

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE GAMA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**FABRICAÇÃO E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PEDRA SINTÉTICA A BASE DE VERMICULITA E PERLITA**

JULIO CEZAR PEDROSA DA SILVA

ORIENTADOR: DANIEL MONTEIRO ROSA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DOS
MATERIAIS**

PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 83A/2019

BRASÍLIA, AGOSTO/2019

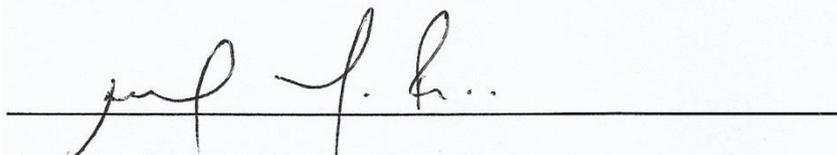
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA/FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**“FABRICAÇÃO E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEDRA
SINTÉTICA A BASE DE VERMICULITA E PERLITA”**

JULIO CEZAR PEDROSA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Integridade dos Materiais de Engenharia.

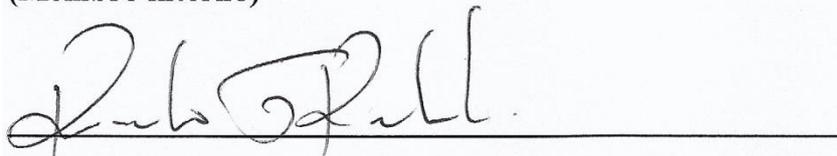
APROVADA POR:



**Prof. Dr. Daniel Monteiro Rosa; FT/UnB
(Orientador)**



**Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira; FT/UnB
(Membro interno)**



**Prof. Dr. Ricardo Fouad Rabahi; IFG/Senador Canedo
(Membro externo)**

BRASÍLIA / DF, 09 de Agosto de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

JULIO CEZAR PEDROSA DA SILVA

FABRICAÇÃO E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEDRA SINTÉTICA A BASE DE VERMICULITA E PERLITA, [Distrito Federal] 2019.

99 pag., 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2019).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. VERMICULITA

2. PERLITA

3. CALCÁRIO

4. PEDRA SINTÉTICA

I. FGA/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SILVA, J. C. P. DA; (2019), Fabricação e análise das propriedades mecânicas de pedra sintética a base de vermiculita e perlita, Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, 83A/2019, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 99 pág..

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Julio Cezar Pedrosa da Silva

TÍTULO: Fabricação e análise das propriedades mecânicas de pedra sintética a base de vermiculita e perlita

GRAU: MESTRE

ANO: 2019

É concedida a 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.

Júlio Cezar Pedrosa da Silva
Rua 43, Nº 360, Bairro Santa Luzia,
74823-190, Goianésia – GO
eng.pedrosa@live.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que ele tem feito, na verdade nada disso teria ocorrido se não fosse por Ele.

Agradeço a minha esposa que acompanhou toda minha trajetória, foram tantas coisas que ocorreram nesses anos, e ela me ajudando sempre, altos e baixos se passaram e ela permaneceu ali.

Agradeço aos meus colegas de mestrado pela ajuda até aqui.

Pelo IFG, que em tantas coisas me forneceu todo suporte necessário para a execução e desenvolvimento desse projeto.

Ao professor Ricardo pelas orientações, dicas, conselhos e cuidados, que sinceramente foi como um tutor pra mim desde o fim da graduação.

Agradeço de forma tão especial quanto ao professor Daniel, que aceitou me orientar e me deu todo suporte que eu precisava, até mesmo nas férias, para resolver os ocorridos de última hora.

Dedico a minha família, de pais analfabetos, que diziam acerca de nós “o que pode resultar os filhos do surdo e da louca”, mas até aqui nos ajudou o Senhor e coisas muito maiores Ele fará. O primeiro mestre da família, que minha mãe não pôde ver se concretizando, mas ela já sabia a muito tempo que teríamos todos nós sim um futuro bem diferente do que diziam.

Agradeço a cada amigo, de alguns vieram os apoios, outros aprendi tanto de engenharia e outros agradeço a oração por todos esses dias.

Agradeço a Deus, não sendo repetitivo mas Ele é o início e o fim, então não há como terminar de forma diferente.

RESUMO

Os materiais compósitos são materiais formados pela união de dois ou mais materiais com o objetivo de melhorar das propriedades específicas do material. O calcário é um minério bastante usual na fabricação de compósitos, principalmente em mármore sintéticos como carga mineral. Contudo, a vermiculita e a perlita são rochas que quando hidratadas se expandem, apresentando alta leveza, são higroscópicos e bastante usuais na indústria agrícola, mas na atualidade, tem se tornado fonte de estudos para aplicações na construção civil como isolantes térmicos e acústicos. Este trabalho propõe o estudo das propriedades mecânicas de um compósito utilizando a vermiculita e a perlita como substituto do calcário na fabricação de pedras sintéticas. Para tanto, foram fabricados os corpos de prova de compósito de matriz polimérica com diferentes adições de carga mineral de vermiculita e perlita, além da fabricação de compósito, com adição de calcário, utilizado como referência para a avaliação. Trezentos e trinta corpos de prova foram fabricados em molde aberto semelhante aos utilizados pela indústria com dez diferentes percentuais de adição de cargas minerais. Durante a fabricação, pode ser que corpos de prova com composições acima de 40% de carga mineral de vermiculita apresentaram misturas incompletas entre a matriz e o reforço inviabilizando as análises destes materiais. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão a três pontos e de atrito interno para a determinação dos módulos elásticos, tensões máxima, deformações, módulo elástico dinâmico e capacidade de amortecimento. Nas análises, o compósito com adição de calcário apresentou maiores resistências mecânicas e maiores capacidades de amortecimento. Os compósitos com adição de vermiculita ou perlita apresentaram redução da tensão máxima, frequência de amortecimento e módulos de elasticidade em relação ao compósito de referência. No entanto a adição dos minerais apresentou um aumento progressivo do amortecimento das estruturas. Contudo, quando analisado as propriedades mecânicas em função da densidade pode-se verificar valores maiores para os compósitos com 20% de vermiculita, 20% de Perlita e 60% de perlita e em relação a propriedade mecânica em função dos custos dos materiais, o compósito com 100% de perlita como carga mineral apresentou a melhor relação entre custo e benefício.

