

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE MÁRMORE SINTÉTICO
ATRAVÉS DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

RICARDO FOUAD RABAHI

ORIENTADOR: FLAMINIO LEVY NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM DM - 149A/2010

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE MÁRMORE SINTÉTICO
ATRAVÉS DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

RICARDO FOUAD RABAHI

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

**Prof. Flaminio Levy Neto, PhD, (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Jorge Luiz da Almeida Ferreira, Dr, (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima, (FGA - UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 24 DE MAIO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

RABAHI, RICARDO FOUAD

Análise da resistência de vigas de mármore sintético através da distribuição estatística de Weibull. [Distrito Federal] 2010.

x, 210 x, 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2010).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Mármore sintético

2. Ensaio de Tração

3. Estatística de Weibull

4. Carga Mineral

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RABAHI, R. F. (2010). Análise da resistência de vigas de mármore sintético através da distribuição estatística de Weibull. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM_DM-149A/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 55p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ricardo Fouad Rabahi

TÍTULO: Análise da resistência de vigas de mármore sintético através da distribuição estatística de Weibull.

GRAU: Mestre

ANO: 2010

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

Ricardo Fouad Rabahi
Rua 227-A nº 246, Ap. 402, Setor Universitário.
74.610-155 Goiânia – GO – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus que iluminou meu caminho e me deu forças para buscar meus objetivos;

À minha esposa que sempre foi minha incentivadora na conclusão do meu Mestrado;

Aos meus filhos, que dividiram o pouco tempo que passamos juntos com as minhas Atividades de mestrando.

Ao professor Flaminio Levy Neto, da UnB, pela atenção e presteza no acompanhamento desta orientação;

Agradeço ao Programa de Pós Graduação de Ciências Mecânicas, PCMEC, da Universidade de Brasília pela oportunidade oferecida na realização deste Mestrado, e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho;

Aos colegas de mestrado Jair Dinoah de Araújo Júnior e Mário César Oliveira Vieira que não mediram esforços para permanecermos juntos do início ao fim dessa caminhada;

Ao colega Thiago Macedo que auxiliou no processo de execução dos ensaios.

Dedico este trabalho a meu pai, Fouad Zakhour Rabahi e Minha Mãe Salem Abboud Rabahi, que sempre me foram exemplo de luta e perseverança.

RESUMO

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE MÁRMORE SINTÉTICO
ATRAVÉS DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

Autor: Ricardo Fouad Rabahi

Orientador: Flamínio Levy Neto

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, Maio de 2010

No presente trabalho foi abordada a análise estatística de Weibull como ferramenta de avaliação da resistência mecânica à flexão tanto do mármore sintético puro quanto do mármore sintético reforçado com fibra vidro. Um dos objetivos do trabalho é observar o comportamento do módulo de Weibull e da resistência mecânica, à medida que se introduz fibra de vidro picotada na composição do mármore sintético. Sua influência na resistência mecânica será investigada e levar-se-á em consideração os ganhos ou perdas. Para isso foram avaliados quatro teores, em massa, de acréscimo de fibra de vidro, para estabelecer uma curva padrão que exponha o comportamento mecânico, a medida em que se altera o teor de fibra do compósito. A metodologia de Weibull viabiliza esta análise, uma vez que, além dos corpos de prova possuírem grande semelhança dimensional de espessura com os produtos fabricados em mármore sintético, eles estão sujeitos à ocorrência de imperfeições devido ao processo de fabricação. A inserção de fibra de vidro na massa de mármore sintético, em proporções de 12,5 a 100 gramas, provoca uma diminuição no módulo de Weibull, de até 25%; e, dependendo da quantidade de fibra inserida, a resistência intrínseca pode aumentar ou diminuir, atingindo o valor mínimo com 25 gramas. O tempo de desmoldagem, também influencia fortemente o módulo de Weibull.

Palavras – chave: Mármore Sintético, Fibra de Vidro, Estatística de Weibull.

ABSTRACT

**ANALYSIS OF STRENGTH OF BEAMS OF CULTURED MARBLE
THROUGH DISTRIBUTION OF WEIBULL STATISTICS**

Autor: Ricardo Fouad Rabahi

Supervisor: Flaminio Levy Neto

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, May, 2010

The present study adopted the Weibull statistical analysis as a tool for evaluating the flexural strength of both the cultured marble pure as the cultured marble reinforced fiberglass. One of the objectives of this study is to observe the behavior of the module Weibull and strength, as it introduces fiberglass perforated in the composition of cultured marble. Its influence on the mechanical strength will be investigated and lead it to consider gains or losses. To this end four levels were evaluated by weight increase of fiberglass to establish a standard curve that exposes the mechanical behavior, the extent to which changes the fiber content of the composite. The Weibull method enables the analysis, since, besides the specimens own a great similarity dimensional thick with products manufactured in cultured marble, they are subject to the occurrence of imperfections due to manufacturing process. The inclusion of fiberglass into the body of cultured marble, in proportions from 12.5 to 100 grams, causes a decrease in the Weibull module up to 25% and depending on the quantity fiber inserted intrinsic resistance can increase or decrease, reaching the minimum value of 25 grams. The demolding time, also strongly influences the Weibull module.

Keywords : Cutured Marble, Fiberglass, Weibull Statistics.

SUMÁRIO

1 –INTRODUÇÃO	1
2 –MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 –MATERIAIS E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	5
2.1.1 –Considerações Gerais	5
2.1.2 –Cdps com Cura Fora dos Moldes após 2 horas	8
2.1.3 –Cdps Desmoldados Após 24 Horas	8
2.2 –METODOLOGIA DE ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA	9
2.2.1 –Considerações Gerais	9
2.2.2 –Método de Ensaio de Flexão em Três Pontos	9
2.3 –ESTATÍSTICA DE WEIBULL	12
2.4 –EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	19
3 –RESULTADOS OBTIDOS	21
3.1 –CONSIDERAÇÕES GERAIS	21
3.2 –TABELAS DE RESULTADOS E DIAGRAMAS DE WEIBULL..	23
3.3 –PRIMEIRO GRUPO DE ENSAIOS EM 2008, DESMOLDAGEM DUAS HORAS APÓS A MOLDAGEM	29
3.4 –SEGUNDO GRUPO DE ENSAIOS REALIZADO EM 2009 COM DESMOLDAGEM 24 HORAS APÓS A MOLDAGEM	30
3.5 – COMPARANDO OS RESULTADOS “A”, “B” e “C” com “D”, “E” e “F”.....	30
4 –ANÁLISE DOS RESULTADOS, COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES ..	37
5 –CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
5.1 –CONCLUSÕES	40
5.2 –SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
BIBLIOGRAFIA	42

ANEXOS	44
Anexo A - Boletim Técnico Commodities.....	44
Anexo B - Dados dos Corpos de Prova	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Tabela de probabilidade genérica para um grupo de 27 amostras.....	17
Tabela 3.1	Resultados de tensões máximas dos corpos de prova.....	24
Tabela 3.2	Resultados do Módulo de Elasticidade dos corpos de prova.....	25
Tabela 3.3	Resultados de Resistências Intrínsecas e Módulos de Weibull.....	30
Tabela 3.4	Resultados de Resistências Intrínsecas em ordem crescente de acréscimo de Fibra de Vidro.....	33
Tabela 3.5	Resultados Probabilidades de Sobrevivência dos corpos de prova.....	35
Tabela 7.1	Dimensões dos corpos de prova grupo "A".....	46
Tabela 7.2	Dimensões dos corpos de prova grupo "B".....	47
Tabela 7.3	Dimensões dos corpos de prova grupo "C".....	48
Tabela 7.4	Dimensões dos corpos de prova grupo "D".....	49
Tabela 7.5	Dimensões dos corpos de prova grupo "E".....	50
Tabela 7.6	Dimensões dos corpos de prova grupo "F".....	51
Tabela 7.7	Tabela de dados obtidos grupo "A".....	52
Tabela 7.8	Tabela de dados obtidos grupo "B".....	55
Tabela 7.9	Tabela de dados obtidos grupo "C".....	54
Tabela 7.10	Tabela de dados obtidos grupo "D".....	55
Tabela 7.11	Tabela de dados obtidos grupo "E".....	56
Tabela 7.12	Tabela de dados obtidos grupo "F".....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Massa de mármore sintético acrescida de fibra de vidro antes da mistura..	6
Figura 2.2	Massa de mármore sintético após mistura com fibra de vidro.....	7
Figura 2.3	Moldagem da massa de mármore sintético com fibra de vidro.....	7
Figura 2.4	Ensaio de flexão em três pontos.....	10
Figura 2.5	Distribuição de Weibull de amostras que fraturam sob tensão aplicada material dútil e material frágil.....	13
Figura 2.6	Exemplo de gráfico de $\ln \sigma \times \ln(\ln(1/(1-F(V))))$	18
Figura 2.7	Ensaio de flexão de três pontos.....	19
Figura 3.1	Gráfico Força x Deflexão amostra D - 03.....	22
Figura 3.2	Gráfico Força x Deflexão amostra C - 24.....	22
Figura 3.3	Plotagem de dados Grupo “D” de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	26
Figura 3.4	Plotagem de dados Grupo “D” de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	26
Figura 3.5	Plotagem de dados Grupo “D” de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	27
Figura 3.6	Plotagem de dados Grupo “D” de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	27
Figura 3.7	Plotagem de dados Grupo “E” de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	28
Figura 3.8	Plotagem de dados Grupo “F” de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	28
Figura 3.9	Plotagem de dados Composição x Módulo de Weibull.....	31
Figura 3.10	Plotagem de dados Composição x Resistência intrínseca.....	32
Figura 3.11	Comportamento da Resistência Intrínseca X Quant. de Fibra de Vidro.....	33
Figura 3.12	Diagrama da Influência de Diferentes Frações Volumétricas de Fibras.....	34
Figura 3.13	Diagrama das Probabilidades de Sobrevivência $P(V_0) \times$ Tensão Aplicada σ (MPa) dos grupos de “A” a “F”	36

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

- σ - tensão aplicada
- σ_u - tensão na qual a probabilidade de falha é nula
- σ_o - resistência característica ou resistência intrínseca
- V_0 - volume constante dos corpos de prova
- PS (V_0) - probabilidade de sobrevivência de um volume V_0
- F(V_0) - probabilidade de falha de um volume V_0
- E - É o módulo de elasticidade em flexão
- m - módulo de Weibull
- f - deslocamento vertical ou flecha ou deflexão
- t - É a espessura da sessão transversal no ponto de aplicação da força P
- y - É a metade da altura da secção transversal do CP ($t/2$)
- b - É a largura da sessão transversal no ponto de aplicação da força P
- L - Distância entre apoios inferiores do suporte de ensaio
- C - Comprimento dos CDPs
- CDPs - Corpos de prova
- I - É o momento de inércia de área da secção transversal do CP ($b.t^3/12$)

1 - INTRODUÇÃO

O Mármore Sintético está longe de ser uma novidade no mercado, sendo sua aplicação mais usual em pias, tanques e lavatórios na indústria da construção civil, com grande flexibilidade de tamanhos e formas, característica de seu processo de moldagem. Em função do aumento da competitividade este tem se tornado um produto cada vez mais fino e leve e com as mais variadas dimensões. Sem uma normatização específica no Brasil, as empresas têm buscado, através do apelo do baixo custo, encontrar soluções para se manterem competitivas no mercado, seja buscando novas formas ou novas composições. Existem hoje no mercado de Mármore Sintético dois tipos principais de produto, o puro e o reforçado com fibra de vidro. Neste último, a fibra de vidro é adicionada posteriormente ao processo de moldagem, com adição de uma camada de fibra picotada, juntamente com resina pura na região inferior, menos visível e supostamente mais tracionada.

Dentre as inúmeras aplicações do mármore sintético destaca-se uma aplicação importante, em hospitais e centro cirúrgicos, onde os lavatórios e bancadas não podem conter emendas ou cantos, sendo a assepsia prejudicada, e o Mármore Sintético com sua facilidade de modelagem atende de maneira eficiente a essa exigência.

No presente trabalho, objetiva-se avaliar o comportamento das propriedades mecânicas, com acréscimo de fibra de Vidro na massa de Mármore Sintético, em um só processo de moldagem, sem a necessidade de um processamento posterior, qual seja a adição de camada externa de resina com fibra de vidro.

Para se avaliar a resistência mecânica do Mármore Sintético com segurança, é necessário empregar uma abordagem estatística compatível. A ocorrência de descontinuidades é um fator de grande influência nas propriedades mecânicas de materiais compósitos frágeis, e esta influência ocorre de acordo com o tamanho, forma, disposição e da quantidade destas descontinuidades. No mármore sintético, que tem em seu processo produtivo a mistura de sua massa, provocando a formação de bolhas, faz-se necessário que a sua moldagem ocorra em

mesas vibratórias, para eliminar boa parte desses vazios e facilitar o escoamento da massa pelo molde, que pode ser fechado ou aberto. Mesmo após este processo vibratório, observa-se ainda grande formação de bolhas tanto microscópicas quanto macroscópicas. A resistência mecânica do mármore sintético é fortemente influenciada pela probabilidade de se encontrar essas descontinuidades. Em materiais metálicos ou poliméricos, que apresentam grande deformação plástica, o comprometimento de sua resistência mecânica é comparativamente menor em relação aos materiais frágeis. *Nos materiais tipicamente dúcteis, a dispersão estatística da resistência mecânica é relativamente pequena e obedece a uma distribuição Gaussiana* (Askeland, 2008). Por outro lado, a resistência mecânica de materiais frágeis, como o mármore sintético, apresenta grandes variações de resultados em corpos de prova idênticos e de mesma composição, mas com teores de descontinuidades diferentes, em função de seu processo produtivo. Assim, pode-se sugerir que a avaliação utilizada para análise de confiabilidade do mármore sintético seja a distribuição estatística de Weibull, já que se trata de um estudo que modela bem a dispersão da resistência de materiais frágeis, resultante da aleatoriedade dos tamanhos, formas, disposição e quantidades destas descontinuidades.

A estatística de Weibull vem sendo utilizada, de forma bem sucedida, na análise de materiais tipicamente frágeis, como os cerâmicos (Si_3N_4 , SiC , Al_2O_3) e os compósitos (fibra de vidro, fibra de carbono, mármore sintético, etc.). Um aprofundamento sobre esta abordagem estatística, que permite que se quantifique a repetibilidade da resistência mecânica dos materiais, através do módulo de Weibull (m), pode ser encontrado na literatura científica especializada (Burgman, 1984; Wilks, 1942; Green, 1998). Pode se encontrar também trabalhos que busquem a simplificação da utilização do método estatístico de Weibull através da criação de softwares específicos para obtenção dos resultados (Monteiro, 2001)

Em alguns estudos pode-se comparar a análise de dados através de métodos estatísticos diferentes, como no trabalho realizado por Lu et al, (2002). O trabalho mostra uma comparação entre a distribuição Normal e a análise de Weibull em diferentes tipos de materiais frágeis, qual sejam, (Si_3N_4 , SiC e ZnO), quando confrontadas com resultados experimentais. Sendo que, segundo o critério de informação Akaike (critério proposto por Akaike, H. em 1969 para comparar análises estatísticas entre si), na análise do Si_3N_4 a

distribuição de Weibull obteve um resultado mais satisfatório, já o SiC, teve resultados semelhantes em ambas análises, sendo o ZnO melhor analisado pela distribuição Normal.

A análise de Weibull também é amplamente utilizada em ensaios destrutivos de reforços para materiais compósitos, principalmente as fibras de vidro ou de carbono, como pode-se observar no trabalho “Statistical fracture of E-glass fibres using a bundle tensile test and acoustic emission monitoring” (Mili. et al, 2008). Este estudo experimental e estatístico analisa a variação das propriedades mecânicas de feixes de 2000 filamentos de fibra de vidro-E, utilizando alguns tipos de lubrificantes entre as fibras, submetidas a ensaio de tração. Através de emissões acústicas ocorridos durante o processo de tração dos feixes de fibra de vidro, é possível analisar as falhas individuais de cada filamento, registrando a tensão no momento da falha, traçando assim curva de sobrevivência para cada tipo de lubrificante utilizado, e comprovando o bom desempenho da análise de Weibull neste tipo de estudo.

