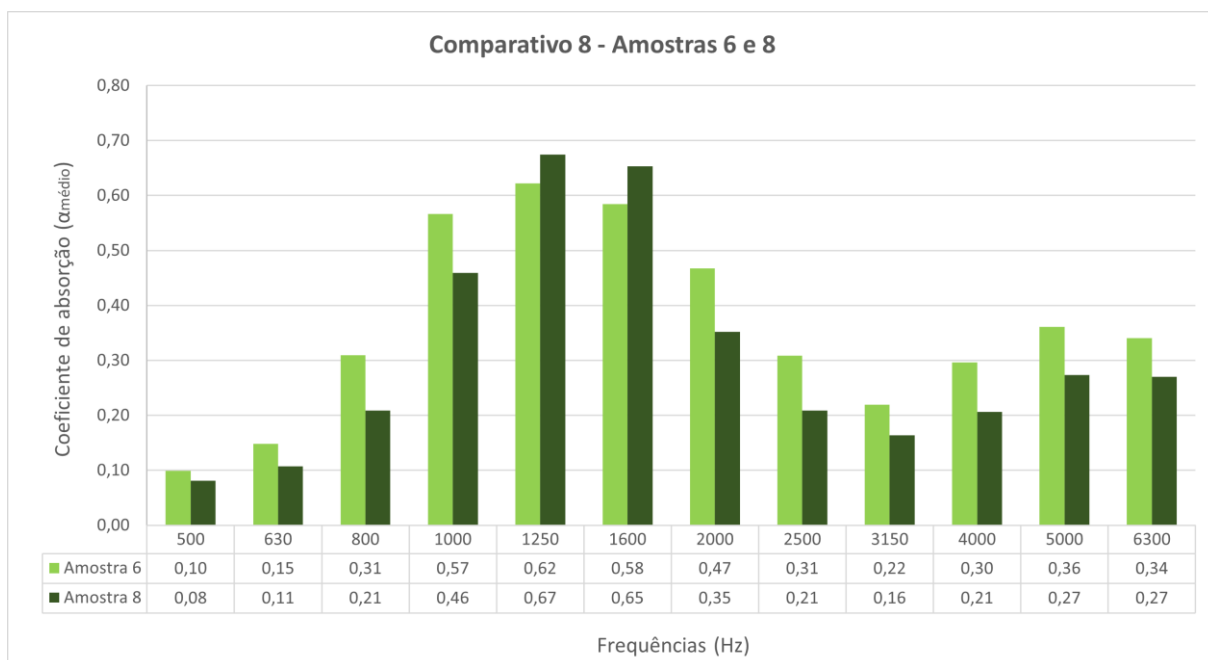
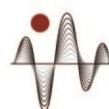


Figura 81: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da granulometria na absorção sonora (comparativo 8)
Fonte: Elaboração própria

O comparativo 8 é feito entre as amostras 6 e 8 apresentam a proporção cimento:bambu = 3:1 e a densidade (1 g/cm^3), o fator que as difere é a granulometria. Amostra 6 = G1 e a Amostra 8 = G2. O gráfico é apresentado na figura 81. Observou-



se nesta análise o mesmo comportamento da análise do comparativo 7. A amostra 6, com partículas menores (G1), apresentou desempenho superior de modo geral, no entanto a amostra 8 com partículas maiores (G2) apresenta pico de absorção em 1250 Hz.

4.4.3 Influência do aumento da densidade

O comparativo 9 é feito entre as amostras 1 e 5 apresentam a proporção cimento:bambu = 2,5:1 e a granulometria (G1) o fator que as difere é a densidade. Amostra 1 = 0,8 g/cm³ e a Amostra 5 = 1,0 g/cm³. O gráfico é apresentado na figura 82. Fica evidente que a amostra mais densa apresentara melhor performance até a frequência de 2000 Hz, e a partir de 2500 Hz a amostra com menor densidade se mostra com melhor desempenho.

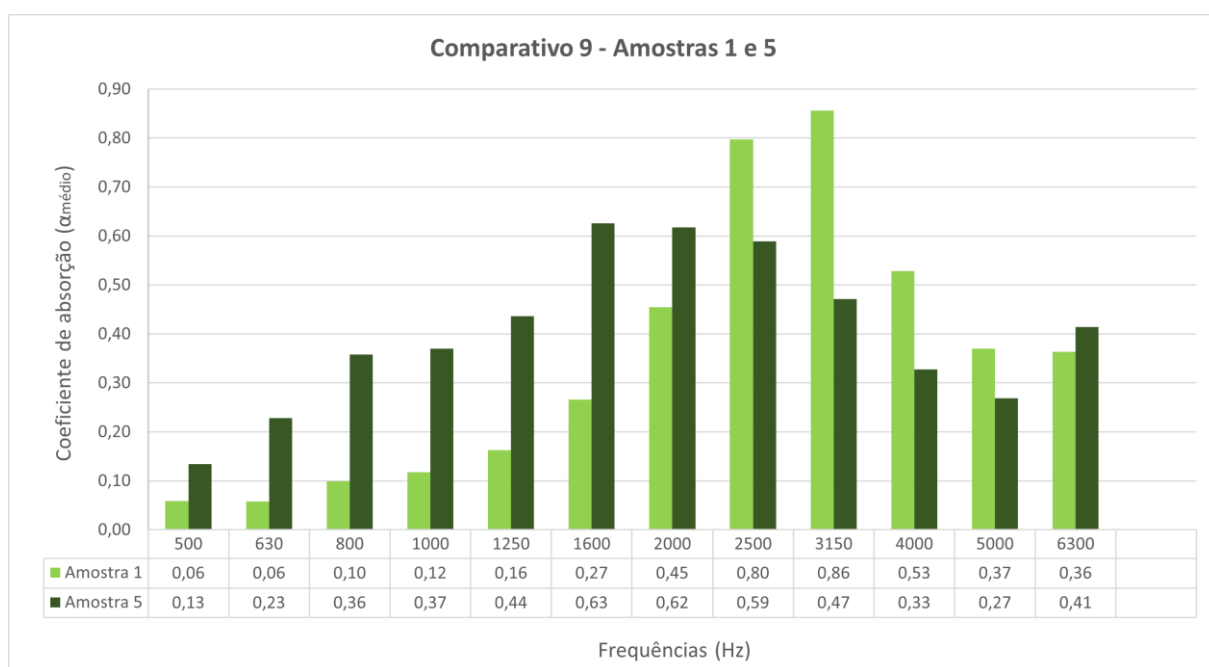
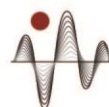


Figura 82: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 9)
Fonte: Elaboração própria



O comparativo 10 é feito entre as amostras 2 e 6 apresentam a proporção cimento:bambu = 3:1 e a granulometria (G1) o fator que as difere é a densidade. Amostra 2 = 0,8 g/cm³ e a Amostra 6 = 1,0 g/cm³. O gráfico é apresentado na figura 83. O comportamento se demonstrou semelhante a análise anterior. Amostras com partículas menores, tem melhor desempenho em médias frequências com maior densidade e melhor desempenho em frequências agudas com menor densidade. Esse comportamento ocorreu independente do percentual de cimento.

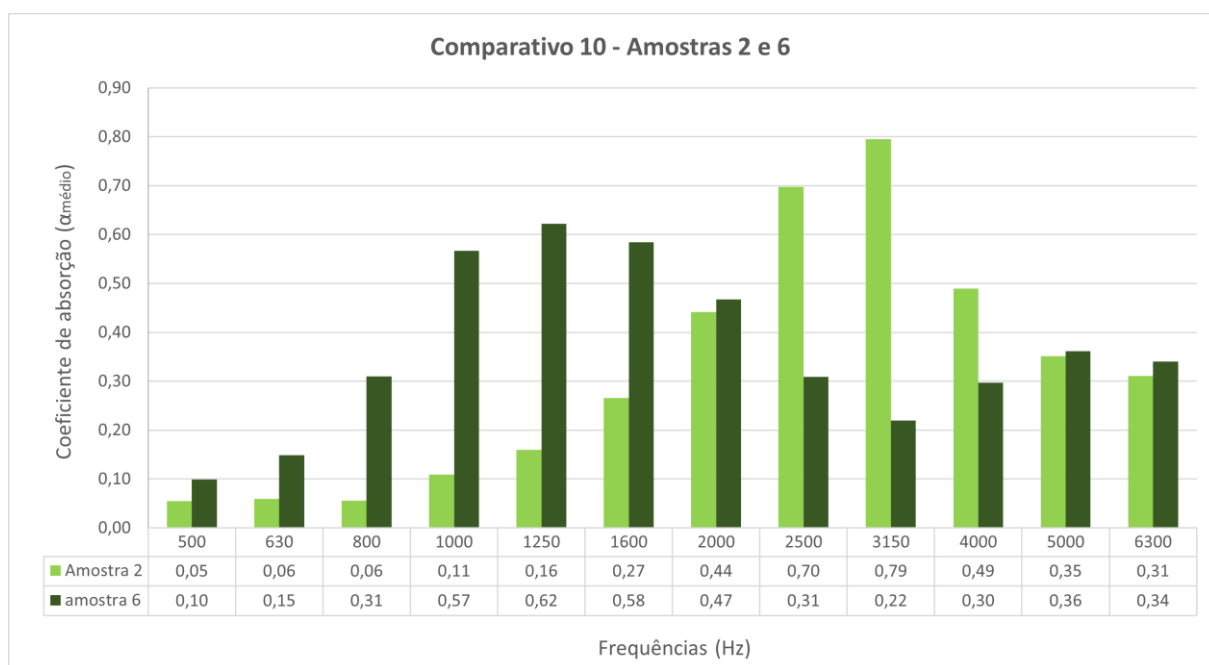
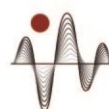


Figura 83: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 10)
Fonte: Elaboração própria

O comparativo 11 é feito entre as amostras 3 e 7 apresentam a proporção cimento:bambu = 2,5:1 e a granulometria (G2) o fator que as difere é a densidade. Amostra 3 = 0,8 g/cm³ e a Amostra 7 = 1,0 g/cm³. O gráfico é apresentado na figura 84. O comparativo 15 é feito entre as amostras 4 e 8 apresentam a proporção cimento:bambu = 3:1 e a granulometria (G2) o fator que as difere é a densidade. Amostra 4 = 0,8 g/cm³ e a Amostra 8 = 1,0 g/cm³. O gráfico é apresentado na figura 85.



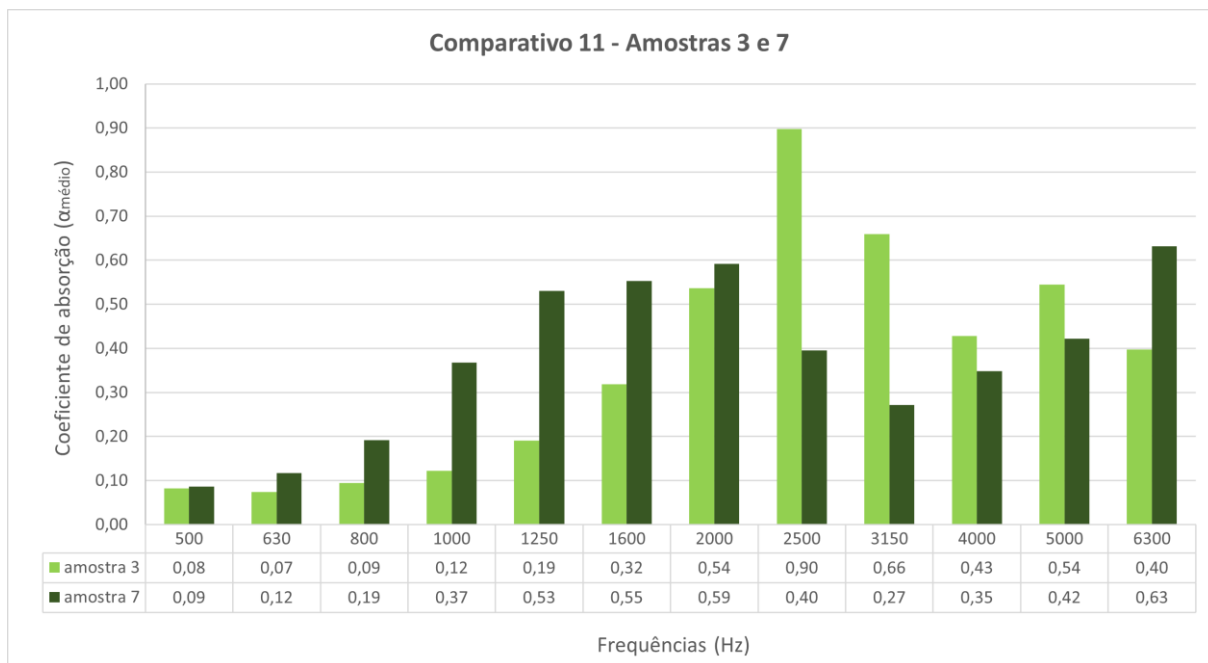


Figura 84: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 11)
Fonte: Elaboração própria

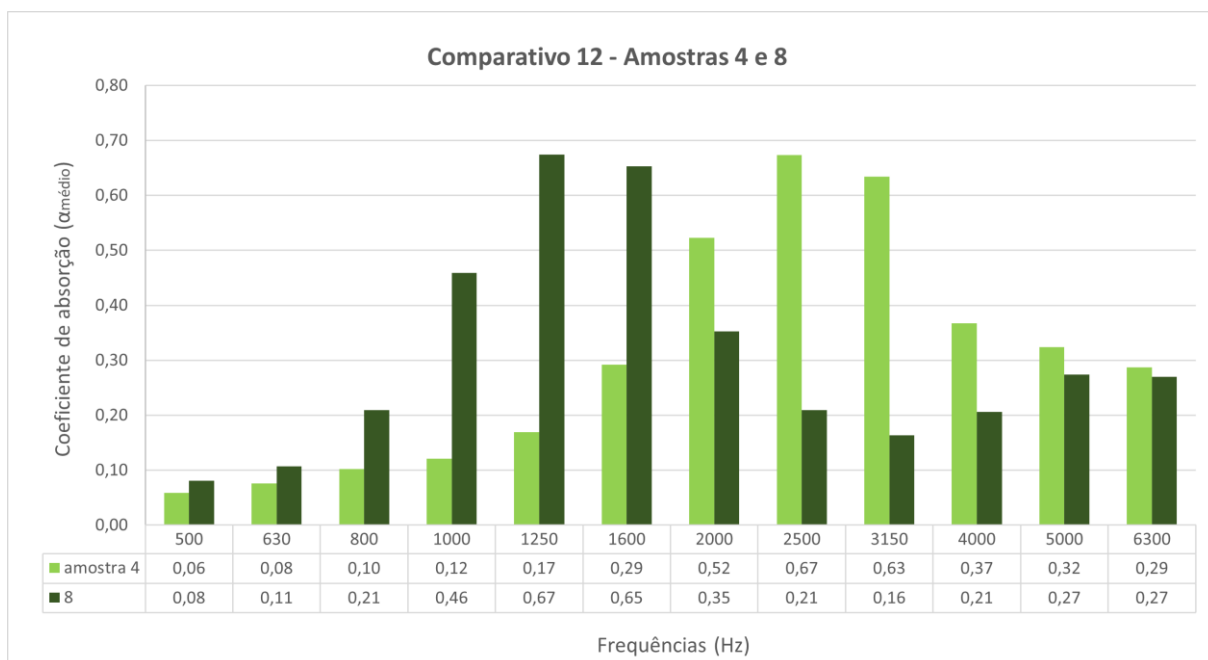
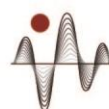


Figura 85: Gráficos de análise comparativa acerca da influência da densidade na absorção sonora (comparativo 12)
Fonte: Elaboração própria

Em ambos os casos o comportamento se repetiu. A maior densidade incorre em melhor performance em médias frequências e a menor densidade em altas frequências. A maior diferença percebida é que com o aumento do percentual de



cimento, que é o que difere os comparativos 11 e 12, o aumento do percentual de cimento resultou em um aumento significativo da absorção na frequência de 2000 Hz.