Palavras – Chave: Vermiculita, Perlita, Calcário, Pedra sintética, compósito polimérico com carga mineral;

ABSTRACT

Composite materials are materials formed by joining two or more materials with the aim of enhancing material-specific properties. Limestone is a very common ore in the manufacture of composites, especially in synthetic marbles such as mineral fillers. However, vermiculite and perlite are rocks that when hydrated expand, presenting high lightness, are hygroscopic and quite common in the agricultural industry, but nowadays, it has become a source of studies for civil construction applications as thermal and acoustic insulators. This paper proposes the study of the mechanical properties of a composite using vermiculite and perlite as a substitute for limestone in the manufacture of synthetic stones. For this purpose, the polymeric matrix composite specimens were manufactured with different additions of vermiculite and perlite mineral filler, and the composite fabrication, with limestone addition, used as reference for the evaluation. Three hundred and thirty specimens were manufactured in an open mold similar to those used by industry with ten different percentages of mineral filler addition. During manufacture, it may be that specimens with compositions above 40% vermiculite mineral filler presented incomplete mixtures between the matrix and the reinforcement, making the analysis of these materials unfeasible. The specimens were submitted to three point bending and internal friction tests to determine the elastic modulus, maximum stress, deformation, dynamic elastic modulus and damping capacity. In the analyzes, the limestone-added composite presented higher mechanical strengths and higher damping capacities. The composites with addition of vermiculite or perlite showed reduction of the maximum tension, damping frequency and elasticity moduli in relation to the reference composite. However, the addition of minerals showed a progressive increase in the damping of the structures. However, when analyzing the mechanical properties as a function of density, higher values can be verified for composites with 20% vermiculite, 20% perlite and 60% perlite and in relation to mechanical properties as a function of material costs, the composite 100% perlite as mineral filler presented the best cost / benefit ratio.

Key words: Vermiculite, Perlite, Limestone, Synthetic stone, mineral-loaded polymer composite;

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE GRÁFICOS	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS	15
2.1.1. Compósitos Poliméricos	16
2.2. RESINA	17
2.2.1. Resina Poliester	18
2.3. ROCHAS ARTIFICIAIS	20
2.3.1. Carbonato de Cálcio	22
2.3.2. Vermiculita	26
2.3.3. Perlita	31
2.3.4. Processo de expansão	34
3. METODOLOGIA	35
3.1. FORMULAÇÃO	36
3.2. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	39
3.3. ENSAIO DE ATRITO INTERNO	42
3.4. ENSAIO DE FLEXÃO	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS	50
4.2. FABRICAÇÃO	51
4.2.1. Pedra sintética de referência	51
4.2.2. Pedra sintética com adição de vermiculita	51
4.2.3. Pedra sintética com adição de perlita	53
4.3. ENSAIO DE ATRITO INTERNO	54
4.4. ENSAIO DE FLEXÃO	59
4.5. MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO	63
4.6. MICROSCOPIA	65
4.7. VIABILIDADE ECONÔMICA	68
5. CONCLUSÃO	72

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO I	79
ANEXO II	86
ANEXO III	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais depósitos de vermiculita	29
Tabela 2: Composição básica da Perlita	33
Tabela 3: Formulação adotada para cada grupo	36
Tabela 4: Formulação volumétrica de cada grupo adotado	38
Tabela 5: Composição dos pós por difração dos óxidos maiores analisados.	50
Tabela 6: Média dos resultados obtidos pelo ensaio de atrito interno	57
Tabela 7: Médias obtidas a partir do ensaio de flexão de 3 pontos	62
Tabela 8: Custos das cargas minerais das peças produzidas	71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Macromolécula de um poliéster curado.	19
FIGURA 2 - À esquerda uma imagem do moinho Raymond e à direita um diagrama do circuito básico de moagem e classificação com esse moinho.	24
FIGURA 3 – Vermiculita, a esquerda na forma mineral e a direita na forma expandida	28
FIGURA 4 – Fluxograma das atividades executadas	35
FIGURA 5 – Determinação do volume ocupado pelos minerais em resina	37
FIGURA 6 - Molde sendo preenchido com compósito a base de perlita	40
FIGURA 7 – Pontos de medição dos corpos de prova	42
FIGURA 8 - Resposta de um impulse para oscilador simples	43
FIGURA 9 – Suporte do sistema de atrito interno, sendo: 1) Suporte dos corpos de prova; 2 e 3) atuador sonelástico. 4) Captor Acústico; 5) Corpo de prova	44
FIGURA 10 - Esquema básico de ensaio de flexão de 3 pontos.	46
FIGURA 11 – Máquina de ensaios universal	48
FIGURA 12 - Pedra sintética com 100% de carga como calcário	51
FIGURA 13 – Corpos de prova a) com 40% de vermiculita e b) 60% de vermiculita	52
FIGURA 14 - Peça produzida com 100% de vermiculita	53
FIGURA 15 - Amostras PP40 após preparação prévia	54
FIGURA 16 - Microscopia da seção transversal peça com 100% de calcário como carga mineral	65
FIGURA 17 - Amostra com 20% de perlita como carga mineral.	66
FIGURA 18 - Peça a base de vermiculita (40%) como carga mineral.	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Reservas médias de calcário por região	24
Gráfico 2 - Participação dos países na produção mundial de calcário	25
Gráfico 3 – Frequência de amortecimento comparativo dos grupos a base de calcário e vermiculita	55
Gráfico 4 – Frequência de amortecimento comparativo dos grupos a base de calcário e perlita	55
Gráfico 5 – Amortecimento dos materiais a base de calcário e vermiculita	58
Gráfico 6 – Amortecimento dos materiais a base de calcário e perlita	58
Gráfico 7 - Tensão máxima comparativo do mármore tradicional em comparação dos a base de vermiculita	60
Gráfico 8 – Tensões máximas comparativas do mármore tradicional em comparação dos a base de perlita	60
Gráfico 9 – Comparação dos módulos de elasticidades dos materiais analisados	61
Gráfico 10 – Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico das pedras convencionais e da vermiculita	63
Gráfico 11 – Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico das pedras convencionais e da Perlita	64
Gráfico 12 – Resistência específica dos materiais fabricados	69
Gráfico 13 – Propriedades específicas dos materiais fabricados (Tensão e Custo)	70

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos surgiram no mercado para atender necessidades de diversos segmentos industriais buscando atender propriedades requeridas em projetos, as quais levam vantagens em relação aos chamados materiais de engenharia convencionais, ressaltando a possibilidade de combinação de propriedades na medida em que se deseja obter, sejam elas através da variação da quantidade percentual de cada componente, da forma geométrica do componente estrutural ou do tipo de cada componente. Em busca de materiais que apresentem características específicas como leveza, resistência mecânica e algumas vezes mal condutores elétricos que levou ao desenvolvimento e a diversos estudos relacionados com a área.

Para se ter uma idéia atualmente 49% de uma aeronave é composta por compósitos reforçados com fibras. Assim, a busca de materiais que possuam uma resistência específica (resistência mecânica e peso) elevada é considerável realizar pesquisas que visem a redução da densidade dos materiais, buscando uma boa relação entre os termos. Com uma resistência específica melhor que dos aços e materiais metálicos os materiais compósitos apresentam características bem interessantes que justificam bem seus estudos.