No presente trabalho, foram realizados cerca de 150 ensaios destrutivos de flexão em três pontos em vigas de mármore sintético, com e sem a adição de fibras curtas de vidro-E, com a finalidade de se estudar o comportamento mecânico e obter tanto os módulos de elasticidade efetivos em flexão, bem como as cargas de ruptura das vigas, com diferentes teores de reforço fibroso. Sendo os objetivos específicos referentes à obtenção dos seguintes parâmetros dos mármores sintéticos testados: (i) módulo de elasticidade efetivo à flexão; (ii) tensão normal máxima de ruptura devido à flexão; (iii) módulo de Weibull; e (iv) resistência intrínseca destes materiais.

No capítulo 2 serão apresentados as especificações técnicas e características dos materiais utilizados, bem como os métodos de confecção dos CDPs e suas analogias com o processo de produção industrial, será apresentado ainda o método de ensaio dos CDPs baseado na norma ASTM D-790-90 de flexão de materiais compósitos.

A coleta de dados e tratamento destes dados, através de métodos estatísticos, será o objetivo do capítulo três, obtendo as informações necessárias para a avaliação do estudo proposto, sendo levantada tabelas e gráficos importantes para a análise dos resultados.

Na análise dos resultados será comentado sobre a variação do módulo de weibull com as alterações de composição dos CDPs, bem como a influência do processo de fabricação, no resultado final.

Ao concluir o trabalho pode-se constatar um comportamento da resistência intrínseca de um compósito quanto ao acréscimo de fibra de vidro, já observado por Vinson and Chou (1975) no livro “Composite materials and their use in structures”, onde é analisado o acréscimo de fibras unidirecionais em matriz polimérica e sua influência na tensão de ruptura de tal compósito, dentre outros aspectos de relevância do processo de fabricação do mármore sintético.

2. - MATERIAIS E MÉTODOS.

2.1 – MATERIAIS E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

2.1.1 – Considerações Gerais

Os materiais empregados neste trabalho consistem basicamente de mármore sintético puro e composto com fibra de vidro, em teores variados. Sendo que o mármore sintético é composto de resina poliéster insaturada ARAZYN 3.7 (nome comercial), carga mineral de carbonato de cálcio (CaCO_3) e outros aditivos. A resina poliéster pura possui uma tensão de ruptura média, em ensaio de flexão, em torno de 82 MPa (anexo 7.1). Ao se adicionar o carbonato de cálcio, com a intenção de aumentar volume e diminuir custo, na proporção de 25% de resina poliéster e 75% de carbonato de cálcio, por peso, obtendo-se o mármore sintético, a tensão de ruptura em flexão, varia entre 20 e 35 MPa (Rabahi, R.F.et.al. 2008). É de certa forma previsível que haja uma considerável perda de resistência na tensão de ruptura, uma vez que ocorre uma interferência de carga mineral com a diluição das cadeias poliméricas. Em contrapartida, há um ganho de área e conseqüentemente no momento de inércia de área na secção transversal, a um incremento no custo muito baixo (carbonato de cálcio).

A fibra de vidro-E é um componente usual dos materiais compósitos poliméricos que proporciona, através do ancoramento de seus fios, em princípio, melhores propriedades mecânicas aos compósitos. Neste trabalho, a fibra acrescida no composto é do tipo roving picotado por picotadeira pneumática, com comprimento médio de 50 mm, e de aproximadamente 4000 fios por mexa.

O desmoldante utilizado para facilitar o destaque do cdps foi o desmoldante PVA (álcool polivinílico) a base d'água, que após sua aplicação forma um filme plástico que impede o contato da massa moldada com o molde, evitando aderências. No processo produtivo industrial o desmoldadente PVA tem grande influência na qualidade final da superfície moldada.

Com o propósito de se avaliar a influência do tempo de desmoldagem nos materiais analisados que seguem diferentes rotinas na fabricação: (i) tanto a dos processos industriais típicos de produção, com desmoldagem no tempo mínimo; bem como (ii) a dos cuidadosamente manufaturados, para fins de pesquisa científica, com desmoldagem após 24 horas. Foram elaborados dois lotes principais de corpos de prova (CDPs), com três tipos de materiais cada. Os corpos de prova das duas etapas foram confeccionados nas dependências da empresa FOZARA – Ind. e Com. de Mármore Sintético LTDA, seguindo os mesmos parâmetros básicos de fabricação, porém em diferentes datas.

Em cada etapa, as três massas de mármore sintético provêm de uma única batelada excluindo, portanto, qualquer diferença de composição, a não ser pela diferença no teor de fibra de vidro, que é objetivo deste trabalho. As figuras 2.1 e 2.2 mostram a massa de mármore sintético acrescido de fibra de vidro (12,5 g), antes da mistura e após a mistura para homogeneização da massa.



Figura 2.1- Massa de mármore sintético acrescida de fibra de vidro, antes da mistura.



Figura 2.2 Massa de mármore sintético, após mistura com fibra de vidro.

As amostras foram fundidas em moldes de fibra de vidro, especialmente confeccionados para este fim, na forma de cinco barras, com as seguintes dimensões de 8 mm x 40 mm x 1000 mm conforme mostra a figura 2.3, posteriormente colocadas em uma mesa vibratória por 12 minutos, objetivando melhor compactação e para mitigar a formação de bolhas.



Figura 2.3 - Moldagem da massa de mármore sintético com fibra de vidro

Existiu, porém, uma diferença básica entre os processos de confecção dos CDPs. No primeiro processamento, em 2008 (grupos de amostras A, B e C), seguiu-se o padrão normal de desmoldagem do processo produtivo industrial, que ocorre duas horas após a moldagem, posteriormente deixado um tempo de cura por 24 horas em grades de descanso. Já o segundo, que foi confeccionado em 2009 (grupos de amostras D, E e F), a cura de 24 horas ocorreu com os CDPs dentro dos moldes, não havendo nenhuma movimentação até sua cura final.

2.1.2 – CDPs com cura fora dos moldes desmoldados após 2 horas.

No processo de desmoldagem com 2 horas após a moldagem, os CDPs possuem 1000 mm de comprimento por 40 mm de largura, sendo, portanto peças esbeltas de pouca rigidez, antes da cura de 24 horas. Esse processo é normalmente utilizado no processo produtivo comum para proporcionar maior utilização dos moldes no mesmo dia, em pias, tanques, lavatórios e outros produtos em mármore sintético. Normalmente são peças de maiores espessuras nas bordas, que proporcionam maior rigidez, como também em muitos casos, possuem cubas que enrijecem a estrutura, não tendo portanto a mesma esbeltez dos corpos de prova analisados. As composições deste primeiro lote foram:

Grupo A – 3,0 Kg de mármore sintético puro (i.e. sem fibras);

Grupo B – 3,0 Kg de mármore sintético com 50 g de fibra de vidro; e

Grupo C – 3,0 Kg de mármore sintético com 100 g de fibra de vidro.

2.1.3 – CDPs desmoldados após 24 horas

Ao término da moldagem e vibração das peças, os CDPs deste segundo lote permanecem nos moldes por 24 horas até que já estejam com a cura completa tendo assim uma maior rigidez, como também uma maior facilidade de desmoldagem, provavelmente também, devido à maior contração da massa no interior do molde fêmea. As composições neste lote foram:

Grupo D – 3,0 Kg de mármore sintético puro (i.e. sem fibras);

Grupo E – 3,0 Kg de mármore sintético com 12,5 g de fibra de vidro; e

Grupo F – 3,0 Kg de mármore sintético com 25 g de fibra de vidro.

2.2 – METODOLOGIA DE ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA

2.2.1 – Considerações Gerais

Os seis grupos de amostras, com no mínimo 25 CDPs por composição, foram ensaiados em duas etapas, baseado na norma ASTM D-790-90 de flexão de materiais compósitos, utilizando a máquina universal de ensaios MTS 810 com a supervisão do Prof. Flaminio Levy Neto. Na primeira etapa, realizada no segundo semestre de 2008, divididos em três grupos de trabalho A, B e C. A segunda etapa, realizada no primeiro semestre de 2009, para os grupos D, E, e F, tiveram a execução dos ensaios auxiliada pelo monitor e formando de graduação em Engenharia Mecânica (UNB), o qual já havia atuado como monitor e executado ensaios na MTS 810, na primeira etapa.

Os monitores acima citados já haviam utilizado extensivamente a MTS 810, em seus projetos de graduação na área de fadiga de materiais frágeis (dentes humanos e bovinos), nos dois semestres que antecederam os ensaios do primeiro lote. Eram monitores da disciplina Materiais de construção Mecânica 2, que inclui em sua ementa materiais poliméricos, cerâmicos e compósitos, bem como Estatística de Weibull. Assim, tanto os monitores, como os alunos que os auxiliaram, tinham pleno domínio dos equipamentos usados nos ensaios e dos assuntos relativos aos materiais testados.

Ao término da confecção das amostras obteve-se 25 amostras para os grupos A, B, e C e 27 amostras para os grupos D, E e F, todos eles em média com as seguintes dimensões nominais: 8 mm x 40 mm x 140 mm. Porém adicionalmente, as amostras foram medidas com paquímetro e pesadas com balança de precisão. Estes resultados encontram-se nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 no anexo 7.2

2.2.2 – Método De Ensaio - Ensaio de Flexão em Três Pontos

O método de ensaio escolhido para determinação das propriedades mecânicas foi ensaio de flexão em três pontos, baseado na norma ASTM D-790-90 de flexão de materiais compósitos

(Figura 2.4). Esse método de ensaio é o método indicado pela simplicidade da confecção dos corpos de prova (CP), pela maior dificuldade de se executar ensaios de tração em materiais frágeis, devido ao possível deslizamento do CP nas garras da máquina de ensaio e por melhor representar a condição real de fratura (em campo).

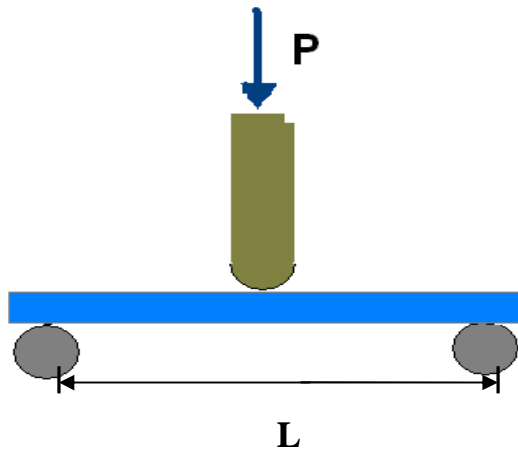


Figura 2.4 – Ensaio de Flexão em três pontos

Ao se promover uma flexão aplicando uma força P no centro do CP, conforme ilustrado na Figura 2.4, provoca-se, além da compressão na região superior, uma tensão de tração, que surge a partir do ponto central e tendo maior valor na superfície inferior da amostra, onde terá início a fratura do CP.

Basicamente, os valores fornecidos pelo equipamento durante o ensaio são: a carga aplicada (P); o deslocamento vertical ou deflexão (f) e o tempo em segundos.

Para o cálculo do módulo de elasticidade, estes foram obtidos inserindo uma coluna na planilha eletrônica com a formulação abaixo, isolando-se o valor de 'E' (Nash, 1992).

$$f = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (2.1)$$

Onde:

- f é o valor da deflexão, no ponto de aplicação da carga;
- P é a carga aplicada;
- $L = 114 \text{ mm}$ é o comprimento entre os apoios (Vão);

- E é o módulo de elasticidade em flexão; e
- I é o momento de inércia de área da secção transversal do CP ($b.t^3/12$)

Para o cálculo das tensões máximas de ruptura, estas foram processadas pela planilha com a formulação que segue (Nash 1992):

$$\sigma = \frac{M_f \cdot y}{I} \quad (2.2)$$

Onde:

- σ é a tensão normal máxima devido à flexão;
- M_f é o momento fletor $(P/2) * (L/2)$;
- $y = t/2$ é a metade da altura da secção transversal do CP;
- I é o momento de inércia de área da secção transversal do CP.

Pode-se ainda, da formula 2.1 obter-se a seguinte expressão para cálculo do módulo de elasticidade em flexão efetivo em flexão (Nash, 1992):

$$E = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad (2.3)$$

A resistência de flexão (ou módulo de ruptura em flexão, σ_{max}), dado pela equação (2.4), descreve a resistência do material. Os resultados do teste de flexão incluem a força (P) e a deflexão (f), e não a deformação (a deflexão tem unidade de comprimento). Observando que materiais dúcteis sofrem um dobramento e materiais frágeis fraturam mesmo com pequenas curvaturas.

Para obtenção da máxima tensão normal devido à flexão utilizou-se a Eq. 2.4:

$$\sigma_{max} = \frac{M_f \cdot \frac{t}{2}}{\frac{b \cdot t^3}{12}} = \frac{\frac{PL}{4} \cdot \frac{t}{2}}{\frac{b \cdot t^3}{12}} = \frac{3}{2} \frac{PL}{b \cdot t^2} \quad (2.4)$$

Onde:

- P é a carga aplicada;
- $L = 114$ mm é o comprimento ou vão entre os apoios;
- b é a largura da sessão transversal no ponto de aplicação da força P ;
- t é a espessura da sessão transversal no ponto de aplicação da força P .

Em todos os ensaios destrutivos realizados, a velocidade da deflexão foi controlada e mantida no valor de 2 mm/min. A MTS-810 possui um sistema de aquisição de dados que registrou a força aplicada (P), a deflexão (f) e o tempo (t).

2.3 – ESTATÍSTICA DE WEIBULL

Em função da grande variação dos resultados nas fraturas frágeis, torna-se imprescindível que os dados fornecidos pelo ensaio de flexão em três pontos tenham um tratamento estatístico adequado. A análise proposta é a Análise de Weibull, pois ela descreve a fração das amostras que fraturam em diferentes tensões aplicadas. À medida que aumenta o teor de falhas e defeitos nos corpos de prova, diminui-se a tensão de ruptura, ficando caracterizada a analogia de que as correntes nunca são mais resistentes do que seu elo mais fraco, rompendo-se neste ponto. Assim, ao estender este conceito para os materiais frágeis, Weibull representou os elos por pequenos volumes da peça, sendo, o elo mais fraco, equivalente à região que contém a falha crítica. Weibull propôs também uma função empírica de distribuição de probabilidade de falhas e obteve a expressão para a probabilidade de fratura acumulada, conhecida como Distribuição de Weibull.

A distribuição de Weibull trabalha com a probabilidade do material após a aplicação de uma determinada tensão resistir ou não, mesmo que esta tensão esteja abaixo da média do limite de resistência estática convencional do material. Isto é, o rompimento do material se dará pela ocorrência de falhas em seu processo produtivo e a distribuição de Weibull quantifica esta probabilidade. Pode-se observar na fig. 2.5, a diferença de comportamento de um material dúctil e outro material frágil, na dispersão dos resultados, sendo o material dúctil de resultados menos dispersos.

