

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RAFAEL ANDRÉ ARAUJO CRUZ**

**ANÁLISE DA REUTILIZAÇÃO DO VIDRO MOÍDO PARA  
FABRICAÇÃO DE MÁRMORE SINTÉTICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**RAFAEL ANDRÉ ARAUJO CRUZ**

**ANÁLISE DA REUTILIZAÇÃO DO VIDRO MOÍDO PARA  
FABRICAÇÃO DE MÁRMORE SINTÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento Acadêmico de Mecânica do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

**Orientadora:**

*Prof. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto*

**PONTA GROSSA**

**2017**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Bacharelado em Engenharia Mecânica



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA REUTILIZAÇÃO DO VIDRO MOÍDO PARA FABRICAÇÃO DE MÁRMORE SINTÉTICO**

por

**RAFAEL ANDRE ARAUJO CRUZ**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 16 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Profa. Ma.Heliety Rodrigues Borges Barreto**

Orientadora

**Profa. Ma.Sandra Mara Kaminski Tramontin**

Membro Titular

**Prof. Me.Pericles Secco Cancian**

Membro Titular

**Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares**

Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**

Coordenador do Curso

Dedico este Trabalho de Conclusão aos meus pais, *André* e *Edimar*, meus irmãos, *Lucas* e *Renan*, minha noiva *Monize*, meus avós, tios e primos.

*The success of life is not measured by the way you won, but by the difficulties overcome on the way.*

O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que você superou pelo caminho.

*Abraham Lincoln*

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com um pouco de si para que este trabalho se tornasse possível.

Agradeço a DEUS pela oportunidade de realizar este trabalho, por ter me dado saúde, paciência, sabedoria e força para superar as dificuldades.

Agradeço a minha mãe por toda a dedicação e atenção, muitas vezes abrindo mão de fazer coisas para si e se dedicar a mim, mesmo sem eu pedir nada e por sempre me incentivar e encorajar nas dificuldades.

Ao meu pai que esteve sempre ao meu lado nas dificuldades, me ajudando, encorajando, aconselhando e com dedicação total.

A toda minha família por ter me dado amizade, carinho e o suporte necessário para a conclusão de mais esta importante etapa da minha vida.

A minha orientadora pela oportunidade, incentivo, apoio, confiança e disponibilidade para elaboração deste Trabalho.

Aos membros da banca examinadora, por se fazerem disponíveis para a avaliação deste Trabalho.

A UTFPR pela bolsa auxílio ao TCC, a qual foi muito importante para realização deste trabalho, pelo ambiente receptivo e oportunidades de crescimento acadêmico que me proporciona desde 2011.

## RESUMO

CRUZ, Rafael André Araujo. **Análise da reutilização do vidro moído para fabricação de mármore sintético**. 2017. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Este trabalho aborda a questão de materiais reforçados com vidro moído. O objetivo é caracterizar o potencial do vidro moído como elemento de reforço a ser adicionado à resina poliéster. O trabalho busca caracterizar o desempenho dos compósitos formados, identificando as alterações decorrentes da incorporação em função do comportamento e resistência mecânica. Os objetivos são verificar a potencialidade de utilização do vidro em termos de trabalhabilidade e resistência mecânica; definir como deve ser a forma de incorporação, verificar o aspecto estético após a cura em matriz e determinar a resistência à flexão comparando com corpos-de-prova com adição de elementos reforçantes variados. Como vantagens da incorporação de vidro moído, constata-se uma facilidade na busca da matéria-prima, reduzindo o custo de produção.

**Palavras-chave:** vidro moído, resina poliéster, resistência mecânica.

## ABSTRACT

CRUZ, Rafael André Araujo. **Analysis of the reuse of ground glass for the manufacture of synthetic marble.** 2017. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

This paper approaches the issue of materials reinforced with ground glass. The objective is to characterize the potential of the ground glass as a reinforcement element to be mixed to polyester resin. This paper aims at characterizing the performance of the formed composites identifying the changes resulting from the incorporation in face of the mechanical resistance. The objectives are to verify the potentiality of the usage of the ground glass in terms of workability and mechanical resistance; to define how the incorporation should be made, to verify the aesthetic appearance after curing in the matrix to determine the flexural strength in comparison with addition of various reinforcing elements. As an advantage of the incorporation of ground glass, there is easiness in the search for the raw material, reducing the cost of production.

**Keywords:** ground glass, polyester resin, mechanical resistance.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina de corte com fio helicoidal .....	19
Figura 2 - Fio diamantado com espaçadores metálicos e molas.....	20
Figura 3 - Aspecto linear após corte com fio diamantado .....	20
Figura 4 - Principais estados exportadores em 2016 .....	21
Figura 5 -Taxas de variação do faturamento das exportações de rochas ornamentais 2015-2016 .....	22
Figura 8 - Exportações brasileiras por país de destino .....	23
Figura 9 - Importações brasileiras acumuladas de materiais rochosos naturais .....	24
Figura 10 - Importações brasileiras acumuladas de materiais rochosos artificiais ....	25
Figura 15 – Ligações químicas dos poliésteres insaturados .....	29
Figura 16 - Representação esquemática de um moinho de bolas .....	31
Figura 17 - Representação de um agitador eletromagnético e peneiras .....	32
Figura 18 - Representação de ensaio de flexão em três pontos .....	33
Figura 19 – Fluxograma dos processos realizados .....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos poros de acordo com as regras da IUPAC .....	34
Tabela 2 – Massas do grupo A de amostras .....	39
Tabela 3 – Massas do grupo B de amostras .....	39
Tabela 4 – Massas do grupo C de amostras.....	40
Tabela 5 - Distribuição do tamanho das partículas do pó de vidro.....	50
Tabela 6 – Ensaio de Flexão 3 pontos do grupo A.....	53
Tabela 7 – Ensaio de Flexão 3 pontos do grupo B.....	54
Tabela 8 – Ensaio de Flexão 3 pontos do grupo C .....	56
Tabela 9 – Ensaio de Flexão 3 pontos em resina poliéster pura.....	59
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de flexão com carga de wollastonita.....	61
Tabela 14 – Amostras do grupo A.....	62
Tabela 15 – Amostras do grupo B.....	62
Tabela 16 – Amostras do grupo C.....	62

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Componentes básicos do moinho de bolas Servitech CT 240/A .....	37
Fotografia 2 - Mesa Vibratória Vibrotech CT-025 .....	38
Fotografia 7 - Balança analítica Powerpack PW-1000 .....	41
Fotografia 3 - Resina e catalisadores .....	41
Fotografia 4 - Matriz para moldagem da massa de mármore sintético de material acrílico .....	42
Fotografia 5 – Massa para moldagem .....	43
Fotografia 6 - Moldagem da massa de mármore sintético .....	43
Fotografia 8 - Politriz CT-025 .....	44
Fotografia 9 - Lixamento da amostra .....	44
Fotografia 10 – Máquina Universal de Ensaio .....	45
Fotografia 11 - Massa das amostras secas .....	47
Fotografia 12 – Massa das amostras imersas em água .....	48
Fotografia 13 – Amostras com rebarbas (Antes do lixamento) .....	51
Fotografia 14 - Amostras sem rebarbas (Após o lixamento) .....	52
Fotografia 15 – Amostra em processo de flexão .....	52
Fotografia 16 – Amostras do grupo A .....	53
Fotografia 17– Amostras do grupo A após ensaio de flexão .....	54
Fotografia 18 – Amostras do grupo B .....	54
Fotografia 19 – Amostras do grupo B após ensaio de flexão .....	55
Fotografia 20 – Amostras do grupo C .....	55
Fotografia 21 – Amostras do grupo C após ensaio de flexão .....	56

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tamanho de grão de vidro moído em função do tamanho das peneiras	51
Gráfico 2 – Tensão Máxima em MPa para os grupos de amostra A,B e C .....	57
Gráfico 3 – Deflexão para os grupos de amostra A,B e C .....	57
Gráfico 4 – Ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster pura .....	58
Gráfico 5 – Curva do ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster com vidro moído .....	59

Gráfico 6 – Ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster pura .....	60
Gráfico 7 – Curva do ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster pura .....	60
Gráfico 8 – Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ).....	63
Gráfico 9 – Porosidade.....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Romanos

<i>Mr</i>	Módulo de Ruptura	[N/m <sup>2</sup> ]
<i>Mf</i>	Momento Fletor	[N/m <sup>2</sup> ]
E	Módulo de Young	[N/m <sup>2</sup> ]

### Subscritos

<i>mu</i>	Massa úmida
<i>ms</i>	Massa Seca
<i>mi</i>	Massa Imersa
<i>dap</i>	Densidade Aparente
<i>pa</i>	Porosidade Aparente
<i>dl</i>	Densidade Líquida
<i>Fe<sub>2</sub>O</i>	Hematite
<i>Fe<sub>2</sub>OH<sub>2</sub></i>	Limonite
<i>MnO<sub>2</sub></i>	Óxido de Manganês
<i>FeS</i>	Pirite Magnética
<i>SiO<sub>2</sub></i>	Sílica
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	Óxido de Sódio
<i>CaO</i>	Óxido de Cálcio
<i>rpm</i>	Rotações por Minuto
<i>RTM</i>	Resin Transfer Molding



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivo Específico .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	EXPLORAÇÃO DOS MÁRMORES NATURAIS .....	18
2.2	MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL E NO MUNDO.....	21
2.2.1	Exportações.....	22
2.2.2	Importações .....	24
2.3	TIPOLOGIA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS E SUA APLICABILIDADE .....	25
2.4	MÁRMORE SINTÉTICO .....	26
2.4.1	Composição Química dos Mármore Sintéticos .....	28
2.4.2	Sistemas para Fabricação das Amostras .....	31
2.5	METODOLOGIA PARA ANÁLISE PRÁTICA.....	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	35
3.2	FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	36
3.2.1	Processo de Moagem do Vidro.....	36
3.2.2	Caracterização do Pó de Vidro .....	37
3.2.3	Adição de Resina.....	41
3.2.4	Moldagem .....	41
3.2.5	Lixamento das Amostras .....	43
3.3	CARACTERIZAÇÃO.....	44
3.3.1	Ensaio de Flexão em Três Pontos .....	45
3.3.2	Cálculo da porosidade aparente ( $P_a$ ).....	47
3.3.3	Cálculo da densidade aparente ( $D_a$ ).....	48

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
4.1	ANÁLISE PRÁTICA .....	50
4.1.1	Caracterização do Pó .....	50
4.1.2	Resultado do Lixamento das Amostras .....	51
4.1.3	Resistência Mecânica à Flexão .....	52
4.1.4	Resultado da porosidade e densidade das amostras .....	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mármore natural apresenta uma série de limitações quanto ao seu uso, entre as quais: suscetibilidade às manchas e facilidade de quebra. Para superar esse ponto negativo, optou-se pela fabricação do mármore sintético ou artificial. Busca-se no mármore sintético alta versatilidade, beleza, alta resistência mecânica, excelente resistência a intempéries, resistência à flexão, melhorando a dureza artificial e principalmente custo baixo por ter um processamento simples (GUERREIRO, 2000).

As principais características estéticas dos mármore bem como outras rochas ornamentais, surgem a partir da interação de três fatores fundamentais, tais como: cor, textura e granulometria. Essas características servirão como base para o valor comercial agregado a essas pedras.

“A cor do mármore tem diversas origens, derivando, na maior parte dos casos, da existência de impurezas, sob a forma de óxidos, na estrutura das rochas” (GUERREIRO, 2000).

Os tipos de óxidos e outros componentes presentes, que assumem um papel importante na definição da cor do mármore são: Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}$ ), Limonite ( $\text{Fe}_2\text{OH}_2$ ), Óxido de Manganês ( $\text{MnO}_2$ ), Pirite magnética ( $\text{FeS}$ ), entre outros (GUERREIRO, 2000).

Os mármore são classificados como: Homogêneos; Venados; Nuvoados; Brechificados e Arabescados. Essas características têm origem das texturas às quais estão diretamente ligadas à distribuição espacial dos elementos que constituem a rocha como: minerais, clastos, entre outros (GUERREIRO, 2000).

Em termos de tamanho de grão (granulometria) os mármore podem ser divididos em três classes: grão fino, grão médio, grão grosso. Grão fino se dá quando os cristais ou elementos são impossíveis de identificar a olho nu. Quando os cristais e outros elementos dos minerais são possíveis de serem identificados a olho nu e apresentarem tamanho de grão na ordem de um milímetro, se dá o nome de grão médio. Grão grosso (ou grosseiro) os cristais apresentam tamanho de grão

elevado na ordem de dois milímetros ou mais, sendo possível a visualização a olho nu (GUERREIRO, 2000).

Em termos de características técnicas, as quais serão importantes sob o ponto de vista da aplicação do mármore, temos como principais: petrografia, composição mineralógica, composição química e propriedades físico-mecânicas. A petrografia está ligada diretamente à gênese da rocha e dos minerais que a constituem. A composição mineralógica mostra as características dos minerais presentes na rocha, sendo uma condição importante na previsão de alterações estéticas como: variação de cor, vulnerabilidade a manchas, etc. A composição química define o tipo e porcentagem dos elementos químicos presentes nas rochas. Fornece informações de impurezas presentes no material, além da possibilidade da utilização do mármore em alguns ambientes com alto grau de corrosão, poluição, alta e baixa temperatura, entre outros. As propriedades físico-mecânicas fornecerão informações sob o ponto de vista da sua funcionalidade e durabilidade. Essas informações são obtidas através de ensaios destrutíveis e não-destrutíveis. Elas são do tipo: resistência à compressão, resistência à flexão, resistência ao impacto, resistência ao desgaste, porosidade, entre outras (GUERREIRO, 2000).

Apesar das várias vantagens oferecidas pelo mármore sintético, este também apresenta certas desvantagens. Por exemplo, a superfície de mármore por ter uma sensibilidade maior a manchas alguns cuidados devem tomados para evitar colocar objetos sobre ele que possam causar arranhões.

As matérias-primas necessárias para a fabricação dos mármore sintéticos são: resina, enchimentos como sílica, hidróxido de alumínio ou carbonato de cálcio. Estes materiais conhecidos como enchimento agem como ligantes e fornecem a resistência necessária ao mármore. As suas composições são cerca de 12 a 15%. Com base nesses enchimentos os mármore podem ser do tipo acrílico ou poliéster Bera et al. (2012).