A calcita (CaCO_3) é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore com elevada pureza. O calcário encontrado extensivamente em todos os continentes é extraído de pedreiras ou depósitos que variam em idade, desde o pré-cambriano até o holoceno. As reservas de rochas carbonatadas são grandes e intermináveis, entretanto, a sua ocorrência com elevada pureza corresponde a menos que 10% das reservas de carbonatos lavradas em todo mundo. Nas atividades diárias é comum o uso de produtos contendo carbonato de cálcio nas mais variadas aplicações, tais como: Materiais de construção civil à produção de alimentos; Da purificação do ar ao tratamento de esgotos; Do refino do açúcar à pasta de dentes; Da fabricação de vidros e aço à fabricação de papéis, plásticos, tintas, cerâmica e tantos outros. (SAMPAIO, 2005)

De acordo com Oliveira (2004), a vermiculita é um aluminossilicato hidratado de ferro e de magnésio, pertencente à família dos filossilicatos, que possui estrutura cristalina micáceo-lamelar com cátions trocáveis em posições interlamelares. Sua particularidade é que quando aquecido a 800-1000 graus expande-se abruptamente na direção axial

umentando seu volume em até 20 vezes, devido a vaporização das moléculas de água que se encontram entre as camadas. Vermiculita é comercializada sempre na sua forma expandida, possuindo várias aplicações nos seguintes setores: Agricultura – Condicionamento de solos, componente de liberação lenta de nutrientes, suporte para inseticidas, condicionador de sementes, suporte para micronutrientes; Construção civil – Blocos e placas de isolamento térmico e acústico, enchimento; Indústria química – Catalisador de reações orgânicas; Cerâmica - Refratários isolantes, concretos isolantes; Meio Ambiente – Remediação de solos contaminados por petróleo.

Oriundo de um processo industrial de fabricação, a perlita expandida está entre os agregados inorgânicos mais leves que existem, sendo que sua massa específica gira na faixa de 30 a 240 kg/m³. O material básico desse agregado pertence a um grupo de rochas efusivas densas, vítreas, com alto teor de água (2 a 6%) e estrutura interna composta de anéis concêntricos. Esse mecanismo expande as partículas, possibilitando o surgimento de uma estrutura interna porosa que é mantida após o resfriamento. Outras vantagens que o agregado proporciona são o baixo peso, o retardo ao fogo em estruturas, o isolamento térmico e a facilidade de manipulação. A Perlita expandida é uma substância inerte, não inflamável e não combustível (PEREIRA, 2012).

Os materiais compósitos apresentam características interessantes e aplicações nas mais diversas áreas, a utilização de cargas minerais para a fabricação dos compósitos é fundamental principalmente quando tem-se materiais de apresentem valor agregado reduzido. Em busca de qualidade, resistência mecânica, assim como redução do peso levam a pesquisa e desenvolvimento de uma infinidade de novos materiais. O estudo de fibras para reforço tem gerado diversos estudos e pesquisas das mais diversas, sendo fibras de vidro a mais comum, além de fibras de aramida e carbono no polímero.

Quando se fala de pedra sintética o calcário é mais que dominante e pouca variação de carga mineral tem sido estudadas para esse material. A variação da carga mineral do mármore sintético por outro material que vise reduzir o peso do material sem afetar de formas drásticas a resistência mecânica do material é uma fonte de pesquisa que pode ser bastante aplicável.

Assim, o intuito desse trabalho é o desenvolvimento de um compósito para utilização como pedra sintética substituindo a carga mineral convencional (calcário) por dois

outros minérios a vermiculita e a perlita. Estes minérios são produzidos em larga escala no estado de Goiás, possuem diversas como cerâmicos, porém pouco estudado na formulação de compósitos. Dessa forma, este estudo visa a fabricação, e caracterização de um compósito sintético mais leve, com maior capacidade de amortecimento e com resistência mecânica próxima as pedras sintéticas convencionais fabricadas comercialmente.

O desenvolvimento de novos produtos à base de vermiculita e perlita podem ser um precursor na criação de empregos, com diversas aplicações como bases de máquinas, produtos para a construção civil e outras, principalmente no estado de Goiás, onde estes minérios são abundantes. Dessa forma, o trabalho científico pode se correlacionar com uma aplicação comercial, transformando possíveis impactos ambientais em benefícios sociais à população.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- a) Fabricação dos corpos de prova do compósito formado com resina poliéster e diferentes composições de carga mineral.
- b) Caracterização e obtenção das propriedades mecânicas das amostras por meio de ensaio de flexão de 3 pontos.
- c) Análise da densidade específica, realizando medições e pesagem de cada uma das amostras produzidas e comparação entre o material sintético de referência usado atualmente no mercado;
- d) Desenvolver uma formulação e uma metodologia específica para o problema em questão;
- e) Análise e comparação dos novos materiais produzidos;

2. REVISÃO

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Levy Neto e Pardini (2006), grandes avanços tecnológicos em áreas como, aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil e de artigos esportivos só foram possíveis graças ao avanço dos estudos de compósitos. Esses materiais são amplos e abrangentes, estando presente em polímeros reforçados com fibras, de composição metal/compósito, concretos estruturais e outros que incorporam a matriz metálica ou cerâmica. Os componentes básicos de um compósito são:

- Matriz: material aglutinante que funciona no sentido de manter os reforços trabalhando de forma conjunta transferindo os esforços entre si, geralmente plásticos e metais;
- Reforço: material que tem alta resistência a cargas em uma ou várias direção, mas na outra apresentam fragilidade, tendo assim pouca aplicação em situações usuais.

Em muitos casos é possível ao combinar materiais para conseguir compósitos, obtém-se efeitos sinérgicos. Filamentos extremamente resistentes, rígidos e leves, por exemplo, só seriam úteis a esforços de tração unidimensionais caso não fossem utilizados junto a uma matriz que os aglutinassem, ou seja, a matriz faz com que as tensões sejam distribuídas as fibras de forma a condicionar ao material composto pelas duas propriedades que isoladas elas não teriam (LEVY NETO, 2006).

Os materiais compósitos surgiram no mercado para suprir necessidades de diversos segmentos industriais buscando atender propriedades requeridas em projetos, as quais levam vantagens em relação aos chamados materiais de engenharia convencionais, ressaltando a possibilidade de combinação de propriedades na medida em que se deseja obter, sejam elas através da variação da quantidade percentual de cada componente, da forma geométrica do componente estrutural ou do tipo de cada componente. Atualmente com o aumento dos estudos e tecnologias envolvendo os materiais compósitos eles estão mais presentes nas indústrias.