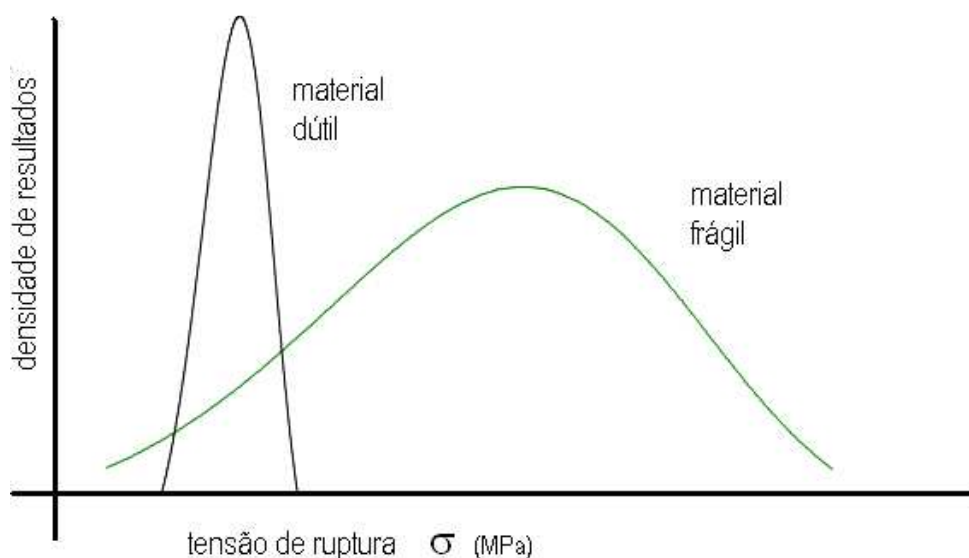


Figura 2.5 - Distribuição de Weibull de amostras que fraturam sob tensão aplicada - material dúctil e material frágil, (Askeland, 2008).

Para analisar um corpo de prova de volume V , que poderá apresentar uma variação de falhas e descontinuidades, estando ele submetido a uma tensão σ , pode-se subdividir em n partes de volume V_0 onde cada parte tem a mesma distribuição de defeitos. Assim, segundo Askeland “pode-se mostrar que a probabilidade de sobrevivência dos corpos de prova $P(V_0)$, ou seja, a probabilidade de um material frágil não frature sob a tensão aplicada σ é dada por:

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o} \right)^m \right] \quad (2.5)$$

A probabilidade de falha $F(V_0)$, que é complemento da probabilidade de sobrevivência, pode ser expressa da seguinte forma” (Askeland, 2008):

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o} \right)^m \right] \quad (2.6)$$

A partir das equações 2.5 e 2.6, onde σ é a tensão aplicada, σ_0 a resistência intrínseca que correspondente a probabilidade de sobrevivência de 37% ou ainda $P(V_0)=0,37$, e σ_u é a tensão onde a probabilidade de falha é nula, ou ainda, a probabilidade de sobrevivência é 1,0. O módulo de Weibull m pode variar de 0 a ∞ e representa a repetibilidade da resistência mecânica do material, esses valores estão diretamente ligados às características do material analisado como, homogeneidade, quantidade de defeitos como bolhas, impurezas ou descontinuidades, entre outros. O módulo de Weibull m tem valores próximos a 3 para cerâmicas (materiais frágeis) e próximo a 100 para metais e ligas. Alguns materiais cerâmicos especiais podem alcançar um módulo m entre 5 e 10.

Para materiais frágeis onde existe uma variação considerável nos valores correspondentes às tensões de ruptura, adota-se como valor seguro, quando não haverá falha no material testado, a tensão de ruptura onde a probabilidade de falha é nula, σ_u , igual a 0, assim para esses materiais pode-se reescrever as equações 2.5 e 2.6, da seguinte forma :

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2.7)$$

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2.8)$$

Portanto, analisando a equação 2.7, pode-se constatar que para uma tensão aplicada σ nula, a probabilidade de sobrevivência, com certeza, será de 100% e ainda com o acréscimo da tensão aplicada σ , a probabilidade de sobrevivência $P(V_0)$ diminui, alcançando valores próximo a zero para tensões aplicadas σ , muito maiores que a resistência intrínseca σ_0 . Assim, a partir também da equação 2.7 pode-se comprovar que quando $\sigma = \sigma_0$ a probabilidade de sobrevivência $P(V_0)$ passa a ser igual a $1/e \approx 0,37$ ou 37%, ou ainda que a probabilidade de falha $F(V_0)$ seja aproximadamente igual a 0,63, ou 63%. (Askeland, 2008).

O expoente m , chamado de Módulo de Weibull, é adimensional e fornece uma avaliação da homogeneidade do material e, conseqüentemente, da repetibilidade de seus valores de resistência e de sua confiabilidade. Quanto menor o módulo de Weibull, maior é a dispersão,

tornando o material susceptível a falhas em uma maior faixa de tensões. Já para valores elevados do parâmetro, a dispersão torna-se menor em um estreito intervalo em torno de σ_0 . Assim, quanto maior o m , maior é a confiabilidade do material, pois a dispersão das tensões de ruptura medidas é menor.

Para obter-se m , é necessário que se isole m na equação 2.8, para isso pode-se linearizar a equação exponencial da seguinte forma:

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

ou

$$1 - F(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] = e^{- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m}$$

Ao aplicar logaritmo neperiano nos dois lados da equação, obtém-se:

$$\ln(1 - F(V_0)) = \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

Aplicando novamente o ln

$$\ln(\ln(1 - F(V_0))) = -m(\ln \sigma - \ln \sigma_0)$$

Ao multiplicar os dois lados por -1, como $\ln x = -\ln(1/x)$, obtém-se:

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - F(V_0)} \right) \right) = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0)$$

Assim o Modulo de Weibull pode ser determinado, para materiais frágeis, pela expressão:

$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(V_0)}\right)\right)}{(\ln \sigma - \ln \sigma_0)} \quad (2.9)$$

Pode-se ainda considerar que todos os corpos de prova tenham o mesmo volume $V = V_0$, portanto:

$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(V)}\right)\right)}{(\ln \sigma - \ln \sigma_0)} \quad (2.10)$$

Sendo plotado um gráfico onde ordenada seja dada pela expressão $\ln[\ln(1/(1-F(V_0)))]$ e a abscissa por $\ln(\sigma/\sigma_0)$, pode-se concluir que o módulo m representa a inclinação de uma reta interpolada a partir dos pontos obtidos neste gráfico.

Pode-se encontrar a probabilidade de falha $F(V_0)$ dos CDPs por um método simples, proposto por WILKS (1942), consiste em inicialmente, ordenar os resultados das tensões de falha obtidas de forma crescente numerando-as a partir do número 1 até n (número total de amostras). Assim, a probabilidade de falha $F(V)$ corresponde à classificação numérica (posição na tabela (1, 2, ..., n)), dividido por $(n+1)$, ou seja, obtém-se $F(V)$, para os valores de σ (MPa). Pode-se então traçar $\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$ em função de $\ln \sigma$.

Existem outras formas de se avaliar a probabilidade, porém segundo BERGMAN (1983) o método proposto por WILKS (1942), apresenta menor variância.

Para um grupo de 27 amostras genéricas a tabela de dados, por exemplo, ficaria como na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Probabilidade genérica para um grupo de 27 amostras

Posição	Tensão de ruptura		Probabilidade de Falha F(V)	$\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$
1	σ_1	1 /28	0,04	-3,3141
2	σ_2	2 /28	0,07	-2,6022
3	σ_3	3 /28	0,11	-2,1775
4	σ_4	4 /28	0,14	-1,8698
5	σ_5	5 /28	0,18	-1,6260
6	σ_6	6 /28	0,21	-1,4223
7	σ_7	7 /28	0,25	-1,2459
8	σ_8	8 /28	0,29	-1,0892
9	σ_9	9 /28	0,32	-0,9474
10	σ_{10}	10 /28	0,36	-0,8168
11	σ_{11}	11 /28	0,39	-0,6952
12	σ_{12}	12 /28	0,43	-0,5805
13	σ_{13}	13 /28	0,46	-0,4714
14	σ_{14}	14 /28	0,50	-0,3665
15	σ_{15}	15 /28	0,54	-0,2649
16	σ_{16}	16 /28	0,57	-0,1657
17	σ_{17}	17 /28	0,61	-0,0679
18	σ_{18}	18 /28	0,64	0,0292
19	σ_{19}	19 /28	0,68	0,1266
20	σ_{20}	20 /28	0,71	0,2254
21	σ_{21}	21 /28	0,75	0,3266
22	σ_{22}	22 /28	0,79	0,4321
23	σ_{23}	23 /28	0,82	0,5439
24	σ_{24}	24 /28	0,86	0,6657
25	σ_{25}	25 /28	0,89	0,8036
26	σ_{26}	26 /28	0,93	0,9704
27	σ_{27}	27 /28	0,96	1,2036

Ao se utilizar dois pontos A e B da reta obtida, que melhor representa os pontos dispostos na tabela 2.1, obtém-se a Figura 2.6, no qual m é a inclinação da reta que melhor se ajusta aos pontos.

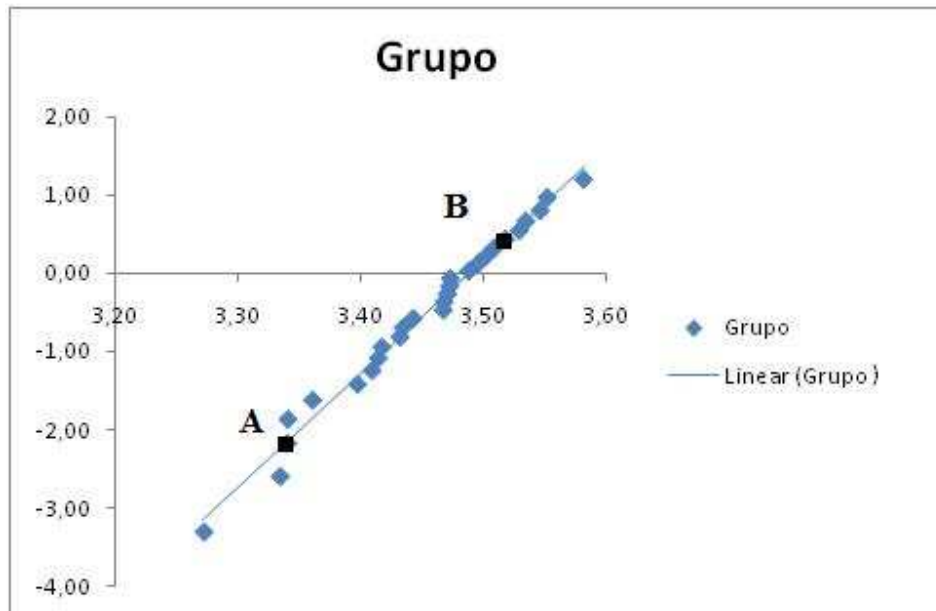


Figura 2.6 – Exemplo de gráfico de $\ln(\ln(1/(1-F(V))) \times \ln \sigma$

Obtém-se assim a seguinte expressão para o cálculo de m :

$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V)_a}\right)\right) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V)_b}\right)\right)}{(\ln \sigma_a - \ln \sigma_b)} \quad (2.11)$$

Outro método bastante utilizado é a regressão linear e plotagem de gráficos utilizando-se o software apropriado. Alguns softwares possuem ferramentas satisfatórias para obtenção das equações que mais aproximam da tendência dos pontos plotados, bem como para a obtenção dos gráficos plotados a partir desses pontos.

2.4 – EXECUÇÕES DOS ENSAIOS

Para obtenção dos dados desejados foi feito o teste de flexão em 3 pontos (figs 2.4 e 2.7) para materiais frágeis. Esse método de ensaio foi escolhido pelo fato de não ser fácil efetuar o teste de tração em vários materiais frágeis, inclusive no mármore sintético, devido á presença de defeitos superficiais. De fato, o simples ato de se posicionar uma amostra de material frágil nas garras da máquina de tração é, ás vezes, suficiente para causar trincas.

O método consiste em imprimir uma flexão com a aplicação de um carregamento no ponto médio de uma viga bi-apoiada, a qual se dá o nome de flexão em 3 pontos, causando compressão na região superior e uma tensão trativa que surge no ponto central e inferior da amostra, a fratura terá início neste local. Os resultados do teste de flexão são semelhantes às curvas de tensão-deformação. Neste caso, porém, o gráfico inclui a força e a deflexão, e não a deformação.



Figura 2.7- Ensaio de flexão de três pontos

Nos ensaios realizados no Laboratório de Ensaios do ENM - UnB, foi utilizada a máquina universal de Ensaio de Tração/Compressão MTS – 810, Material Test System, do referido laboratório da UnB, bloco SG9. A figura 2.7 ilustra este equipamento durante a realização do ensaio a flexão do corpo de prova.

3. - RESULTADOS OBTIDOS

3.1 – Considerações Gerais

Os resultados foram obtidos em dois ensaios distintos, com 3 grupos de CDPs cada.

O primeiro foi realizado por alunos de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, orientados pelo autor deste trabalho e supervisionados pelo Prof. Flamínio em 2008, divididos em três grupos: Grupo “A” (3Kg de Mármore Sintético puro), grupo “B” (3Kg de Mármore Sintético + 50g de fibra de vidro), grupo “C” (3Kg de Mármore Sintético + 100g de fibra de vidro). Com desmoldagem dos CDPs no mesmo dia, duas horas após sua moldagem.

O segundo ensaio foi realizado em 2009, também dividido em três grupos com as seguintes composições: Grupo “D” (3Kg de Mármore Sintético puro), grupo “E” (3Kg de Mármore Sintético + 12,5g de fibra de vidro), grupo “F” (3Kg de Mármore Sintético + 25g de fibra de vidro). Com desmoldagem dos CDPs no dia seguinte 24 horas após a moldagem. Vale resaltar que a única diferença entre os grupos A e D foi o tempo de desmoldagem, sendo que os dois grupos são de mármore sintético puro e de mesma composição.

Foram feitas medidas das dimensões de todos os CDPs (comprimento C, largura b, espessura t), em vários pontos, bem como de suas respectivas massas. Com estes dados foi possível calcular a densidade dos mesmos. Estes resultados encontram-se nas tabelas 7.1 a 7.6 do Anexo B.

Na execução dos ensaios foram coletados duas colunas de dados principais, quais sejam: a força “P” e a deflexão ou flecha “f”, esses dados plotados em gráficos têm a configuração das amostras D-03 e C-24, que são compostas sem adição de fibra (D-03) e com 100 gramas de fibra (C-24), respectivamente representadas pelas figuras 3.1 e 3.2.