Conforme a classificação do mercado, os principais tipos de rochas conhecidas são os granitos e os mármore. Além dessas rochas também conhecidas como ornamentais, pois de acordo com Frascá (2003) as rochas ornamentais são materiais rochosos aproveitados pela sua aparência estética (de onde vem seu valor agregado) e utilizados como elemento decorativo em trabalhos



artísticos e como material para construção civil, há uma gama de outras rochas, as quais fazem parte das rochas ornamentais, são elas: quartzitos, arenitos, ardósias e conglomerados. Os quartzitos e arenitos são rochas compostas por quartzo, tendo assim alta resistência ao risco (dureza Mohs 7) e ao desgaste abrasivo. As ardósias são rochas metamórficas compostas essencialmente de mica (muscovita-serecita), quartzo e clorita. Os conglomerados são também rochas sedimentares, que diferem dos arenitos por apresentar constituintes de maior diâmetro (superior a 2 mm). Tais constituintes, referidos como seixos e grânulos, compõem-se basicamente de fragmentos de quartzo e tipos variados de rocha. Os conglomerados utilizados como rocha ornamental geralmente se acham afetados por metamorfismo, o que lhes confere maior coesão entre grãos e maior resistência mecânica (RIBAHI, R.F. 2010).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A utilização do vidro moído como objeto de pesquisa como matéria-prima para fabricação do mármore sintético baseia-se na possibilidade de reutilização deste material quase que 100% de sua massa, não havendo limites para sua reciclagem mantendo sua forma original dependendo de sua composição química, evitando assim o acúmulo de vidro na natureza quando descartado de forma incorreta. Desta forma a análise da viabilidade da fabricação do mármore sintético a partir do vidro moído e da adição de resina se faz necessária para a comparação em relação ao processo de fabricação do mármore natural.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade da reutilização do vidro moído para fabricação de mármore sintético.

### 1.2.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos são:

- i) Projetar e construir Corpos de Prova (CPs) produzidos com diferentes tamanhos de material particulado em processo de moagem;
- ii) Testar e comparar os CPs pelos testes em sistemas mecânicos variados;
- iii) Comparar a resistência mecânica de diversos tipos de mármore com reforços artificiais;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura, a exploração de mármore naturais, aplicação dos mármore naturais e sintéticos, a classificação das rochas, os tipos de rochas e abordagem sobre vidro.

### 2.1 EXPLORAÇÃO DOS MÁRMORES NATURAIS

A origem da exploração dos mármore teve início já na antiguidade. Iniciada pelos Egípcios e Gregos, a exploração de forma intensa ocorreu na região de Carrara, onde o mármore começou a ser explorado pelos Romanos em meados do ano 89 a.C. tornando-se assim uma arte a prática da exploração de rochas. A pedra assumia então, um protagonismo importante ao nível da construção de edificações monumentais que caracterizaram aquelas épocas (GUERREIRO, 2000).

Michelangelo, Giambologna e Canova, entre outros, utilizaram o mármore de Carrara para erguer monumentos e estátuas de rara beleza, ainda hoje apreciadas. Através destes artistas famosos na época, o mármore ficou conhecido em todo o mundo, o qual estava localizado na zona de Carrara (“Montanha de Mármore”).

A exploração deste recurso nem sempre foi contínua durante o Renascimento (séc. XV e XVI) e mesmo no Neoclassicismo (séc. XVIII e XIX), devido, por um lado, às grandes desavenças entre os Romanos e os povos bárbaros que dominavam aquela região e detinham o poder sobre as pedreiras.

Uma nova técnica de desmonte do mármore empregando pólvora negra surgiu por volta do século XIX, trazendo grande expressão na exploração do mármore e aumentando os níveis de produção. Do material extraído, apenas uma pequena parte era aproveitada em nível comercial devido ao grande impacto nas

estruturas cristalinas do mármore, não suportando assim as ondas de explosão (GUERREIRO, 2000).

Em 1854, surge uma ferramenta capaz de minimizar as perdas e aumentar a produtividade. O francês Eugène Chevalier criou o fio helicoidal na forma de uma máquina para serrar a pedra que entusiasmou a indústria de exploração do mármore. Esta técnica promovia o corte da rocha graças à tensão que nela é exercida pelo fio helicoidal em movimento linear, tal como se pode observar na Figura 1.

**Figura 1 - Máquina de corte com fio helicoidal**



**Fonte: <http://talalenterprises.com/aboutus.aspx>. Acesso em: 17/03/2017**

Devido às melhorias sucessivas, o fio helicoidal começou a perder prestígio com o aparecimento, em 1978, da máquina de fio diamantado, a qual é capaz de realizar cortes em todas as direções (cortes verticais, horizontais e inclinados) com excelentes rendimentos.

A ferramenta cortante é composta por um cabo de aço onde são distribuídas pérolas diamantadas devidamente espaçadas por espaçadores metálicos e molas, como é possível observar na Figura 2.

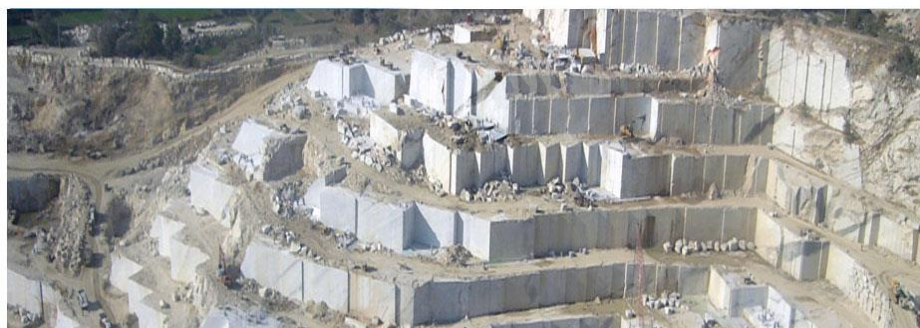
**Figura 2 - Fio diamantado com espaçadores metálicos e molas**



**Fonte:** <http://sanwadiamondtool.tumblr.com/>. Acesso em: 17/03/2017

Pode-se notar claramente na Figura 3 o aspecto linear após o processo de corte com a máquina com fio diamantado.

**Figura 3 - Aspecto linear após corte com fio diamantado**



**Fonte:** <http://www.optimaindia.com/services.html>. Acesso em: 17/03/2017

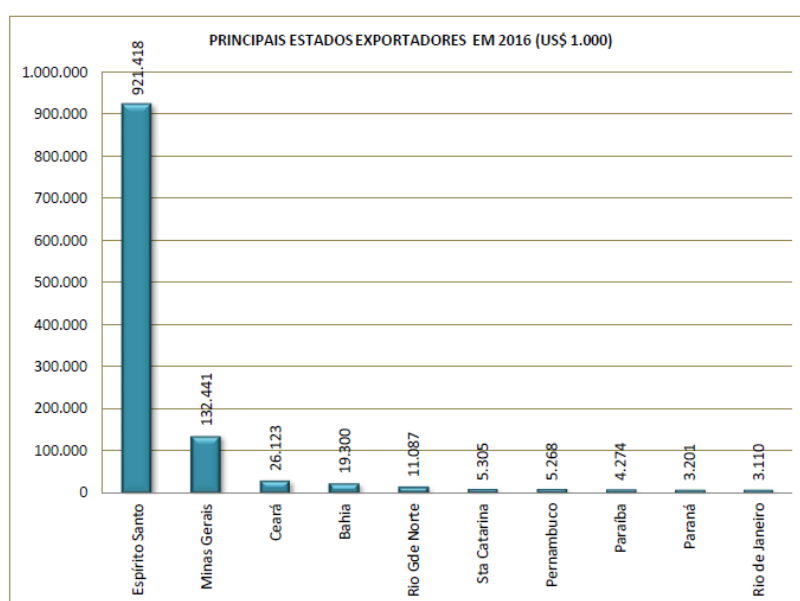
Hoje em dia a máquina de corte com fio diamantado encontra-se bastante difundida na indústria de extração e fabricação de mármore natural devido à sua simples engenharia e custo de manutenção. Apesar disso, novas técnicas estão surgindo no mercado a fim de facilitar o trabalho de exploração, quer seja a céu aberto ou mesmo no subsolo, como é o caso de máquinas elétricas leves, de alto rendimento e facilidade de manuseio.

## 2.2 MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL E NO MUNDO

Segundo ABIROCHAS (2017) o Brasil está entre os cinco maiores produtores mundiais de rochas ornamentais sendo responsável pela geração de mais de 100 mil empregos diretos no país. Empregadas como elemento estrutural de monumentos, na fabricação de concreto e na construção civil, o uso das rochas ornamentais teve seu início quando o homem utilizava as cavernas para abrigo e proteção.

Exportações de rochas ornamentais foram efetuadas por 18 estados brasileiros em 2016. Apenas os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte efetuaram vendas superiores a US\$ 10 milhões. Com 1,8 milhões t e US\$ 921,4 milhões, destacou-se novamente o Espírito Santo, que respondeu por 75% do volume físico e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras conforme mostra a Figura 4 (ABIROCHAS, 2017).

**Figura 4 - Principais estados exportadores em 2016**



Fonte: Abirochas (2017)

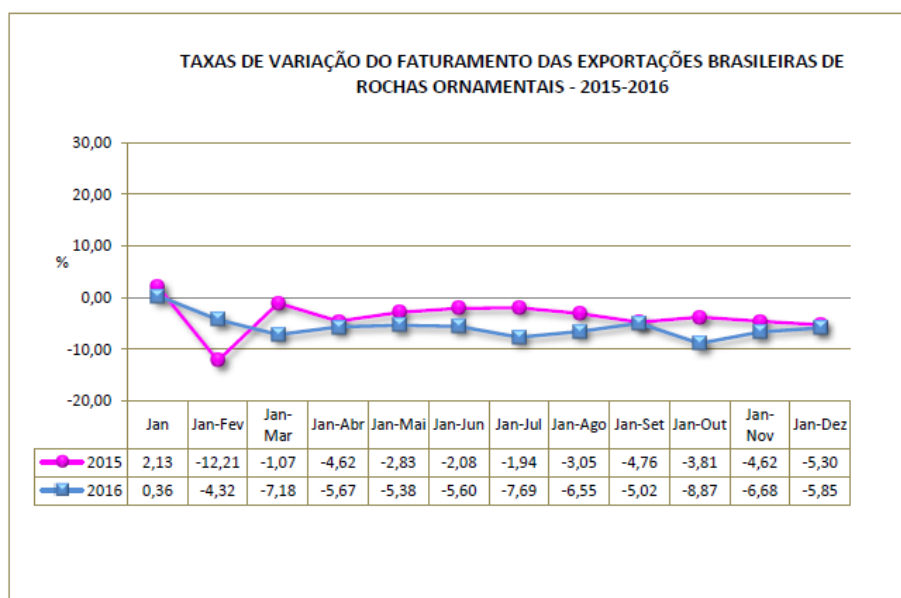
O Paraná foi o responsável pelo maior preço médio para produtos exportados (US\$ 1.120/t) seguindo de Rio de Janeiro (US\$ 770/t) e Ceará (US\$ 710/t). O maior preço médio do Paraná foi devido às exportações de chapas e rochas carbonáticas e produtos acabados (ABIROCHAS, 2017).

## 2.2.1 Exportações

As exportações brasileiras de produtos de rochas ornamentais e de revestimento fecharam o ano de 2016 com US\$ 1.138,3 milhões e 2,46 milhões t (ABICROCHAS, 2017).

Reproduzindo a mesma tendência de 2014 e 2015, estas exportações tiveram variação negativa no faturamento (-5,85%) e positiva no volume físico (+5,82%) conforme mostra a Figura 5 (ABIROCHAS, 2017).

**Figura 5 -Taxas de variação do faturamento das exportações de rochas ornamentais 2015-2016**



**Fonte: Abirochas (2017)**

### 2.2.1.1 Principais destinos

O Brasil exportou rochas ornamentais para 120 países em 2016 com destaque para EUA, China e Itália. Somadas as vendas para esses três países, compuseram 80,6% do total das exportações brasileiras de rochas (ABIROCHAS, 2017).

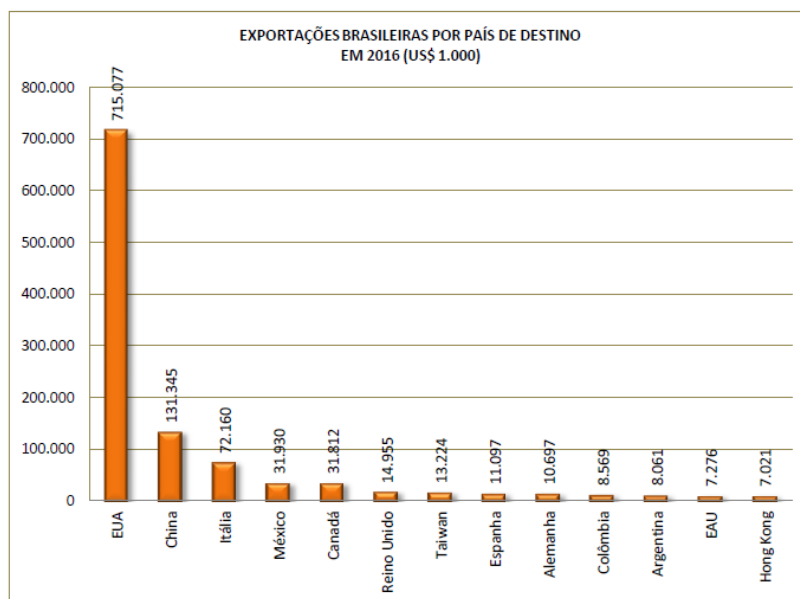
As exportações para os EUA somaram US\$ 715,1 milhões e 1,04 milhões t, com preço médio de US\$ 690/t. O volume físico dessas exportações manteve o mesmo patamar de 2015. O faturamento recuou 9,7% frente ao de 2015 (US\$ 792,2 milhões), devido à queda do preço médio dos produtos exportados (US\$ 760/t em 2015). A participação dos EUA no faturamento das exportações brasileiras de

rochas recuou de 65,5% em 2015 para 62,8% em 2016. As exportações somaram US\$ 46,3 milhões e teve preço médio de US\$ 2.130/t, o que já sugere uma participação expressiva de produtos acabados (ABIROCHAS, 2017).