Segundo Silva (2010), denomina-se de material compósito ou simplesmente de compósito um material composto por duas ou mais fases, sendo essas de diferentes propriedades químicas e físicas. Ainda, representam uma “classe de materiais compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço ou modificador), contínua ou não, cujas propriedades são obtidas a partir da combinação das propriedades dos constituintes individuais (regra da mistura)”. Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras são utilizados em aplicações estruturais, se destacam por suas excelentes propriedades mecânicas, associadas também a uma densidade mais baixa do que a de suas alternativas tradicionais.

O objetivo principal em se produzir compósitos é de combinar diferentes materiais para produzir um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários (ASKELAND, 1985).

Vários tipos de classificação são disponíveis para compósitos. Um desses tipos de classificação define compósitos em termos da morfologia de seus agentes de reforço: compósitos particulados, com fibras e laminados (CALLISTER, 2002).

2.1.1. Compósitos poliméricos

Compósitos poliméricos podem ser termoplásticos ou termorrígidos. A principal diferença entre estes dois tipos está no comportamento característico quando aquecidos, isto é, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldadas várias vezes devido às suas características de se tornarem fluidos sob ação da temperatura e depois se solidificarem quando a temperatura diminui. Já os termorrígidos não têm o comportamento de fluidos devido à presença de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares.

Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alta rigidez, elevada estabilidade térmica, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, resistência à fluência e relaxação. A definição da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades desejadas. Os polímeros termoplásticos, macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, normalmente são fundidos durante o processamento e podem ser reciclados, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material. Eles podem ser

moldados por injeção, extrusão ou por outras técnicas de moldagem por aquecimento. Suas maiores restrições são dimensões e custo dos equipamentos, quanto maior a peça, maior a tendência ao empenamento e mais caro o equipamento de processo (ALBINANTE et al, 2013).

Um dos aspectos importante na manufatura de compósitos consiste na obtenção de adesão adequada da fibra e matriz. Fatores como a determinação do comprimento crítico de fibras para determinada matriz, fração volumétrica de fibra nos compósitos influenciam na estabilidade de uma adequada interação entre fibra e matriz. O desempenho de compósitos reforçados por fibras depende de três diferentes fatores (SANTOS, 2006):

- A resistência e módulo da fibra;
- Resistência e estabilidade química da resina;
- Efetiva interação entre a resina e fibra para a transferência de esforços na interface.

2.2. RESINA

As resinas são materiais poliméricos de alta massa molar, acima de dez mil g/mol, cuja estrutura pode ser representada por pequenas unidades repetidas, denominadas mero (ASM INTERNATIONAL, 1993). Classificam-se, segundo sua origem, em naturais, semissintéticas e sintéticas. As resinas naturais são obtidas por meio de fontes animais, vegetais e minerais. As semissintéticas derivam de produtos naturais que sofreram modificação química, tais como a poliuretana derivada de óleo de mamona e o nitrato de celulose. As resinas sintéticas são formadas através de reações de adição e condensação como, por exemplo, a poliuretana – PU, a resina epóxi – ER e o poli (acetato de vinila) – PVAc (MILANESE, 2008).

Do grupo de resinas sintéticas, um dos utilizados é o óxido de etileno, onde um átomo de oxigênio está ligado a dois grupos CH_2 ligados entre si, sendo comum a presença o grupo glicidil que contém no anel epóxi um carbono secundário (RATNA, 2009).Essas resinas são quimicamente compatíveis com a maioria dos substratos e exibem boa molhabilidade superficial, justamente pelos grupos polares que minimiza problemas relativos à interface resina/reforço (RUSHING, THOMPSON e CASSIDY, 1994).

Segundo Ratna (2009), as resinas termorrígidas mais usadas são os poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas; as quais são usadas principalmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro. As resinas epóxi, também são bastante utilizadas e possuem a vantagem de possuírem melhores propriedades mecânicas e melhores resistências à umidade do que os poliésteres, poliuretanos e as resinas vinílicas. As resinas epóxi são polímeros termorrígidos de alto desempenho mecânico que contém pelo menos dois grupos epóxi terminais conhecido também como grupos oxirano ou etoxilina.

Segundo Kersting (2004), na área de fabricação de compósitos, as resinas termorrígidas têm poucas aplicações em sua forma pura, sendo necessários adesivos para melhorar a processabilidade. As formulações para a utilização deste tipo de polímero em materiais compósitos normalmente compreendem uma resina (com endurecedores, inibidores e plastificantes) e cargas ou reforços. A resina e seus aditivos conferem a coesão à mistura, fornecendo estabilidade dimensional e ao calor, resistência química e a chama. Os reforços também influenciam nas propriedades, sobretudo na estabilidade dimensional e ao calor, mas seu principal efeito é na tensão de ruptura e tenacidade do produto acabado. Cargas especiais e aditivos podem influenciar nas propriedades mecânicas, especialmente uma estabilidade dimensional, mas elas são usadas especialmente para conferir uma melhor resistência a chama, estabilidade frente a radiação ultravioleta e resistência elétrica.

A fabricação de pedras sintéticas com resinas poliéster e carga mineral é uma das mais usuais, sendo aplicada na indústria para a produção de pedras tradicionais, em casos específicos utiliza-se resina epóxi, mas em geral com carga apenas como item de aglutinação em menor proporção, e não como carga mineral em maior concentração (DEMARTINI, 2017).

2.2.1. Resina de poliéster

As primeiras observações sobre a resina de poliéster datam de 1833, mas a produção significativa desta teve início durante a I Guerra Mundial, produzida a partir de ácido ftálico e glicerol, sendo empregado como material impregnante para madeira e papel. Kienie preparou o chamado *alkyd*, poliéster usado como laca e verniz, obtido a partir de ácido ftálico e glicerol modificado com ácidos graxos insaturados (PINTO,2002).

Carothers (1929) estudou a química da poli esterificação e definiu a relação estequiométrica inerente à síntese deste poliéster. Ele verificou que o endurecimento destes materiais é acelerado devido à polimerização oxidativa envolvendo as duplas ligações dos poliésteres e a adição de monômero vinílico (por exemplo, estireno). A produção no Brasil, em 1998, foi de 52.445 toneladas, cerca de 40 % superior ao ano de 1991. A figura 1 abaixo apresenta a macromolécula de uma resina poliéster curada.