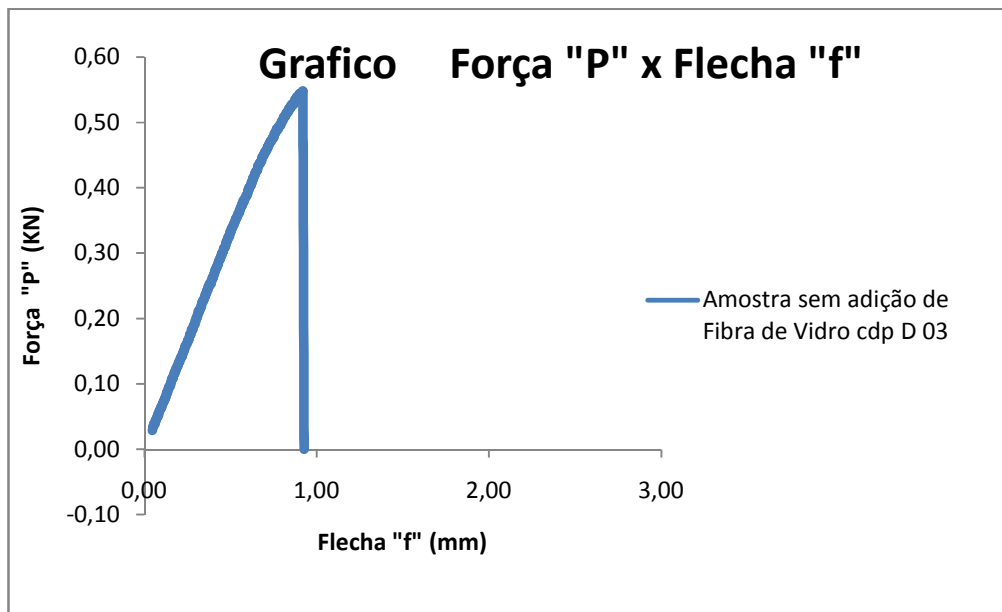


Figura 3.1– Gráfico força x deflexão amostra D-03

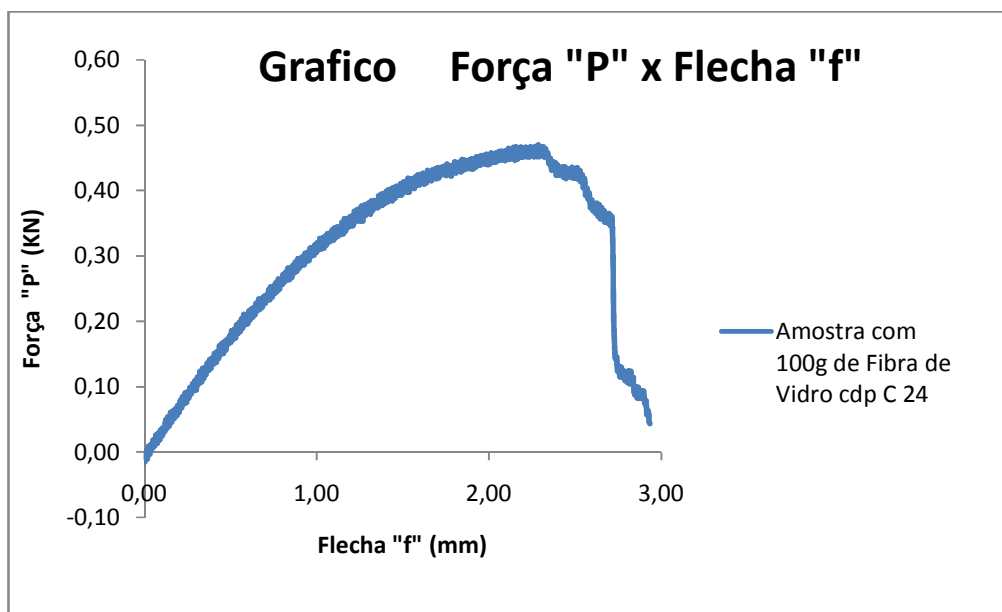


Figura 3.2 – Gráfico força x deflexão amostra C-24

Após a execução dos ensaios foram obtidas as tabelas 7.7 a 7.12, apresentadas no Anexo B, contendo informações de carga(P) e deslocamento(f), feito o tratamento dos dados e obtendo a tensão máxima de cada ensaio podendo-se condensar todos os dados de tensão de ruptura na

tabela 3.1, com as tensões normais máximas devido à flexão, e na tabela 3.2 com os Módulos de Elasticidade em Flexão (E).

A partir da tabela 3.1 foram montados seis gráficos de $\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\} \times \ln\sigma$, plotados nas Figuras 3.3 a 3.8. Um fato interessante é que nos grupos A,D e E, todos os CDPs fraturaram no ponto médio e dividiram-se em duas partes. E nos grupos B,C e F, com 25g, 50g e 100g de fibras, respectivamente, no instante da falha a fratura iniciou-se no ponto inferior, de maior tensão, mas não se propagou ao longo de toda espessura, e os CDPs não chegaram a dividir-se. Ou seja, o modo de falha dos CDPs com 25g, 50g e 100g foi menos catastrófico que aqueles sem fibra (A e D) e com 12,5g (E).

3.2 – TABELAS DE RESULTADOS E DIAGRAMAS DE WEIBULL

Os dados da tabela 3.1 e as respectivas probabilidades de falha, obtidas pelo Método da Posição Relativa, foram logaritimados, obtendo-se $\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\} \times \ln\sigma$ (Fig. 3.3 a 3.8)

Tabela 3.1 - Resultados de tensões máximas dos corpos de prova

Posição	Tensão de ruptura (MPa) Grupo "A"	Tensão de ruptura (MPa) Grupo "B"	Tensão de ruptura (MPa) Grupo "C"	Tensão de ruptura (MPa) Grupo "D"	Tensão de ruptura (MPa) Grupo "E"	Tensão de ruptura (MPa) Grupo "F"
1	20,00	24,31	23,01	27,97	24,67	25,74
2	25,07	24,60	27,40	28,68	26,88	26,04
3	25,94	24,88	28,12	29,82	27,13	26,47
4	26,56	25,51	29,03	29,89	27,19	26,64
5	27,20	26,23	30,02	30,25	28,29	26,76
6	27,40	28,70	30,11	30,88	28,91	26,95
7	27,72	29,31	32,18	31,33	29,06	27,28
8	27,86	29,54	32,28	31,40	29,31	27,36
9	28,04	29,95	32,29	31,40	29,39	27,36
10	28,46	30,04	33,03	31,78	29,83	27,38
11	28,95	30,76	33,50	31,92	29,85	27,97
12	29,65	30,83	34,45	31,95	30,31	28,14
13	29,69	31,29	35,62	32,49	30,34	28,27
14	29,95	31,50	35,66	32,50	30,51	28,33
15	30,01	31,94	35,98	32,77	30,53	28,55
16	30,99	32,80	38,73	33,04	30,86	28,80
17	31,02	32,90	39,16	33,26	31,08	28,81
18	31,08	33,74	39,55	33,79	31,34	29,67
19	32,47	35,50	40,00	33,88	31,92	29,71
20	32,81	36,62	40,09	34,22	32,03	30,36
21	33,50	38,32	41,99	34,24	32,10	30,51
22	33,81	39,61	43,23	34,41	32,28	30,97
23	34,63	39,95	43,82	34,64	32,35	31,15
24	34,91	41,77	44,39	34,69	32,50	32,10
25	36,39	43,56	45,87	35,20	32,78	32,18
26				36,12	33,47	32,34
27				36,51	33,54	34,16
Média	29,76	32,17	35,58	32,56	30,31	28,89
Desvio Padrão	3,54	5,30	5,86	1,74	1,70	1,80
C.V.	11,90%	16,47%	16,47%	5,34%	5,61%	6,23%
Mediana	29,69	31,29	35,62	32,50	30,51	28,33

Tabela 3.2 - Resultados do Módulo de Elasticidade dos corpos de prova

Posição	Módulo de Elasticidade (GPa) Grupo "A"	Módulo de Elasticidade (GPa) Grupo "B"	Módulo de Elasticidade (GPa) Grupo "C"	Módulo de Elasticidade (GPa) Grupo "D"	Módulo de Elasticidade (GPa) Grupo "E"	Módulo de Elasticidade (GPa) Grupo "F"
1	7,65	6,30	4,23	7,34	9,66	9,04
2	4,26	5,41	6,90	9,27	8,68	9,23
3	6,6	12,13	7,21	9,01	11,13	7,76
4	5,83	4,73	7,99	8,75	9,05	10,47
5	4,64	4,57	9,76	8,51	8,87	7,76
6	4,59	5,72	6,58	10,35	10,58	7,89
7	9,11	9,64	4,85	8,21	10,61	8,47
8	5,64	5,00	7,92	10,02	9,53	7,58
9	6,92	9,50	6,23	9,02	9,14	8,21
10	5,18	4,05	6,14	10,12	9,08	9,34
11	5,73	8,64	9,56	9,87	9,82	7,61
12	4,71	7,91	4,96	8,55	8,97	7,17
13	8,24	5,40	5,74	8,75	10,73	7,79
14	6,36	4,20	6,16	9,41	10,31	7,72
15	8,27	9,13	6,64	8,80	9,07	7,07
16	6,28	8,03	6,10	8,77	9,43	8,47
17	5,71	7,23	6,98	8,36	10,66	9,19
18	7,28	13,14	4,55	9,51	10,04	8,80
19	5,65	8,91	6,85	9,18	9,81	8,27
20	6,02	7,96	5,85	9,37	8,43	7,54
21	7,07	7,47	6,55	9,26	9,62	7,64
22	6,66	9,51	6,31	8,96	8,74	7,37
23	7,33	9,10	8,24	9,13	8,80	7,58
24	7,16	10,71	6,77	10,00	9,00	7,26
25	6,17	7,55	8,51	9,21	10,00	8,60
26				9,80	10,22	6,26
27				9,48	9,42	8,23
Média	6,36	7,68	6,70	9,15	9,61	8,09
Desvio Padrão	0,98	1,96	1,04	0,50	0,61	0,69
C.V.	15,41%	25,52%	15,52%	5,46%	6,35%	8,53%

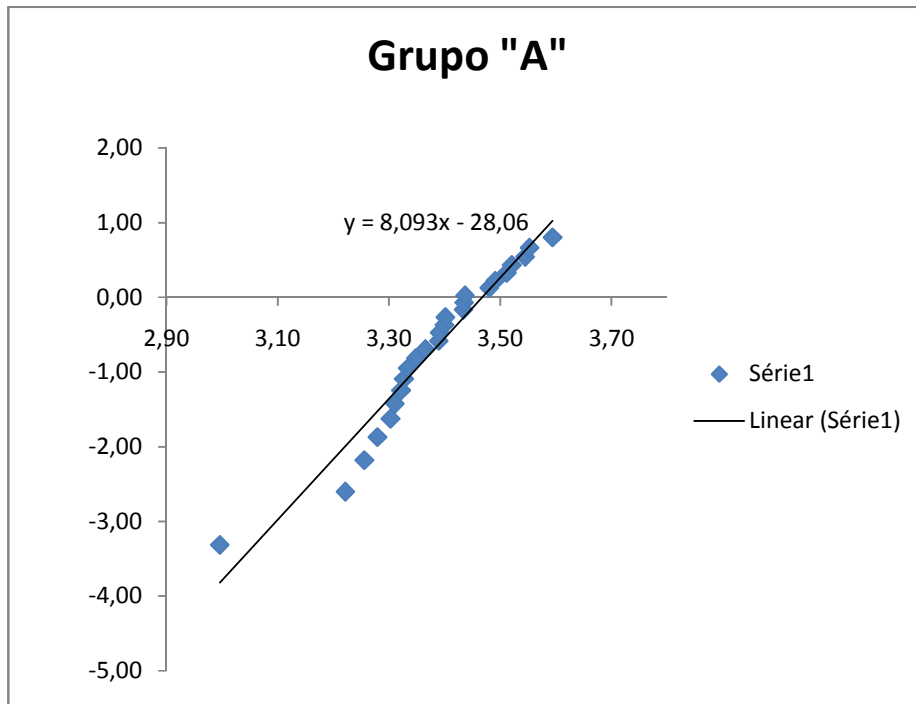


Figura 3.3 - Plotagem de dados Grupo "A" de $\ln\sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$

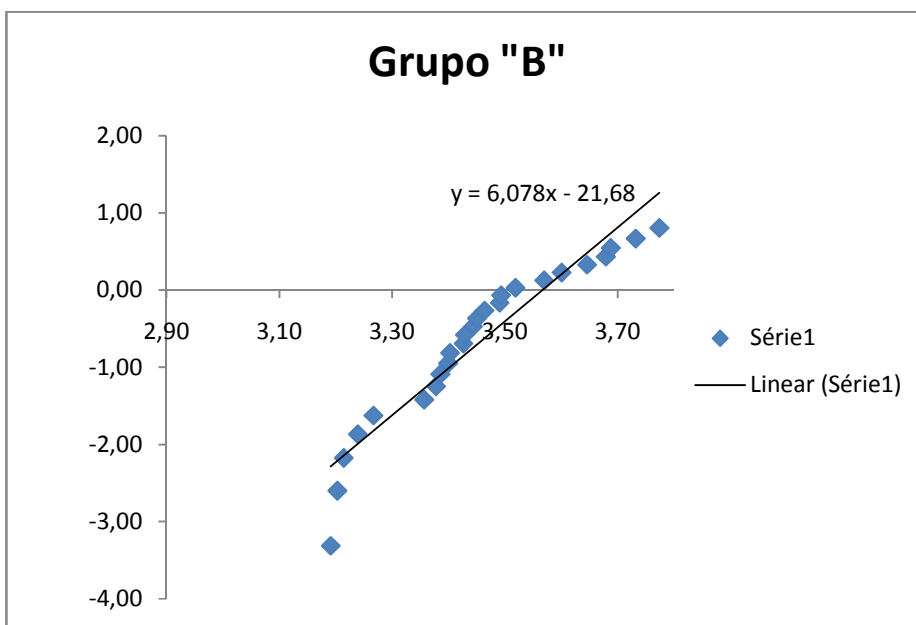


Figura 3.4 - Plotagem de dados Grupo "B" de $\ln\sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$

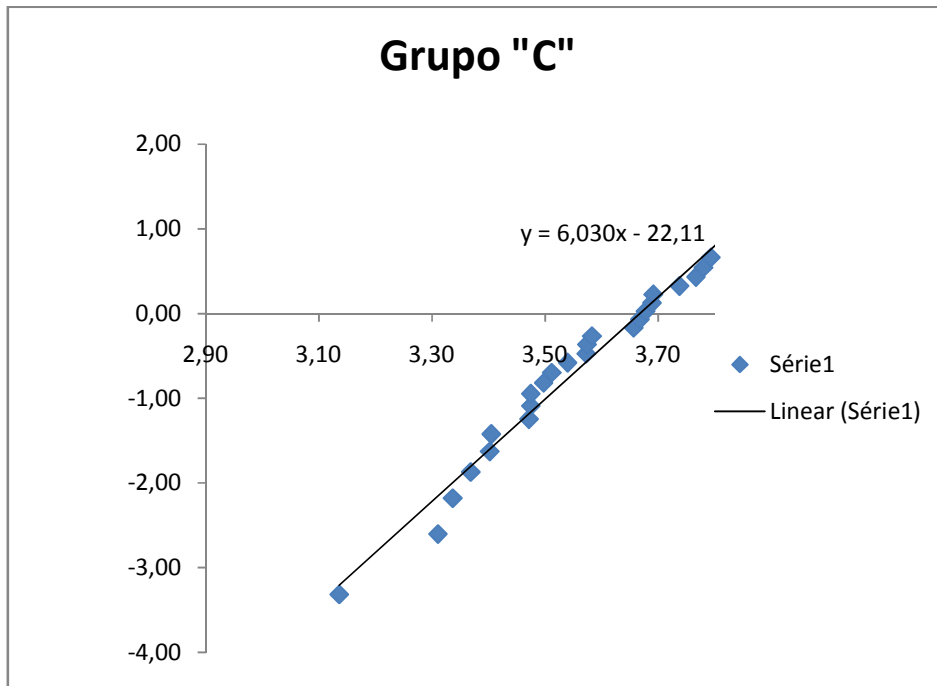


Figura 3.5 - Plotagem de dados Grupo "C" de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$

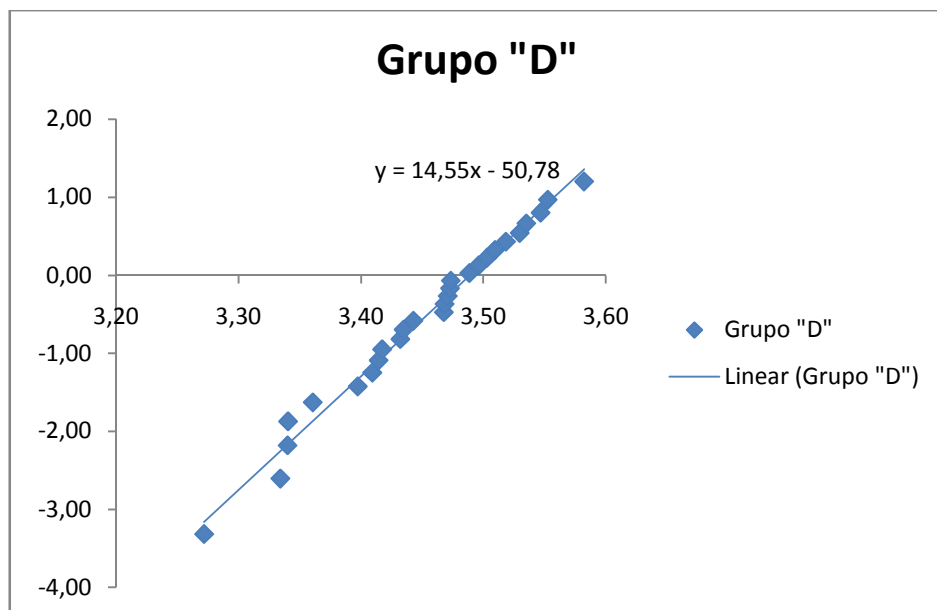


Figura 3.6 - Plotagem de dados Grupo "D" de $\ln \sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$