As rochas brutas (brocos) foram os principais produtos de exportações para a China com preço médio de US\$ 180/t, somando assim US\$ 131,3 milhões e 746,3 mil t, com crescimento de respectivamente 25,8% e 31,3% frente a 2015. A participação chinesa foi de 11,5% no faturamento de exportações de rochas e 30,4% no volume físico em 2016, contra respectivamente 8,6% e 24,5% em 2015 (ABIROCHAS, 2017).

As exportações para a Itália somaram US\$ 72,2 milhões e 165,5 mil t, com variação negativa de respectivamente 8,1% e 15,8% frente a 2015. A participação das vendas para a Itália, no total das exportações brasileiras de rochas, foi de 6,3% no faturamento e 11,3% no volume físico conforme mostra a Figura 8.

**Figura 6 - Exportações brasileiras por país de destino**



Fonte: Abirochas (2017)

Conforme exposto nos dados acima, as exportações brasileiras de rochas reproduziram em 2016 o mesmo comportamento de 2014 e 2015, evidenciando recuo do faturamento e incremento relativo do volume físico comercializado. Essa tendência tenderá a persistir devido ao baixo valor agregado ao produto acabado. Outro aspecto notável é a deficiência logística em portos brasileiros como Rio de

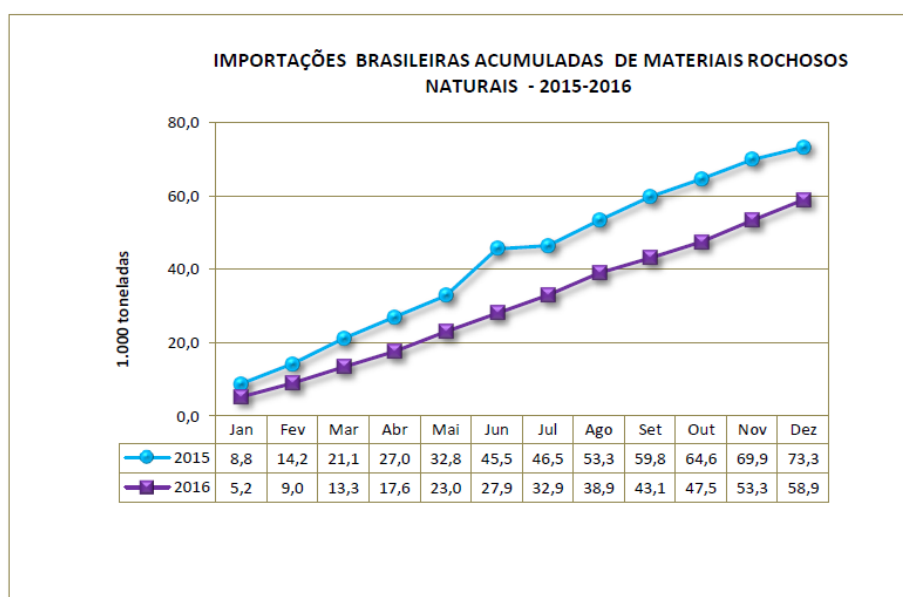
janeiro e principalmente Santos, trazendo um grande prejuízo para o setor de rochas ornamentais.

A queda das importações continua refletindo a retração da economia brasileira e do seu mercado imobiliário. Tal retração refletiu no mercado externo com grande queda de preço dos produtos comercializados. O valor médio do dólar em 2016 (R\$ 3,45) foi apenas superior ao de 2015 (R\$ 3,33) o que não compensou os descontos de preço concedidos pelos exportadores.

## 2.2.2 Importações

As importações brasileiras de materiais rochosos naturais somaram US\$ 31,9 milhões e 58,9 mil t em 2016, com variação negativa de respectivamente 24,6% e 19,7% frente a 2015, conforme mostra a Figura 9.

**Figura 7 - Importações brasileiras acumuladas de materiais rochosos naturais**



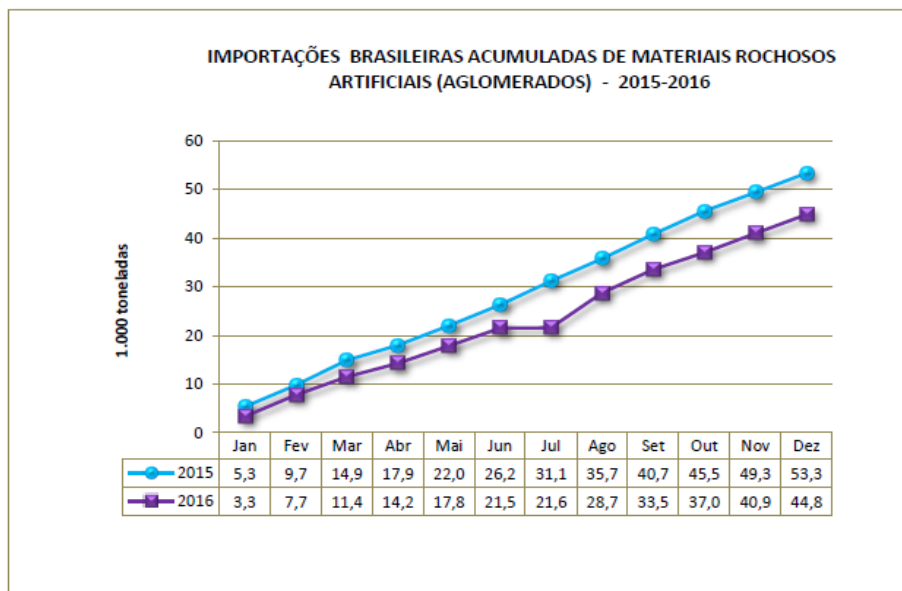
**Fonte: Abirochas (2017)**

O preço médio dos materiais naturais recuou 6,1% passando de US\$ 57,4/t em 2015 para US\$ 542,0/t em 2016. O reflexo da grande elasticidade dos preços pelos fornecedores atingiu também os materiais artificiais com recuo de 16% passando de 810,5/t em 2015 para US\$ 681,2/t em 2016 (ABIROCHAS, 2017).



As importações brasileiras de materiais rochosos artificiais recuaram, obtendo um saldo acumulado em 2016 de 44,8 t frente a 53,3 t em 2015, conforme mostra a Figura 10 (ABIROCHAS, 2017).

**Figura 8 - Importações brasileiras acumuladas de materiais rochosos artificiais**



Fonte: Abirochas (2017)

### 2.3 TIPOLOGIA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS E SUA APLICABILIDADE

De acordo com Branco (2015) a definição de rocha é uma associação natural de dois ou mais minerais em proporções definidas e que ocorre em grandes dimensões formando uma camada externa sólida da Terra, chamada litosfera. O granito, por exemplo, é formado por quartzo, feldspato e frequentemente mica.

Algumas rochas são constituídas por um único mineral, porém são consideradas como rochas, pois ocorrem em grandes volumes, formando grandes pares ou morros que se estendem por dezenas de quilômetros. Essas rochas são chamadas de *monominerálicas*. São exemplos dessas rochas o calcário composto por calcita e o quartzito formado de quartzo (BRANCO, 2015).

Os minerais presentes nas rochas são dos tipos: essenciais ou acessórios. Os minerais essenciais são aqueles que definem a natureza da rocha, se trata de uma rocha vulcânica basáltica e não um riolito. Já os minerais acessórios não

exercem tanta influência na natureza da rocha, pois são encontrados em pequenas quantidades.

## 2.4 MÁRMORE SINTÉTICO

O mármore sintético, também conhecido como mármore artificial ou composto de engenharia é formado pela mistura de resina de alta resistência, pó de mármore, pó de vidro ou fibra de vidro e catalisador. O mármore natural, como explorado nos tópicos anteriores apresenta uma série de limitações quanto ao seu uso, entre as quais: custo elevado, suscetibilidade a manchas, heterogêneo com impurezas e facilidade de quebra. Eles estão disponíveis em áreas remotas e requerem um tratamento extensivo na modelagem e acabamento. Isso aumenta o preço dessas pedras e para superar todas essas limitações do mármore natural, o mármore sintético é produzido em grande escala com custo mais baixo, permitindo ainda a obtenção de uma gama enorme de cores como também de formas e tamanhos, além de possuírem propriedades desejáveis como: alta resistência mecânica, resistência a intempérie, resistência a flexão, dureza superficial, resistência ao calor, resistência a manchas e uma excelente processabilidade BERA, P., Guptha, N., Dasan, K. P., & Natarajan, R. (2012).

Muito utilizado na construção civil, o mármore sintético pode ser aplicado em residências em produtos para cozinhas, como pias, bancadas, tanques de lavar roupa, tipo simples ou duplo, mais profundos ou mais rasos, redondos ou tradicional, acrescentando cores e caracteres como superfície lisa e não porosa. Os banheiros e lavabos também ganharam um novo elemento de utilidade e decoração, podendo ser produzido em qualquer formato ou dimensão, tonalidade e desenho com resistência a produtos quimicamente abrasivos.

Bera, Guptha, Dasan & Natarajan (2012) apresentaram materiais e processos necessários para confecção do mármore sintético: resinas, sílica, carbonato de cálcio, etc. Técnicas como: fundição, prensagem isostática, fundição a seco também foram exploradas. Apresentaram outro tipo de mármore, o Onyx, o qual é outro composto similar ao mármore, com mais transparência contendo o tri-hidróxido de alumínio ( $Al(OH)_3$ ). Estudaram propriedades como comportamento mecânico, aparência e suas influências.

Fagan & Azevedo (2014) apresentaram a *tecnologia mamoryl*, que trata de uma pedra industrializada ou sintética tornando-se assim um produto inovador patentado no mercado. O produto consiste em uma resina polimérica, de alta densidade e facilmente moldável, permitindo sua adaptação aos mais diferentes formatos e necessidades. Esta pedra alternativa possibilita a obtenção de uma superfície extremamente lisa e resistente.

De Mello (2006) estudou a utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha. A utilização da lama residual de marmoraria em cerâmica vermelha foi colocada em prática visando à diminuição do impacto ambiental, causado tanto pelo descarte da lama como também pela quantidade de argila extraída no setor cerâmico. Tanto as amostras a serem incorporadas, quanto o argilito, foram caracterizados por meio de análise granulométrica, análise química por fluorescência de raios x e análise mineralógica por difração de raios x; além de análises segundo à norma NBR 10004 nas lamas. Após a caracterização das matérias-primas, foi aplicado às misturas, ensaio de plasticidade; em seguida, confeccionados corpos de prova.

Bernardi (2003) avaliou o comportamento de materiais compósitos reforçados com fibras (*fiber reinforced concrete*) com enfoque em matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar. O objetivo foi caracterizar o potencial da fibra de aramida kevlar como elemento de reforço a ser adicionado ao concreto em termos de comportamento mecânico e da resistência ao impacto e aderência da fibra à matriz através da microscopia eletrônica de varredura.

Uma das pedras sintéticas mais comuns no mercado, o Mármore Sintético, está longe de ser uma novidade comercial. 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 (RABAHI, 2007).

De uma forma geral, a reciclagem de componentes descartados de materiais compósitos ou simplesmente de resíduos sólidos, que possam ser utilizados como cargas de enchimento ou de reforço de novos produtos, tem tomado um caminho

sem volta na sua consolidação econômica e viabilização de processos, através dos trabalhos e estudos comprobatórios das qualidades desses materiais reaproveitados (RABAHI, 2007).

A questão ecológica com relação aos produtos utilizados na construção civil vem ganhando muito espaço em áreas de pesquisa devido ao grande desenvolvimento experimentado pelas nações em desenvolvimento, abrindo um grande espaço para pesquisa de novos produtos que sejam ecologicamente corretos, e que possam ainda se utilizar de matérias primas oriundas dos rejeitos do processo de produção ou do próprio produto já utilizado pelo consumidor, mas que deve-se levar em consideração que além de ecologicamente correto, o novo produto deve apresentar características produtivas viáveis (RABAHI, 2007).

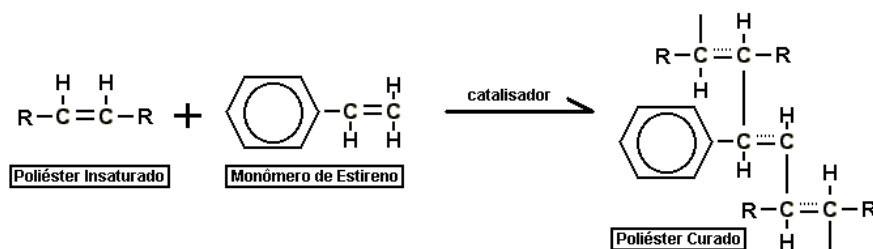
A importância ecológica do presente estudo deverá ainda ser ressaltada uma vez que, irá minimizar o impacto ambiental que poderá ser causado pelo rejeito de vidro, que levaria centenas de anos para se degradar na natureza.

#### 2.4.1 Composição Química dos Mármore Sintéticos

##### 2.4.1.1 Resina poliéster

Os poliésteres insaturados são ésteres formados pela reação de um diálcool (glicol) e um anidrido ou ácido dibásico (diácido), com a liberação de uma molécula de água. As resinas de poliéster, tanto quanto as acrílicas são fornecidas ao moldador na forma de um líquido viscoso e se transforma em um sólido rígido infusível (termorrígido) por meio de uma reação química exotérmica de polimerização ou cura. Entretanto, a cura de resinas de poliéster se processaria muito lentamente, porque as moléculas que a constituem têm pequena mobilidade. Esse problema é resolvido pela adição de catalisadores ou aceleradores fazendo com que as duplas ligações (insaturações) sejam rompidas para que assim as interligações ocorram, conforme são mostradas na figura 15. (RODRIGUES, 2014).

**Figura 9 – Ligações químicas dos poliésteres insaturados**



**Autor: RODRIGUES (2014).**

As resinas acrílicas são utilizadas em maior volume na fabricação e confecção de mármores sintéticos por oferecem maior transparência, como monômero acrílico acrilato de metilo, acrilato de etilo, acrilato de butilo, metacrilato de metilo, metacrilato de butilo, derivados de acrílico entre outros. Por apresentarem um ponto de ebulição relativamente baixo, a temperatura de cura deve ser suficientemente baixa para evitar a ebulição da resina, conseqüentemente, há um aumento do tempo de cura BERA, P., Guptha, N., Dasan, K. P., & Natarajan, R. (2012).

#### 2.4.1.2 Catalisador

Os catalisadores são substâncias que diminuem a energia de ativação e aumenta a velocidade de reação não alterando a composição química nem a quantidade de substâncias dos reagentes e produtos envolvidos (FAJARDO, 2004).