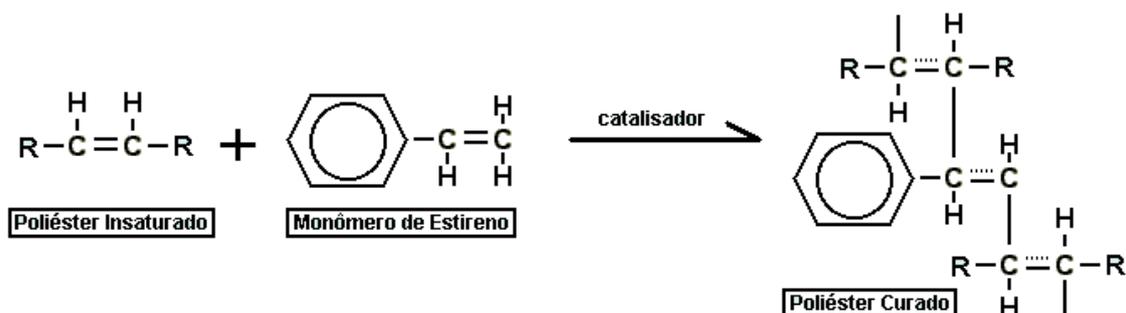


FIGURA 1: Macromolécula de um poliéster curado.

As resinas poliéster insaturadas são um dos termofixos mais largamente utilizados em aplicações industriais, tais como na marinha, na aviação, em automóveis, como substituto de materiais convencionais e em construções industriais devido as suas boas propriedades mecânicas, especialmente quando reforçadas com fibras ou cargas, seu baixo custo e boa processabilidade. Um dos desafios da utilização da RPI no campo automobilístico é resultante do acabamento superficial dos componentes fabricados. A contração da peça em função da cura das resinas termofixas contribui para redução da qualidade da superfície. Aditivos de baixa contração e materiais termoplásticos adicionados em resinas termofixas de modo não reativo, são alternativas para compensar a contração decorrente da cura (REIS, 2016).

O poli(tereftalato de etileno), mais conhecido pela sigla PET, é um polímero termoplástico, com estrutura parcialmente alifática e aromática, semicristalino e membro comercialmente mais importante da família dos poliésteres. De acordo com regras da IUPAC, sua nomenclatura correta é poli(oxitereftaloíla de oxietileno). O PET foi desenvolvido em 1941 por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson; porém, sua fabricação em grande escala teve início apenas nos anos 1950 nos EUA e Europa, quando foi utilizado principalmente para a fabricação de fibras têxteis. Só a partir dos anos 1970 o PET começou a ser utilizado na fabricação de embalagens. Já no Brasil, a resina PET só começou a ser comercializada na década de

1970, quando inicialmente foi utilizada na forma de fibras. Somente a partir de 1993, a resina passou a ser fortemente utilizada na fabricação de embalagens (SOARES JUNIOR, 2010).

A principal diferença entre os tipos de polietileno tereftalato reside no peso molecular ou grau de polimerização que dá origem a diferentes propriedades dos materiais resultantes. Quanto maior o peso molecular, maior a resistência mecânica, química e térmica do polietileno tereftalato. O peso molecular do polietileno tereftalato, por outro lado, é medido e expresso indiretamente, através dos valores de viscosidade intrínseca (VI), em uma relação de proporcionalidade direta. Quanto maior a VI, maior o peso molecular da resina. As propriedades do polietileno tereftalato, requeridas para cada tipo de aplicação, variam para cada tipo de uso podendo-se destacar as seguintes: inflamabilidade, transparência e propriedades de barreira (ALVES, 2003).

2.3. ROCHAS ARTIFICIAIS

A utilização da pedra na produção de ferramentas úteis usadas pelo homem data de tempos bastante remotos. De acordo com registros arqueológicos, os primeiros instrumentos de pedra tiveram seu desenvolvimento há 2,5 milhões de anos. Instrumentos de pedra eram usados para cavar, abater ou arrancar plantas, cortar junco ou separar a casca de árvores, na confecção de esteiras ou cestaria, transformar matérias-primas em artefatos úteis, etc.. Essa utilização extrema do homem em relação aos instrumentos de pedra e o uso intensivo dos mesmos na luta pela sobrevivência caracterizou um período que recebeu a denominação de Paleolítico ou idade da Pedra (ATLAS HISTÓRICO, 1995).

A nomenclatura rocha ornamental é utilizado para descrever rochas que, "após serragem, polimento e lustração, ressaltam características intrínsecas (textura, estrutura, trama dos minerais, etc), conferindo-lhes grande beleza e permitindo seu uso em revestimentos, pisos e ornamentação". Tal nomenclatura distingue as rochas assim caracterizadas das "pedras ornamentais", termo que designa "aquelas pedras passíveis de serem utilizadas como adornos ou peças decorativas in natura ou então trabalhadas sob as mais variadas formas" (SOUSA, 2007).

No meio comercial, as rochas ornamentais subdividem-se em dois grandes grupos: granitos e mármore.

O termo granito refere-se às rochas não carbônicas, de composição silicática, suscetíveis de polimento e empregadas como material de revestimento. Assim, para a indústria, são considerados granitos as rochas graníticas e afins (o granito propriamente dito, dioritos, granodioritos, sienitos, etc), como outras rochas de natureza geológica diversa (gnaisses, magmátitos, charnockitos, etc). Os termos granito e mármore, são adotados nas transações comerciais, uma vez que o interesse maior tanto para o consumidor quanto para produtor não reside em tal discussão, mas sim nos aspectos estéticos tais como cor, textura, tamanho do grão (por sua vez dependentes da composição mineralógica das rochas) e nas características tecnológicas (por ex., durabilidade) (GONÇALVES, 2011).

A rocha artificial comumente conhecida como rocha industrializada ou rocha composta, é produzida por 95% de agregados naturais, ou seja, é considerado praticamente um material natural. Os agregados que compõe a rocha artificial podem ser constituídos por – partículas de mármore, granito triturado, areia de quartzo, cristais de vidro como sílica ou óxido de silício (SiO_2) e demais compostos – que são misturados juntamente com agentes aglutinantes, como a resina de poliéster, por exemplo, que dependendo do agregado principal origina-se o tipo de rocha artificial. Dentre os tipos de Rocha artificial, podemos destacar três linhas de produção, a realizada através de partículas de mármore e resina de poliéster, conhecida como “mármore composto”, a de produção à base de cristais de vidro, conhecida como “superfície cristalizada de vidro”, e por fim a produção realizada por agregados de quartzo e granito triturado, conhecida como “superfície de quartzo” (Pedra artificial, 2018).

As rochas artificiais têm hoje uma enorme importância na construção civil e podem ser enquadradas em quatro classes (MARTINS, 2010):

- Produtos cerâmicos, que são os produtos baseados em argila, moldados plasticamente a frio e endurecidos por cozedura;
- Produtos vítreos, que são os materiais que adquirem plasticidade em elevadas temperaturas e endurecem com o resfriamento;
- Produtos compactos, que são materiais formados por partículas da rocha natural aglomerados por uma resina sintética sujeitos à compactação;
- Produtos hidráulicos, que são materiais similares aos produtos compactos,

entretanto, utiliza-se um aglomerante hidráulico ao invés de uma resina polimérica.