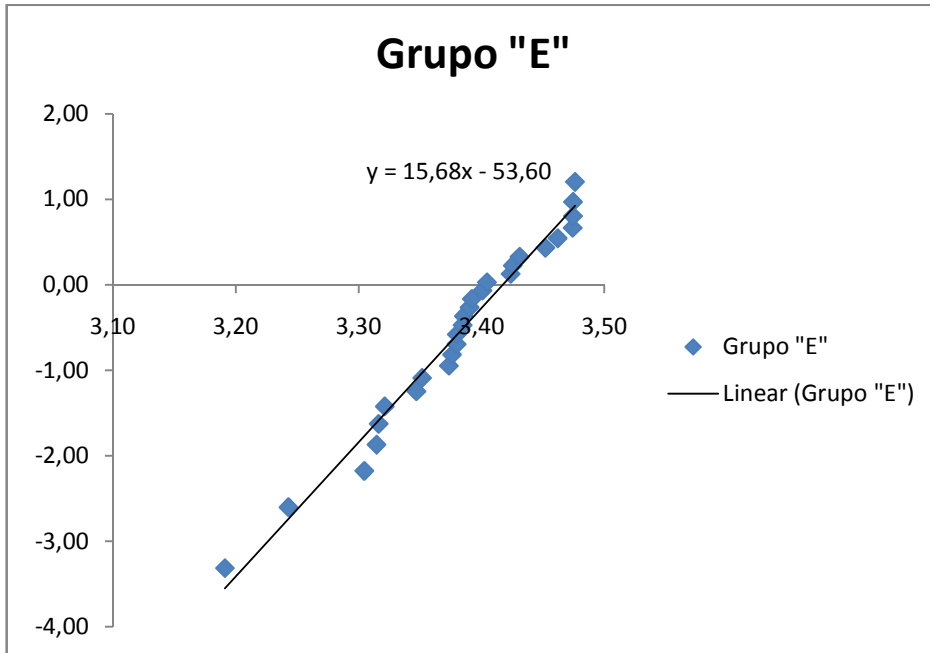


Figura 3.7 - Plotagem de dados Grupo "E" de $\ln\sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$

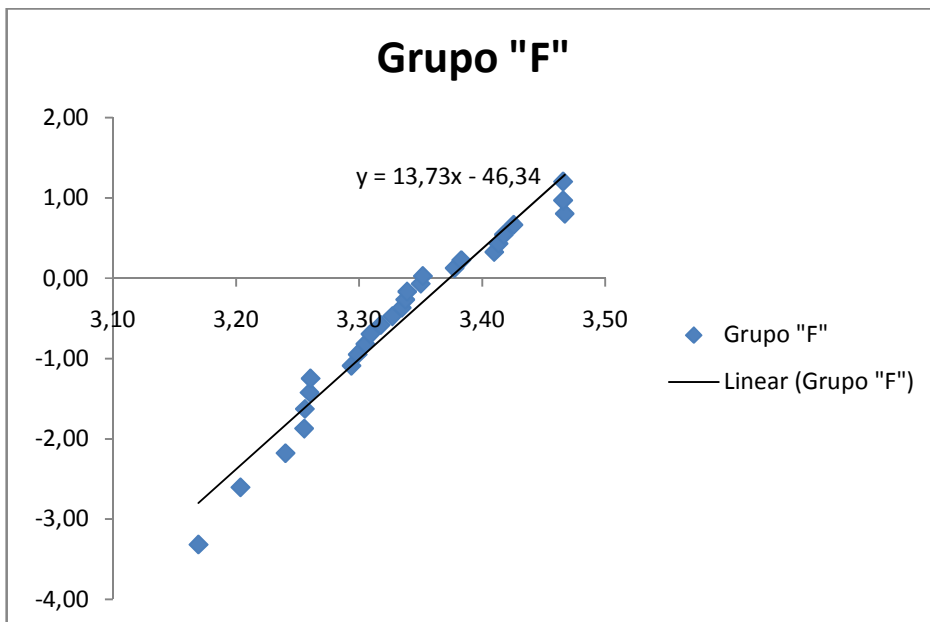


Figura 3.8 - Plotagem de dados Grupo "F" de $\ln\sigma \times \ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$

Após a disposição destes pontos, obteve-se as seguintes equações plotadas a partir da regressão linear, onde, na equação da reta do tipo: $y = a.x + b$, o coeficiente a representa o coeficiente angular da reta que é o próprio módulo m de Weibull.

3.3 – PRIMEIRO LOTE (GRUPOS A, B E C) DE ENSAIOS EM 2008 COM DESMOLDAGEM DUAS HORAS APÓS A MOLDAGEM

$$\text{Grupo "A": } y = 8,09x - 28,07, \mathbf{m = 8,09}$$

$$\text{Grupo "B": } y = 6,08x - 21,68, \mathbf{m = 6,08}$$

$$\text{Grupo "C": } y = 6,03x - 22,12, \mathbf{m = 6,03}$$

Como foi colocado anteriormente em materiais frágeis σ_0 é a tensão em que a probabilidade de sobrevivência é de 0,37, portanto para:

$$\text{Grupo "A"} \ln \{ \ln[1/(1-0,63)] \} = 8,09 \ln(\sigma_0) - 28,07$$

$$\text{Grupo "B"} \ln \{ \ln[1/(1-0,63)] \} = 6,08 \ln(\sigma_0) - 21,68$$

$$\text{Grupo "C"} \ln \{ \ln[1/(1-0,63)] \} = 6,03 \ln(\sigma_0) - 22,12$$

Sendo $\ln \{ \ln[1/(1-0,63)] \} = -0,00576$,

$$\text{Assim : Grupo "A"} \quad \sigma_0 = \mathbf{29,63 \text{ MPa}}, \quad \sigma_{\text{max.medio}} = \mathbf{29,76 \text{ MPa}}$$

$$\text{Grupo "B"} \quad \sigma_0 = \mathbf{31,61 \text{ MPa}}, \quad \sigma_{\text{max.medio}} = \mathbf{32,17 \text{ MPa}}$$

$$\text{Grupo "C"} \quad \sigma_0 = \mathbf{35,01 \text{ MPa}}, \quad \sigma_{\text{max.medio}} = \mathbf{35,58 \text{ MPa}}$$

3.4 – SEGUNDO LOTE (GRUPOS D, E E F) DE ENSAIOS REALIZADO EM 2009 COM DESMOLDAGEM 24 HORAS APÓS A MOLDAGEM.

$$\text{Grupo "D": } y = 16,57x - 58,22, \mathbf{m = 16,57}$$

$$\text{Grupo "E": } y = 15,04x - 51,79, \mathbf{m = 15,04}$$

$$\text{Grupo "F": } y = 14,05x - 47,85, \mathbf{m = 14,05}$$

Como foi colocado anteriormente, em materiais frágeis, a resistência intrínseca σ_0 é a tensão em que a probabilidade de sobrevivência é de 0,37, portanto para:

$$\text{Grupo "D"} \quad \ln\{\ln[1/(1-0,63)]\} = 16,57 \text{Ln}(\sigma_0) - 58,22$$

$$\text{Grupo "E"} \quad \ln\{\ln[1/(1-0,63)]\} = 15,04 \text{Ln}(\sigma_0) - 51,79$$

$$\text{Grupo "F"} \quad \ln\{\ln[1/(1-0,63)]\} = 14,05 \text{Ln}(\sigma_0) - 47,85$$

Sendo $\ln\{\ln[1/(1-0,63)]\} = -0,00576$,

Assim : Grupo "D" $\sigma_0 = 32,52 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{max.medio}} = 32,26 \text{ MPa}$

Grupo "E" $\sigma_0 = 30,17 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{max.medio}} = 30,06 \text{ MPa}$

Grupo "F" $\sigma_0 = 28,73 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{max.medio}} = 28,54 \text{ MPa}$

3.5 – COMPARANDO OS RESULTADOS "A", "B" e "C" com "D", "E" e "F"

Comparando os resultados pode-se elaborar a tabela 3.3 e plotar os gráficos comparativos das figuras 3.9 e 3.10

Tabela 3.3 - Resultados de Resistências Intrínsecas (σ_0) e Módulos de Weibull (m)

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F
	DESMOLDADOS COM 2 HORAS			DESMOLDADOS COM 24 HORAS		
M	8,09	6,08	6,03	16,57	15,04	14,05
σ_0 (MPa)	29,63	31,61	35,01	32,52	30,17	28,73
Quantidade de fibras de vidro (g)	0	50,0	100	0	12,5	25

Plotando dados da tabela 3.3 em um gráfico, Composição x Módulo de Weibull, :

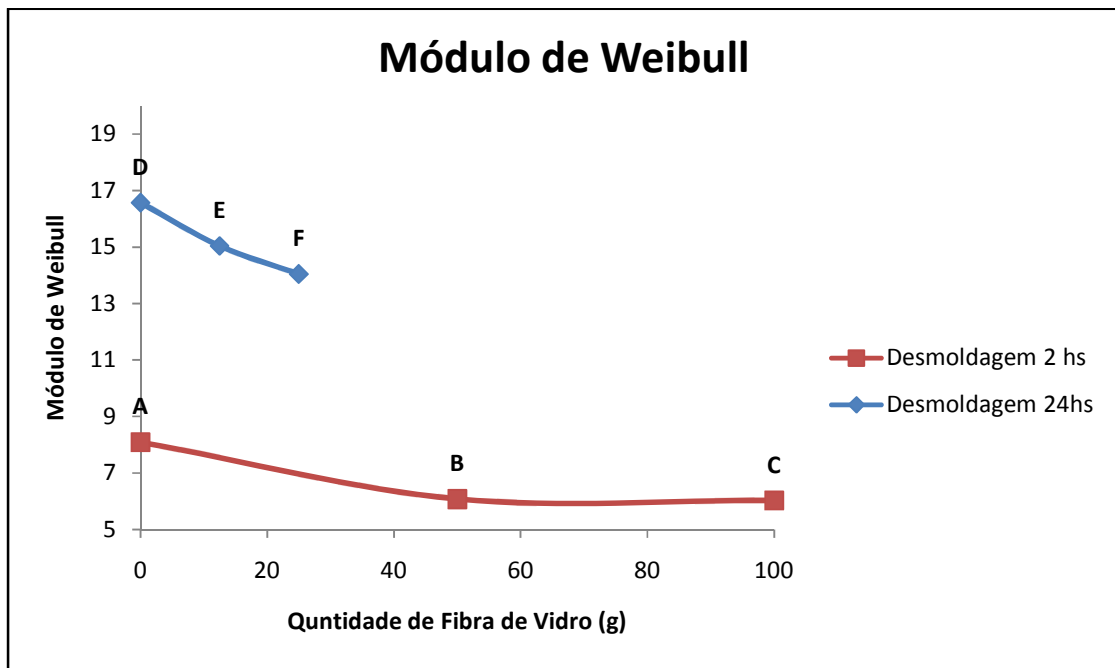


Figura 3.9 - Plotagem de dados Composição x Módulo de Weibull

Ao se analisar o gráfico da figura 3.9 nota-se uma clara tendência de queda do módulo de Weibull nos dois grupos de ensaio, ao inserir fibra de vidro na composição do material ensaiado, esse comportamento é explicado pelo fato de que inicialmente as fibras inseridas na massa de mármore sintético diminuem a repetibilidade dos valores obtidos nos ensaios de flexão, por atuarem como descontinuidades ou defeitos no material. Ao continuar a inserção de fibra de vidro entre 50g e 100g percebe-se que o módulo de Weibull não sofre alteração significativa.

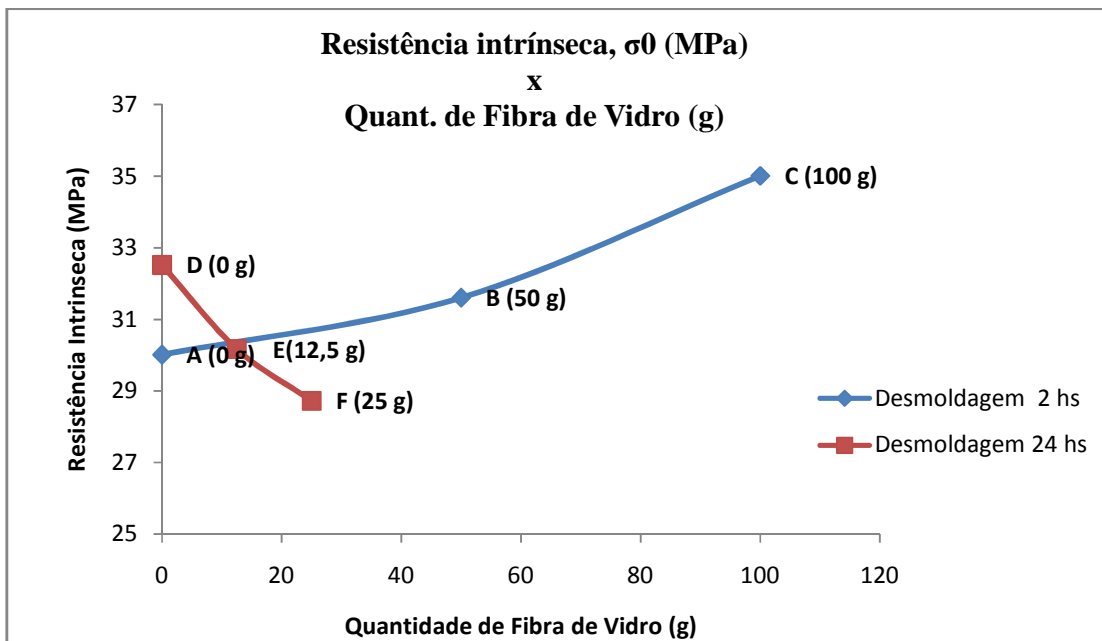


Figura 3.10 - Plotagem de dados Composição x Resistência intrínseca

Já na figura 3.10 observa-se um aumento na resistência intrínseca de forma mais acentuada a partir do acréscimo de 50g de fibra por 3 Kg de massa, já no segundo grupo de amostras D, E e F, a inserção de fibra de vidro provoca uma diminuição na resistência intrínseca.

Levando em consideração que os grupos A e D destacam-se dos demais (B, C, E e F), por não possuírem fibra de vidro, possuindo portanto a mesma composição, sendo a única variante entre os dois grupo de ensaios, o tempo de desmoldagem, e considerando ainda que as duas situações de desmoldagem são extremas, adota-se um valor médio da resistência intrínseca para avaliar de uma forma geral a influência do acréscimo de fibras na massa de mármore sintético, conforme apresentado na Tabela 3.4. Estes resultados são plotados no gráfico da Figura 3.7.