#### 2.4.1.3 Vidro

O pó de vidro ou fibra de vidro e o mármore moído agem como um agregado e devem estar presentes em até 85 a 95% da massa total.

O vidro é um material muito conhecido há tempos, podendo ser provavelmente o material mais antigo feito pelo homem, sendo utilizado desde o início dos primeiros registros históricos (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

Os vidros são definidos por Michael Faraday, em 1830 como uma solução de diferentes substâncias. Até então, os vidros eram definidos como um material viscoso devido o seu processo de fabricação passar por fusão e resfriamento, pois

segundo o conceito de viscosidade, um sólido é um material rígido que não escoar quando submetido a forças moderadas (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

Os vidros são produzidos por técnicas simples através da fusão a altas temperaturas e resfriamento do composto. Esse processo passa por diferentes etapas como ilustrado na Figura 19 variando volume e temperatura da mistura.

Como a formação do vidro por fundição é diretamente proporcional ao tempo de resfriamento, o volume do produto final também é influenciado, visto que quanto maior o empacotamento das partículas, menor será o volume. O volume também é influenciado pela temperatura, assim pode-se entender que podemos ter diferentes estruturas com volumes diferentes e temperaturas diferentes (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

Os materiais constituintes de um vidro podem ser divididos em cinco categorias: formador, fundente, agente modificador, agente de cor e agente de refino. Os formadores de vidro são responsáveis pela formação da rede tridimensional estendida aleatória e os principais formadores comerciais são  $\text{SiO}_2$  (sílica),  $\text{B}_2\text{O}_3$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  com a sílica sendo a principal matéria-prima dos vidros comerciais. A sílica passa a ter alto valor agregado por ter a possibilidade de agregar cor ao vidro. Os vidros coloridos dependem do estado de oxidação do metal, da sua concentração, da composição do vidro e do tratamento térmico ao qual foi submetido (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

O vidro mais comum produzido comercialmente é o sodo-cálcico composto de 71 a 73% de  $\text{SiO}_2$ , 12 a 14% de  $\text{Na}_2\text{O}$  e 10 a 12% de  $\text{CaO}$  (SMITH; HASHEMI, 2010).

A utilização do pó de vidro sodo-cálcico como principal matéria-prima de estudo deste trabalho é devido ao fato da facilidade de encontrá-lo no dia-a-dia e ainda ser um material de fácil trabalhabilidade, não sendo prejudicial à saúde nem ao meio ambiente.

#### 2.4.1.4 Pigmento

O pigmento é adicionado para obter a cor desejada e geralmente não excedem 5% da massa total BERA, P., Gupta, N., Dasan, K. P., & Natarajan, R. (2012).

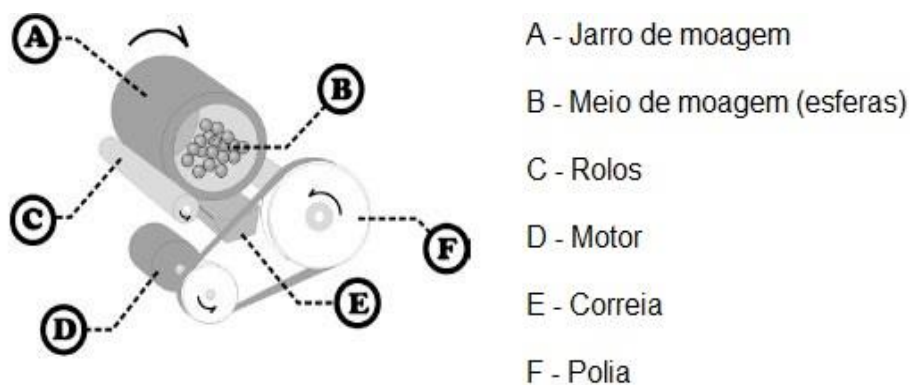
Para o presente trabalho, optou-se por não utilizar qualquer tipo ou cor de pigmento, visto que a resina disponível em laboratório para uso experimental é de tom escuro, que misturado com a cor branca, característica do vidro moído, transforma-se em cor roxa.

## 2.4.2 Sistemas para Fabricação das Amostras

### 2.4.2.1 Moinho de bolas

O moinho de bolas é um dos métodos mais utilizados para obtenção de partículas de tamanhos apropriados. Esse sistema consiste em colocar as partículas a serem moídas num cilindro fechado com bolas de alumina, e ao girar em torno do seu eixo, causa um efeito cascata. As partículas então se movem entre a parede do moinho e os espaços entre as bolas de alumina, e são quebradas em partículas menores (RICHERSON, 2005). A figura 16 ilustra um moinho de bolas.

**Figura 10 - Representação esquemática de um moinho de bolas**



**Fonte: RICHERSON (1992)**

Os moinhos de bolas com diâmetro do recipiente de moagem pequeno são de baixa energia ou moinho de bolas convencional.

Trata-se então de um equipamento utilizado para se fazer um processo de moagem, que pode proporcionar diferentes tamanhos de partículas dependendo do tempo em que as amostras são processadas no moinho e também do diâmetro das bolas.

#### 2.4.2.2 Peneiras vibratórias

Tal técnica consiste em peneirar uma quantidade de material através de uma série de peneiras com agitador magnético e quantificar a massa do material retido em cada peneira. A distribuição do tamanho de partícula é então associada à fração mássica retida em cada peneira. A dimensão de abertura de cada peneira é dada em milímetro ou em abertura por polegada linear (*mesh*) (CREMASCO, 2012).

A figura 17 demonstra uma peneira com agitador magnético.

**Figura 11 - Representação de um agitador eletromagnético e peneiras**



**Fonte: CREMASCO (2012)**

#### 2.4.2.3 Ensaio de flexão em três pontos

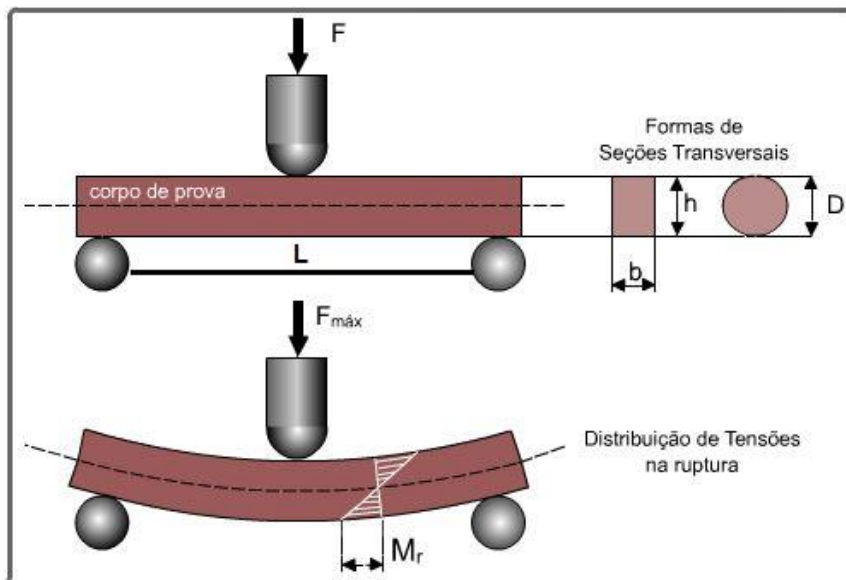
O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente, em determinados pontos da pré-forma. Este ensaio fornece dados quantitativos da deformação destes materiais, quando sujeitos a cargas de flexão. Existem dois tipos principais deste ensaio: o ensaio de flexão em três pontos e ensaio de flexão em quatro pontos (GARCIA A., SPIM A J, SANTOS C. A.).

Os resultados, fornecidos pelo ensaio de flexão, podem variar com a temperatura, velocidade de aplicação da carga, os defeitos superficiais, as características microscópicas e, principalmente, com a geometria da seção



transversal do corpo de prova (GARCIA A., SPIM A J, SANTOS C. A., 2000). A figura 18 representa o ensaio de flexão em três pontos.

**Figura 12 - Representação de ensaio de flexão em três pontos**



Fonte: GARCIA A., SPIM A J., SANTOS C. A. Ensaio dos Materiais. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2000.

O valor da carga máxima, no momento da ruptura, permite calcular o momento fletor máximo da seção. A tensão máxima, correspondente à fibra mais externa da seção é também chamada de módulo de ruptura ( $M_r$ ).

#### 2.4.2.4 Cálculo da densidade e porosidade aparente (Pa)

Uma característica de especial interesse para muitas aplicações é a dimensão característica dos poros, por exemplo, o diâmetro de um poro cilíndrico ou a distancia entre lados de um poro em forma de fenda (MATA, 1998).

Uma classificação dos poros de acordo com a sua dimensão foi determinada oficialmente pela *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*. Essa classificação é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 1 - Classificação dos poros de acordo com as regras da IUPAC (Mata, 1998)**

<b>Classificação</b>	<b>Tamanho</b>
<b>Microporos</b>	< 20 Å
<b>Mesoporos</b>	20 Å < d < 500 Å
<b>Macroporos</b>	> 500 Å

**Fonte: MATA (1998)**

Os métodos mais utilizados na medição de distribuições de tamanhos de poros são: porosimetria de mercúrio, experiências de sorção de gases (adsorção e dessorção), técnicas de análise de imagem e ressonância magnética linear. A técnica de porosimetria de mercúrio, sendo a mais utilizada para análise de poros, permite a determinação de tamanhos de Mesoporos e Macroporos, a partir da análise das curvas de intrusão de um fluido não-molhante, o mercúrio (MATA, 1998).

Assim, designa-se por *porosidade* à razão entre o volume de poros e o volume total de uma dada amostra porosa (MATA, 1998).

## 2.5 METODOLOGIA PARA ANÁLISE PRÁTICA

A metodologia para início da análise é inicialmente selecionar os materiais necessários para confecção do mármore sintético, definir quantidades das composições em porcentagem e ainda definir os processos e métodos. Na sequência devem ser feitos os cálculos de viabilidade econômica da confecção do mármore sintético em comparação com o mármore natural.

Com o vidro moído, matéria-prima principal da análise definido, é possível realizar a distribuição do tamanho das partículas através de uma mesa vibratória com peneiras com diferentes aberturas acopladas. Após a caracterização do pó e seleção das partículas é feita a compactação em matriz juntamente com porcentagens variadas de resina e catalisador a fim de obter diferentes corpos de prova.

No processo de fabricação dos corpos de prova, as peças são moldadas em moldes confeccionados em matriz acrílica e resina poliéster, onde o composto preparado de resina e pó de vidro é derramado. O tempo de cura é variado para análise da estrutura física dos CPs.

Com os CPs fabricados é possível realizar testes mecânicos destrutíveis e não destrutíveis gerando informações e parâmetros importantes para a análise como: dureza, tensão de ruptura, densidade, tensão máxima, módulo de elasticidade e deslocamento.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

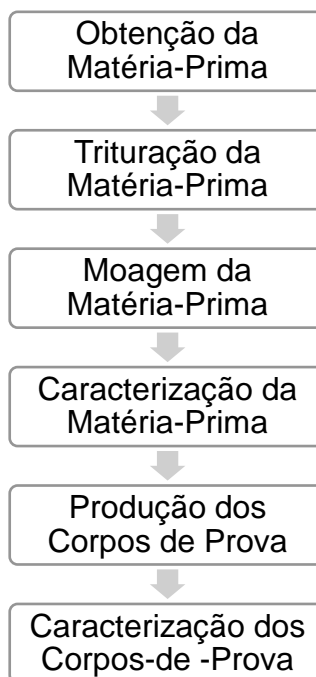
Neste capítulo são apresentadas as etapas dos procedimentos de construção e fabricação das amostras para testes mecânicos: processo de moagem do vidro, caracterização do pó e análise experimental dos dados.

#### **3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO**

Para o desenvolvimento desta investigação experimental, foram utilizadas diferentes quantidades de pó de vidro e resina, além de diferentes tempos de cura.

A figura 19 ilustra um fluxograma das principais atividades e processos realizados, desde a obtenção da matéria-prima até a execução dos ensaios mecânicos finais para caracterização dos CPs.

**Figura 13 – Fluxograma dos processos realizados**



**Fonte: Autoria própria**

## 3.2 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

A construção das amostras para ensaios mecânicos foi realizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos Destrutíveis e Não Destrutíveis (LabEns) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Câmpus* Ponta Grossa.

### 3.2.1 Processo de Moagem do Vidro

A matéria prima utilizada na produção do pó de vidro foram garrafas de vidro transparentes do tipo sodo-cálcico, os quais são o tipo mais comum de vidro e de mais fácil acesso, tendo sua composição básica de acordo com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro (ABIVIDRO) composta de aproximadamente:

60% - 74% de sílica; ( $\text{SiO}_2$ ),

12% - 18% de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ );

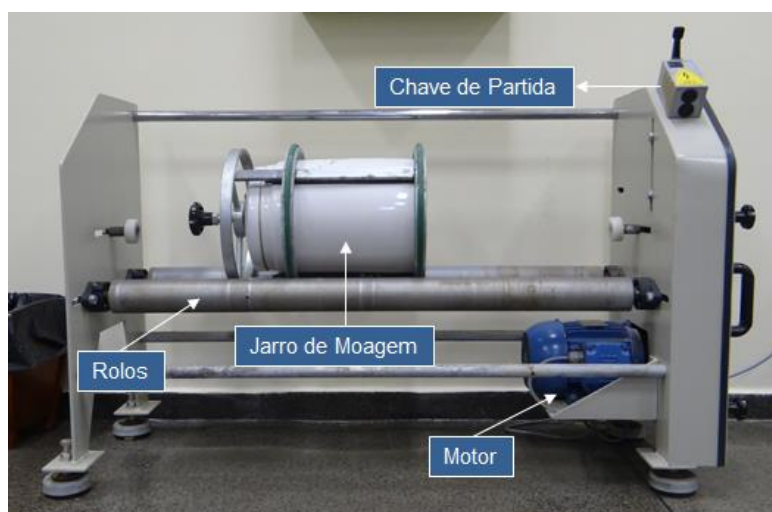
5% - 12% de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ).

Optou-se por eliminar a utilização de vidro que apresentasse algum tipo de aditivo como corante, pois ocorreram reações entre o vidro e a resina, não sendo possível realizar a mistura desses componentes.