2.3.1. Carbonato de cálcio

O carbonato de cálcio é um dos minerais mais abundantes, encontrado em várias formas e em todo mundo. É muito estável e por isso amplamente utilizado como carga na indústria do plástico. O PVC, poliolefinas, fenólicas, poliésteres e epóxis são resinas que podem formar compósitos com o carbonato de cálcio. Outras propriedades do CaCO_3 que podem ser destacadas são a não abrasividade, é um material atóxico, apresenta baixa absorção de plastificantes e boa resistência à decomposição térmica durante o processo e possui uma cor bastante clara. O carbonato de cálcio é produzido em diferentes distribuições de tamanho de partícula, grades comerciais incluem partículas muito finas que não estavam disponíveis há algumas décadas e também partículas com superfície modificada para facilitar a dispersão (RIBEIRO, 2011).

A calcita (CaCO_3) é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore com elevada pureza. O calcário encontrado extensivamente em todos os continentes é extraído de pedreiras ou depósitos que variam em idade, desde o Pré-Cambriano até o Holoceno. As reservas de rochas carbonatadas são grandes e intermináveis, entretanto, a sua ocorrência com elevada pureza corresponde a menos que 10% das reservas de carbonatos lavradas em todo mundo (SAMPAIO, 2005).

O calcário apresenta uma grande variedade de usos, desde matéria prima para a construção civil, matéria prima para a fabricação de cal e cimento, corretivos de solos ácidos, ingredientes na indústria de papel, plásticos, química, siderúrgica, de vidro; refratários e outras. Ainda assim, o calcário representa um produto relativamente barato, exceto em suas formas beneficiadas mais sofisticadas, de valor agregado elevado. O baixo preço do calcário resulta numa estreita relação entre a demanda e a produção, levando a um baixíssimo nível de estoques na indústria. Por outro lado, dada a relação entre os baixos preços do calcário e o custo do frete, há pouco intercâmbio da produção, em nível internacional, exceto para os produtos beneficiados de maior valor agregado, que representam ínfima participação na produção total (menos de 1%), apesar de apresentar preços bem mais elevados (SILVA, 2009).

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2006, a produção de calcário bruto (não beneficiado) se dá em quase todos os estados brasileiros. Os maiores produtores foram Minas Gerais, com 22,3% de participação na produção nacional; Distrito Federal, com 20,4%; Sergipe, com 13,4%; e Ceará, com 11,0%. Juntos, esses estados perfazem dois terços da produção brasileira, que em 2005 atingiu cerca de 21.9 milhões de toneladas, incluindo a produção de calcita e conchas calcárias. A produção de calcário beneficiado também se dá em praticamente todos os estados brasileiros. A produção beneficiada está concentrada em três estados: Minas Gerais, com 34,6% de participação na produção nacional; São Paulo com 13,6%; e Paraná com 12,6%. Juntos, esses estados perfazem mais de 60% da produção brasileira, que em 2005 atingiu cerca de 66.3 milhões de toneladas, incluindo a produção de calcita e conchas calcárias (SILVA, 2009).

O tratamento das rochas carbonatadas, especialmente o calcário, depende do uso e especificações do produto final. A lavra seletiva, a catação manual, a britagem em estágio unitário e o peneiramento são os métodos usuais para obtenção de produtos, cuja utilização final não requer rígidos controles de especificações. Este é o caso, especialmente, para o calcário agrícola. A cominuição do calcário pode ser feita via seca, segundo as etapas de britagem, classificação, moagem em moinho de rolos tipo Raymond ou em moinhos tubulares com bolas (Figura 2), com cuidados especiais para evitar a contaminação por ferro. Para moagem mais fina, são utilizados moinhos micronizadores ou de bolas, com os mesmos cuidados em relação à contaminação por ferro. Uma descrição do tipo de equipamento utilizado para moagem do calcário pode ser vista na figura 2 (SAMPAIO, 2005).

O somatório das reservas medidas, indicadas e inferidas, de calcário é da ordem de 100 bilhões de toneladas. É importante ressaltar que por força da Lei n.º 6.567/1978 um empreendimento voltado à produção de calcário a ser empregado como corretivo de solos, pode se utilizar do regime de licenciamento, o que implica dizer que prescinde de prévios trabalhos de pesquisa; trata-se de lavra imediata. O gráfico 1 mostra a capacidade das reservas de produção por região do Brasil.

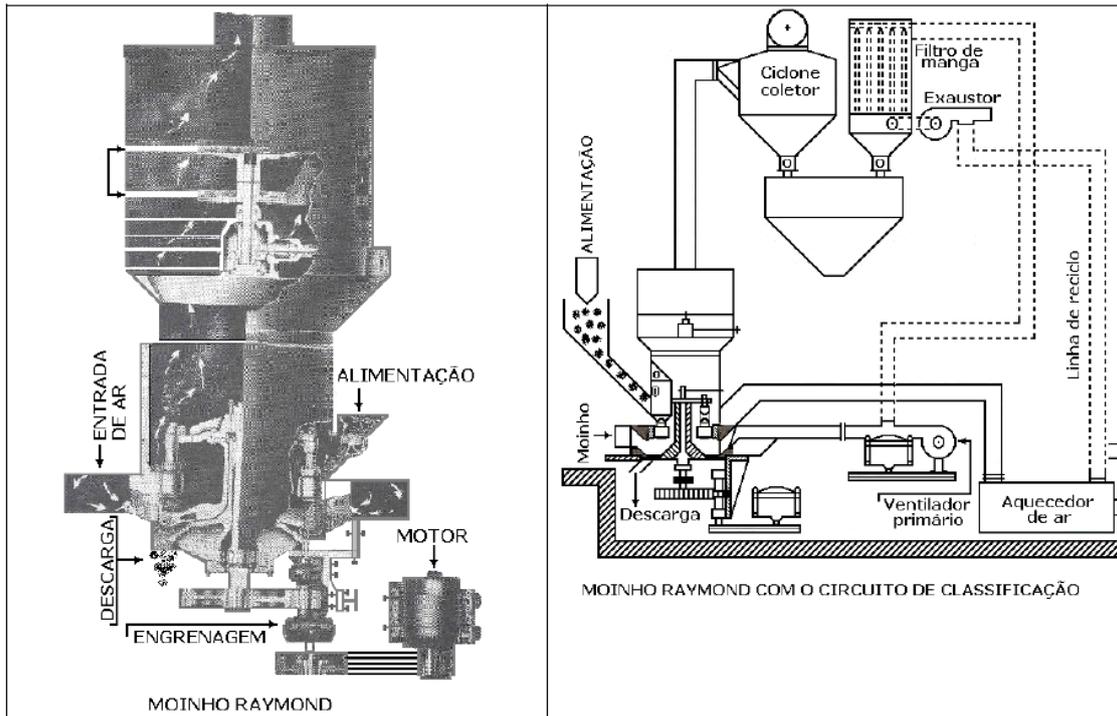
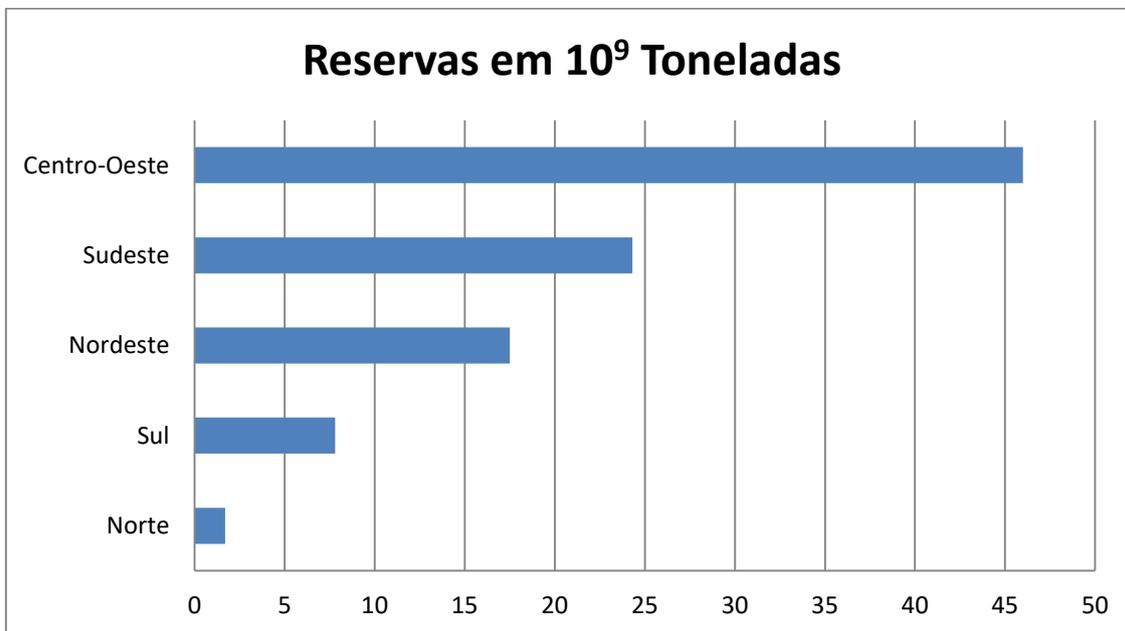