Tabela 3.4 - Resultados de Resistências Intrínsecas (σ_0) em ordem crescente de acréscimo de Fibra de Vidro

	Média dos Grupos A e D	Grupo E	Grupo F	Grupo B	Grupo C
Quantidade de fibra de vidro (g)	0	12,5	25	50	100
σ_0 (MPa)	31,08	30,17	28,73	31,61	35,01
M	12,33	15,04	14,05	6,08	6,03
E (GPa)	7,76	9,61	8,09	7,68	6,7

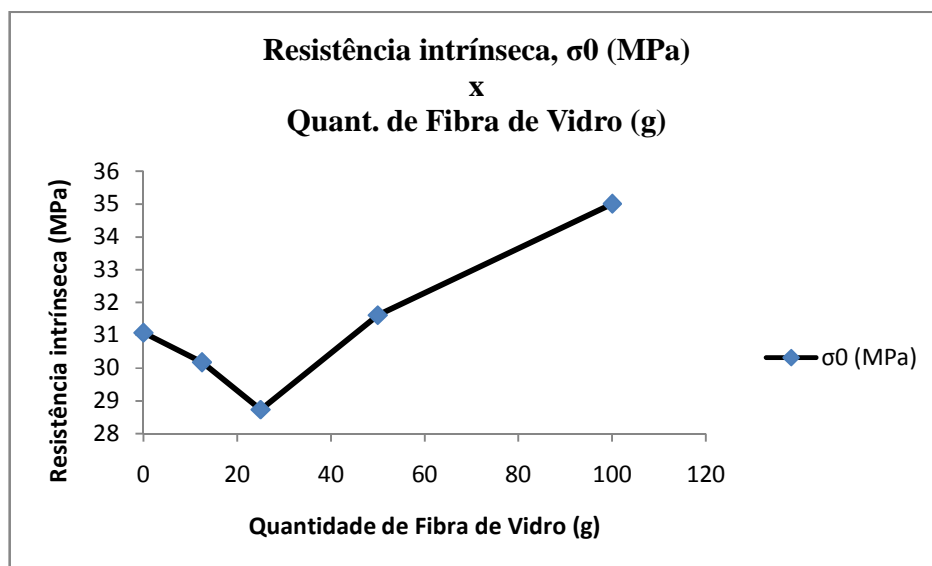


Figura 3.11 – Comportamento da Resistência Intrínseca [MPa]x Quant. de Fibra de Vidro [g]

Na Figura 3.11 pode-se observar que o acréscimo de fibra de vidro, em quantidades inferiores a um valor mínimo, próximo a 25 g, pode interferir negativamente na resistência do material. Já para valores acima desse valor mínimo, a inclusão de fibra de vidro passa a contribuir positivamente na resistência intrínseca, analogamente ao ilustrado na Figura 3.12.

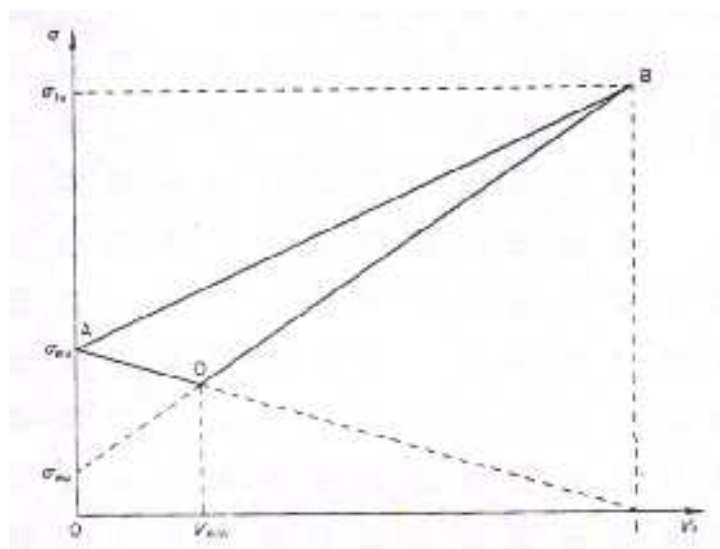


Figura 3.12 – Diagrama da influência de diferentes frações volumétricas de fibras (Fonte: Fig. 8.3, pg. 353, do livro do Vinson & Chou)

Como no mármore sintético ensaiado nesta dissertação de Mestrado, as fibras são picotadas e aleatórias, a chance delas virem a atuar como defeitos, quando inseridas em quantidade insuficiente, é bem maior que no caso de reforço contínuo e unidirecional, na direção de carregamento de tração uniaxial, que gerou o gráfico mostrado na Figura 3.12 (Vinson e Chou, 1975)

A partir da determinação do módulo de Weibull (m) e resistência intrínseca (σ_0) de todos os grupos pode-se então montar a tabela 3.5 utilizando a equação 2.6, $P(V_0) = \exp\{-(\sigma/\sigma_0)^m\}$, encontrando-se valores de 0 a 1, onde “1” representa a ausência de probabilidade de falha, e “0” ausência da probabilidade de sobrevivência.

Tabela 3.5 - Resultados Probabilidades de Sobrevivência dos corpos de prova

Tensão aplicada σ (MPa)	Grupo "A"	Grupo "B"	Grupo "C"	Grupo "D"	Grupo "E"	Grupo "F"
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
1	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
3	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
4	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
5	1,00000	0,99999	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000
6	1,00000	0,99996	0,99998	1,00000	1,00000	1,00000
7	0,99999	0,99990	0,99994	1,00000	1,00000	1,00000
8	0,99998	0,99976	0,99988	1,00000	1,00000	1,00000
9	0,99994	0,99952	0,99975	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,99985	0,99909	0,99953	1,00000	1,00000	1,00000
11	0,99968	0,99837	0,99916	1,00000	1,00000	1,00000
12	0,99936	0,99723	0,99858	1,00000	1,00000	0,99999
13	0,99877	0,99550	0,99769	1,00000	1,00000	0,99998
14	0,99776	0,99295	0,99640	1,00000	0,99999	0,99995
15	0,99609	0,98930	0,99454	1,00000	0,99997	0,99988
16	0,99342	0,98420	0,99196	0,99999	0,99992	0,99971
17	0,98928	0,97724	0,98843	0,99998	0,99981	0,99931
18	0,98303	0,96793	0,98371	0,99994	0,99955	0,99846
19	0,97384	0,95573	0,97750	0,99986	0,99899	0,99671
20	0,96065	0,94003	0,96947	0,99968	0,99782	0,99326
21	0,94216	0,92016	0,95924	0,99929	0,99547	0,98666
22	0,91686	0,89547	0,94640	0,99846	0,99090	0,97451
23	0,88306	0,86531	0,93051	0,99679	0,98232	0,95293
24	0,83906	0,82912	0,91111	0,99351	0,96673	0,91607
25	0,78338	0,78648	0,88774	0,98727	0,93939	0,85593
26	0,71512	0,73722	0,85999	0,97576	0,89334	0,76343
27	0,63443	0,68148	0,82747	0,95518	0,81959	0,63210
28	0,54298	0,61978	0,78992	0,91965	0,70907	0,46551
29	0,44434	0,55313	0,74722	0,86085	0,55834	0,28597
30	0,34399	0,48301	0,69943	0,76892	0,37893	0,13323
31	0,24875	0,41137	0,64684	0,63610	0,20413	0,04096
32	0,16550	0,34048	0,59004	0,46506	0,07719	0,00680
33	0,09954	0,27279	0,52986	0,27949	0,01709	0,00046
34	0,05300	0,21064	0,46748	0,12361	0,00170	0,00001
35	0,02438	0,15601	0,40428	0,03406	0,00005	0,00000
36	0,00942	0,11026	0,34187	0,00456	0,00000	0,00000
37	0,00296	0,07394	0,28192	0,00021	0,00000	0,00000
38	0,00073	0,04675	0,22604	0,00000	0,00000	0,00000
39	0,00013	0,02768	0,17566	0,00000	0,00000	0,00000
40	0,00002	0,01524	0,13186	0,00000	0,00000	0,00000
41	0,00000	0,00774	0,09524	0,00000	0,00000	0,00000
42	0,00000	0,00359	0,06594	0,00000	0,00000	0,00000
43	0,00000	0,00151	0,04356	0,00000	0,00000	0,00000
44	0,00000	0,00057	0,02734	0,00000	0,00000	0,00000
45	0,00000	0,00019	0,01621	0,00000	0,00000	0,00000
46	0,00000	0,00006	0,00904	0,00000	0,00000	0,00000
47	0,00000	0,00001	0,00471	0,00000	0,00000	0,00000
48	0,00000	0,00000	0,00228	0,00000	0,00000	0,00000
49	0,00000	0,00000	0,00102	0,00000	0,00000	0,00000
50	0,00000	0,00000	0,00042	0,00000	0,00000	0,00000

Tendo como base os resultados das probabilidades de sobrevivência em relação às tensões aplicadas é possível então plotar o gráfico a seguir.

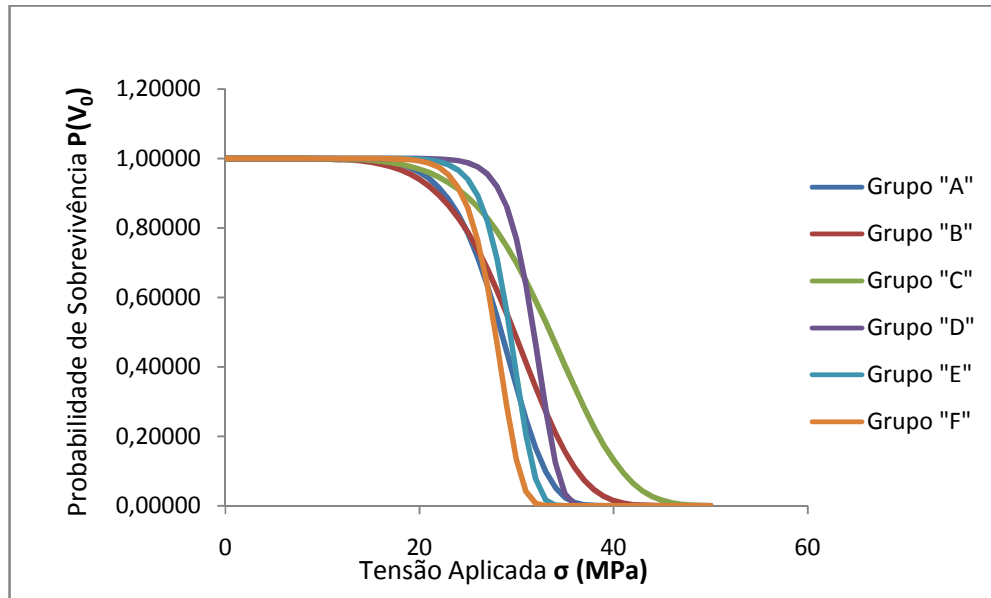


Figura 3.13 – Diagrama das Probabilidades de Sobrevivência $P(V_0)$ x Tensão Aplicada σ (MPa) dos grupos de “A” a “F”

4. - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao observar os valores obtidos do Módulo de Weibull “ m ” e da Resistência intrínseca “ σ_0 ” destaca-se que houve:

Queda da Resistência intrínseca “ σ_0 ”, de 7,2% e 11,7% , em relação ao Grupo A, sem fibra de vidro, com o acréscimo de fibra de vidro à massa de mármore sintético, nos grupos “E” e “F”, nos os valores de 12,5g , e 25,0g de fibra de vidro, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 3.10;

Já para os grupos “B” e “C” com acréscimos de 50,0g e 100,0g de fibra de vidro, observa-se inicialmente, que, com a adição de 50,0g a resistência aproxima-se do valor do Grupo A, sem fibras. E, com a incorporação de 100,0g há um incremento na resistência intrínseca de 18,2% , em relação ao Grupo A.

Por se tratar de dois lotes de amostras (A, B e C), (D, E e F) distintos, porém com formulação de massa de mármore sintético, idênticas, percebe-se que ao iniciar-se o acréscimo de fibra de vidro, até 25g, ocorre uma diminuição na resistência intrínseca do material, que pode ser atribuída a uma atuação negativa do material fibroso na composição, há indicações de que a matriz de mármore sintético predomina na resistência do compósito e as fibras atuam como se fossem defeitos (Vinson e Chou, 1975).

Em seguida, com acréscimos maiores esse comportamento se inverte a partir de 50g de fibra de vidro,ou aumentando ainda mais com 100g de fibra para 3 kg de massa. Ou seja, as fibras de vidro só passam a atuar como reforço a partir de uma fração volumétrica mínima, ou fração volumétrica crítica.

Com relação ao Módulo de Weibull m observa-se uma ligeira tendência de queda nas duas etapas, um pouco mais acentuada no lote de CDPs desmoldados após 2 horas (Grupos A, B e C), na medida em que se acrescenta a fibra de vidro. Tendência essa que se mostra menos intensa no lote de CDPs desmoldados após 24 horas (Grupos D, E e F), e quando se passa de

50g, com $m=6,45$, e para 100g $m= 6,35$, indicando assim uma estabilização no valor do módulo de Weibull (m).

A grande diferença entre os valores de m entre lotes de CDPs: (i) desmoldados após 2 horas (Grupos A, B e C), com σ_0 médio de 32,08 MPa; e (ii) desmoldados após 24 horas (Grupos D, E e F), com σ_0 médio de 30,47 MPa, pode ser atribuída ao melhor controle na segunda etapa, no processo de elaboração dos corpos de prova. Por exemplo, na segunda etapa os corpos de prova foram desmoldados no dia seguinte, ou seja, após 24 horas; e na primeira etapa os corpos de prova foram desmoldados 2 (duas) horas após a moldagem. Esse tempo de duas horas é o normalmente empregado dentro do processo produtivo industrial, visando melhor aproveitamento dos moldes. Porém, para que haja esta desmoldagem somente duas horas após, é necessário que haja um cuidado especial, pois os CDPs saem da fôrma sem rigidez; o que pode, em alguns casos, provocar microtrincas ocorrendo assim uma instabilidade a mais nos valores obtidos. Provavelmente causado por um número maior de defeitos gerados na operação de desmoldagem, e, uma possível ocorrência de microtrincas explicaria o fato dos Módulos de Weibull (m) dos CDPs desmoldados após 2 horas terem apresentado valores de m , em média, menores, por um fator superior a duas vezes, em relação aos desmoldados após 24 horas.

Já nos grupos D, E e F, a desmoldagem após 24 horas permitiu que a cura da matriz polimérica se efetivasse totalmente e o compósito ficasse bem mais rígido e melhor consolidado antes de ser sacado dos moldes. O aumento significativo no módulo de Weibull dos CDPs dos grupos D,E e F, em relação aos dos grupos A, B e C, de cerca de duas vezes (i.e. fator de ≈ 2), sugere que no lote referente aos grupos D, E e F, desmoldados após 24 horas, a qualidade do produto final é bem melhor, havendo menor quantidade de defeitos, em relação aos grupos A,B e C, desmoldados com 2 horas, antes de a matriz atingir a máxima rigidez. Vale lembrar que a geometria dos corpos de prova é bem esbelta sem nervuras, concavidades ou sobressaltos, diferindo assim das peças normalmente inseridas no processo produtivo industrial de mármore sintético (Pias, Tanque, Lavatórios, etc), que possuem geometria favorável para o aumento do momento de inércia, podendo atenuar as diferenças dos resultados entre as desmoldagens com 2 horas e 24 horas.