4.4.4 Discussões

As amostras estudadas representam painéis aglomerados de partículas de bambu e cimento. O painel aglomerado de fibra de madeira mineralizada é um material convencional da construção civil, reconhecido por suas propriedades de absorção e resistência ao fogo.

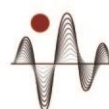
Este material é produzido a partir de fibras longas e longilíneas de madeira de média densidade. A figura 86 apresenta a imagem dos painéis convencional e de bambu e cimento desenvolvidos neste estudo, onde fica evidente a diferença de forma entre as partículas. A extração de madeira e seu beneficiamento em partículas desse formato fibroso e longilíneo exige estrutura de produção em escala industrial para ser realizada.



Figura 86: Infográfico de apresentação do painel convencional de fibra de madeira e cimento e o painel convencional estudado de grânulos de bambu e cimento

Fonte: Elaboração própria

O bambu apresenta sua colheita e beneficiamento mais facilitado a pequenas iniciativas pois apresenta uma produtividade maior por cultivo perene, é passível de ser colhido por indivíduos e ferramentas de baixa tecnologia. A trituração das

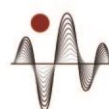


partículas é um desafio e neste estudo utilizamos o moinho de martelos, equipamento menor e mais acessível, porém que resulta em partículas de formato granular e curto e não fibroso e longo.

Um dos aspectos que mais dificultou a produção dos painéis com esse formato de partícula foi alcançar a espessura planejada devido a taxa de compactação. Pois quanto mais finas as partículas, mais volume a mesma massa de partículas gera, isso implica em maior eficiência na compressão do compósito, maior porosidade ao material.

O painel de bambu e cimento de acordo com as variáveis adotadas neste estudo foi viável em termos de resistência física a partir da densidade planejada de $0,7 \text{ g/cm}^3$. Infere-se que a dificuldade em produzir painéis estáveis com densidades baixas pode ser devido a granulometria, mais precisamente o formato das partículas. No entanto a possibilidade de alcançar desempenho acústico com os painéis granulares torna possível a simplificação do processo de produção de materiais dessa natureza e ampliação ao acesso a esse tipo de solução construtiva.

Botterman *et al.*; (2016) apresenta dados de coeficiente de absorção sonora de painéis de lã de madeira e cimento, com espessura de 15,25 mm e densidade de $0,45 \text{ g/cm}^3$. O gráfico apresentado na figura 87 compara os coeficientes de absorção sonora aferidos para as amostras com os dados para painel de lã de madeira e cimento extraído de Botterman *et al.*; (2016). As amostras de 1 a 4 tem densidade $0,8 \text{ g/cm}^3$, e as amostras de 5 a 8 tem densidade de $1,0 \text{ g/cm}^3$.



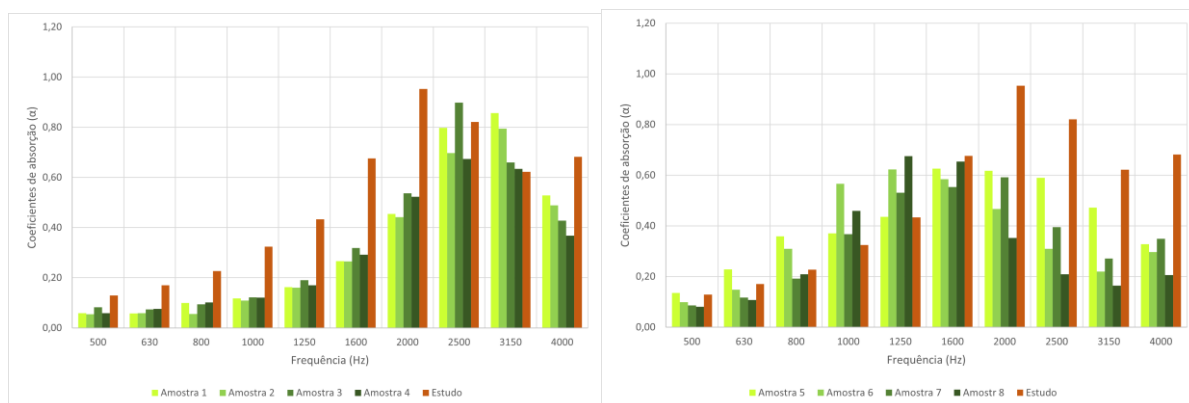
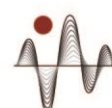


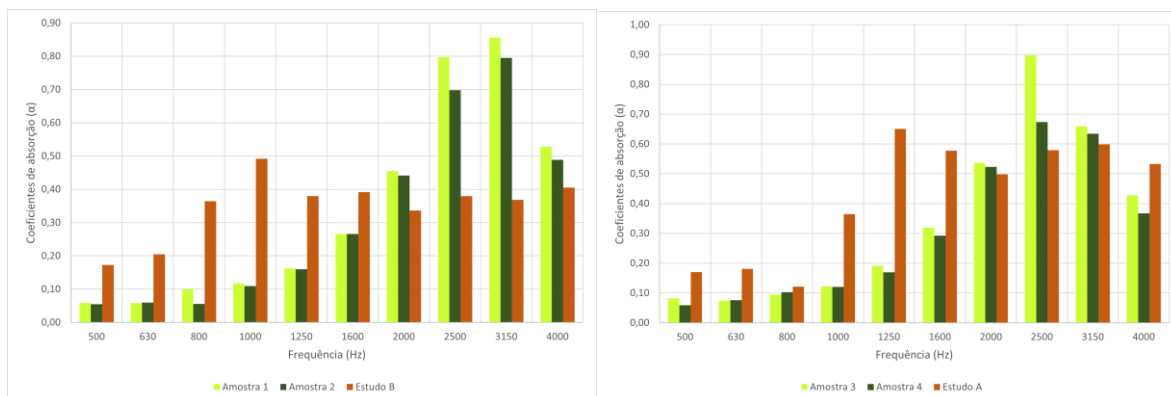
Figura 87: Gráfico comparando os coeficientes de absorção sonora aferidos para as amostras deste estudo e de painel de lã de madeira e cimento
Fonte: Botterman *et al.*; (2016) e elaboração própria

Os painéis granulares de bambu e cimento de maior densidade superaram o desempenho do painel convencional em médias frequências. E os painéis de menor densidade se mostraram equivalentes às do material convencional. Dada a facilitação da produção, a performance mais alta em um intervalo maior de frequências pode ser alcançada através da criação de componentes acústicos mistos, associando os painéis estudados.

Como o projeto acústico é realizado mediante cálculos que levam em consideração áreas de superfície e volume dos ambientes, é possível adotar um uso misto de materiais de modo a atender a finalidade de absorção sonora do ambiente. A proposta do componente acústico ficará mais clara no tópico de aplicação mais adiante.

Karlinassari *et al.*; (2012), estudou painéis granulares de bambu para fins acústicos, porém adotou como aglutinante resina de Isocianato. Comparamos o desempenho dos painéis elaborados pela autora com densidade de $0,8 \text{ g/cm}^3$ com os elaborados por este estudo com a mesma densidade planejada de $0,8 \text{ g/cm}^3$. A figura 88 apresenta o gráfico de comparação entre os resultados obtidos por Karlinassari *et al.*; (2012) para partículas finas com as amostras analisadas nesta tese fabricadas com partículas finas.





Estudo A: Partículas médias (2 a 3 mm)

Estudo B: Partículas finas (retidas na peneira de 10 mesh)

Figura 88: Gráfico comparando os coeficientes de absorção sonora aferidos para as amostras deste estudo de painel aglomerado de bambu e resina

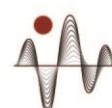
Fonte: Karlinassari et al.; (2012) e elaboração própria

As amostras 1 e 2 representam painéis de bambu e cimento, feitos com a granulometria menor e mais fina (G1), densidade de $0,8 \text{ g/cm}^3$, variando apenas o percentual de cimento. A amostra Estudo B representa o painel feito com partículas de bambu e resina de isocianato com partículas finas (retidas na peneira 10 mesh) e densidade de $0,8 \text{ g/cm}^3$ por Karlinassari et al.; (2012).

Em relação a granulometria, os painéis de partículas mais finas de bambu tem melhor desempenho em altas frequências com o cimento de aglutinante e em médias frequências com resina de isocianato. Para os painéis de bambu feitos de partículas maiores ocorreu o mesmo fenômeno, com exceção das frequências de 4000 Hz.

Os resultados apresentados endossam a viabilidade da aplicação de partículas de bambu para a produção de painéis absorvedores granulares. O cimentício produzido é de baixa exigência tecnológica e aplicável em extensões remotas.

4.5 Estudos de aplicação



4.5.1 Projeto de condicionamento acústico Auditório do complexo da Escola do Futuro do Estado de Goiás em Artes Basileu França – EFGABF

O estudo de caso apresentado é o auditório pertencente ao bloco 4 do complexo de edificações da Escola do Futuro do Estado de Goiás em Artes Basileu França – EFGABF. Será apresentado o projeto arquitetônico, um diagnóstico da acústica do ambiente, as soluções apresentadas à época de finalização do projeto e uma nova solução adotando como material absorvedor os painéis desenvolvidos na tese.

A Escola do Futuro do Estado de Goiás em Artes Basileu França está localizada em Goiânia, capital do Estado de Goiás, e se trata um dos mais importantes centros de formação artística do Brasil Central. Sua trajetória teve início com a Escola de Artes Veiga Valle, primeira iniciativa pública estadual em Goiás integrando arte e educação. Nos anos 2000, transformou-se em Centro de Educação Profissional em Artes Basileu França, incorporando formação técnica em música, dança, teatro, artes visuais e circo. Atualmente passou a integrar a Rede de Escolas do Futuro do Estado de Goiás, unindo tradição e inovação ao oferecer formação de excelência. (BASILEU FRANÇA, 2025)

O conjunto está implantado faceando uma via de alto fluxo e duas outras vias de porte local. O auditório é implantado no meio do terreno no térreo do bloco 4, o que promoveu uma proteção acústica do ruído do entorno. A figura 89 ilustra a vista superior, a fachada de acesso ao conjunto e localização do auditório no conjunto.

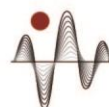
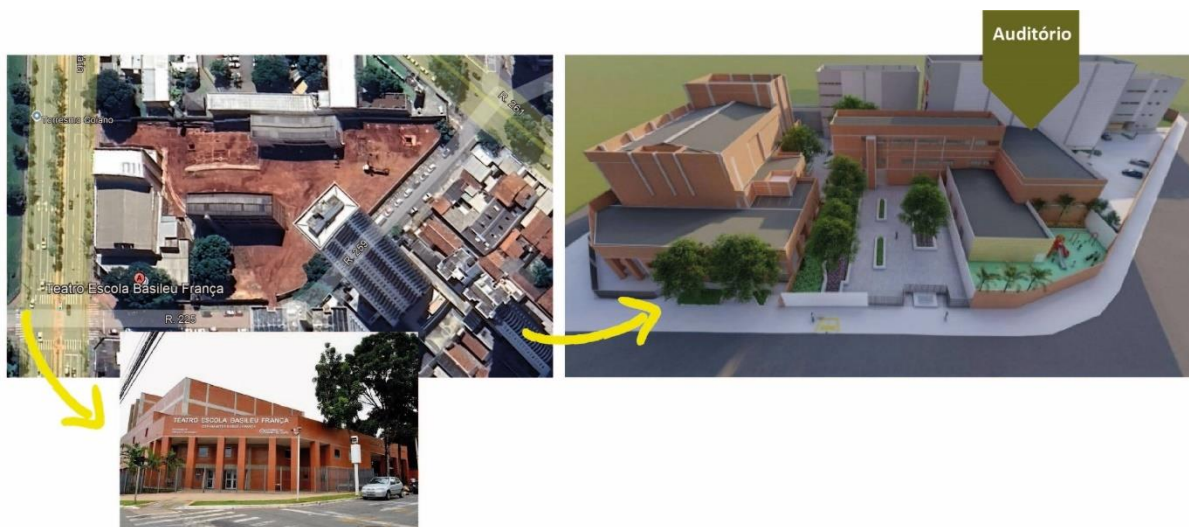


Figura 89: Localização da Escola do Futuro do Estado de Goiás em Artes Basileu França
Fonte: Acervo pessoal e elaboração própria

A qualidade acústica de um recinto tratado acusticamente depende de uma combinação de parâmetros físicos, requisitos técnicos e objetivos específicos de uso. Em ambientes utilizados para aprendizagem ou tarefas cognitivas se torna muito relevante o condicionamento acústico, pois ambientes ruidosos exigem esforço cognitivo adicional para filtrar informações. Além disso, recintos tratados acusticamente elevam a qualidade da experiência auditiva.

Em relação aos requisitos de conforto acústico o principal é o Tempo de Reverberação, que se trata do tempo necessário para que a energia sonora decaia em 60 dB após a interrupção da fonte. A normativa brasileira a respeito do condicionamento acústico de ambientes utiliza como referência a curva elaborada por Bolt e Beraneck and Newman, figura abaixo, em que são associados valores de volume de sala e tempo de reverberação nas curvas de uso específico.