FIGURA 2 - À esquerda uma imagem do moinho Raymond e à direita um diagrama do circuito básico de moagem e classificação com esse moinho.

Fonte: Sampaio, 2009

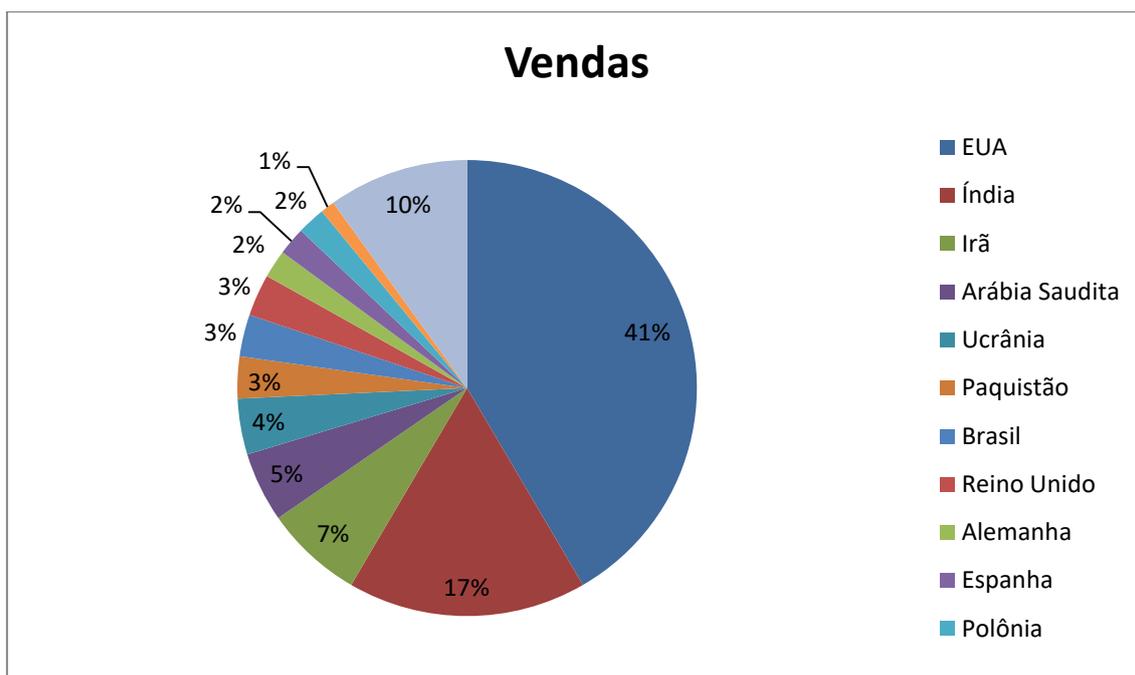
Gráfico 1: Reservas médias de calcário por região



Fonte: Parahyba, 2019

Com relação a participação mundial, o gráfico 2 abaixo apresenta os maiores produtores mundiais de calcário no ano de 2007.

Gráfico 2: Participação dos países na produção mundial de calcário



Fonte: Silva, 2009

As rochas carbonatadas mais comercializadas, em todo mundo, são calcário e dolomito. Os calcários são rochas sedimentares compostas, basicamente, por calcita (CaCO_3), enquanto os dolomitos são também rochas sedimentares compostas, basicamente, pelo mineral dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). De longe, a calcita apresenta maior valor econômico, comparada às demais, dolomita, mármore e greda ou giz (SAMPAIO, 2005).

Segundo Marinho e Boschi (2000) e Freas (1994), há três diferenças básicas entre a calcita e a dolomita, de fundamental interesse à calcinação:

- na calcita há 56% de CaO e na dolomita 21,95% de MgO e 30,4% de CaO;
- as temperaturas de decomposição, durante a calcinação, ocorrem em faixas diferentes de temperatura para a calcita e a dolomita;
- a perda ao fogo para os dois minerais é 44% para a calcita e 48% para dolomita, que corresponde, basicamente, à liberação de CO_2 .

O Calcário, seja ele na forma de calcita ou dolomita tem uma infinidade de aplicações industriais, podendo ser usada na Indústria de Cimento, para Cal Virgem, na Indústria de Papel, na Indústria de Plásticos, na Indústria de Tintas, Indústria de Vidros, na

Indústria Cerâmica, na Agricultura, na Alimentação de Animais, Rochas Ornamentais ou Decorativas (Fabricação de pedras sintéticas, por exemplo), na Indústria Metalúrgica, no Tratamento da Água entre outras.