As garrafas foram lavadas e secas e então fragmentadas manualmente até um tamanho de partículas de 100 a 150 mm suficiente para que sejam processadas no moinho de bolas. Após isso, essas partículas foram transferidas para um moinho de bolas *Servitech* modelo *CT 240/A* para fazer a moagem das partículas ainda menores. As bolas utilizadas para esta moagem são compostas de alumina.

Os componentes do moinho de bolas são mostrados na Fotografia 1.

**Fotografia 1 - Componentes básicos do moinho de bolas *Servitech* CT 240/A**



**Fonte: Autoria própria.**

Para o melhor aproveitamento do moinho, este trabalhou com um volume de 20% de bolas de alumina, e 30% de volume em amostra, com uma rotação de 36 rpm, sendo feito um acompanhamento a cada meia hora para amostragem do pó.

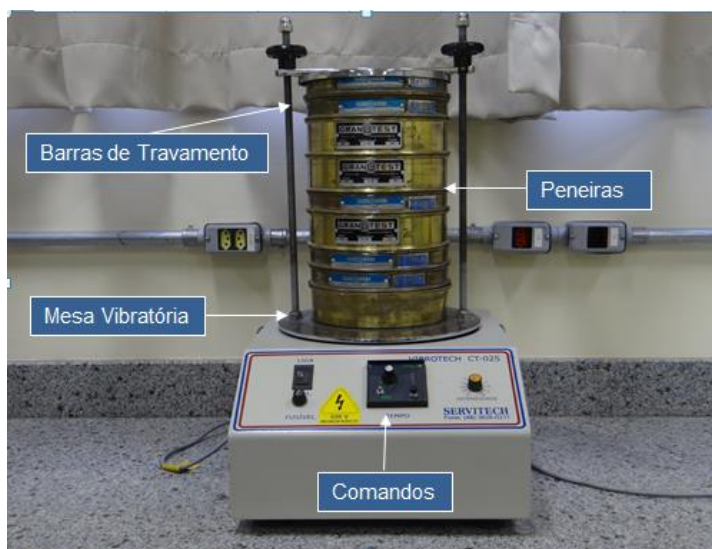
### 3.2.2 Caracterização do Pó de Vidro

A distribuição de tamanhos das partículas de vidro foi feita através de uma mesa vibratória *Servitech* modelo *Vibrotech CT-025* em que foram acopladas peneiras com diferentes aberturas. Esta mesa vibratória está disponível no

Laboratório de Ensaio Mecânicos Destrutíveis e Não Destrutíveis (LabEns) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Câmpus* Ponta Grossa.

A fotografia 2 mostra uma mesa vibratória.

**Fotografia 2 - Mesa Vibratória Vibrotech CT-025**



**Fonte: Autoria própria.**

Para isto, foram utilizadas peneiras com *Mesh*

- #4;
- #32;
- #80;
- #100;
- #120;
- #140;
- #170;
- #200.

Após o peneiramento, foram escolhidas duas faixas de retenção das partículas para as análises: a primeira com partículas entre 15 mm e 3,0 mm (retidas na peneira de *mesh* 100 e 120) e a segunda com partículas entre 1,0 e 0,85 mm (retidas na peneira de *mesh* 140 e 170). Estas duas faixas foram escolhidas para se

observar quanto o grau de homogeneização de tamanho das partículas influencia na compactação e resistência das amostras.

A quantidade de peneiras e o tamanho de abertura tiveram os seguintes critérios de escolha: uma boa distribuição de partículas, remoção das partículas muito grossas e remoção das partículas muito finas.

### 3.2.2.1 Massa de pó de vidro e resina do grupo A de amostras

Os CPs foram divididos em três grupos de amostras: A, B e C.

As massas de pó de vidro e resina, assim como os tempos de cura das amostras são mostradas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Massas do grupo A de amostras**

<b>Amostras</b>	<b>Massa Pó de Vidro (g)</b>	<b>Massa Resina (g)</b>	<b>Massa Total (g)</b>	<b>% Pó</b>	<b>% Resina</b>	<b>Tempo de Cura (h)</b>
<b>1</b>	43	18,5	61,5	69,92	30,08	72
<b>2</b>	43,5	18,55	62,05	70,10	29,90	72
<b>3</b>	44	18,6	62,6	70,29	29,71	72
<b>4</b>	42,9	18,77	61,67	69,56	30,44	72
<b>5</b>	43,3	18,74	62,04	69,79	30,21	72
<b>Média</b>	43,34	18,632	61,972	70	30	72

**Fonte: Autoria própria**

A porcentagem de pó de vidro e resina utilizada para o grupo A foi de aproximadamente 70 e 30% respectivamente.

### 3.2.2.2 Massa de pó de vidro e resina do grupo B de amostras

Para o grupo B de amostras foi utilizada uma porcentagem de pó de vidro e resina de aproximadamente 60 e 40% respectivamente para realizar os testes. A tabela 3 mostra os valores das massas do grupo B.

**Tabela 3 – Massas do grupo B de amostras**

<b>Amostras</b>	<b>Massa Pó de Vidro (g)</b>	<b>Massa Resina (g)</b>	<b>Massa Total (g)</b>	<b>% Pó</b>	<b>% Resina</b>	<b>Tempo de Cura (h)</b>
-----------------	--------------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	-------------	---------------------	----------------------------------

<b>1</b>	37,5	25	62,5	60	40	36
<b>2</b>	38	24	62	61,3	38,7	36
<b>3</b>	37	25,4	62,4	59,3	40,7	36
<b>4</b>	37,4	24,9	62,3	60	40	36
<b>5</b>	37,6	24,8	62,4	60,25	39,75	36
<b>Média</b>	37,5	24,82	62,32	60,17	39,83	36

Fonte: Autoria própria

### 3.2.2.3 Massa de pó de vidro e resina do grupo C de amostras

Para os testes do grupo C de amostras foi utilizada uma porcentagem de resina e pó de vidro de aproximadamente 50 e 50% respectivamente.

A tabela 4 mostra os valores organizados das porcentagens utilizadas para o ensaio de flexão do grupo C de amostras.

Tabela 4 – Massas do grupo C de amostras

<b>Amostras</b>	<b>Massa Pó de Vidro (g)</b>	<b>Massa Resina (g)</b>	<b>Massa Total (g)</b>	<b>% Pó</b>	<b>% Resina</b>	<b>Tempo de Cura (h)</b>
<b>1</b>	31,25	31,25	62,5	50	50	24
<b>2</b>	30	32	62	48,38	51,62	24
<b>3</b>	32,5	31	63,5	51,18	48,82	24
<b>4</b>	31	31,5	62,5	49,6	50,4	24
<b>5</b>	30	31,8	61,8	48,54	51,46	24
<b>Média</b>	30,95	31,51	62,46	49,54	50,46	24

Fonte: Autoria própria

Para obter valores exatos das quantidades a serem trabalhadas, utilizou-se uma balança portátil digital *Powerpack PW-1000* de capacidade 1000g.



A fotografia 7 mostra a balança analítica utilizada para as quantidades das matérias-primas.

**Fotografia 3 - Balança analítica Powerpack PW-1000**



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.3 Adição de Resina

Após as etapas de moagem do vidro e caracterização do pó as amostras estão prontas para serem confeccionadas através da adição de resina e catalisador. A resina utilizada foi do tipo poliéster insaturada *RHAI* pré-acelerada por possuir alta viscosidade, fácil acesso e baixo valor de mercado. A relação de proporcionalidade para catálise é de aproximadamente 20 a 25 gotas de catalisador para 100 ml de resina.

A fotografia 3 mostra a resina utilizada.

**Fotografia 4 - Resina e catalisadores**



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Moldagem

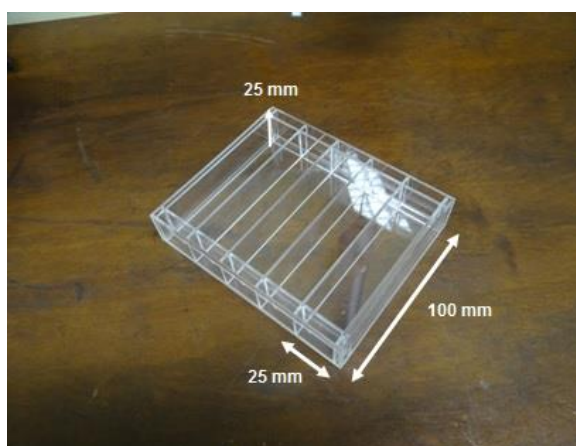
Ao adicionar o pó de vidro na mistura com a intenção de aumentar o volume e diminuir custo com uma proporção de até 80% de pó de vidro e de até 50% de

resina as propriedades como: massa, densidade, tensões de ruptura, módulo de elasticidade, deslocamento máximo, porosidade e flexão variam proporcionalmente.

Para o grupo A utilizou-se uma média de 70% de vidro moído em relação à massa total da amostra, sendo, portanto, 43 gramas. Para o grupo B, utilizou-se 60%, ou seja, 37 gramas de vidro moído. Para o grupo C de amostras, utilizou-se 50% de vidro moído, sendo, portanto, 30 gramas em média para cada corpo de prova.

Após a quantidade certa de pó de vidro, resina e catalisador, os materiais foram misturados em recipiente e misturados em movimentos circulares contínuos até obterem uma consistência viscosa e na sequência moldados em matriz de material acrílico fabricada na forma de barras, com as seguintes dimensões: 25 mm x 25 mm x 100 mm.

**Fotografia 5 - Matriz para moldagem da massa de mármore sintético de material acrílico**



**Fonte: Autoria própria.**

Para cada amostra, foram confeccionados cinco CPs a fim de obter uma média após os testes realizados.

A fotografia 5 mostra a massa de resina poliéster, catalisador e vidro moído pronta para moldagem em matriz.

**Fotografia 6 – Massa para moldagem**



**Fonte: Autoria própria.**

A fotografia 6 mostra os CPs já moldados na matriz em processo de cura.

**Fotografia 7 - Moldagem da massa de mármore sintético**



**Fonte: Autoria própria**

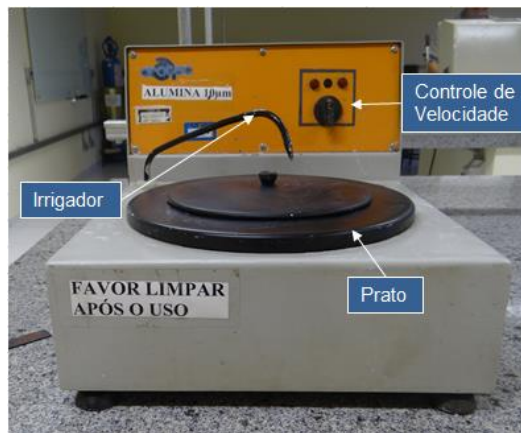
### 3.2.5 Lixamento das Amostras

O lixamento das amostras é necessário para retirada de rebarbas após o processo de cura na matriz.

Inicialmente todas as amostras foram submetidas ao lixamento em *Politriz Arotec™ modelo CT-025* conforme fotografia 8. Para garantir a qualidade do

lixamento e obter bons resultados foram utilizadas lixas d'água grão 600 e 120 com fluxo de água contínuo.

**Fotografia 8 - Politriz CT-025**



**Fonte: Autoria própria**

O processo de lixamento está ilustrado na fotografia 9 e durou cerca de 5 (cinco) minutos para cada amostra. Através do auxílio visual, constatou-se que não havia mais rebarbas e o processo foi interrompido.

**Fotografia 9 - Lixamento da amostra**



**Fonte: Autoria própria**

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

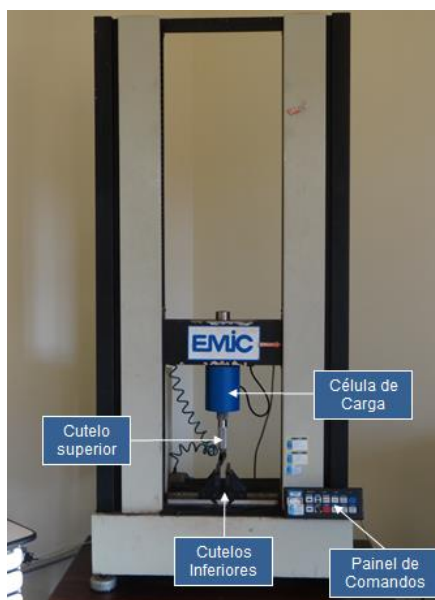
Na presente seção, o procedimento experimental adotados são descritos.

### 3.3.1 Ensaio de Flexão em Três Pontos

O ensaio de flexão consistiu na aplicação de uma carga crescente na parte central da amostra confeccionada no formato retangular. Foi utilizada uma configuração dos ferramentais específica para este tipo de ensaio, onde os cutelos inferiores são dispostos em paralelo, além de o cutelo superior ser de geometria plana.

A fotografia 10 mostra a máquina universal de ensaios utilizada para realizar os ensaios de flexão nas amostras.

**Fotografia 10 – Máquina Universal de Ensaio**



**Fonte: Autoria própria.**

O valor desta tensão é calculado por (GARCIA A., SPIM A J, SANTOS C. A., 2000):

$$Mr = \frac{Mf \cdot y}{J} \quad (1)$$

Mf é o momento fletor e é dado por:

$$M_f = \frac{F \cdot L}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{FL}{4} \quad (2)$$

Onde:

J= Momento de Inércia da seção transversal do CP

y= Metade da altura da seção transversal do CP

Os valores específicos do módulo de ruptura ou máxima tensão normal para seções retangulares são dados pela expressão abaixo:

$$M_r = \frac{3 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3)$$

Onde:

Mr = Módulo de ruptura

F<sub>máx</sub> = Força máxima

L = Comprimento entre os apoios

b = Base do CP

h = Altura do CP

É possível também extrair do teste o valor do módulo de elasticidade (Young), que assume os valores abaixo, para seções retangulares.

$$E = \frac{0,25 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot L^3}{y \cdot b \cdot h^3} \quad (4)$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade

F<sub>máx</sub> = Força máxima

L = Comprimento entre os apoios

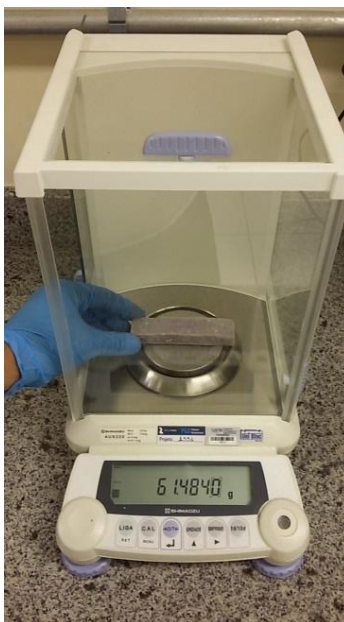
b = Base do CP

h = Altura do CP

### 3.3.2 Cálculo da porosidade aparente ( $P_a$ )

O método utilizado para análise da porosidade aparente consistiu em medir a massa das amostras com elas ainda secas em *Balança de Precisão modelo Shimadzu AUX 220*, conforme mostra a fotografia 11.