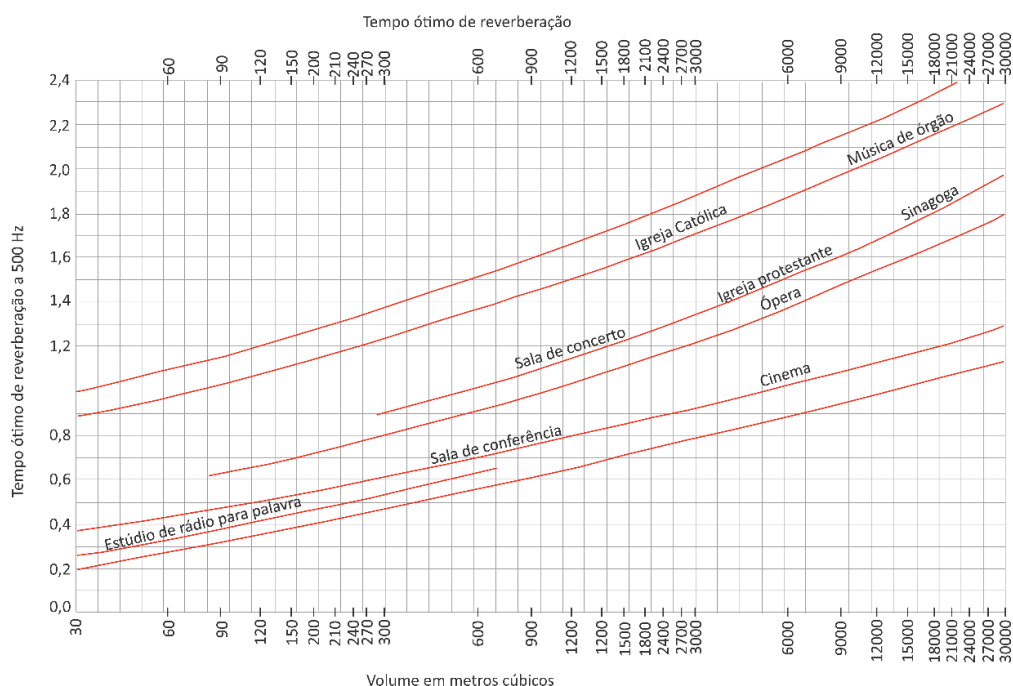
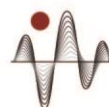


Figura 90: Curva do tempo ótimo de reverberação conforme Bolt e Beraneck and Newman
Fonte: ABNT NBR 12.179/1992

O desempenho do tempo de reverberação se comporta de forma diferencia por banda de frequência. A DIN 18041:2016 versa sobre requisitos acústicos para salas de



pequeno a médio porte, apresenta requisitos mais detalhados para Tempo de Reverberação relacionados ao tipo de uso e volume do ambiente.

Tabela 37: Requisitos de determinação do TR ideal DIN 18041:2016

TR(500 Hz)	0,32*LOG(V)+0,17		Ensino / Comunicação			
	0,26*LOG(V)+0,14		Ensino / Comunicação Inclusiva			
	0,37*LOG(V)+0,14		Discurso / Palestra			
	0,45*LOG(V)+0,07		Música			
	0,75*LOG(V)+1,00		Esporte 200 m³ ≤ V < 10000 m³			
	2		Esporte V ≥ 10000 m³			
Volume:	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
V ≤ 250 m³	0,6*TR (500 Hz)	0,9*TR (500 Hz)	TR (500 Hz)	TR (500 Hz)	0,9*TR (500 Hz)	0,8*TR (500 Hz)

Fonte: DIN 18041 (2016)

A equação 14 determina o TR ótimo que se aplica ao auditório.

$$0,37 \cdot \text{LOG}(V) + 0,14 \quad (14)$$

Onde:

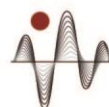
V = Volume do recinto (m³)

Adotou-se o método de cálculo proposto por Millington-Sette (1932) que leva em conta a contribuição individual de cada superfície, melhorando a precisão em salas heterogêneas. Recomenda-se a adoção desse modelo quando há grandes variações de α_i entre superfícies. O cálculo foi elaborado conforme a equação 15.

$$\text{TR}_{60} = \frac{0,161 \times V}{-\sum S_i \times \ln(1 - \alpha_i)} \quad (15)$$

Onde:

V = Volume do recinto (m³)



S_i = Área da superfície – i (m^2)

α_i = Coeficiente de absorção da superfície – i

O espaço destinado ao auditório tem formato retangular. O layout foi estudado de modo a atender as legislações monitoradas pelo Corpo de Bombeiros, assim como promover a maior ocupação possível para o espaço. A figura 91 apresenta a planta de layout, assim como imagens 3D do ambiente sem intervenção em absorção sonora.

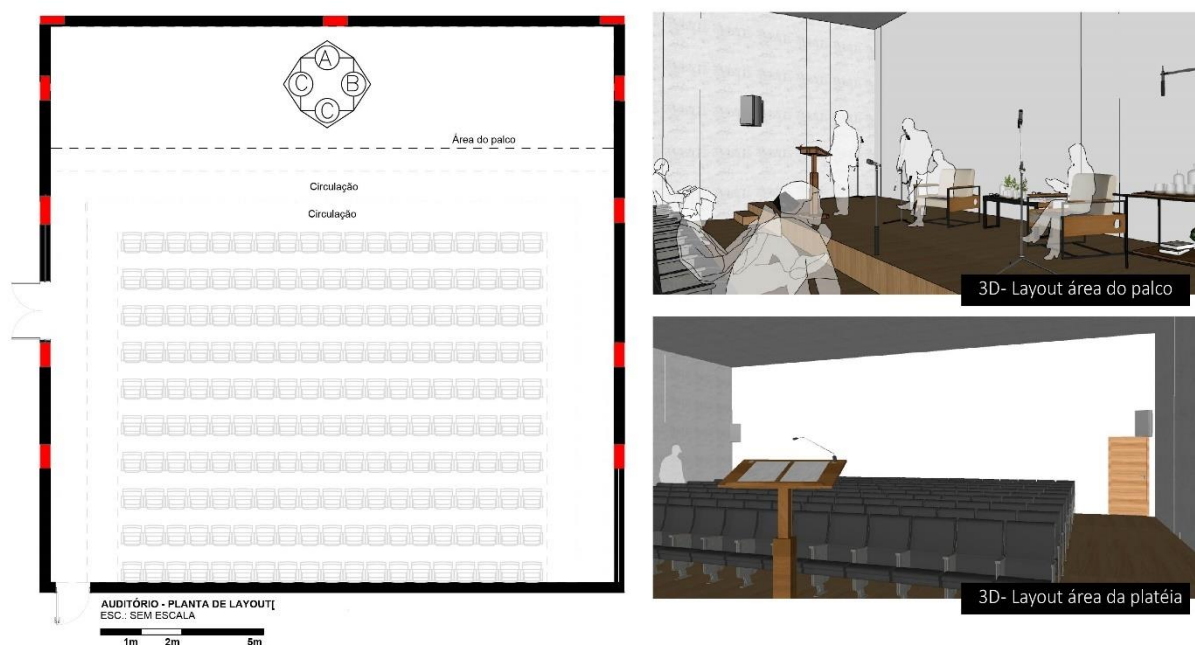
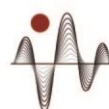


Figura 91: Planta de layout e imagens 3D do auditório sem intervenção acústica
Fonte: Louredo (2022)

A tabela 38 apresenta os dados dimensionais do ambiente sem intervenção. Através deles é possível calcular o tempo de reverberação e utilizar esse dado para construir o diagnóstico da acústica do espaço.

Tabela 38: Dados de dimensionais do ambiente antes da intervenção	
Comprimento (c):	13,85 m
Largura (l)	13,66 m
Altura (a):	4,45 m
Volume:	841,90 m ³
Área de piso - Granitina:	189,26 m ²
Área de teto – Laje pintada:	189,26 m ²



Área elevação A – Parede pintada	61,63 m ²
Área elevação B – Parede pintada	60,78 m ²
Área elevação C – Parede pintada	61,63 m ²
Área elevação C – Porta compensado	1,81 m ²
Área elevação D – Parede pintada	60,78 m ²
Área elevação D – Porta compensado	3,07 m ²

Fonte: Louredo (2022)

Primeiramente calculou-se o Tempo de Reverberação ideal para este recinto conforme a equação 14. A tabela 39 apresenta o TR ideal calculado para as bandas de frequência.

Tabela 39: Tempo de Reverberação Ideal para o Auditório

TR ideal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
	1,83	1,83	1,22	1,22	1,10	1,10

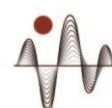
Fonte: Elaboração própria

O Tempo de Reverberação do ambiente sem intervenção foi calculado conforme a equação 15. Os materiais considerados nas superfícies e seus respectivos coeficientes de absorção sonora são apresentados na tabela 40. A figura 92 apresenta o gráfico e a tabela de valores do Tempo de Reverberação calculado para o auditório antes da proposta de intervenção. Em todas as bandas de frequência há uma extrapolação significativa do TR ideal. O Tempo de reverberação calculado para o ambiente sem intervenção está muito elevado e distante do ideal calculado.

Tabela 40: Coeficientes de absorção sonora adotados para as superfícies do auditório sem intervenção

Material:	α por banda de frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso - Granitina	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Elevações - Parede pintada	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Teto - Laje de concreto pintada	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Aberturas - Compensado	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11

Fonte: Louredo (2022)



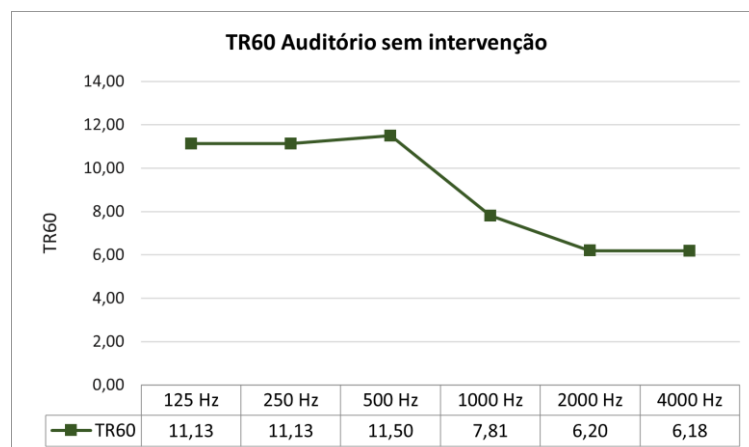


Figura 92: Gráfico de Tempo de Reverberação calculado para o auditório sem intervenção
Fonte: Elaboração própria

O objetivo é efetuar a atenuação do tempo de reverberação utilizando os painéis bambu-cimento como material absorvedor. Selecionou-se as amostras 1, 3 e 5 que apresentaram os maiores coeficientes médios de absorção nas frequências mais usuais de projeto 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz. Os coeficientes de absorção das amostras selecionadas são apresentados na tabela 41.

Tabela 41: Coeficientes de absorção das amostras selecionadas

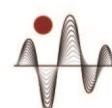
Amostras:	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Cimento:Bambu amostra 1	0,02	0,04	0,06	0,12	0,45	0,53
Cimento:Bambu amostra 5	0,03	0,05	0,13	0,37	0,62	0,33
Cimento:Bambu amostra 6	0,03	0,04	0,1	0,57	0,47	0,3

Fonte: Elaboração própria

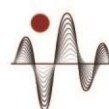
A dimensão do painel adotada em projeto foi aquela que pôde ser produzida de forma artesanal e individualmente nas experiências deste estudo, a placa de 50 cm x 50 cm x 1,5 cm.

A primeira solução projetual adotada foi a instalação do forro em forma de placas suspensas penduradas na laje chamadas de nuvens. Foi proposta a execução de quatro nuvens estruturadas em perfis de alumínio revestidas com os painéis de bambu-cimento desenvolvidos nesta pesquisa.

A figura 93 apresenta o diagrama que ilustra a solução construtiva. As nuvens serão penduradas na laje e permitirão flexibilidade no ajuste do pé-direito. A aplicação das placas referentes as três amostras foram distribuídas proporcionalmente nas nuvens.



Nas laterais do recinto a instalação dos painéis de bambu-cimento também foi proposta através da estrutura de perfis de alumínio, comprovadamente eficiente para o sistema drywall. A figura 94 apresenta o diagrama que ilustra a solução construtiva.



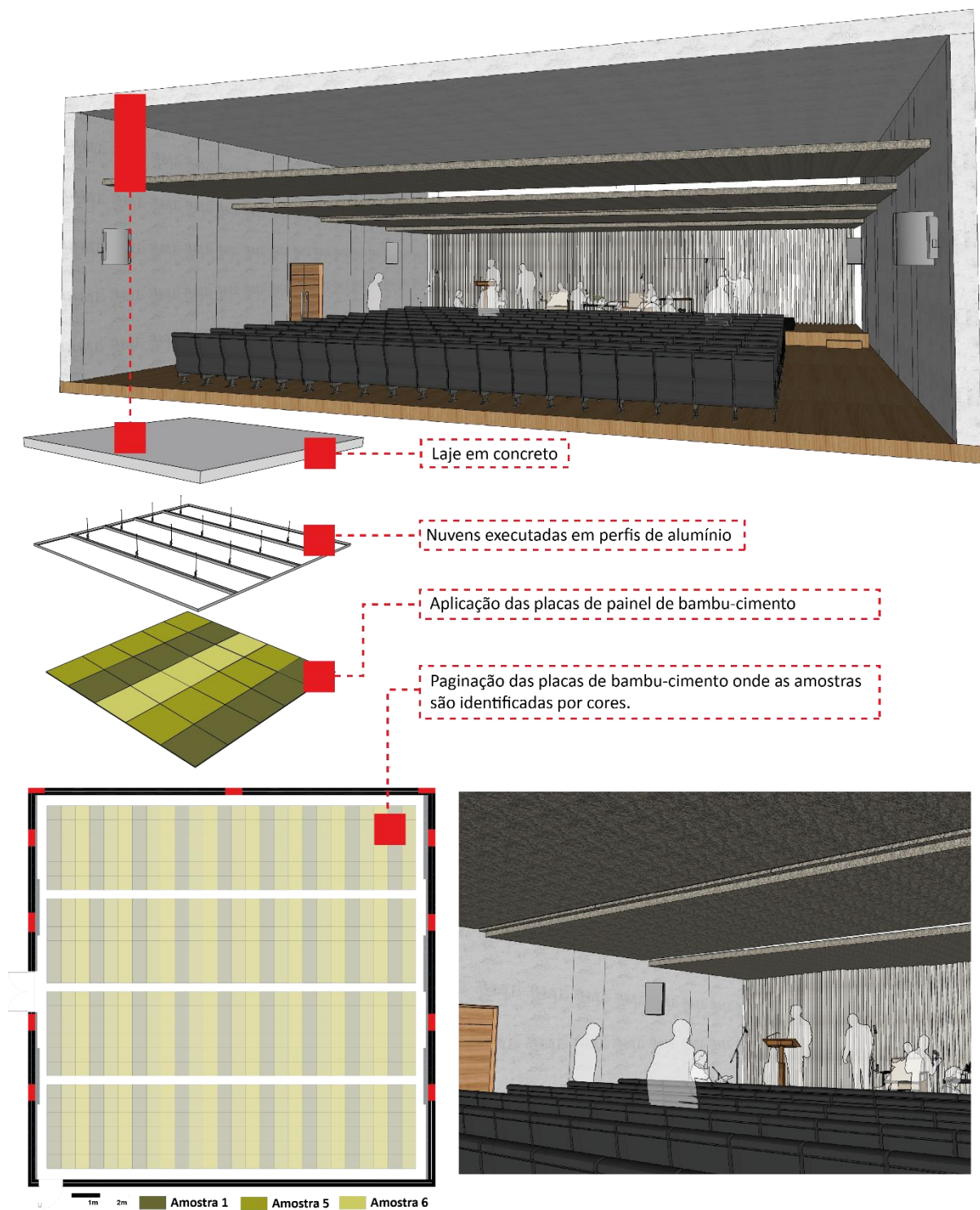
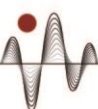