O decréscimo na resistência intrínseca com a inserção de fibra de vidro, de certa forma não era o esperado, pois, a resistência mecânica da fibra de vidro é muitas vezes maior que a resistência do mármore sintético, e, isso deveria provocar uma melhora em suas propriedades mecânicas, porém pode-se suspeitar que as fibras inseridas na massa possam ter incrementado as falhas e/ou bolhas na massa de mármore sintético, uma vez que para se ter eficiência de atuação das fibras na massa é necessário que haja um perfeito engastamento, ou adesão das mesmas que em quantidades inferiores a 50g por 3 kg de massa, inviabiliza o procedimento provocando diminuição em sua resistência.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – CONCLUSÕES

Em relação à média dos valores dos grupos sem fibras de vidro picadas (A e D), de $\sigma_0 = 32,32$ MPa, a adição de fibras, até 25 g, causou uma progressiva diminuição na Resistência Intrínseca (σ_0) para 28,73 MPa. Sendo que com 12,5 g de fibras obteve-se o valor intermediário $\sigma_0 = 30,17$ MPa;

Para a incorporação de 50 g de fibra de vidro, a Resistência Intrínseca atingiu um valor de 31,61 MPa, próximo ao valor inicial de 29,63 com aumento de 6,7%. E, ao se adicionar 100 g de fibras, σ_0 subiu para 35,01 MPa, um aumento de 18,2%;

O Módulo de Weibull (m) médio dos CDPs desmoldados após 2 horas foi de 6,73. Nestes grupos, A, B e C, m diminuiu de 8,09 para 6,08 e depois 6,03, quando os teores de fibra foram, respectivamente, 0, 50 e 100 g; e

O Módulo de Weibull (m) médio dos CDPs desmoldados após 24 horas foi de 15,22. Nestes grupos, D, E e F, m diminuiu de 16,57 para 15,04 e depois 14,05, quando os teores de fibra foram, respectivamente, 0, 12,5 e 25 g;

O aumento no tempo de desmoldagem, de 2 para 24 horas, fez o Módulo de Weibull, m, aumentar por um fator superior a duas vezes. Ou seja, os CDPs desmoldados após 24 apresentaram uma repetibilidade na resistência mecânica bastante superior.

Outro destaque de grande importância é que a partir da inserção de 25g de fibra de vidro em 3Kg de mármore sintético passa-se ter trincas sem que haja separação total do cdps, ou seja falhas não catastróficas, sendo mais significativas quanto maior o teor de fibra de vidro.

Assim dentre aspectos positivos e aspectos negativos sobre o acréscimo de fibra de vidro na massa de mármore sintético pode-se concluir que:

Até a quantidade de 25g por 3Kg de massa houve queda na repetibilidade dos ensaios, queda na resistência intrínseca e rupturas catastróficas;

Entre 25g e 50g por 3 Kg de massa houve queda na repetibilidade dos ensaios, queda na resistência intrínseca e algumas rupturas não catastróficas;

Já para as amostras com teor de 100g por 3 Kg de massa, não se teve perdas em repetibilidade de resultados com relação ao grupo anterior de 50g por 3 Kg de massa, porém houve um ganho expressivo na resistência intrínseca do composto, além de não ter tido nenhuma falha com separação total dos corpos de prova.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo de Viabilidade econômica na adição de fibra de vidro no composto de mármore sintético;
- Estudo da Influência nas propriedades mecânicas com a variação da relação carga mineral x resina poliéster no mármore sintético;
- Análise da vibração na compactação e resistência mecânica do mármore sintético;
- Estudo do tempo de degradação do mármore sintético.

BIBLIOGRAFIA

- ASKELAND, D.R. e PHULÉ, P.P.,(2008) “Ciência e Engenharia dos Materiais”, *CENGAGE Learning*, Rio de Janeiro, pp. 190-196.
- BERGMAN, B.(1983) “On the Estimation of the Weibull Modulus”, *Journal of Material Science Letters*, n.3, p.689-692.
- GREEN, D.,(1998), “An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics”, *Cambridge University Press*, Cambridge, pp. 286-290.
- LEVY NETO, F. e PARDINI, L.C.,(2008), “Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia”, *Editora Edgard Blucher*, São Paulo.
- LU, C., DANZER R., FISCHER F.D. (2002), “Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution”, *Physical Review E, Volume 65, 067102, Montanuniversita't Leoben, A-8700 Leoben, Austria*
- MATTHEUWS, F. L. e RAWLINGS, R. D. , (1994), “Composite Materials: Engineering and Science. Imperial College of Science”, *Technology and Medicine*, London, UK.
- MILI, M. R, MOEVUS M., GODIN N.(2008), “Statistical fracture of E-glass fibres using a bundle tensile test and acoustic emission monitoring”, *Composites Science and Technology* 68, Universite´ de Lyon, INSA-Lyon, Mateis, 69621 Villeurbanne Cedex, France
- MONTEIRO, A.L.A.,(2001), “Um Sistema para Calculo da resistência Mecânica de materiais Frágeis pelo Uso do Método estatístico de Weibull”, *Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá*, Monografia de Especialização.
- NASH, W.,(1992), “Resistência dos Materiais”, *Mac Gral Hill*, São Paulo.
- RABAHI, R.F., DINOAH, J., GUEDES, J., VIEIRA, M.C.O.,(2007), “Estudo da Influência da Fibra de Vidro nas Propriedades Mecânicas do Mármore Sintético”, *Relatório de Curso na Pós Graduação*, PCMEC – UnB, Brasília.
- SILVA, J.B, HOTZA, D., SEGADÃES, A.M., ACCHAR, W.,(1975) “Incorporação de Lama de Mármore e Granito em Massas Argilosas”, *Cerâmica*, v. 51, n. 320, pp. 325-330, 2005.
- VINSON JACK, R. AND T.-W. CHOU. “Composite materials and their use in structures”. *Applied Science Publishers Ltd.*, London.
- WHITNEY, J. M. , DANIEL, I. M. e PIPES, R. B.,(1984) “Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials”, *The Society for Experimental Mechanics*, Brookfield

Center, Connecticut, New Jersey, USA.

WILKS,S.S.,(1942), “Determination of Sample Size for Setting Limits”. *The Anals of Mathematical Statistics*, n.12, p.91-96.

ANEXOS

ANEXO A - BOLETIM TÉCNICO COMMODITIES

ARAZYN 3.7 - BOLETIM

ARA QUÍMICA S/A. – RUA ARTHUR CÉSAR, 200

18147-000 – ARAÇARIGUAMA – SP – BRASIL • TEL: 0 (XX) 11 4136 1900

BTE DOCUMENTO 001023

RESINA POLIÉSTER INSATURADO, ORTO-TEREFTÁLICA, MÉDIA
REATIVIDADE

DESCRIÇÃO: A resina padrão da família AZ 3.7 de média reatividade e pré-acelerada apresenta, no estado líquido, viscosidade média e coloração castanha, boa molhabilidade alta aceitação de carga (melhor rendimento) e excelente fluidez para fabricação de massa. Após a cura, apresenta rigidez.

OUTRAS RESINAS Na mesma família, existem outras resinas com características específicas quanto à viscosidade, gel time e pigmentação. Consultar o departamento Técnico da AraAshland.

SUGESTÕES DE USO Na fabricação de artefatos em mármore sintético e granito sintético, tais como pias, tanques, estátuas.

Esta resina apresenta um ciclo de cura mais rápido, interessante para quem têm poucos moldes em produção e precisa ter boa produtividade.

Na fabricação de sinalizadores rodoviários (tachões, tachinhas) deverá ser flexibilizada para ter propriedade de resiliência. Consultar o departamento técnico da AraAshland.

A resina padrão da família AZ 3.7 aceita como produtos modificadores, corantes na forma pura ou pigmentos na forma de pastas de poliéster não reativo, promotores ou inibidores especiais para acelerar ou retardar a cura, e outros.

Em caso extremo de haver necessidade de adicionar estireno, NÃO EXCEDER 2%. Há necessidade de testes para identificar o grau de aceitação de cada um desses aditivos.

Certamente, a adição deles afeta as características da resina padrão. Em caso de dúvidas, consultar o departamento técnico da AraAshland.

PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 3.7 - Padrão

Viscosidade Brookfield (25°C/LVF sp 2/12 rpm), cps 650-800

Gel Time (25°C c/ 1,0 g MEK-P em 100 g resina), minutos 10' - 15'

Intervalo Pico, minutos max. 12'

Pico Exotérmico, °C max. 180°C

Índice de Acidez (em solução), mg KOH/g de resina max. 25

Aspecto opaco

Cor branca

Teor de Sólidos, % min. 65 %

®Marca registrada da Ara Química S. A.

PROPRIEDADES MECANICAS – VALORES TÍPICOS*

PROPRIEDADES FÍSICAS DA RESINA CURADA A 25 °C SEM REFORÇO (pós cura de 2 horas à 80°C:**

TESTE VALOR MÉTODO DE TESTE

Resistência à Tração, psi 7.800 ASTM D-638

Módulo na Tração, psi X105 2,8 ASTM D-638

Alongamento, % 3,0 ASTM D-638

Resistência à Flexão, psi 12.000 ASTM D-790

Módulo na Flexão, psi X105 3,6 ASTM D-790

Temperatura de Distorção Térmica, °C 75 ASTM D-648

ANEXO B - DADOS DOS CORPOS DE PROVA

Tabela 7.1 – Dimensões dos corpos de prova grupo “A”

n° CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)
1	8,29	40,11	14,06	96	2,020
2	7,68	40,11	14,06	86	1,994
3	8,09	39,64	14,06	89	1,998
4	7,85	39,41	14,06	80	1,848
5	8,34	40,15	14,06	92	1,965
6	7,87	39,55	14,06	86	1,982
7	8,09	40,28	14,06	90	1,971
8	7,78	39,41	14,06	90	2,050
9	8,00	39,83	14,06	79	1,765
10	8,00	39,83	14,06	83	1,854
11	8,00	39,83	14,06	84	1,876
12	8,00	39,83	14,06	89	1,988
13	8,00	39,83	14,06	91	2,033
14	8,00	39,83	14,06	92	2,055
15	8,00	39,83	14,06	81	1,809
16	8,00	39,83	14,06	86	1,921
17	8,00	39,83	14,06	93	2,077
18	8,00	39,83	14,06	93	2,078
19	8,00	39,83	14,06	89	1,988
20	8,00	39,83	14,06	91	2,058
21	8,00	39,83	14,06	37	0,837
22	8,00	39,83	14,06	83	1,854
23	8,00	39,83	14,06	89	1,988
24	8,00	39,83	14,06	84	1,876
25	8,00	39,83	14,06	95	2,122
Média	8,000	39,831	14,060	85,920	1,963
Desvio Padrão	0,130	0,197	0,000	11,191	0,244
C.V.	2%	0%	0%	13%	12%

Tabela 7.2 - Dimensões dos corpos de prova grupo "B"

n° CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)
1	7,57	39,42	138,63	84	2,031
2	8,01	40,10	138,88	90	2,018
3	7,59	39,88	137,74	79	1,904
4	7,86	39,78	137,48	86	2,002
5	7,95	39,77	139,03	87	1,979
6	7,99	39,45	139,15	81	1,841
7	7,67	39,81	138,65	82	1,945
8	7,67	39,81	138,65	82	1,945
9	7,67	39,81	138,65	82	1,945
10	7,67	39,81	138,65	82	1,945
11	7,67	39,81	138,65	82	1,945
12	7,84	39,79	140,04	84	1,915
13	7,34	40,15	138,18	76	1,867
14	7,67	39,81	138,65	82	1,945
15	7,67	39,81	138,65	82	1,945
16	7,85	39,47	139,03	87	2,020
17	7,67	39,81	138,65	82	1,945
18	7,35	40,59	140,25	78	1,874
19	7,68	40,04	137,84	79	1,872
20	7,79	39,09	138,73	85	2,013
21	7,35	40,40	138,40	79	1,916
22	7,25	39,46	137,74	78	1,980
23	7,67	39,81	138,65	82	1,945
24	7,67	39,81	138,65	82	1,945
25	7,67	39,81	138,65	82	1,945
Média	7,671	39,811	138,648	82,357	1,945
Desvio Padrão	0,195	0,307	0,614	3,175	0,050
C.V.	3%	1%	0%	4%	3%

Tabela 7.3 - Dimensões dos corpos de prova grupo "C"

n° CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)
1	0,79	4,06	13,53	78,00	1799
2	0,78	4,09	14,47	78,80	1713
3	0,79	3,97	14,47	77,10	1700
4	0,80	3,99	13,62	78,70	1823
5	0,81	4,07	14,05	81,70	1763
6	0,80	3,98	13,75	82,00	1875
7	0,80	4,02	13,10	72,70	1724
8	0,81	4,05	13,42	77,70	1766
9	0,80	4,03	13,82	80,40	1802
10	0,80	4,06	14,03	84,30	1859
11	0,80	4,06	13,36	78,60	1821
12	0,79	4,02	13,49	76,40	1778
13	0,81	4,05	13,40	79,50	1819
14	0,80	4,09	13,13	76,70	1796
15	0,82	4,01	13,12	80,20	1863
16	0,81	4,05	13,88	82,00	1803
17	0,81	3,99	13,43	81,20	1864
18	0,82	4,00	13,46	79,30	1808
19	0,80	4,01	14,00	82,00	1819
20	0,81	4,02	13,44	80,40	1843
21	0,82	4,09	13,60	80,30	1756
22	0,81	3,97	13,35	77,50	1815
23	0,80	4,03	13,00	80,80	1929
24	0,79	4,02	13,88	85,90	1952
25	0,81	4,04	13,10	79,20	1845
Média	8,023	40,298	135,942	79,656	1813,348
Desvio Padrão	0,195	0,307	0,614	3,175	0,050
C.V.	3%	1%	0%	4%	3%

Tabela 7.4 - Dimensões dos corpos de prova grupo "D"

n° CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)
D1	6,95	39,40	137,00	78	2,079
D2	8,23	39,30	137,00	92	2,075
D3	8,25	39,20	139,00	94	2,091
D4	7,20	40,00	138,00	83	2,088
D5	7,33	39,20	139,00	83	2,077
D6	8,15	39,00	138,00	92	2,097
D7	7,28	39,40	139,00	82	2,056
D8	7,42	40,10	138,00	85	2,071
D9	8,00	39,10	139,00	91	2,093
D10	7,25	40,20	137,00	83	2,079
D11	7,77	40,00	139,00	90	2,084
D12	8,05	39,40	137,00	89	2,048
D13	7,58	39,10	137,00	84	2,068
D14	7,97	40,00	141,00	91	2,025
D15	6,90	40,10	138,00	79	2,069
D16	8,00	39,00	138,00	90	2,090
D17	6,77	39,30	141,00	77	2,054
D18	6,37	39,20	138,00	72	2,091
D19	6,75	39,60	137,00	77	2,103
D20	7,55	39,20	139,00	88	2,139
D21	7,02	39,00	138,00	81	2,145
D22	7,17	39,50	139,00	84	2,135
D23	7,05	40,20	137,00	80	2,060
D24	7,88	39,20	137,00	89	2,102
D25	8,12	39,00	141,00	91	2,039
D26	7,42	39,70	138,00	85	2,092
D27	7,72	39,70	141,00	89	2,060
Média	7,486	39,485	138,407	85,148	2,082
Desvio Padrão	0,507	0,427	1,327	5,558	0,029
C.V.	7%	1%	1%	7%	1%

Tabela 7.5 - Dimensões dos corpos de prova grupo "E"

n° CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)
E1	7,87	40,00	138,00	93	2,065
E2	7,60	39,30	139,00	88	2,059
E3	8,05	39,50	139,00	94	2,104
E4	7,78	39,30	139,00	90	2,032
E5	7,53	39,20	139,00	87	2,031
E6	7,85	39,70	137,00	90	2,137
E7	7,75	39,40	138,00	91	2,051
E8	7,70	39,70	138,00	90	2,021
E9	7,72	39,20	138,00	88	2,042
E10	7,47	40,30	137,00	88	2,093
E11	7,80	39,70	139,00	91	2,023
E12	7,63	39,20	139,00	86	1,987
E13	7,60	39,40	137,00	86	2,091
E14	7,85	39,00	138,00	90	2,017
E15	7,92	39,30	137,00	89	2,011
E16	7,77	39,40	139,00	91	2,039
E17	7,77	39,30	139,00	90	1,985
E18	7,87	39,30	139,00	91	1,987
E19	7,68	40,00	139,00	91	2,087
E20	7,75	39,30	137,00	87	2,071
E21	7,38	39,40	137,00	86	2,150
E22	7,58	40,00	139,00	89	2,096
E23	7,57	39,30	139,00	87	2,075
E24	7,53	40,00	138,00	89	2,072
E25	7,92	39,80	137,00	90	2,069
E26	7,63	40,30	137,00	89	2,041
E27	7,70	40,00	139,00	90	1,987
Média	7,71	39,57	138,19	89,296	2,053
Desvio Padrão	0,156	0,365	0,898	1,958	0,046
C.V.	2%	1%	1%	2%	2%