**Fotografia 11 - Massa das amostras secas**

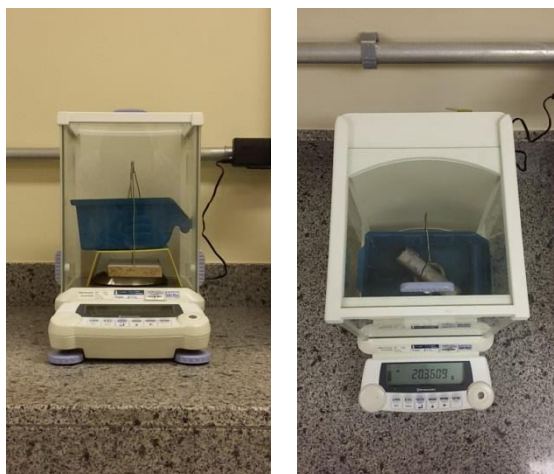


**Fonte: Autoria própria.**

Após colocar as amostras num líquido de densidade conhecida (água)  $\rho_l$  de forma que este ocupasse toda a parte porosa, mediu-se sua massa após 24 horas.

Também mediu-se suas massas quando elas estavam imersas em água, utilizado novamente a balança e um aparato para essa análise como mostrado na fotografia 12.

**Fotografia 12 – Massa das amostras imersas em água**



Fonte: Autoria própria.

Com a relação abaixo, é possível obtermos os dados da porosidade (BARRETO, 2005).

$$Pa = \frac{mu - ms}{mu - mi} \times 100 \quad (5)$$

Onde,

$Pa$  = Porosidade aparente

$mu$  = Massa da amostra úmida

$ms$  = Massa da amostra seca

$mi$  = Massa da amostra quando imersa em água

### 3.3.3 Cálculo da densidade aparente ( $Da$ )

A densidade aparente foi medida utilizando-se a técnica de Archimedes, na qual os corpos de prova foram imersos 24 horas em um líquido de densidade conhecida (água)  $\rho_l$ , medindo-se a massa imersa  $mi$ , a massa úmida  $mu$ , em seguida os corpos de prova foram secos em temperatura ambiente por 36 horas e então mediu-se sua massa seca  $ms$ .

A equação (6) foi utilizada para o cálculo da densidade aparente (BARRETO, 2005):



$$D_{ap} = \frac{m_s}{m_u - m_i} \times d_l \quad (6)$$

Onde,

$D_{ap}$  = Densidade aparente,

$d_l$  = Densidade líquida

$m_u$  = Massa da amostra úmida

$m_s$  = massa da amostra seca

$m_i$  = Massa da amostra imersa

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados práticos dos testes experimentais obtidos a partir de diferentes grupos de amostras compostos de resina poliéster e vidro moído, além de dados de outros autores com o objetivo de comparação das propriedades.

### 4.1 ANÁLISE PRÁTICA

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios das amostras divididas em três grupos: grupo A, grupo B e grupo C contendo cinco amostras cada grupo além da análise dos dados dos ensaios de flexão realizados em resina poliéster pura, resultados da caracterização do pó, resultados de densidade e porosidade aparentes, ainda analisar a influência do vidro na resistência da mistura com a resina na produção do mármore sintético.

#### 4.1.1 Caracterização do Pó

A distribuição de tamanhos das partículas de vidro peneiradas após o processo de moagem é mostrada na Tabela 5:

**Tabela 5 - Distribuição do tamanho das partículas do pó de vidro**

<b>Mesh</b>	<b>Massa Pó de Vidro (g)</b>	<b>a/t</b>	<b>% Pó</b>
<b>32</b>	373,31	0,3205	32,05
<b>100</b>	320,71	0,2754	27,53
<b>120</b>	276,00	0,2370	23,70
<b>140</b>	166,43	0,1429	14,29
<b>170</b>	24,03	0,0206	2,06
<b>Fundo</b>	4,24	0,0036	0,36
<b>Total</b>	1164,72		

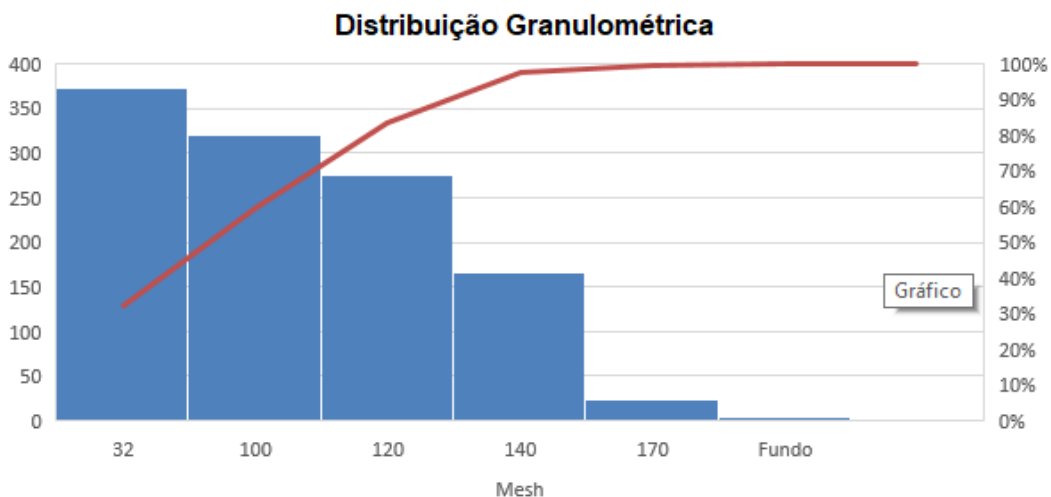
**Fonte: Autoria própria**

a/t = relação entre quantidade de amostra pelo total peneirado.

% = porcentagem de amostra retida em cada peneira relativo ao total peneirado.

O gráfico 1 mostra o refino do tamanho de grão versus o tamanho das peneiras para diferentes amostragens de pó. No estágio inicial de moagem o tamanho de grão diminui.

**Gráfico 1 – Tamanho de grão de vidro moído em função do tamanho das peneiras**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2 Resultado do Lixamento das Amostras

Conforme é possível observar na fotografia 13, havia muitas rebarbas dificultando o posicionamento dos CPs nos cutelos da máquina de ensaios, sendo portanto, necessário realizar lixamento em cada amostra.

**Fotografia 13 – Amostras com rebarbas (Antes do lixamento)**



Fonte: Autoria própria

A fotografia 14 mostra o resultado após o processo de lixamento. É possível observar a superfície lisa de cada amostra, facilitando portanto o encaixe dos CPs nos cutelos da máquina universal de ensaios.

**Fotografia 14 - Amostras sem rebarbas (Após o lixamento)**

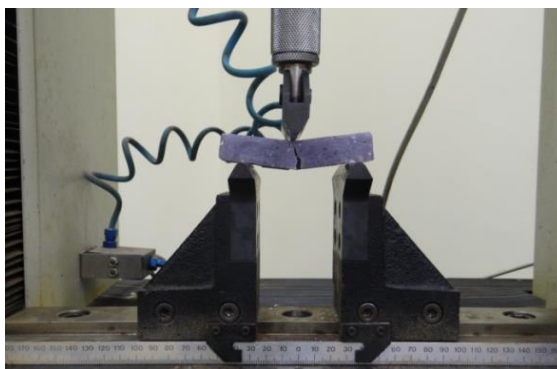


**Fonte: Autoria própria**

#### 4.1.3 Resistência Mecânica à Flexão

A fotografia 15 mostra um CP em processo de ruptura após realizada a carga de flexão.

**Fotografia 15 – Amostra em processo de flexão**



**Fonte: Autoria própria.**

##### 4.1.3.1 Resultados do ensaio de flexão para amostras do grupo A

**Fotografia 16 – Amostras do grupo A**

**Fonte: Autoria própria**

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão mecânica podem ser vistos na tabela 6 e apresentam uma média de tensão máxima e módulo elástico de aproximadamente 14,53 MPa e 1271,25 MPa respectivamente.

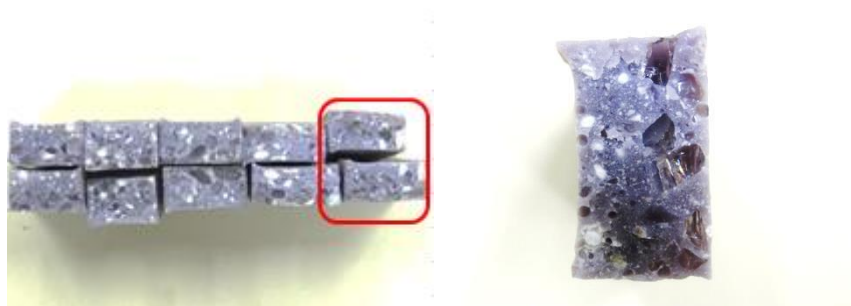
**Tabela 6 – Ensaio de Flexão 3 pontos do grupo A**

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Distância dos apoios (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo Elástico (MPa)
I	24,00	14,00	70,00	16,70	0,90	1272
II	22,00	15,00	70,00	16,07	1,06	1275
III	26,00	14,00	70,00	12,41	1,01	1269
IV	27,00	13,00	70,00	12,93	0,75	1270
V	26,00	12,00	70,00	25,42	0,79	2550
<b>Média</b>	25,00	13,6	70,00	14,53	0,93	1271,25
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	-	1,68	0,11	2,04

**Fonte: Autoria própria**

Foi constatado no corpo de prova V, um acúmulo de pó de vidro próximo à sua borda como mostra a fotografia 17, causando assim uma fragilidade excessiva. A falta da homogeneização na mistura da massa de resina com o vidro moído é o principal causador dessas características nas amostras refletindo assim nos dados discrepantes obtidos nos testes de flexão. Esses valores discrepantes dos demais podem ser comprovados através do alto desvio padrão apresentados no módulo elástico, sendo assim não foram considerados nos cálculos das médias.

Fotografia 17– Amostras do grupo A após ensaio de flexão



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.3.2 Resultados do ensaio de flexão para amostras do grupo B

Fotografia 18 – Amostras do grupo B



Fonte: Autoria própria

Na tabela 7 podem ser observados os valores obtidos no segundo ensaio de flexão para o grupo B de amostras.

Os valores apresentam uma média de tensão máxima e módulo elástico de aproximadamente 16,63 MPa e 1008,6 MPa respectivamente

Tabela 7 – Ensaio de Flexão 3 pontos do grupo B

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Distância dos apoios (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo Elástico (MPa)
I	25,00	19,00	70,00	19,93	0,81	1007
II	26,00	18,00	70,00	17,53	1,10	1018
III	25,00	19,00	70,00	17,59	0,80	1005
IV	26,00	17,00	70,00	11,15	0,82	1003
V	24,00	19,00	70,00	16,93	0,69	1010
<b>Média</b>	25,2	18,4	70,00	16,63	0,84	1008
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	-	2,92	0,14	5,24

Fonte: Autoria própria

Foi constatado no corpo de prova IV um acúmulo de pó de vidro em todo o corpo de prova, causando assim uma cura não homogênea. Esses valores discrepantes dos demais podem ser comprovados através do alto desvio padrão apresentados no módulo elástico, sendo assim não apresentaram uma confiabilidade adequada para usá-los nos cálculos das médias.

**Fotografia 19 – Amostras do grupo B após ensaio de flexão**



**Fonte: Autoria própria**

Outra característica apresentada pelos corpos de prova do grupo B foi que, o vidro moído no processo de cura tendeu-se a sedimentar no fundo dos corpos de prova, causando assim uma fragilidade excessiva, agindo como concentrador de tensão na borda dos corpos de prova.

#### 4.1.3.3 Resultados do ensaio de flexão para amostras do grupo C

**Fotografia 20 – Amostras do grupo C**



**Fonte: Autoria própria**

Os valores da tabela 8 apresentam uma média de tensão máxima e módulo elástico de aproximadamente 11,56 MPa e 986,75 MPa.

Tabela 8 – Ensaio de Flexão 3 pontos do grupo C

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Distância dos apoios (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo Elástico (MPa)
I	24,00	15,00	70,00	15,21	1,41	978
II	26,00	11,00	70,00	14,19	1,45	988
III	24,00	12,00	70,00	16,03	1,44	991
IV	22,00	16,00	70,00	11,98	0,85	1496
V	26,00	16,00	70,00	12,39	1,60	990
<b>Média</b>	24,4	14,00	70,00	11,56	1,18	986,75
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	-	2,86	0,27	4,62

Fonte: Autoria própria

O corpo de prova IV mostra uma discrepância nos resultados de tensão máxima, deflexão e módulo elástico, comprometendo assim o resultado final de todo o grupo C de amostras. Sendo assim, os resultados práticos do corpo de prova IV não foram utilizados no cálculos dessas propriedades. A má mistura da resina com o vidro moído foi o causador da alteração na estrutura após a cura da amostra como mostra a fotografia 21. Por ação da gravidade, o vidro moído sedimentou-se no fundo da matriz, acumulando-se assim na base de todos os CPs.

Fotografia 21 – Amostras do grupo C após ensaio de flexão

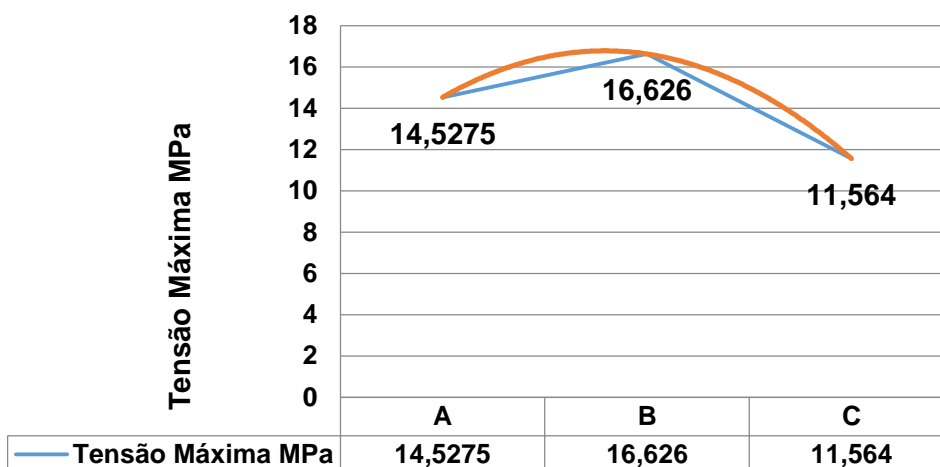


Fonte: Autoria própria

Nos Gráficos 2,3 e 4 podem ser observados os dados de Tensão Máxima (MPa), Deflexão (mm) e Módulo Elástico (MPa) para os grupos de amostra A,B e C.