Figura 93: Diagrama de proposta de sistema de execução das nuvens acústicas de painéis de bambu-cimento
 Fonte: Elaboração própria



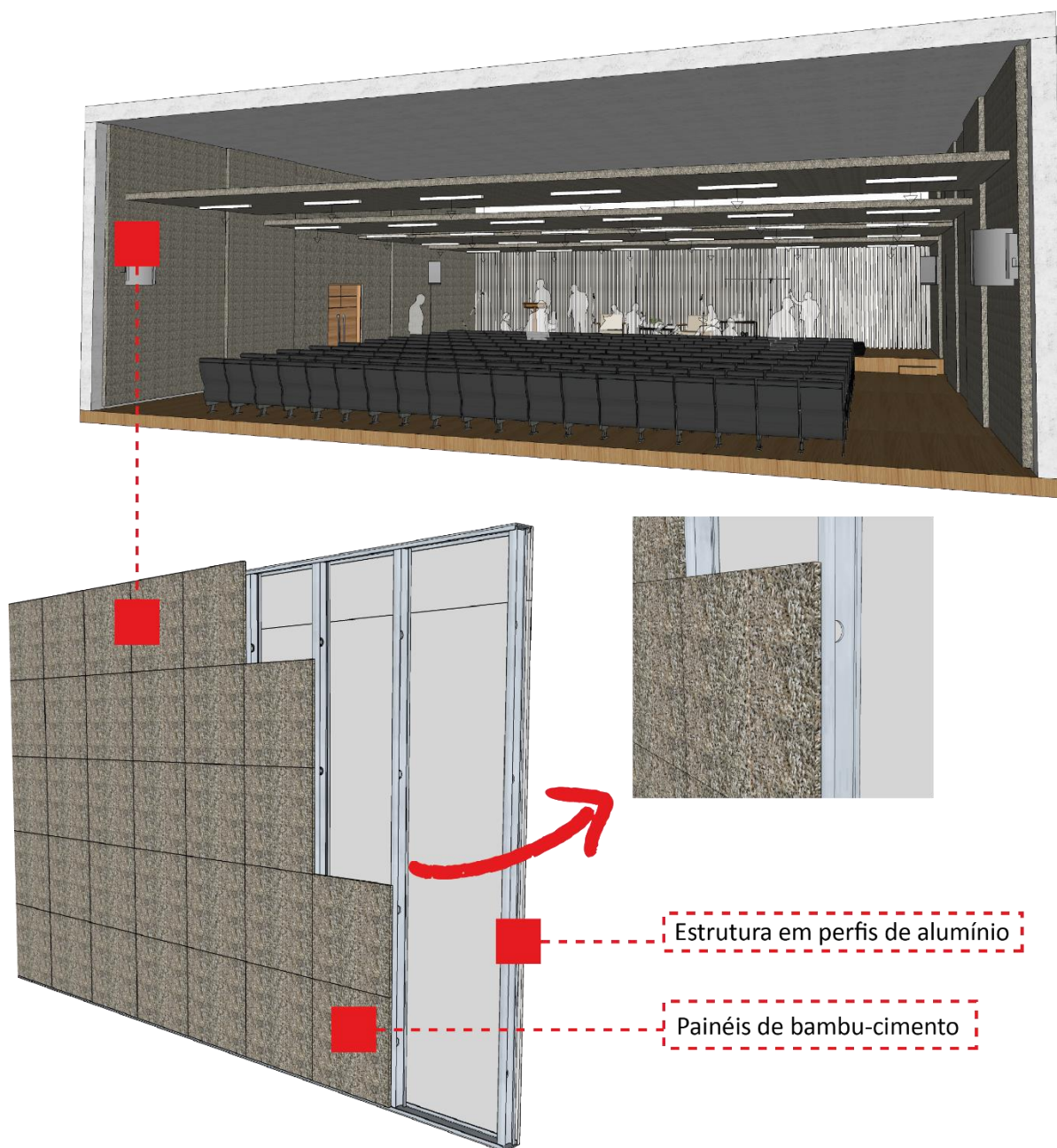
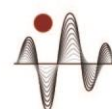


Figura 94: Diagrama de proposta de sistema de execução do revestimento acústico de painéis de bambu-cimento
Fonte: Elaboração própria

A área de revestimento também foi proporcionalmente distribuída entre as amostras de painel bambu-cimento selecionadas. A figura 95 ilustra a paginação dos painéis conforme as amostras selecionadas. A tabela 42 apresenta os quantitativos de área de superfície e os materiais aplicados para fins de cálculo do tempo de reverberação TR da proposta.



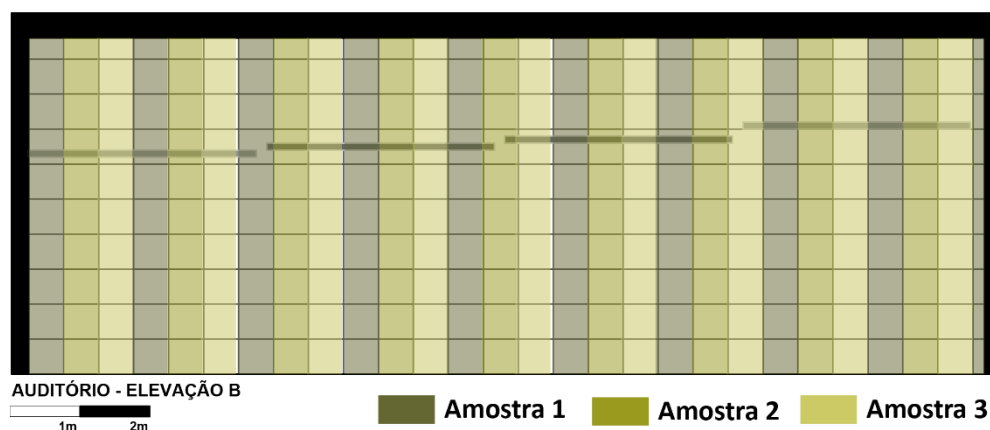


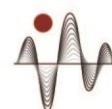
Figura 95: Diagrama paginação de painéis conforme as amostras selecionadas
Fonte: Elaboração própria

Tabela 42: Área de aplicação dos materiais e seus coeficientes de absorção sonora

Superfície:	Área - Si (m²):	Coeficiente de absorção do material (α):					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Piso:	189,26	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Teto - laje pintada:	33,26	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Teto - Painel Bambu 1	53,976	0,02	0,04	0,06	0,12	0,45	0,53
Teto - Painel Bambu 5	53,976	0,03	0,05	0,13	0,37	0,62	0,33
Teto - Painel Bambu 6	48,048	0,03	0,04	0,1	0,57	0,47	0,3
Elevação A:	61,63	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Elevação B - Painel Bambu 1:	21,03	0,02	0,04	0,06	0,12	0,45	0,53
Elevação B - Painel Bambu 5:	21,03	0,03	0,05	0,13	0,37	0,62	0,33
Elevação B - Painel Bambu 6:	18,72	0,03	0,04	0,1	0,57	0,47	0,3
Elevação C- Vedação:	59,82	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Elevação C- Porta:	1,81	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Elevação D - Painel Bambu 1:	18,57	0,02	0,04	0,06	0,12	0,45	0,53
Elevação D - Painel Bambu 5:	18,57	0,03	0,05	0,13	0,37	0,62	0,33
Elevação D - Painel Bambu 6:	18,57	0,03	0,04	0,1	0,57	0,47	0,3
Elevação D - Porta:	3,07	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11

Fonte: Elaboração própria

A figura 96 apresenta o gráfico com o cálculo do TR após a intervenção com os painéis de bambu, na legenda a aplicação dos painéis bambu-cimento são identificadas como solução 1.



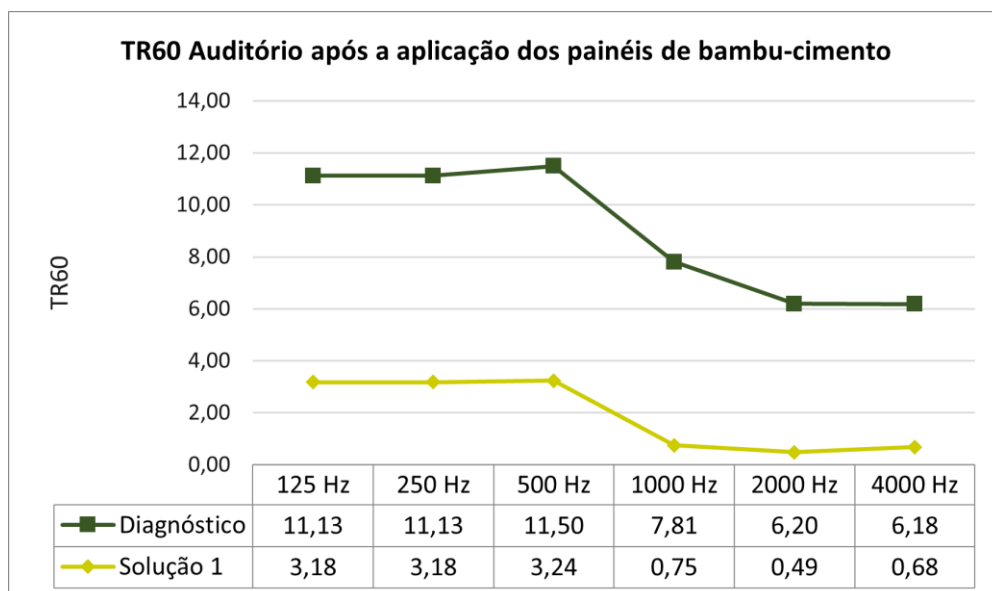


Figura 96: Gráfico de Tempo de Reverberação calculado para o auditório após a aplicação dos painéis de bambu-cimento
Fonte: Elaboração própria

Tabela 43: Tempo de Reverberação Ideal para o Auditório

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
TR ideal (s)	1,83	1,83	1,22	1,22	1,10	1,10
TR Diagnóstico (s)	11,13	11,13	11,50	7,81	6,20	6,18
TR Solução 1 (s)	3,18	3,18	3,24	0,75	0,49	0,68

Nota:

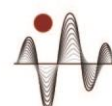
TR Diagnóstico: Ambiente sem intervenção

TR Solução 1: Aplicação dos painéis bambu-cimento

Fonte: Elaboração própria

A tabela 43 apresenta o comparativo de valores de tempo de reverberação ideal, o calculado para o ambiente sem intervenção e o calculado após a aplicação dos painéis de bambu. A adoção dos painéis reduziu significativamente o tempo de reverberação em todas as bandas de frequência. O TR ideal foi alcançado a partir de 1000 Hz, apesar da grande redução ocorrida em graves e médias, ainda há necessidade de atenuação nessa faixa de frequência.

A absorção de ondas graves e médias tem uma dificuldade a ser enfrentada que é a necessidade de maior espessura do material ou componente construtivo. Isso se dá porque quando uma onda sonora plana incide sobre uma parede rígida (ou qualquer superfície com alta impedância acústica), ela é totalmente refletida. A superposição



da onda incidente com a onda refletida cria uma onda estacionária no campo próximo da parede.

Nesta onda estacionária, há nodos de pressão máxima exatamente na parede. A velocidade da partícula é nula na parede e cresce até o valor máximo na distância de um quarto do comprimento da onda. Posicionar o material absorvedor no ponto onde as partículas que compõe a onda estacionária estarão na sua máxima velocidade, implica que o material alcançará a sua máxima performance de absorção.

De modo a atenuar o TR nas frequências de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz, será criada uma sequência de planos executados em painel de bambu-cimento na distância de um quarto de onda de cada uma das frequências. O comprimento de onda é calculado pela equação 16.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (16)$$

Onde:

λ = comprimento de onda (m)

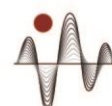
c = velocidade do som no ar (m/s)

f = frequência (Hz)

A tabela 44 apresenta o cálculo das distâncias ideais entre a parede rígida e o material absorvedor de modo que a absorção seja maximizada. Será proposta a execução de três níveis de vedação acústica a partir da parede do palco de acordo com a distância ideal de cada banda de frequência. A figura 97 ilustra esquematicamente a solução construtiva para as camadas de atenuação de frequências médias e graves.