Tabela 7.6 -Dimensões dos corpos de prova grupo "F"

n° CP	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)
F1	7,65	39,00	141	89	2,075
F2	7,62	39,00	138	88	2,123
F3	7,48	40,00	139	88	2,083
F4	7,37	40,00	137	84	2,100
F5	7,48	39,50	139	84	2,040
F6	7,75	39,00	141	87	2,003
F7	7,70	39,50	137	86	2,012
F8	7,67	40,00	139	90	2,102
F9	7,37	39,50	139	84	2,040
F10	7,98	40,00	139	91	2,046
F11	7,72	39,50	139	86	2,034
F12	7,87	39,40	138	89	2,072
F13	7,98	40,00	138	91	2,061
F14	7,50	39,50	138	85	1,999
F15	8,03	39,50	137	87	2,010
F16	7,90	40,00	138	90	2,013
F17	7,83	39,50	137	87	2,035
F18	7,98	40,00	140	91	2,031
F19	7,45	40,00	139	86	2,062
F20	7,97	40,00	137	91	2,050
F21	7,90	39,50	138	88	1,993
F22	7,78	39,30	138	88	2,080
F23	7,87	39,20	138	88	2,033
F24	7,15	39,20	137	80	2,069
F25	7,70	39,50	139	87	2,058
F26	7,95	40,00	141	93	2,061
F27	7,50	40,00	138	87	2,101
Média	7,709	39,615	138,48	87,593	2,051
Desvio Padrão	0,241	0,326	1,155	2,903	0,032
C.V.	3%	1%	1%	3%	2%

Tabela 7.7 - Tabela de dados obtidos grupo "A"

corpo de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Max Deflexão (mm)	momento fletor Maximo (KN*mm)	Modulo de Elasticidade Médio (GPa)	momento de inércia (mm ⁴)
1	0,52	32,81	1,45	14,33	6,02	1904,30
2	0,45	32,47	1,65	12,24	5,65	1514,10
3	0,55	36,39	1,61	15,05	6,17	1749,03
4	0,38	27,20	1,65	10,53	4,64	1588,67
5	0,46	23,45	1,45	12,65	5,13	1940,90
6	0,44	30,99	1,38	12,09	6,28	1606,53
7	0,42	20,00	0,71	8,41	7,64	1777,27
8	0,49	33,81	1,44	12,87	6,66	1546,55
9	0,37	25,07	1,62	10,18	4,26	1699,41
10	0,44	29,65	1,74	12,03	4,71	1699,41
11	0,41	27,86	1,36	11,31	5,64	1699,41
12	0,50	33,50	1,31	13,60	7,07	1699,41
13	0,44	29,68	0,99	12,05	8,24	1699,41
14	0,44	30,01	1,00	12,18	8,27	1699,41
15	0,40	27,40	1,64	11,12	4,59	1699,41
16	0,43	28,95	1,39	11,75	5,73	1699,41
17	0,46	31,08	1,37	12,62	6,28	1699,41
18	0,52	34,91	1,35	14,17	7,16	1699,41
19	0,48	34,63	1,30	14,05	7,33	1699,41
20	0,51	34,63	1,30	14,05	7,33	1699,41
21	0,38	25,94	1,08	10,53	6,60	1699,41
22	0,39	26,56	1,26	10,78	5,83	1699,41
23	0,42	28,04	1,12	11,38	6,92	1699,41
24	0,46	31,02	1,50	12,59	5,71	1699,41
25	0,41	27,72	0,84	11,25	9,11	1699,41
Média	0,4468	29,7508	1,3404	12,1524	6,3588	1700,69
Desvio Padrão	0,049	3,954	0,264	1,529	1,240	88,359
C.V.	11%	13%	20%	13%	19%	5%

Tabela 7.8 - Tabela de dados obtidos grupo "B"

corpo de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Max Deflexão (mm)	momento fletor Maximo (KN*mm)	Modulo Elasticidade Médio (GPa)	momento de inércia (mm ⁴)
1	0,34	24,88	0,55	9,37	12,13	1425,03
2	0,53	33,74	0,65	14,47	13,14	1717,14
3	0,44	31,50	1,99	12,04	4,20	1450,06
4	0,53	35,50	1,02	14,52	8,91	1606,65
5	0,64	41,77	0,99	17,50	10,71	1665,24
6	0,39	25,51	1,36	10,69	4,73	1673,54
7	0,62	43,56	1,52	17,01	7,55	1497,37
8	0,35	24,31	1,01	9,49	6,30	1497,37
9	0,45	31,94	0,92	12,47	9,13	1497,37
10	0,41	28,70	1,32	11,20	5,72	1497,37
11	0,57	39,95	1,15	15,60	9,10	1497,37
12	0,46	30,76	0,92	12,54	8,64	1597,87
13	0,52	39,61	1,14	14,28	9,51	1322,93
14	0,43	29,95	0,83	11,69	9,50	1497,37
15	0,42	29,31	0,80	11,44	9,64	1497,37
16	0,45	30,83	1,00	12,50	7,91	1591,09
17	0,37	26,23	1,51	10,24	4,57	1497,37
18	0,33	24,60	1,25	8,98	5,41	1340,17
19	0,52	36,62	1,21	14,41	7,96	1511,46
20	0,42	29,54	1,53	11,66	5,00	1536,95
21	0,41	31,29	1,59	11,36	5,40	1333,90
22	0,41	32,90	1,27	11,37	7,23	1252,95
23	0,43	30,04	1,95	11,73	4,05	1497,37
24	0,47	32,80	1,07	12,81	8,03	1497,37
25	0,54	38,32	1,35	14,96	7,47	1497,37
Media	0,458	32,166	1,196	12,573	7,678	1499,842
Desvio Padrão	0,082	5,414	0,358	2,263	2,444	109,740
C.V.	18%	17%	30%	18%	32%	7%

Tabela 7.9 - Tabela de dados obtidos grupo "C"

corpo de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Max Deflexão (mm)	momento fletor Maximo (KN*mm)	Modulo Elasticidade Médio (GPa)	momento de inércia (mm ⁴)
1	0,49	39,55	3,36	13,56	4,55	1663,43
2	0,38	33,03	2,41	10,35	6,14	1600,40
3	0,50	43,82	2,35	13,75	8,24	1630,32
4	0,36	29,03	1,41	9,85	7,99	1669,84
5	0,43	33,50	1,42	11,69	9,56	1808,27
6	0,52	41,99	2,53	14,23	6,55	1691,77
7	0,30	23,01	1,95	8,29	4,23	1716,91
8	0,42	32,18	2,46	11,67	4,85	1792,28
9	0,45	35,98	2,15	12,36	6,64	1730,68
10	0,56	45,87	2,22	15,42	8,51	1706,41
11	0,35	27,40	1,48	9,67	6,90	1705,99
12	0,38	30,11	1,75	10,34	6,58	1669,74
13	0,52	40,09	2,55	14,42	5,85	1765,86
14	0,42	32,29	1,87	11,68	6,23	1717,76
15	0,38	28,12	1,37	10,56	7,21	1833,92
16	0,57	44,39	2,60	15,57	6,77	1792,28
17	0,39	30,02	1,14	10,81	9,76	1786,75
18	0,53	40,00	2,18	14,62	6,85	1804,03
19	0,53	43,23	2,78	14,67	6,31	1735,43
20	0,46	35,66	2,16	12,76	6,16	1765,85
21	0,47	34,45	2,60	12,85	4,96	1897,62
22	0,50	38,73	2,34	13,70	6,10	1727,56
23	0,47	35,62	2,18	12,95	5,74	1718,61
24	0,47	39,16	2,28	12,92	6,98	1640,39
25	0,44	32,28	1,43	12,03	7,92	1801,58
Media	0,452	35,580	2,119	12,429	6,703	1734,948
Desvio Padrão	0,070	5,983	0,531	1,929	1,399	70,145
C.V.	16%	17%	25%	16%	21%	4%

Tabela 7.10 – Tabela de dados obtidos grupo “D”

corpo de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Max Deflexão (mm)	momento fletor Maximo (KN*mm)	Módulo Elasticidade de Médio (GPa)	Módulo de Elasticidade Máximo (GPa)	momento de inércia (mm ⁴)
D1	0,41	34,70	1,39	11,17	8,11	8,50	1126
D2	0,46	28,22	0,76	12,73	11,45	11,45	1873
D3	0,55	34,30	0,92	15,07	9,70	10,42	1801
D4	0,40	30,24	1,02	11,04	8,40	9,43	1351
D5	0,44	32,74	1,11	12,03	8,88	9,33	1378
D6	0,51	33,73	0,78	14,03	11,06	12,37	1664
D7	0,46	35,96	1,22	12,58	7,80	8,72	1277
D8	0,43	30,40	0,87	11,73	9,95	10,38	1467
D9	0,51	32,16	0,94	14,09	8,12	8,94	1797
D10	0,41	32,23	0,87	11,19	11,56	12,76	1250
D11	0,41	26,36	0,74	11,25	9,91	11,19	1707
D12	0,46	28,05	0,87	12,69	8,68	9,49	1877
D13	0,44	33,21	0,99	12,18	10,49	12,41	1375
D14	0,51	32,98	0,90	14,07	9,64	10,22	1707
D15	0,35	28,23	0,99	9,51	9,50	10,94	1196
D16	0,47	29,89	0,90	13,06	9,07	9,85	1792
D17	0,40	34,11	1,30	10,95	7,85	8,57	1123
D18	0,33	31,27	1,15	9,17	9,32	10,00	982
D19	0,34	30,94	1,02	9,44	8,81	10,87	1038
D20	0,46	32,06	0,98	12,74	8,94	9,61	1550
D21	0,36	31,02	0,96	9,88	8,00	10,04	1115
D22	0,43	33,43	1,09	11,73	8,77	9,50	1281
D23	0,42	34,91	1,08	11,46	10,07	10,48	1149
D24	0,49	32,08	0,85	13,41	10,89	11,96	1673
D25	0,49	32,25	0,85	13,41	10,95	12,02	1664
D26	0,40	28,81	0,84	11,01	10,10	10,62	1452
D27	0,47	30,49	0,90	12,91	9,55	10,25	1694
Média	0,437	31,658	1,020	11,040	8,400	9,430	1351
Desvio Padrão	0,057	2,293	0,135	1,573	1,047	1,173	271,401
C.V.	13%	7%	13%	14%	12%	12%	20%

Tabela 7.11 - Tabela de dados obtidos grupo "E"

corpo de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Max Deflexão (mm)	momento fletor Maximo (KN*mm)	Módulo de Elasticidade Médio (GPa)	Módulo de Elasticidade Máximo (GPa)	momento de inércia (mm ⁴)
E1	0,40	25,60	0,71	10,92	9,71	11,86	1707
E2	0,39	27,56	0,86	10,70	9,53	10,11	1495
E3	0,46	29,26	0,67	12,64	12,54	13,59	1749
E4	0,45	29,73	0,88	12,46	9,86	10,49	1677
E5	0,39	28,55	0,88	10,77	10,47	12,20	1434
E6	0,47	32,33	0,79	13,02	12,33	13,12	1570
E7	0,45	30,68	0,76	12,26	12,10	12,84	1558
E8	0,47	32,27	0,90	12,99	9,24	10,36	1570
E9	0,38	27,24	0,78	10,55	11,01	12,28	1491
E10	0,41	29,18	0,90	11,32	7,34	9,41	1474
E11	0,43	27,69	0,76	11,73	10,85	11,82	1694
E12	0,47	32,28	0,99	12,83	9,86	10,76	1550
E13	0,44	28,42	0,80	11,06	10,89	11,81	1499
E14	0,48	31,88	0,80	13,26	11,46	12,13	1664
E15	0,45	29,36	0,83	12,31	10,90	12,52	1677
E16	0,45	29,99	0,86	12,29	8,65	10,05	1619
E17	0,44	29,50	0,74	12,06	11,81	12,76	1615
E18	0,49	32,28	0,85	13,53	9,82	10,59	1677
E19	0,35	24,31	0,66	9,61	11,42	13,06	1522
E20	0,43	29,37	0,92	11,70	8,30	9,22	1554
E21	0,38	29,68	0,83	10,39	10,72	11,52	1277
E22	0,44	31,56	0,98	12,15	8,45	9,49	1463
E23	0,38	27,51	0,82	10,41	11,01	13,75	1438
E24	0,43	30,10	0,95	11,90	8,15	9,28	1522
E25	0,47	30,73	0,82	13,05	9,56	10,49	1698
E26	0,43	29,53	0,79	11,76	11,75	13,88	1533
E27	0,43	30,91	0,84	11,90	11,40	12,13	1463
Média	0,432	29,537	0,829	11,836	10,338	11,538	1562,6
Desvio Padrão	0,036	1,896	0,083	1,010	1,420	1,470	108,129
C.V.	8%	6%	10%	9%	14%	13%	7%

Tabela 7.12 - Tabela de dados obtidos grupo "F"

corpo de prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima (MPa)	Max Deflexão (mm)	momento fletor Maximo (KN*mm)	Módulo de Elasticidade Médio (GPa)	Módulo de Elasticidade Máximo (GPa)	momento de inércia (mm ⁴)
F1	0,39	26,76	0,83	10,78	9,56	11,35	1542
F2	0,40	34,16	0,83	10,86	10,67	13,03	1484
F3	0,36	26,04	0,93	9,99	9,33	11,20	1463
F4	0,45	28,14	0,89	12,36	10,06	10,75	1297
F5	0,35	32,10	0,90	9,60	9,00	10,47	1389
F6	0,40	28,80	0,93	10,98	8,50	9,15	1602
F7	0,46	26,47	0,99	12,53	9,31	10,15	1623
F8	0,41	26,64	1,00	11,29	9,76	11,84	1522
F9	0,34	32,34	0,88	9,46	9,47	11,06	1389
F10	0,41	30,51	0,72	10,50	10,40	12,26	1707
F11	0,46	32,18	1,11	12,68	8,99	9,88	1503
F12	0,45	25,74	1,09	12,40	8,21	8,92	1619
F13	0,50	27,36	1,04	13,67	8,62	9,36	1707
F14	0,35	27,38	0,90	9,53	8,53	10,66	1562
F15	0,42	28,55	0,97	11,63	8,23	8,73	1685
F16	0,41	27,97	0,82	11,39	9,88	11,77	1771
F17	0,42	31,15	0,80	11,53	10,53	11,66	1623
F18	0,43	29,67	0,80	11,88	10,59	12,59	1707
F19	0,42	30,97	1,02	11,53	9,85	11,29	1406
F20	0,46	28,27	1,00	12,47	8,45	9,12	1771
F21	0,46	26,95	1,04	12,72	8,25	8,87	1749
F22	0,41	29,71	0,99	11,22	7,81	8,56	1554
F23	0,40	27,36	0,91	10,90	10,06	11,28	1673
F24	0,36	27,28	1,15	9,92	8,77	10,44	1219
F25	0,39	30,36	0,83	10,68	9,13	9,79	1503
F26	0,42	32,34	1,11	11,50	8,51	10,46	1707
F27	0,41	34,16	0,99	11,39	8,64	9,40	1406
Média	0,413	29,236	0,943	11,311	9,226	10,520	1562
Desvio Padrão	0,041	2,335	0,109	1,111	0,804	1,178	152,827
C.V.	10%	8%	12%	10%	9%	11%	10%