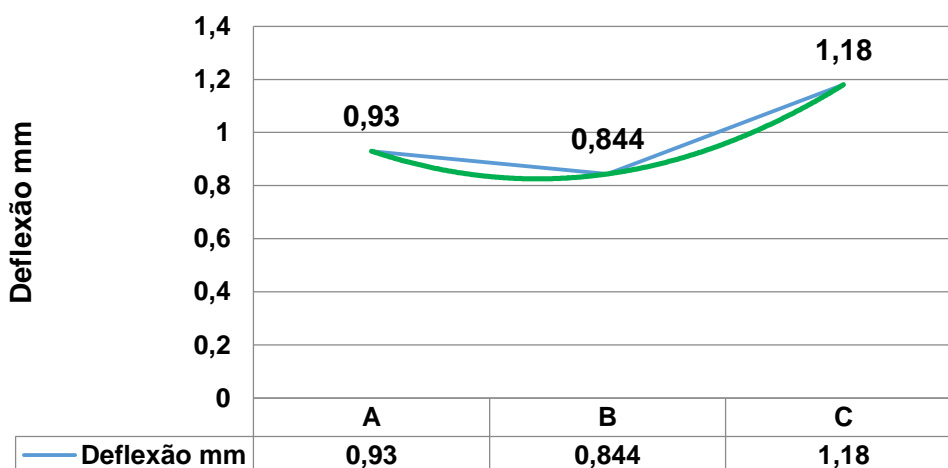
Gráfico 2 – Tensão Máxima em MPa para os grupos de amostra A,B e C



Fonte: Autoria própria

Nota-se uma proximidade nos valores obtidos após os testes de flexão. O Grupo B apresentou a maior tensão com 16,626 MPa de média conforme mostra o gráfico 3. O grupo C por apresentar menor quantidade de vidro moído obteve uma menor tensão devido a menor rigidez na amostra.

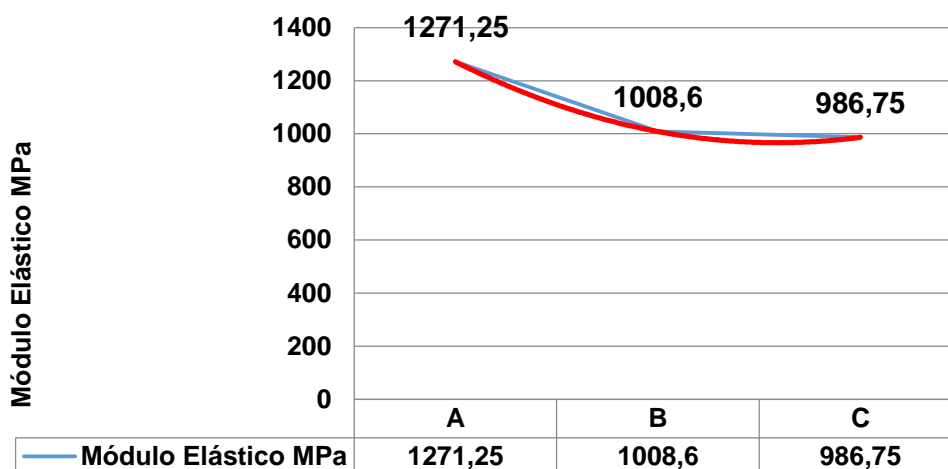
Gráfico 3 – Deflexão para os grupos de amostra A,B e C



Fonte: Autoria própria

Nota-se uma relação inversamente proporcional entre tensão máxima e deflexão. O grupo C obteve a maior deflexão dentre os três grupos de amostra. Isso ocorreu devido o grupo C de amostras terem a menor tensão máxima, sendo assim, uma maior deflexão para ocorrer a ruptura do corpo de prova.

Gráfico 4 – Ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster pura



Fonte: Autoria própria

O módulo elástico para os grupos A, B e C se comportou de forma decrescente. Obteve-se uma queda de cerca de 79% do módulo elástico entre o grupos A, B e C.

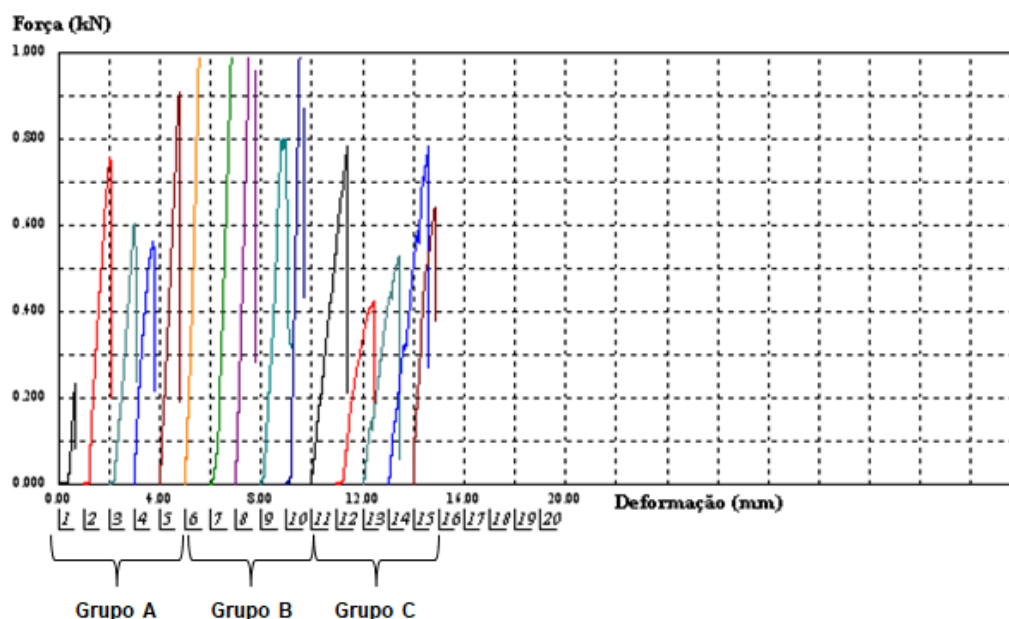
Nos ensaios de flexão, os resultados dos módulos de elasticidade mostraram, em três pontos, a tendência esperada, ou seja, a rigidez eleva-se com o aumento da concentração de vidro moído. Já a tensão máxima aumenta com o aumento da concentração de vidro moído. Assim, pode-se dizer que a carga de vidro moído contribui para uma diminuição da resistência à flexão, em razão da elevação da rigidez dos compósitos.

Os resultados dos ensaios de flexão em resina poliéster foram obtidos no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos (LabEns) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Câmpus* Ponta Grossa.

O grupo A de amostras é composto pelos CPs numerados de 1 a 5. O grupo B é composto pelos CPs de número 6 a 10. O grupo C é composto por CPs numerados de 11 a 15.

No gráfico 5 pode ser observado os resultados do ensaio de flexão de 3 pontos para os três grupos de amostras confeccionadas em resina poliéster com vidro moído.

Gráfico 5 – Curva do ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster com vidro moído



Fonte: Autoria própria

O objetivo da utilização dos dados de ensaios em resina poliéster se dá por título de comparação com os dados dos ensaios em resina poliéster com vidro moído adicionado na mistura.

#### 4.1.3.4 Resultados do ensaio de flexão para resina poliéster pura

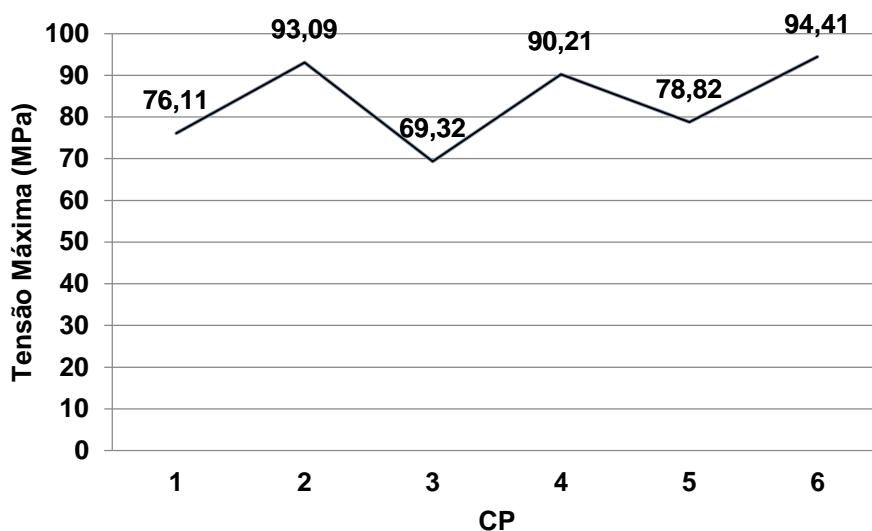
No gráfico 6 pode ser observado os resultados do ensaio de flexão de 3 pontos para amostras confeccionadas em resina poliéster na sua forma pura, sem adição de qualquer material, totalizando 6 corpos de prova.

Tabela 9 – Ensaio de Flexão 3 pontos em resina poliéster pura

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Distância dos apoios (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo Elástico (MPa)
I	14,75	10,15	70,00	76,11	1,34	1788
II	13,40	10,15	70,00	93,09	1,60	1734
III	14,20	11,20	70,00	69,32	1,23	1554
IV	14,20	12,10	70,00	90,21	1,68	1306
V	14,20	11,40	70,00	78,82	1,39	1498
VI	14,40	12,05	70,00	94,41	1,82	1316

Fonte: Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos (LabEns) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Ponta Grossa

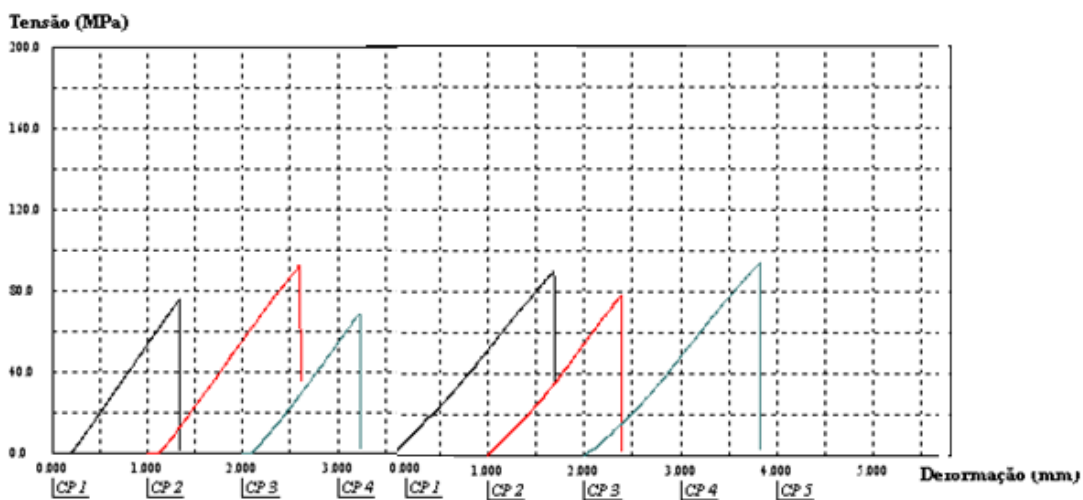
Gráfico 6 – Ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster pura



Fonte: Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos (LabEns) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Câmpus Ponta Grossa*

No Gráfico 7 pode ser observado o comportamento da curva após realizado o ensaio de flexão de 6 amostras em resina poliéster na sua forma pura, ou seja, sem adicional de qualquer material.

Gráfico 7 – Curva do ensaio de flexão 3 pontos em resina poliéster pura



Fonte: Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos (LabEns) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Câmpus Ponta Grossa*

#### 4.1.3.5 Análise dos resultados de outros autores

Pereira (2012, p.26) destacou as propriedades mecânicas de compósitos à base de resina poliéster com fibra de vidro, moldados pelo processo RTM Light e reforçados com carga mineral de wollastonita adicionada à resina em concentrações de 10%, 20% e 30%. Analisou-se também a viabilidade de sua utilização em escala industrial, em comparação ao compósito isento da aplicação de cargas reforçantes. O trabalho mostrou que a wollastonita pode ser utilizada em escala industrial como carga de reforço no compósito de resina poliéster e fibra de vidro, desde que em concentrações adequadas para garantir sua boa distribuição na peça fabricada e também a possibilidade de diminuição da variação da espessura de peças fabricadas pelo processo RTM Light.

O processo RTM Light (Resin Transfer Molding) é vantajoso na obtenção de peças grandes em formas complexas, maior nível de automação e menor tempo de produção, utilizando molde fechado e baixas pressões, com emissões reduzidas de estireno, alta qualidade de acabamento e possibilidade de aplicação de gelcoat. A wollastonita é uma carga mineral que apresenta propriedades características e únicas de clivagem, quebrando em partículas com formato agulha de variada acicularidade.

**Tabela 10 – Resultados dos ensaios de flexão com carga de wollastonita**

<b>Percentual de Wollastonita (%)</b>	<b>Percentual de Fibra de Vidro (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>	<b>Resistência à Flexão (Mpa)</b>
0	14,13	5501,6	93,2
10	13,34	5830,3	90,4
20	12,59	6172,7	83,3
30	11,93	6696,1	81,6

**Fonte: Adaptado de Pereira (2012, p.26).**

Nos ensaios de flexão, os resultados dos módulos de elasticidade mostraram, em três pontos, a tendência esperada, ou seja, a rigidez eleva-se com o aumento da concentração de wollastonita. Já a resistência à flexão diminui com o aumento da concentração de wollastonita. Assim, pode-se dizer que a carga de wollastonita contribui para uma diminuição da resistência à flexão, em razão da elevação da rigidez dos compósitos.