Tabela 44: Cálculo da distância ideal entre o absorvedor e a parede rígida

Frequência (Hz):	Comprimento de onda - λ (m):	Distância da parede - $\lambda/4$ (m):
125	2,744	0,686



250	1,372	0,343
500	0,686	0,1715
Nota: Velocidade do som no ar - c (m/s):		343

Fonte: Elaboração própria

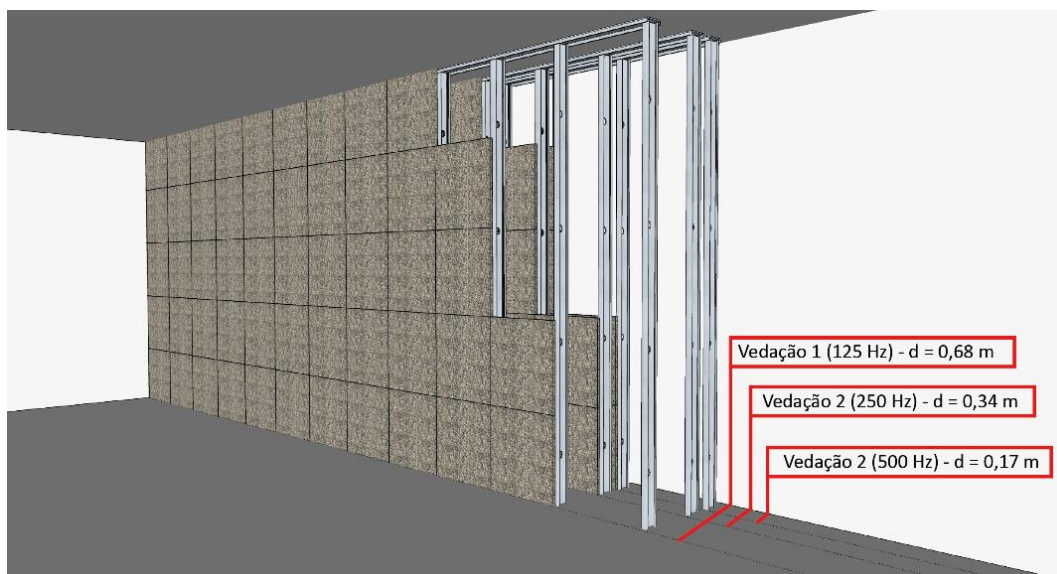
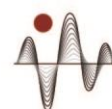


Figura 97: Esquema de instalação das camadas de absorção de acordo com as bandas de frequência de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz

Fonte: Elaboração própria

O resultado preciso da absorção sonora da solução das camadas de atenuação sonora deve de ser obtido mediante ensaios específicos. Porém admite-se que há um incremento de absorção elevado nas frequências específicas que foram tratadas pois nos nodos de maior velocidade da onda a impedância acústica do material se torna próxima a impedância acústica do ar, o que implica em um coeficiente de absorção próximo a 1, ou seja, 100% de absorção.

No novo cálculo de tempo de reverberação considerou-se um aproveitamento de 70% do sistema proposto aplicando o coeficiente de 0,7 para as bandas de frequência em todas as amostras. Com esta estratégia foi possível obter tempos de reverberação menores que o ideal em todas as bandas de frequência.



A figura 98 apresenta os resultados de cálculo do tempo de reverberação ideal para o auditório, o tempo de reverberação sem nenhuma intervenção, o TR após a aplicação dos painéis de bambu cimento e após a solução para atenuação de graves.

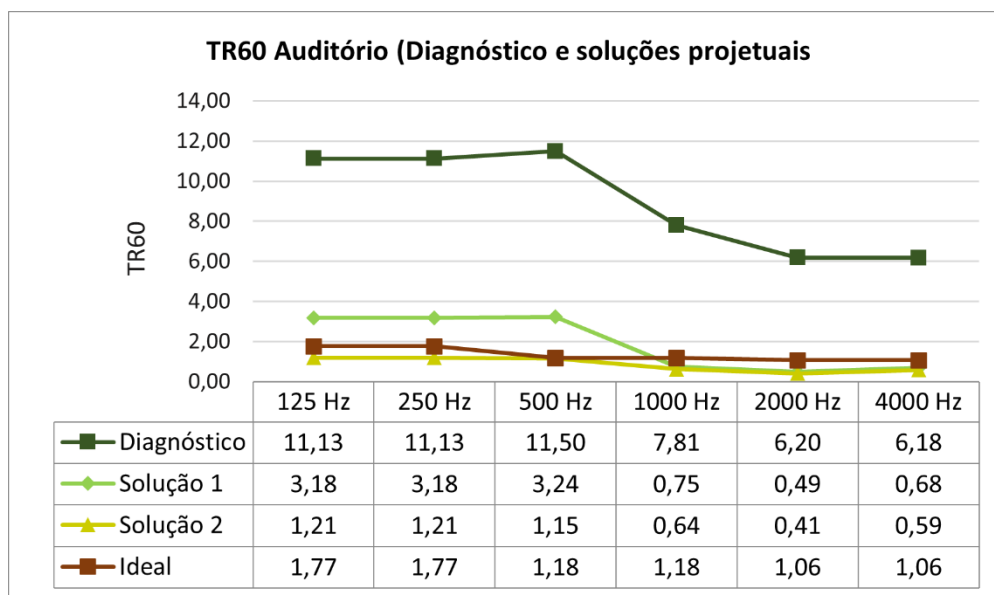


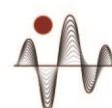
Figura 98: Resultados de cálculo do Tempo de Reverberação para o Auditório
Fonte: Elaboração própria

Esta análise permite inferir que é possível corrigir a reverberação do recinto aplicando os painéis desenvolvidos neste estudo.

4.5.2 Projeto de cartilha de instrução de produção dos painéis de bambu e cimento

Ao longo da pesquisa foi sendo evidenciado o potencial da caracterização do compósito de bambu e cimento não só pelo desempenho acústico obtido, mas também pelo alcance de performance acústica através de materiais amplamente disponíveis e com um processo produtivo que pode ser incluído em uma dinâmica de produção rural.

O cultivo e colheita de colmos de bambu é uma atividade que está na escala de atuação humana, sendo possível realiza-la sem grande aparato tecnológico. A figura 99 apresenta um diagrama que ilustra as etapas de produção do painel acústico de bambu e cimento. O processo beneficiamento da matéria-prima e produção do material simplificado permite que o produto possa ser produzido por completo na área



de cultivo da matéria-prima. Sendo uma alternativa para áreas rurais e de acesso a pequenos produtores.



Figura 99: Diagrama de etapas de produção do painel de bambu e cimento
Fonte: Elaboração própria

Em parceria com a Rede Brasileira do Bambu (RBB) e a Rede Bambu Goiás (RBG), a pesquisa foi apresentada na edição de junho da Agrocentroeste Familiar, uma feira agrícola promovida pela Universidade Federal de Goiás – UFG e voltada para pequenos produtores. A figura 100 ilustra a demonstração realizada com a apresentação da matéria-prima necessária para a produção.

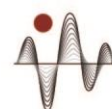
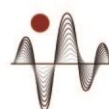


Figura 100: Apresentação do procedimento de produção de painéis de bambu e cimento para absorção sonora
Fonte: Elaboração própria

Essa iniciativa nos incentivou a elaborar um projeto de uma cartilha com instruções de produção do painel que possa ser disponibilizada para uso público. A cartilha se encontra no Apêndice C.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a viabilidade de se produzir painéis aglomerados a partir de partículas de *bambusa vulgaris* var. *vitatta* utilizando como aglutinante o cimento CPV-ARI, e a influência dos parâmetros percentual de cimento, granulometria e densidade do comportamento em absorção sonora.



Conclui-se que é viável a produção de painéis aglomerados de partículas de bambu e cimento com fins de absorção acústica. A adesão das partículas de modo a formar um painel estável e resistente ao beneficiamento de corte das amostras somente foi possível com as partículas que receberam tratamento.

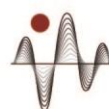
As análises estatísticas permitiram identificar que a densidade é o fator mais importante em relação aos coeficientes de absorção sonora, pois além de apresentar significância em todas as bandas de frequência o coeficiente de determinação R^2 se mostrou elevado.

A alteração da dimensão das partículas ou do percentual do cimento provocou uma mudança qualitativa nos picos de absorção sonora, altera a banda de frequência onde há mais absorção. Em relação a granulometria nota-se que a diminuição da dimensão das partículas incorre em aumento da performance em altas frequências e partículas menores, melhor resultado em médias frequências.

Os estudos de aplicação permitiram inferir que como as amostras apresentaram resultados melhores em bandas de frequência diferentes e todas elas se mostraram viáveis do ponto de vista físico, elas podem ser combinadas em componentes acústicos e atuar em conjunto na absorção sonora de recintos.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

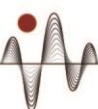
1. Investigação do desempenho acústico de partículas de bambu em formato de fibras e no lugar dos grânulos e identificar se há ganhos de absorção sonora principalmente nas frequências médias.
2. Investigar a influência da mistura de partículas de diferentes granulometrias.
3. Investigação da viabilidade de produção dos painéis e dos coeficientes de absorção sonora com outros tipos de cimento.
- 4 Ensaio de caracterização física, mecânica e resistência a flamabilidade para construir as fichas técnicas dos materiais.



5. Investigar dentre os picadores de pequeno porte disponíveis no mercado oferecem partículas com granulometria mais próxima ao estudo, e aquelas que podem ser viáveis para performance acústica. Desenvolver um procedimento de controle tecnológico para que os painéis sejam produzidos em áreas rurais.
6. Investigar o desenvolvimento do sistema de fixação em bambu laminado colado BLC.
7. Investigar a pegada de carbono de todo o ciclo de produção do painel e identificar mecanismos de diminuir o impacto ambiental e a gestão de resíduos.
8. Investigar a influência Pinheiro; Masson; Lopes da aplicação de pintura nos componentes na absorção sonora.
9. Investigar a durabilidade do material.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10152: Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 22 p. ISBN 978-85-07-07203-4.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: cimento Portland — requisitos e conformidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12 p.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. Athena Impact Estimator for Buildings. Ottawa: Athena SMI, 2022. Disponível em: <https://www.athenasmi.org/>. Acesso em: 15/06/2025.

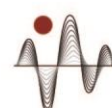
ARAÚJO, Priscila C. de; ARRUDA, Larissa M.; DEL MENEZZI, Cláudio H. S.; TEIXEIRA, Divino E.; SOUZA, Mário R. de. Lignocellulosic composites from Brazilian giant bamboo (*Guadua magna*). Part 2: Properties of cement and gypsum bonded particleboards. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, v. 13, n. 3, p. 297-306, 2011. DOI: 10.4067/S0718-221X2011000300005. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2011000300005&script=sci_arttext. Acesso em: 15/06/2025.

ACCOLTI, Ernesto. Paisaje Sonoro y Música: El paradigma Paisaje Sonoro, ecos desde las ciencias ambientales a las llamadas de la música. In: SEMANA DEL SONIDO, 2014, Rosario. Anais... Rosario: Laboratorio de Acústica y Electroacústica UNR, 2014. Disponível em: <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/Paisaje%20Sonoro%20y%20Musica%20-%20Accolti.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.

ASDRUBALI, Francesco; SCHIAVONI, Stefano; HOROSHENKOV, Kirill V. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*, v. 19, n. 4, p. 283-311, dez. 2012. DOI: 10.1260/1351-010X.19.4.283.

ARENAS, Juan P.; CROCKER, Malcolm J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound and Vibration*, v. 44, n. 7, p. 12-17, jul. 2010.

ARO, Matthew D. Wood strand cement board. In: INTERNATIONAL INORGANIC BONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE, 11., 2008, Madrid. Proceedings [...]. Madrid: [s.n.], 2008. Disponível em: <https://www.iibcc.biz/wp->



content/uploads/2019/05/IIBCC2008-Proceedings-Wood-strand-cement-board.pdf.

Acesso em: 15/06/2025.

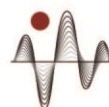
AKKAOUI, Abdessamad. Bétons de granulats de bois: étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Université Paris-Est, Paris, 2011. Disponível em: <https://theses.hal.science/tel-01162671/>. Acesso em: 15/06/2025.

ASHORI, A. et al. Influence of chemical additive on the physical and mechanical properties of cement-bonded composite panels made from jute stick. *Journal of Building Engineering*, v. 26, p. [páginas], 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235271021932604X>. Acesso em: 15/06/2025.

ADU-POKU, A.; OBENG, G. Y.; MENSAH, E.; KWAKU, M.; ACHEAMPONG, E. N.; DUAH-GYAMFI, A.; ADU-BREDU, S. Assessment of aboveground, belowground, and total biomass carbon storage potential of *Bambusa vulgaris* in a tropical moist forest in Ghana, West Africa. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, v. 8, art. 3, 2023. DOI: 10.1051/rees/2023001. Disponível em: https://www.rees-journal.org/articles/rees/full_html/2023/01/rees220019/rees220019.html. Acesso em: 15/06/2025.

AZZINI, Anísio; GONDIM-TOMAZ, Rose Marry Araújo. Extração de amido em cavacos de bambu tratados com solução diluída de hidróxido de sódio. *Bragantia*, Campinas, v. 62, n. 2, p. 221-228, 1996.

BRITO, Flávia Maria Silva; BORTOLETTO JÚNIOR, Geraldo; PAES, Juarez Benigno; BELINI, Ugo Leandro; TOMAZELLO-FILHO, Mário. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. *Construction and Building Materials*, v. 260, p. 120501, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120501>. Acesso em: 15/06/2025.



BRITO, J. O. et al. Optimization of mixing ratio for the production of particle board from bamboo leaves, saw dust and urea formaldehyde. *Journal of Composite Materials*, v. 58, n. 5, p. [páginas], 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773139124000533>. Acesso em: 9 jun. 2026.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. PAS 2050:2011: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. London: BSI, 2011. Disponível em: <https://www.bsigroup.com/en-GB/standards/PAS-2050-2011/>. Acesso em: 15/06/2025.

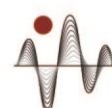
BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 15804:2019: Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. London: BSI, 2019.

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 15/06/2025.

BEUS, Niels; CARUS, Michael; BARTH, Martha. Carbon footprint and sustainability of different natural fibres for biocomposites and insulation material: study providing data for the automotive and insulation industry. Hürth, Germany: nova-Institute, 2019. Disponível em: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/carbon-footprint-and-sustainability-of-different-natural-fibres-for-biocomposites-and-insulation-material-%E2%88%92full-version-update-2019/>. Acesso em: 15/06/2025.

BERARDI, Umberto; IANNACE, Gino. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 132, n. 5, p. 3048–3058, nov. 2012. DOI: 10.1121/1.4756963. Disponível em:



https://www.researchgate.net/publication/277645799_Acoustic_characterization_of_natural_fibers_for_sound_absorption_applications. Acesso em: 15/06/2025.

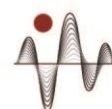
BERTOLINI, Marília da Silva de Moraes; CHRISTOFORO, César Augusto Galvão; BERTOLI, André Luis; SANTOS, Stelamaris Rolla dos; LAHR, Wilson Nunes; ROCCO, Francisco Antonio. Acoustic absorption and thermal insulation of wood panels: influence of porosity. *BioResources*, Raleigh, NC, v. 14, n. 2, p. 3746–3757, mar. 2019. DOI: 10.15376/biores.14.2.3746-3757. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/acoustic-absorption-and-thermal-insulation-of-wood-panels-influence-of-porosity/>. Acesso em: 15/06/2025.

BRAHMIA, A.; ALPAR, T. Effect of pre-treatments and additives on the improvement of cement wood composite: a review. *BioResources*, v. 16, n. 1, p. [páginas], 2021. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effect-of-pre-treatments-and-additives-on-the-improvement-of-cement-wood-composite-a-review/>. Acesso em: 15/06/2025.

BAYMA, Márcio Muniz Albano; PEREIRA, Jonny Everson Scherwinski. Estimativa de volume de Bambu *Guadua* spp. do Acre, Amazônia, Brasil. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, Curitiba, v. 16, n. 42, p. 471-488, 2023. DOI: 10.55905/rdelosv16.n42-030. <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/819/751>. Acesso em: 15/06/2025.

BAYMA, Márcio Muniz Albano; PEREIRA, Jonny Everson Scherwinski; AMARAL, Eufran Ferreira do. Bioeconomia do bambu nativo, *Guadua* spp. do Acre, Amazônia, Brasil. *Revista GeSec*, São Paulo, v. 14, n. 6, p. 10629-10643, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i6.2396. <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2396>. Acesso em: 15/06/2025.

BARACHO JR., Expedito; MARANGÓN, Luis Carlos. Uso de residuos lignocelulósicos en la elaboración de compuestos madera-cemento para fines constructivos no estructurales. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, Pinar del Río, v. 8, n. 2, p. 220-



235, ago. 2020. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692020000200220. Acesso em: 15/06/2025.

BOTTERMAN, B.; HORNIKX, M.; GRÉE, G. D. de la; YU, Q.; BROUWERS, J. Characterizing and modelling the sound absorption of wood wool cement boards (WWCB). In: International Congress on Sound and Vibration, 23., 2016, Atenas. <https://research.tue.nl/en/publications/characterizing-and-modelling-the-sound-absorption-of-wood-wool-ce-3/fingerprints/>. Acesso em: 15/06/2025.

CARVALHO, Régio Paniago. Acústica arquitetônica. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Thesaurus, 2010.

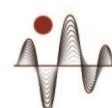
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). EN 15804:2012+A2:2019: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. Bruxelas: CEN, 2019.

COSTA, Humberto; SANTOS, Aguinaldo dos. Design para serviços e a estética sonora no servicescape: influência na experiência estética dos usuários. Projética, Londrina, v. 10, n. 1, p. 77–94, 2019. DOI: 10.5433/2236-2207.2019v10n1p77. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/projetica/article/view/34339>. Acesso em: 22/06/2025.

CHEW, L. T.; SUDIN, R.; KASIM, J. Bambusa vulgaris for urea and cement-bonded particleboard manufacture. Journal of Tropical Forest Science, v. 4, p. 249-256, 1992. Disponível em: <https://jtfs.frim.gov.my/jtfs/article/view/2005>. Acesso em: 15/06/2025.

COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 575 p. ISBN-13: 978-1-4987-4099-9 (Hardback).

CHATTERJEE, Anjan; SUI, Tongbo. Alternative fuels – Effects on clinker process and properties. Cement and Concrete Research, v. 123, p. 105777, set. 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105777. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946519301441>. Acesso em: 15/06/2025.

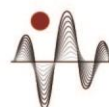
CHABRIAC, P. A.; GLÉ, P.; FABBRI, A.; MCGREGOR, F. Agricultural by-products for building insulation: acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 269–280, jun. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.047. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816302215>. Acesso em: 15/06/2025.

CÉRÉZO, Véronique. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), Lyon, 2005. Disponível em: <https://theses.insa-lyon.fr/publication/2005ISAL0037/these.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.

CASTRO, Vinicius Gomes de. Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação. 2015. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

CALDAS, L.; PITTAU, F.; ANDREOLA, V.; HABERT, G.; SARAIVA, A.; TOLEDO FILHO, R. Dynamic life cycle carbon assessment of three bamboo bio-concretes in Brazil. *Academic Journal of Civil Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.86>. Acesso em: 15/06/2025.

CANAVAN, Susan; RICHARDSON, David M.; VISSER, Vernon; LE ROUX, Johannes J.; VORONTSOVA, Maria S.; WILSON, John R. U. The global distribution of bamboos: assessing correlates of introduction and invasion. *AoB Plants*, v. 9, p. 1-17, 2017. <https://academic.oup.com/aobpla/article/9/1/plw078/2737454>. Acesso em: 15/06/2025.



CHEN, Hong; WU, Jieyu; SHI, Jiangjing; ZHANG, Wenfu; WANG, Hankun. Effect of alkali treatment on microstructure and thermal stability of parenchyma cell compared with bamboo fiber. *Industrial Crops and Products*, v. 164, p. 113380, jun. 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021001448>. Acesso em: 15/06/2025.

DEL REY, Romina; ALBA, Jesus; ARENAS, Jorge P.; SANCHIS, Vicente J. An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Applied Acoustics* 73 (2012) 604–609. doi:10.1016/j.apacoust.2011.12.009

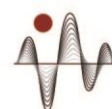
EVEREST, F. Alton; POHLMANN, Ken C. *Master handbook of acoustics*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-184652-3.

FAN, M.; DINWOODIE, J. M.; BONFIELD, P. W.; BREESE, M. C. Dimensional instability of cement-bonded particleboard: Behavior of cement paste and its contribution to the composite. *Wood and Fiber Science*, Madison, v. 31, n. 3, p. 306–315, 2000.

FAN, Mizi; NDIKONTAR, Maurice Kor; ZHOU, Xiangming; NGAMVENG, Joseph Noah. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 135–140, nov. 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.089.

FRYBORT, Stephan; MAURITZ, Raimund; TEISCHINGER, Alfred; MÜLLER, Ulrich. Cement bonded composites – a mechanical review. *BioResources*, Raleigh, NC, v. 3, n. 2, p. 602–626, 2008. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cement-bonded-composites-a-mechanical-review/>. Acesso em: 15/06/2025.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. In: DRUMOND, Patrícia Maria; WIEDMAN, Guilherme (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017. ISBN 978-85-899-6222-3.



GRAZIESCHI, Gianluca; ASDRUBALI, Francesco; THOMAS, Guilhem. Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Engineering and Systems*, v. 2, p. 100032, jun. 2021. DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100032.

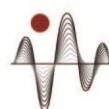
GETZNER WERKSTOFFE. Elastic elements in track influencing total track costs and reducing vibrations. Getzner Werkstoffe GmbH, 2019. Disponível em: <https://www.getzner.com/en/downloads>. Acesso em: 15/06/2025.

GU, Lei; ZHOU, Yufeng; MEI, Tingting; ZHOU, Guomo; XU, Lin. Carbon footprint analysis of bamboo scrimber flooring—implications for carbon sequestration of bamboo forests and its products. *Forests*, v. 10, n. 1, p. 51, jan. 2019. DOI: 10.3390/f10010051.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. Correlation between wood properties and hydration of Portland cement. *Wood and Fiber Science, Madison*, v. 21, n. 4, p. 404–413, 1990.

HUANG, Zujian; SUN, Yimin; MUSSO, Florian. Assessment on bamboo scrimber as a substitute for timber in building envelope in tropical and humid subtropical climate zones - part 2: performance in building envelope. *Construction and Building Materials*, v. 301, p. 124107, 15 set. 2021. https://www.researchgate.net/publication/321366089_Assessment_on_bamboo_scrimber_as_a_substitute_for_timber_in_building_envelope_in_tropical_and_humid_subtropical_climate_zones_-_part_2_performance_in_building_envelope. Acesso em: 15/06/2025.

HARTONO, Rudi et al. Physical, chemical, and mechanical properties of six bamboo from Sumatera Island Indonesia and its potential applications for composite materials. *Polymers*, v. 14, n. 22, p. 4868, nov. 2022. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/22/4868>. Acesso em: 15/06/2025.



INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 11654:1997: Acoustics — Rating of sound absorption. Geneva: ISO, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14067:2018: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. Geneva: ISO, 2018.

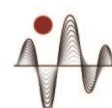
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10534-2:2023: Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes — Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance. Geneva: ISO, 2023.

IANNACE, Gino. The acoustic characterization of green materials. *Building Acoustics*, v. 24, n. 2, p. 101-[final], 2017. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1351010X17704624>. Acesso em: 15/06/2025.

IWAKIRI, Setsuo; SILVA, Leandro Soares da; TRIANOSKI, Rosilani; BONDUELLE, Ghislaine Miranda; ROCHA, Vinicius Yurk da. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis cimento-madeira. *Cerne*, Lavras, v. 22, n. 2, p. 205–213, abr./jun. 2016. Disponível em: <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/827>. Acesso em: 15/06/2025.

INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. Why bamboo & rattan? Disponível em: <https://www.inbar.int/why-bamboo-rattan/>. Acesso em: 8 jun. 2026. Acesso em: 15/06/2025.



IZEKOR, D.; ERAKHRUMEN, A. Physico-mechanical properties of cement-bonded particle boards of *Bambusa vulgaris* and *Gmelina arborea* fibres. *Journal of Tropical Forestry and Environment*, v. 5, n. 1, 2015. <https://journals.sjp.ac.lk/index.php/JTFE/article/view/2495>. Acesso em: 15/06/2025.

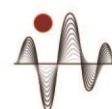
LATORRACA, João Vicente de Figueiredo; IWAKIRI, Setsuo. Efeitos do tratamento das partículas de *Eucalyptus dunnii* (Maid), da variação da relação madeira-cimento e do uso de aditivos sobre as propriedades físicas e mecânicas de chapas de madeira-cimento. *Cerne*, Lavras, v. 6, n. 1, p. 68–76, 2000. Disponível em: <https://biblat.unam.mx/hevila/Cerne/2000/vol6/no1/8.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.

KARLINASSARI, L.; HERMAWAN, D.; MADDU, A.; MARTIANTO, B.; LUCKY, I. K.; NUGROHO, N.; HADI, Y. S. Acoustical properties of particleboards made from Betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources*, v. 7, n. 4, p. 5700-5709, 2012.

KOELLER, Priscila; MIRANDA, Pedro; LUSTOSA, Maria Cecília; PODCAMENI, Maria Gabriela. *Ecoinovação: revisitando o conceito*. Brasília, DF: IPEA, 2020. (Texto para Discussão, n. 2556). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstreams/38095621-e227-4d34-8355-8ea341695966/download>. Acesso em: 15/06/2025.

KOLYA, Haradhan et al. Ammonium persulfate treatment on carbohydrate polymers and lignin of wood improved sound absorption capacity. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 205, p. 626–637, abr. 2022. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.02.075. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813022003117>. Acesso em: 15/06/2025.

KOLYA, Haradhan; KANG, Chun Won. Oxidation treatment on wood cell walls affects gas permeability and sound absorption capacity. *Carbohydrate Polymers*, v. 272, p. 118874, 2021. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118874. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861721012613>. Acesso em: 15/06/2021.

KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; ADACHI, A. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. In: High Performance Structures and Materials. WIT Press, 2002. DOI: 10.2495/HPS020161. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/59/18>. Acesso em: 15/06/2021.

LOUREDO, Joelma Da Mota; PANTOJA, João da Costa; TEIXEIRA, Anelizabeth Alves. O BAMBU COMO MATÉRIA-PRIMA PROMISSORA PARA O MERCADO BRASILEIRO.. In: Anais do XVIII EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Anais...Curitiba(PR) UFPR, 2025. ISBN 978-65-272-1363-5.

LIU, Y.; HU, Z.; ZHANG, G.; ZHANG, D. Sound absorption properties of wood fiber composite materials. Journal of Forestry Research, v. 18, n. 3, p. 210–214, 2007.

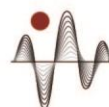
LATORRACA, João Vicente de Figueiredo. Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira. 2000. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/25416>. Acesso em: 15/06/2025.

LILGE, Daniela Silva. Desempenho de Melia azedarach L. sob diferentes tipos de tratamentos de partículas, proporções de cimento e aditivos, na fabricação de painéis cimento-madeira. 2018. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

LIESE, Walter. The anatomy of bamboo culms. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 1998. 204 p.

LONG, Marshall. Architectural Acoustics. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

MELO, Rômulo Ramos; STANGERLIN, Darci Miguel; SANTINI, Elio José; HASELEIN, Carlos Ricardo; GATTO, Darci Alberto. Physical and mechanical properties of



particleboards made from wood and bamboo. *Biomass and Bioenergy*, v. 66, p. 113-121, jul. 2014. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.03.010. Acesso em: 15/06/2025.

MEROTTE, Justin; LE DUIGOU, Antoine; BOURMAUD, Alain; BEHLOULI, Karim; BALEY, Christophe. Mechanical and acoustic behaviour of porosity controlled randomly dispersed flax/PP biocomposite. *Polymer Testing*, v. 51, p. 40–48, maio 2016. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.03.002. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.002>. Acesso em: 15/06/2025.

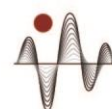
MILLER, Donald L.; MOSLEMI, Ali A. Adhesive bonding of wood material. In: *WOOD ADHESIVES: CHEMISTRY AND TECHNOLOGY*. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 431–460.

MATOSKI, Adalberto. Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira. 2005. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/2378>. Acesso em: 15/06/2025.

MATOSKI, Adalberto; HARA, Mariana M.; IWAKIRI, Shinitiro; CASALI, Julio M. Influence of accelerating admixtures in wood-cement panels: characteristics and properties. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 35, n. 4, p. 611–618, out. 2013. DOI: 10.4025/actascitechnol.v35i4.11261.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber Science*, Madison, v. 15, n. 2, p. 137–149, 1983. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/703>. Acesso em: 15/06/2025.

MIRANDA, Eduardo Hélio de Novais; SILVA, Geraldo Aparecido da; GOMES, Diogo Antonio Correa; SILVEIRA, Mariana Nayara Lima da; VITORINO, Fabrício de Campos; FERREIRA, Saulo Rocha. Efeito de diferentes espécies de madeira e bambu na hidratação de matrizes à base de cimento Portland. *Matéria* (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 27, n. 4, p. e13670, 2022.



<https://www.scielo.br/j/rmat/a/5DfCvMRJnBRsnpTYvpVT7Rg/?lang=pt>. Acesso em: 15/06/2025.

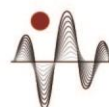
MANALO, Allan C.; WANI, Evans; ZUKARNAIN, Noor Azwa; KARUNASENA, Warnu; LAU, Kin-tak. Effects of alkali treatment and elevated temperature on the mechanical properties of bamboo fibre–polyester composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 80, p. 173-183, out. 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815003388>. Acesso em: 15/06/2025.

MENDES, Cláudia Ohana Borges; NUNES, Maria Alzira de Araújo. Acoustic performance of the banana pseudostem fiber. *Applied Acoustics*, v. 191, p. 108657, mar. 2022. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108657. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X22000317>. Acesso em: 15/06/2025.