## 4.1.4 Resultado da porosidade e densidade das amostras

Nas tabelas abaixo pode-se observar os resultados práticos da porosidade e densidade aparente para os três grupos de amostras analisados, respeitando as variações propostas anteriormente.

Tabela 11 – Amostras do grupo A

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Massa imersa (g)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
I	51,220	51,696	23,461	1,814	1,686
II	50,813	51,174	21,753	1,727	1,227
III	54,928	55,226	24,558	1,791	0,972
IV	49,270	49,564	21,228	1,739	1,038
V	49,652	50,016	21,561	1,745	1,279
<b>Média</b>	51,180	51,540	22,510	1,763	1,240
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	-	0,030	0,250

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 – Amostras do grupo B

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Massa imersa (g)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
I	72,346	72,901	33,610	1,841	1,413
II	70,177	70,964	30,400	1,730	1,940
III	75,149	75,770	35,170	1,851	1,530
IV	67,380	68,575	29,551	1,727	3,062
V	73,959	74,554	34,212	1,833	1,475
<b>Média</b>	72,907	74,547	33,348	1,451	1,272
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	-	0,33	0,38

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 – Amostras do grupo C

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Massa imersa (g)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
I	48,307	48,650	17,295	1,541	1,094
II	36,738	37,185	13,580	1,556	1,894

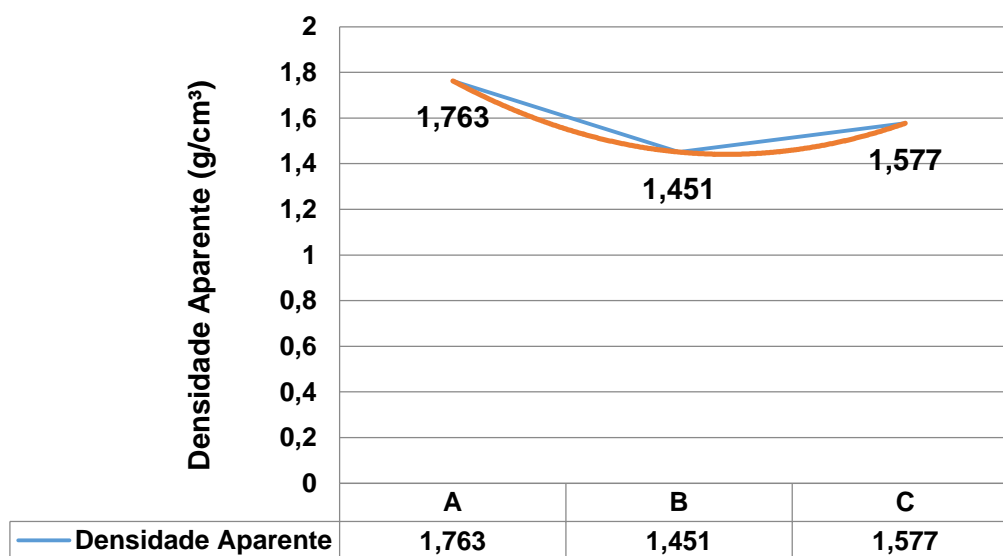
III	39,951	40,328	14,750	1,562	1,474
IV	56,511	56,975	22,940	1,660	1,363
V	55,209	55,557	20,356	1,568	0,989
<b>Média</b>	47,343	47,739	17,784	1,577	1,363
<b>Desvio Padrão</b>	-	-	-	0,04	0,32

Fonte: Autoria própria

Pode ser observado que a massa úmida do grupo C foi a menor dentre os três grupos devido à baixa concentração de vidro moído nas amostras, absorvendo menor quantidade de água em massa.

A porosidade e a densidade aparente foram organizados nos gráficos 8 e 9 para facilitar a análise dos resultados.

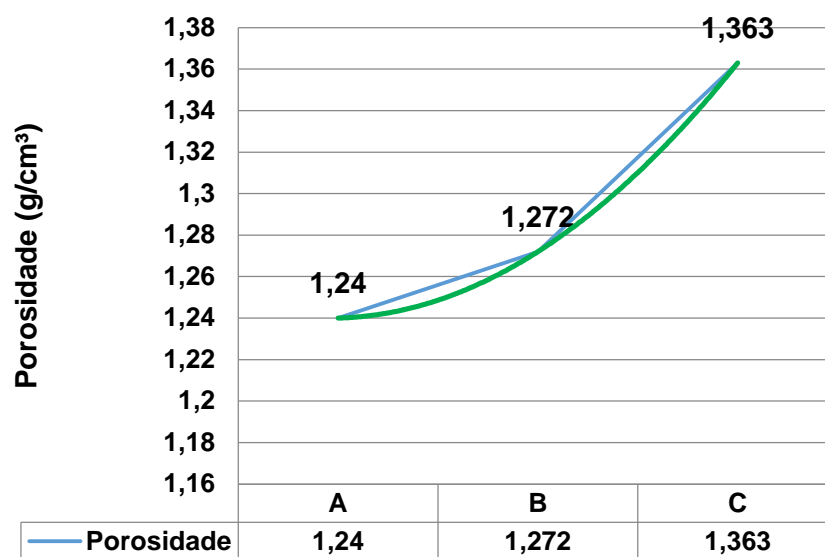
Gráfico 8 – Densidade Aparente (g/cm<sup>3</sup>)



Fonte: Autoria própria

A densidade aparente permaneceu constante e com valores próximos para cada grupo observado. O grupo apresentou maior densidade devido à maior concentração de vidro moído na amostra, o que era esperado.

Gráfico 9 – Porosidade



Fonte: Autoria própria

O grupo C de amostra apresentou maior porosidade dentre todas as amostras analisadas. O resultado encontrado pode ser relacionado à má distribuição das partículas de vidro moído na mistura com a resina na hora da moldagem em matriz.



## 5 CONCLUSÕES

Ao se levantar hipóteses sobre as possibilidades de criar um novo tipo de Mármore Sintético, incorporando diferentes teores de material reciclado, e ainda avaliar esse novo material sobre o aspecto de reciclagens, este estudo se propôs avaliar o desempenho de propriedades mecânicas, bem como características quantitativas e qualitativas desses materiais que pudessem subsidiar o desempenho desse novo material em novas formulações da pedra sintética, utilizando matéria prima reciclada.

As propriedades finais dos materiais compostos não se determinam apenas em função das suas características individuais, mas também do modo como os materiais são produzidos e da forma como são inseridos nesse compósito. Em todos os processos de fabricação de compósitos existentes, desde os que incorporam tecnologias mais simples às mais avançadas, existe um conjunto de limitações, no que diz respeito à capacidade de produção das peças, tamanho, forma geométrica, qualidade estrutural, homogeneidade na produção e possibilidade de automatização.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso foi realizada uma análise da utilização de vidro moído em diferentes proporções (50%, 60% e 70% do volume total das amostras com resina) a fim de analisar o comportamento mecânico do mármore sintético com o vidro moído como carga.

Os CPs foram ensaiados através do ensaio de flexão em três pontos e indicaram resultados satisfatórios. .

Nos ensaios de flexão, os resultados dos Módulos de Elasticidade mostraram, em três pontos, a tendência esperada, ou seja, a rigidez eleva-se com o aumento da concentração de vidro moído tanto quanto a Tensão Máxima. Assim, pode-se dizer que a carga de vidro moído contribui para uma diminuição da resistência à flexão, em razão da elevação da rigidez dos compósitos.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros propõem-se:

- Analisar de forma sistemática a viabilidade econômica da fabricação do mármore sintético visando o mercado e comparando com a fabricação do mármore natural;
- Testar pigmentos com coloração diferentes e analisar o resultado visando à estética do mármore sintético;

## 7 REFERÊNCIAS

ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. Vidros. **Cadernos temáticos-química nova na escola**, v. 2, p. 13–24, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais**. , v. 55, n. 11, p. 1–8, 2016.

AURÉLIO, M. **Mármore sintético versus mármore natural**. **HALO N° 57, Ano XXXI**, p. 9, 1984.

BAPTISTA, C. **Ensaio Mecânicos**. Universidade de São Paulo, p. 14, 2015.

BERA, P.; GUPTHA, N.; DASAN, K. P.; NATARAJAN, R. **Recent developments in synthetic marble processing**. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 32, n. 2, p. 94–105, 2012.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibras de Aramida Kevlar**. , p. 179, 2003.

BRANCO, P.M. **As rochas**. Curso de extensão para professores do Ensino Médio, 2015.

CARISSO, R. **Série Tecnologia Ambiental**, p. 37, 2014.

COATLINE ADITIVOS INDUSTRIAIS LTDA. **Aditivo de Resina Poliéster Insaturado para Mármore Sintéticos-EMPAST 43164-E**. , p. 5, 2012.

CORTE COM FIO DIAMANTADO. Disponível em: <http://www.optimaIndia.com/services.html> Acesso em: 17/03/2017.

CREMASCO, M.A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo. Blucher, 2012.

D'ALMEIDA, A. L. F. S. CALADO, V. M. , BARRETO, D. W. , D'ALMEIDA, J. R. M. **Comportamento mecânico em flexão de compósitos fabricados com matriz poliéster isoftálica e reforçados por fibras de piaçava brutas e tratadas**. Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores**. Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP), p. 60, 2007.

DE MELLO, R. M. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, p. 67, 2006. São Paulo.

DUTRA, M. **Tipos de Rochas**. Brasil Escola-Geografia, 2011.

FAGAN, A. L.; AZEVEDO, D. G. **Tecnologia marmoryl: inovação e empreendedorismo**. , p. 1–16, 2014.

FAJARDO, H. V. **Síntese seletiva da metil vinil cetona usando catalisadores nanoparticulados de SnO<sub>2</sub> e MgO**. Universidade Federal de Santa Catarina Centro.Centro de Ciências Físicas e Matemáticas Departamento de Química, 2004.

FILHO, C. C.; RODRIGUES, E. D. P.; ARTUR, A. C. **Panorama Técnico-Econômico Do Setor De Rochas Ornamentais No Brasil**. Geociências, v. 23, n. 1, p. 5–20, 2004.

FIO DIAMANTADO. Disponível em: <<http://sanwadiamondtool.tumblr.com/>> Acesso em: 17/03/2017).

FIGLIARELLI, J. **Utilização De Fibras De Carbono E De Fibras De Vidro Para Reforço De Vigas De Madeira**. , 2002.

FRASCÁ, Maria Heloisa. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. 2003.

GARCIA A., SPIM A J., SANTOS C. A. **Ensaio dos Materiais**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2000.

GUERREIRO, H. J. P. **Exploração Subterrânea de Mármore. Aspectos Geotécnicos**, p. 193, 2000. Lisboa.

INFOESCOLA. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/geologia/idade-da-terra/>>. Acesso em: 17/03/2017)

MÁQUINA DE CORTE COM FIO HELICOIDAL. Disponível em: <<http://talalenterprises.com/aboutus.aspx>> Acesso em: 17/03/2017).

MATA, V. L. G. **Caracterização de Meios Porosos, Porosimetria, Modelização 3D e Tomografia Seriada, Aplicação e Suportes Catalíticos.** , 1998.

MILHEIRO, F. A. C. **Produção e caracterização de pós compósitos nanoestruturados do metal duro WC-10Co por moagem de alta energia.** Dissertação de mestrado da Universidade estadual do Norte Fluminense., 2006.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Rochas ornamentais.** Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica., 2007.

NUNES, R. L. S., FERREIRA H. S., NEVES G. DE A., SANTANA L. N. L. E FERREIRA, H. C. **Reciclagem de rejeitos de mármore e granitos utilizados em substituição a matérias primas convencionais para produção de revestimentos cerâmicos.** Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 2329–2338, 2003.

PEREIRA, N. C. **Caracterização de compósitos de resina poliéster, fibra de vidro e wollastonita moldados pelo processo RTM light.** Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, v. v. 11, p. 23–37, 2010.

RABAHI, R. F. **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., 2010. Brasília.

RABAHI, R.F., DINOAH, J., GUEDES, J., et al. - **Estudo da Influência da Fibra de Vidro nas Propriedades Mecânicas do Mármore Sintético,** Relatório de Curso na Pós-Graduação, PCMEC - UnB, Brasília, 2007.

REICHHOLD. Guia de Produtos Composites. **Tecnologia em Resinas e Gelcoats.**

RICHERSON, David W. **Modern Ceramic Engineering: *properties, processing, and use in design.*** Second Edition. New York: Marcel Dekker Inc, 1992.

RODRIGUES, J. DA S. **Estudo da técnica de infusão de resina aplicada à fabricação de compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras naturais da amazônia.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da

Amazônia, 2014.

RUCHERT, C. **Ensaio dos Ensaio Mecânicos Materiais – Flexão, Fluência e Fadiga**. Universidade de São Paulo, p. 1–44.

SANSONE CÉSAR, E. **Porosidade Das Rochas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

SILVA, H. V.; CASTRO, N. F. **Aproveitamento de resíduos de pedreiras de rochas ornamentais como agregados para base e sub-base de pavimentos**. V Jornada do Programa de Capacitação Institucional – CETEM, p. 1–7.

SILVA, I. L. A. DA. **Propriedades e Estrutura de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF Campos dos Goytacazes – RJ, p. 110, 2014.

SILVEIRA, L. L. L. DA; BOLONINI, T. M. **Série Rochas e Minerais Industriais. Polimento de Rochas Ornamentais-Aspectos Tribológicos**. 2016.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: Amgh, 2010.

SOUZA, V. C. DE. **Diagnóstico do setor de rochas ornamentais e de revestimento do estado de pernambuco. Minerais e Rochas Industriais; Rochas Ornamentais**; Universidade Federal De Pernambuco Centro De Tecnologia E Geociências Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mineral Ppgeminas, 2008. Recife.

TANJI, M.; DOMITTI, S. S.; LEONARDO, R.; et al. **Influência de ciclos de polimerização sobre a rugosidade e porosidade de resinas acrílicas**. , p. 71–78, 2001.

BARRETO, H. R. B. **Infiltração por compressão de alumínio fundido em pré-formas porosas de carbetto de silício (SiC) pelo processo de “Direct Squeeze Casting” (DSC)**. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia E Ciência Dos Materiais, Universidade Estadual De Ponta Grossa, p. 131, 2005. Ponta Grossa.

FIBROMAX. Disponível em: <<http://fibromax.ind.br/tags/marmore-sintetico/>> Acesso em: 25/10/2017).