NGO, Tri-Dung. Natural fibres for sustainable bio-composites. In: *NATURAL AND ARTIFICIAL FIBER-REINFORCED COMPOSITES AS RENEWABLE SOURCES*. [S.l.]: IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324896441_Natural_Fibres_for_Sustainable_Bio-Composites. Acesso em: 15/06/2025.

NGUYEN TO, Tai Thu. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), Lyon, 2010. Disponível em: <https://theses.hal.science/tel-01017510> . Acesso em: 15/06/2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). A ONU e o meio ambiente. [S.l.]: ONU Brasil, [2020]. Disponível em: A ONU e o meio ambiente | As Nações Unidas no Brasil. Acesso em: 15/06/2025.



OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). Synthetic mineral fibers: health effects. Washington, DC: U.

S. Department of Labor, [s.d.]. Disponível em: <https://www.osha.gov/synthetic-mineral-fibers/health-effects>. Acesso em: 15/06/2025.

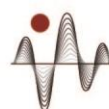
PINHEIRO, Eny Nardelle dos Santos; MASSON, Maria Lúcia Vaz; LOPES, Maria Maeno d'Souza C. A voz do professor: do projeto arquitetônico à acústica da sala de aula. *Distúrbios da Comunicação*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 10–19, 2017. DOI: 10.23925/2176-2724.2017v29i1p10-19. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/dic/article/view/29660>. Acesso em: 15/06/2025.

PROACÚSTICA. Associação Brasileira para a Qualidade Acústica. Disponível em: <https://www.proacustica.org.br/>. Acesso em: 15/06/2025.

PENG, L. Sound absorption and insulation functional composites. In: *ADVANCED HIGH STRENGTH NATURAL FIBRE COMPOSITES IN CONSTRUCTION*. [S.l.]: Elsevier, 2017. cap. 13, p. 333-373. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00013-3. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081004111000133>. Acesso em: 15/06/2025.

PEFC — PROGRAMME FOR THE ENDORSEMENT OF FOREST CERTIFICATION. Reference density values of wood species and wood-based panels. 2023. Disponível em: <https://cdn.pefc.org/furniture.pefc.org/media/2023-10/784c9eb4-2f65-4465-be6e-131b0c1d5dea/84952881-7f2f-5308-8a03-99f31860c423.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.

RABELO, Alessandra Terra Vasconcelos; SANTOS, Juliana Nunes; OLIVEIRA, Rafaella Cristina; MAGALHÃES, Max de Castro. Efeito das características acústicas de salas de aula na inteligibilidade de fala dos estudantes. *CoDAS*, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 299–307, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/codas/a/ghVHnYG5hVgFQmrKmbdz6Yk/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 15/06/2025.



ROCKWOOL GROUP. Sustainability Report 2023: Resilient by nature. Hedehusene: ROCKWOOL, 2024. Disponível em: <https://www.rockwool.com/group/about-us/sustainability/sustainability-report-2023/>. Acesso em: 15/06/2025.

RAY, A. K.; MONDAL, S.; DAS, S. K.; RAMACHANDRARAO, P. Bamboo—A functionally graded composite-correlation between microstructure and mechanical strength. *Journal of Materials Science*, v. 40, n. 19, p. 5249–5253, out. 2005. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-005-4419-9>. Acesso em: 15/06/2025.

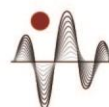
RANJAN, Manish; KHALI, D. P. Effect of cement: bamboo particle ratios on physical and mechanical properties of cement bonded particle board. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences*, v. 4, n. 11, 2016. https://www.isca.me/AGRI_FORESTRY/Archive/v4/i11/1.ISCA-RJAFS-2016-031.php. Acesso em: 15/06/2025.

SCHAFER, R. Murray. A afinação do mundo: uma exploração pioneira pela história passada e pelo estado atual do mais negligenciado aspecto do nosso ambiente. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2001. ISBN 9788539301287.

SANTOS, Karina Rodrigues. Zoneamento de aptidão edafoclimática de espécies de bambu com potencial silvicultural produtivo para o Brasil. 2016. 139 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2016.

SANTOS, Deborah Rodrigues de Souza; SETTE JUNIOR, Carlos Roberto; SILVA, Macksuel Fernandes da; YAMAJI, Fabio Minoru; ALMEIDA, Rogério de Araújo. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 751-758, set. 2016. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr111/cap21.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.

SALGADO, Antônio Luiz de Barros. Bambu com sal: aqui e agora, lá e então. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2014.



SUHASMAN; BAKRI; MASSIJAYA, Muh. Yusram. Fundamental properties of cement board made from bamboo. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TROPICAL SILVICULTURE, 2., 2019, Bogor. Proceedings... Bogor: IOP Publishing, 2019. https://www.researchgate.net/publication/320625604_FUNDAMENTAL_PROPERTIES_OF_CEMENT_BOARD_MADE_FROM_BAMBOO. Acesso em: 15/06/2025.

TANG, Xiaoning; YAN, Xiong. Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 101, p. 360-380, out. 2017. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.07.002.

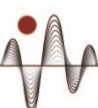
TANG, Xiaoning; YAN, Xiong. Airflow resistance of acoustical fibrous materials: measurements, calculations and applications. Journal of Vibration and Acoustics, [s.l.], v. 142, n. 3, p. 031001, 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1528083718805714>. Acesso em: 15/06/2025.

THE BECK GROUP. 2023 Beck Impact Report. Dallas: The Beck Group, 2023. Disponível em: https://www.beckgroup.com/wp-content/uploads/2025/03/BIR_2023_Final.pdf. Acesso em: 15/06/2025.

THOMPSON, Emily Ann. The soundscape of modernity: architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900-1933. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. ISBN: 9780262701068.

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. 2. ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997. 459 p. ISBN 978-0727725929.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2019 Fiberglass Plant Carbon Intensities Fact Sheet. Washington, DC: EPA, 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-06/2019%20Fiberglass%20Plant%20Carbon%20Intensities%20Fact%20Sheet%20.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.



UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. REDD+: Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation. Disponível em: <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/redd/what-is-redd>. Acesso em: 15/06/2025.

VISEDO, Gisele; PECCHIO, Marisa. Roadmap Tecnológico do Cimento. São Paulo: ABCP/SNIC, 2019. <https://www.abcp.org.br/>. Acesso em: 15/06/2025.

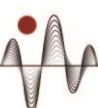
VELÁZQUEZ VIERA, Digna; MANZANARES AYALA, Katia; GUYAT DUPUY, María Antonia. Compatibilidad de especies maderables de la empresa La Palma para formar aglomerados con cemento. Revista Forestal Baracoa, v. 27, n. 1, p. 80-89, 2008.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. State of Climate Action 2025: Closing the global gap in climate action to keep 1.5°C within reach. Washington, DC: WRI; Geneva: WBCSD, 2025. Disponível em: <https://www.wri.org/research/state-climate-action-2025>. Acesso em: 15/06/2025.

WERNET, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>. Acesso em: 15/06/2025.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF HEALTH. Fiberglass. Disponível em: <https://doh.wa.gov/community-and-environment/air-quality/indoor-air/fiberglass>. Acesso em: 15/06/2025.

WOLFE, Ronald W.; GJINOLLI, Agron. Cement-bonded wood composites as an engineering material. In: USE OF RECYCLED WOOD AND PAPER IN BUILDING APPLICATIONS, 1997. Proceedings... [Local de publicação]: Forest Products Society, 1997. Disponível em: <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf1997/wolfe97a.pdf>. Acesso em: 15/06/2025.



WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. What is a sustainable built environment? 2023. Disponível em: <https://worldgbc.org/what-is-a-sustainable-built-environment/>. Acesso em: 15/06/2025.

XU, Xiaoxiao; XU, Peiyu; ZHU, Jianjun; LI, Haitao; XIONG, Zhenhua. Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO₂ emissions. *Science of The Total Environment*, v. 814, p. 152697, 25 mar. 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721077755>. Acesso em: 15/06/2025.

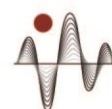
YANG, Weidong; LI, Yan. Sound absorption performance of natural fibers and their composites. *Science China Technological Sciences*, v. 55, n. 8, p. 2278–2283, ago. 2012. DOI: 10.1007/s11431-012-4943-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-012-4943-1>. Acesso em: 15/06/2025.

YILMAZ, Nazire Deniz; POWELL, Nancy B.; BANKS-LEE, Pamela; MICHIELSEN, Stephen. Hemp-fiber based nonwoven composites: effects of alkalization on sound absorption performance. *Fibers and Polymers*, v. 13, n. 7, p. 915–922, set. 2012. DOI: 10.1007/s12221-012-0915-0. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-012-0915-0>. Acesso em: 15/06/2025.

YOUNG, R. A. Extractives from wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 203–226. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tjf/article/224111>. Acesso em: 15/06/2025.

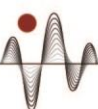
YEN, Tian-Ming; LEE, Joou-Shian. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. *Forest Ecology and Management*, v. 261, n. 6, p. 995–1002, 15 mar. 2011.

YIN, Canbin; LI, Xingong. Influence of alkali treatment on properties of bamboo Portland cement particle board. *ACS Omega*, v. 7, n. 17, p. 14882–14891, abr. 2022. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c01142>. Acesso em: 15/06/2025.



ZENG, S.; JIN, G.; TAN, K.; LIU, X. Can low-carbon city construction reduce carbon intensity? Empirical evidence from low-carbon city pilot policy in China. *Journal of Environmental Management*, v. 332, p. 117363, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117363>. Acesso em: 15/06/2025.

ZHU, Xiaodong; KIM, Birm June; WANG, Qing Wen. Recent advances in the sound insulation properties of bio-based materials. *BioResources*, v. 9, n. 1, p. 1764–1786, 2014. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/recent-advances-in-the-sound-insulation-properties-of-bio-based-materials/>. Acesso em: 15/06/2025.



Autora:

Arq. Me. Joelma da Mota Louredo

Orientador:

Prof. Dr. João da Costa Pantoja

Examinador Interno

Prof. Dr. Jaime Gonçalves de Almeida

Examinador Externo

Dr. Rudybert Barros Von Eye

Examinadora Externa

Profa. Dra. Anelizabeth Alves Teixeira

ACÚSTICA DE BAIXO CARBONO: PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAMBU

ACÚSTICA DE BAIXO CARBONO: PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAMBU E CIMENTO

Cartilha destinada a instruções simples de execução de painéis acústicos de bambu e cimento

INTRODUÇÃO	02
COLHEITA E BENEFICIAMENTO	06
TRATAMENTO E CLASSIFICAÇÃO	07
PRODUÇÃO DOS PAINÉIS	09
DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS E DO DESEMPENHO ACÚSTICO	10
INSTITUIÇÕES	13



INTRODUÇÃO

A qualidade acústica dos recintos é muito relevante para as relações de comunicação e atividades humanas rotineiras. Um exemplo significativo se dá no processo de ensino-aprendizagem, onde a inteligibilidade é essencial. O conforto acústico extrapola a questão de saúde e atinge âmbitos mais subjetivos como a estética dos ambientes e a performance dos usuários nas atividades que executam.

Em relação a aprendizagem, por exemplo, Pinheiro; Masson; Lopes (2017) declaram que o ruído de fundo ou ambiental dificulta ou impede a concentração e compreensão dos conteúdos transmitidos. De modo a atrair a atenção dos ouvintes o professor reage com a elevação da sua intensidade vocal, o que implica de forma preponderante no prejuízo da sua qualidade vocal assim como da performance de atenção dos alunos. Costa e Santos (2019) indica que a partir da ótica do design de serviços a estética ambiental é preponderante na tomada de decisão do consumidor pela permanência no espaço e consequentemente efetuação do ato da compra.

Nos recintos a percepção acústica é resultado do som direto da fonte ou fontes, e das reflexões indiretas de superfícies e outros objetos. Tanto para o som direto quanto para as reflexões as propriedades das superfícies das paredes, piso e teto são determinantes na qualidade acústica. As flechas com linhas preenchidas representam as primeiras reflexões do som após a emissão pela fonte, chamadas reflexões diretas. Já as flexas com linha pontilhada indica as reflexões indiretas, que a onda sonora continua a efetuar no espaço após a fonte ser cessada até que a energia decaia e seja dissipada. Ao incidir sobre uma superfície a onda sonora tem parte de sua energia refletida pela superfície e parte de sua energia é absorvida pelo material. A fenômeno da absorção sonora nos materiais se dá através da conversão da energia sonora em energia térmica. As ondas sonoras precisam percorrer por materiais de porosidade aberta e através de sucessivas reflexões em seu interior e ressonância da estrutura que passa a vibrar a energia sonora é dissipada em energia térmica. A figura 1 apresenta esquematicamente o mecanismo de absorção sonora.

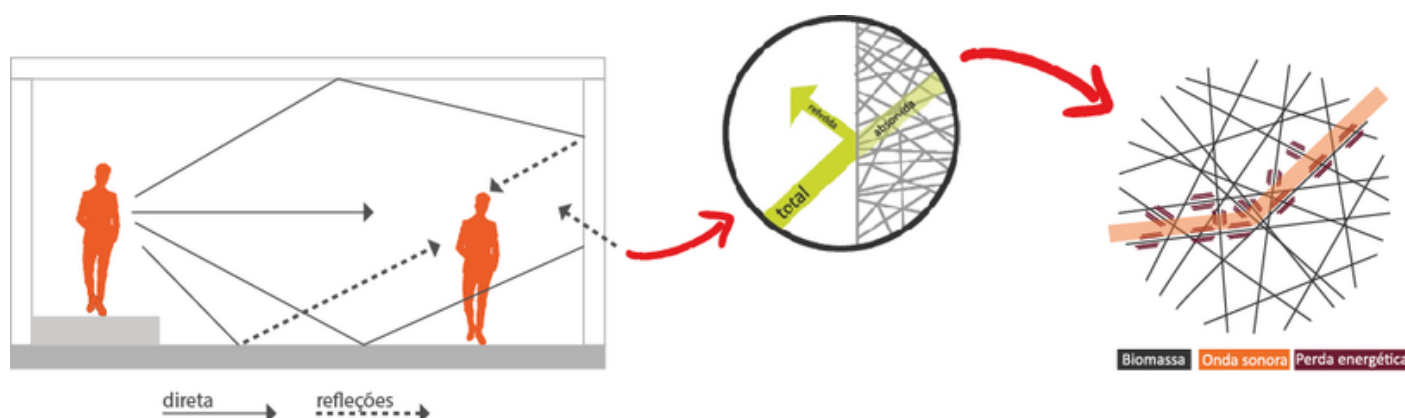


Figura 1: Esquema do mecanismo de absorção sonora dos materiais
Fonte: Elaboração própria

INTRODUÇÃO

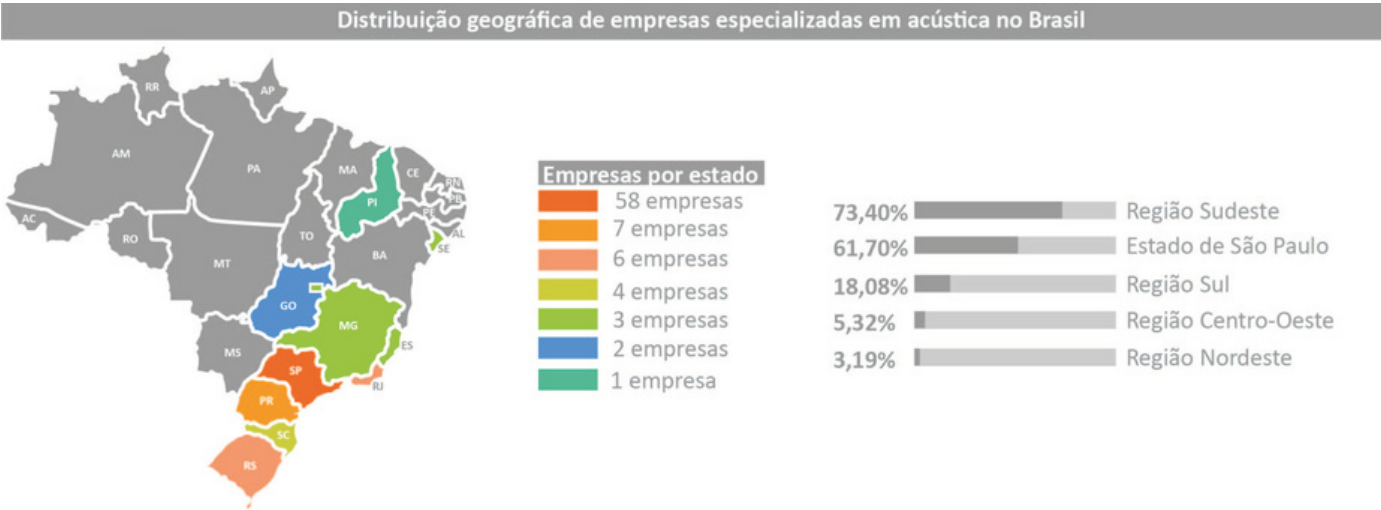


Figura 2: Diagrama de distribuição geográfica de empresas especializadas em acústica no território brasileiro
Fonte: Proacústica (2025) e elaboração própria

Por se tratar de um país com dimensões continentais, o Brasil apresenta desafios em relação ao acesso a produtos e serviços em diversas regiões. A figura 3 ilustra o cenário da distribuição geográfica das empresas especializadas em acústica no país através de consultorias, laudos, distribuição de produtos e execução com base no banco de dados de associados da Associação Brasileira para a Qualidade da Acústica – Proacústica.

A maior concentração de empresas do setor se dá na região sudeste, com maior presença no Estado de São Paulo. As regiões Centro-Oeste e Nordeste apresentam um quantitativo pouco expressivo de agentes do setor e na região norte do país não houve registro. Das 94 empresas registradas, em torno de 31,9% são dedicadas a comercialização e distribuição de materiais com propriedades acústicas, sendo que com exceção de iniciativas no Distrito Federal, quase todas elas são sediadas na região sudeste e sul do país.

Para além das questões de acesso às soluções de absorção sonora, a pesquisa e desenvolvimento de materiais tem um compromisso com as questões ambientais e econômicas. Os materiais oriundos de matéria-prima renovável ganham protagonismo nesse contexto. Na acústica, painéis aglomerados de madeira e cimento de média densidade têm propriedades de absorção sonora reconhecidas e aplicação em grande escala no mercado do setor de condicionamento acústico de recintos. A figura 3 ilustra o painel de fibra de madeira e cimento como revestimento acústico, a fibra de madeira utilizada em sua fabricação e um exemplo de aplicação desse material como revestimento acústico.



Figura 2: Painéis de fibra de madeira e cimento
Fonte: Baux (2025) e elaboração própria

INTRODUÇÃO



Figura 3: Diagrama da cadeia de valor do bambu
Fonte: Elaboração própria

O bambu é uma gramínea amplamente presente no território nacional, de cultivo perene e rápido crescimento. O quadro 3 apresenta de forma resumida as aplicações que o bambu pode ter em vários setores importantes da economia desde a fase do cultivo através do sequestro de CO₂ e controle de erosões. Após as fases de processamento, a produção de madeira laminada colada e painéis aglomerados de partículas são de grande valia para a construção civil. São inúmeras as aplicações da planta, o que implica que a sua adoção pode fomentar uma complexa cadeia produtiva.

INTRODUÇÃO

O cimento é um aglomerante hidráulico e um dos materiais mais consumidos no mundo. Em relação a produção de painéis aglomerados, apresenta vantagens como menor gasto energético na produção e cura dos painéis devido a prensagem a frio, etapa com maior emissão de CO₂, alternativa para a emissão de formaldeído e atuação como proteção das partículas contra ataques xilófagos.

Ao se tratar de compósitos de madeira e cimento, há evidências de que o biocompósito de bambu e cimento se configura como um material que não gera passivos ambientais em relação ao clima. Araújo et al (2025) conduziu uma avaliação de bioconcretos com adição de biomassa. Em adições de 50% do volume da mistura, o bioconcreto feito de biomassa de eucalipto obteve uma pegada de carbono de -109 kg CO₂-eq./m³. O compósito o produzido a partir do bambu gerou um impacto negativo ainda maior, de -113 kg CO₂-eq./m³.

Ressalta-se que assim como bambu, o cimento é um material que serve como base para a indústria da construção civil brasileira devido a suas diversas aplicações desde fundações, estruturas, elementos de vedação, elementos de cobertura, revestimentos, pisos entre outros.

Os painéis de bambu e cimento foram desenvolvidos na tese de doutorado e obtiveram boa performance com baixa exigência tecnológica de produção. As variáveis de produção são a granulometria, a densidade e o percentual de cimento. Os conceitos são apresentados na figura 4



Figura 4: Variáveis da produção dos painéis acústicos de bambu e cimento
Fonte: Elaboração própria

Colheita e beneficiamento

Obtenção da
matéria-prima

01

Identificação da
espécie
*Bambusa vulgaris var
vitatta*



02

Extração dos colmos



03

Corte dos colmos
para que possam ser
triturados



04

Trituramento dos
colmos



Tratamento e classificação

Preparação das
partículas de
bambu

01

Imersão das
partículas em
solução aquosa com
NaOH a 1%



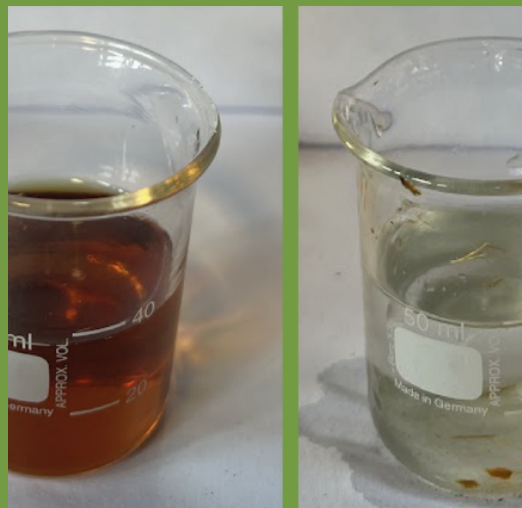
02

Período de ação do
tratamento 24h



03

Lavagem das
partículas



04

Secagem das
partículas



Produção dos painéis

Produção dos painéis

01

Aplicar a água nas partículas de bambu



02

Polvilhar o cimento sobre as partículas umidas



03

Misturar até que as partículas estejam enluvadas pelo cimento



04

Aplicar na forma espalhando e deixando o composto uniforme e prensar



Coefficiente de absorção de todas as amostras

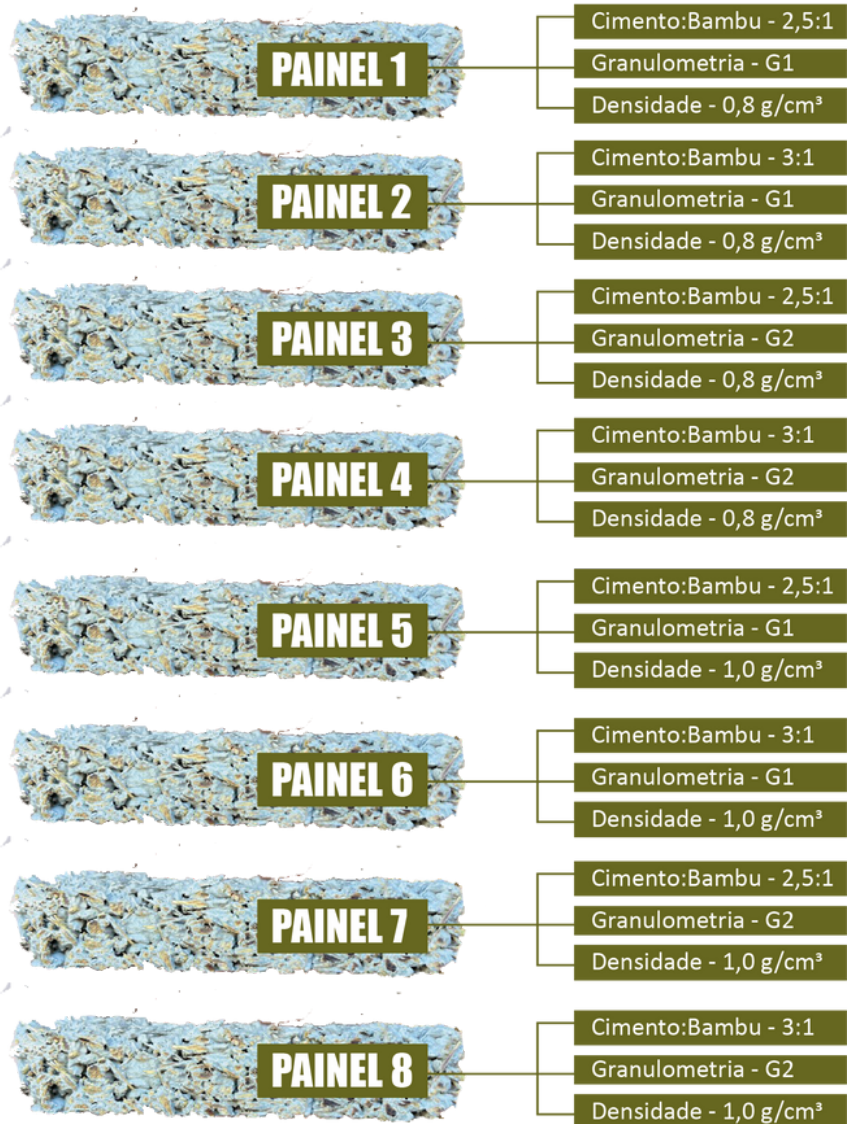
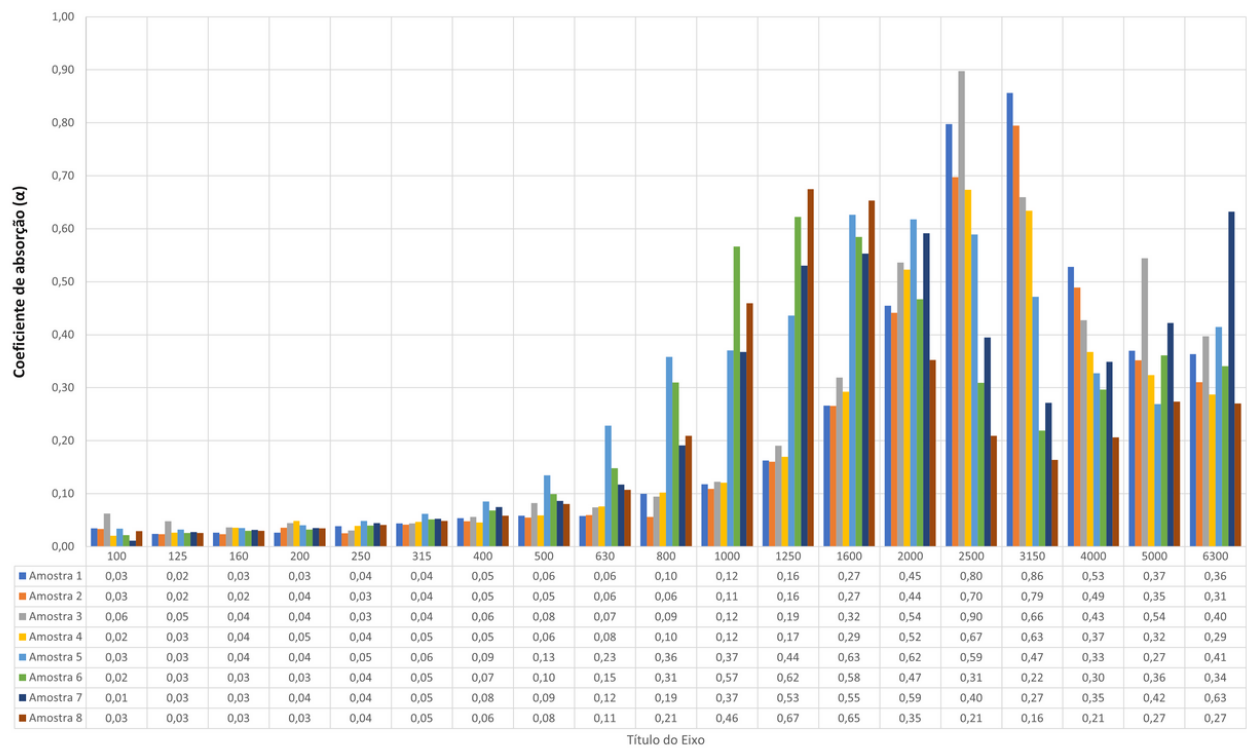


Figura 5: Coeficiente de absorção sonora painéis de bambu e concreto

Fonte: Elaboração própria

Figura 6: Composição dos painéis de bambu

Fonte: Elaboração própria

INSTITUIÇÕES



UnB



Laboratório de Realização do
Ambiente Construído
Universidade de Brasília



INSTITUIÇÕES PARCEIRAS



Universidade
Estadual de Goiás



nupmat
ARQ.URB | UEG
Núcleo de Pesquisa em Materiais
Sustentáveis e Fibras Naturais