Quando se fala de mármore sintético, apesar de o mesmo já existir a vários anos, é um material presente no nosso dia a dia e de grande utilidade. Segundo Rabahi (2010), os materiais usados na fabricação de mármore sintético são a resina poliéster insaturada, carga mineral de carbonato de cálcio (CaCO_3) e aditivos. A resina pura possui uma tensão de flexão média de 82 MPa, porém com valor agregado elevado (aproximadamente R\$ 20,00 o Quilo), para aumentar o volume e permitir a utilização da peça, normalmente a proporção adotada é de 20% de resina poliéster e 80% de carbonato de cálcio (que é bem usual devido o valor agregado baixo podendo chegar a R\$ 150,00 a tonelada).

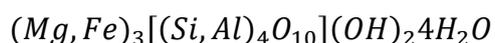
O calcário na fabricação de pedra sintética é bastante usual no mercado, na produção de mármore sintético é amplamente e quase que exclusivo o uso de calcário como carga mineral, isso devido os custos e características que o material proporciona, além do calcário outros estudos envolvem adição de fibras de vidro e a reutilização de rejeitos de marmoraria como carga mineral. Rabahi (2016), mostrou que a carga mineral utilizada pode ser rejeitos de marmoraria que seriam pedras naturais, moídas, peneiradas, proporcionando uma melhoria nas tensões máximas a flexão dos materiais. Nesse estudo, e em Rabahi (2010) é apresentado que a proporção usual na indústria para fabricação de pedras sintéticas é de 20% para resina e 80% de carga mineral. Realizou o processo em molde aberto e usando um vibrador para a compactação do material no molde assim como adotado na indústria na fabricação do mármore sintético tradicional.

2.3.2. Vermiculita

A produção da vermiculita e início de sua utilização ocorreu nos Estados Unidos, e remontam há quase um século. Atualmente sua produção em escala industrial é realizada de forma concentrada em algumas poucas regiões no mundo e sua aplicação está grandemente concentrada em nações de maior desenvolvimento. Pode-se afirmar, por essa razão, que a sua intensidade de uso pode ser considerada um indicador do grau de desenvolvimento tecnológico do país em foco (SZNELWAR,2009).

A vermiculita é um silicato hidratado de formato lamelar, contendo quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio e alumina. Suas características físicas são as mesmas das micas, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade. Suas cores variam do bronze ao amarelo-amarronzado, com brilho perolado típico. A dureza do mineral pode variar de 2,1 a 2,8, na escala Mohs.(UGARTE, 2005)

A vermiculita é um mineral da família das micas (aluminossilicato hidratado de ferro e de magnésio), formada pela superposição de lamínulas finas que ao se submeter a altas temperaturas (cerca de 1000°C) se expande até vinte vezes do seu volume original, deixando um grande vazio em seu interior. As características mais importantes deste material são: baixa densidade que varia de 80 até 120 kg/m³, insolúvel em água, não é tóxico, não abrasivo, baixa condutibilidade, incomburente, inodoro, não se decompõe, nem deteriora ou apodrece, etc. Uma representação geral da sua fórmula de uma célula unitária é: (OLIVEIRA, 2004)



O nome vermiculita é derivado do latim *vermiculus* que significa pequeno verme e se deve ao fato de que esse material se expande sob aquecimento, durante o qual suas partículas movimentam-se de forma semelhante à dos vermes. (UGARTE, 2005)

A vermiculita é comercializada na forma de concentrados (vermiculita não expandida) e na forma expandida. No processo de expansão, em temperaturas próximas a 900°C, seu volume pode aumentar de 10 até 30 vezes. A comercialização nesta última forma, geralmente requer que sua transformação (expansão) seja feita próxima aos pontos de aplicação, considerando o grande volume a ser manuseado e transportado. O comércio internacional e, vendas para aplicações distantes das minas, ocorrem, em geral, na forma de concentrados. A figura 3 apresenta a vermiculita nos dois estados mais usuais, a esquerda na forma de mineral e a direita na forma comercial usual já expandida (SZNELWAR, 2009)



FIGURA 3 – Vermiculita, a esquerda na forma mineral e a direita na forma expandida

O Brasil detém 11% das reservas mundiais de vermiculitas e ocupa, atualmente, a quarta posição mundial na produção, com 6%. A produção nacional é da ordem de 35%, destacando o estado de Goiás como o maior produtor do minério beneficiado, seguido pelos estados do Piauí, Bahia e Paraíba. A lavra é a céu aberto, semi ou totalmente mecanizada. Segundo algumas estimativas, o consumo mundial de vermiculita, em 2006, foi de 516 mil toneladas, fornecidas em grande escala pela África do Sul (200 mil toneladas) seguida dos Estados Unidos (100 mil toneladas). No Brasil, a produção, em 2006, foi de 30 mil toneladas e o consumo interno, 23 mil toneladas (UGARTE, 2005).

A tabela 1 apresenta as principais reservas de vermiculita no país, com a quantidade aproximada de cada reserva e o tipo de vermiculita.

Os depósitos brasileiros de vermiculita conhecidos ocorrem dentro de zonas de complexos máfico-ultramáficos serpentinizados e carbonatitos derivados de alteração da mica. Os depósitos metamorfizados (máfico-ultramáfico), frequentemente, contêm silicatos como a serpentina crisotila e anfibólios como a tremolita, que são minerais de asbestos. Já os depósitos de carbonatitos não contêm minerais do grupo do asbestos. Novas tecnologias permitem a produção de concentrado de vermiculita livre de asbestos, por meio da retirada do mesmo durante o processo de beneficiamento (peneiramento ou classificação) (FRANÇA, 2016).

Tabela1: Principais depósitos de vermiculita

DEPÓSITO	LOCALIZAÇÃO	TIPO	VERMICULITA 10 ⁶ (t)
Catalão I	Ouvidor (GO)	Carbonalito	10
Queimada Nova	Queimada Nova (PI)	Mático e Ultramático	1,95
Santa Luzia	Santa Luzia (GO)	Mático e Ultramático	>7
Sancrelândia	Sancrelândia (GO)	Mático e Ultramático	1,5
Montes-Belos	Montes-Belos (GO)	Mático e Ultramático	2
Brumado	Brumado (BA)	Mático e Ultramático	2

Fonte: (Reis, 2002)

O mercado de vermiculita é um mercado em expansão com inúmeros aplicativos. O carbonatito de Palabora e as minas dos EUA dominam a produção com 80% do total. Os depósitos brasileiros em produção são restritos a corpos máficos/ultramáficos, que têm dimensão reduzida e em geral são sub verticais. Carbonatitos tem melhor dimensão para lavra a céu aberto e a vermiculita pode ser lavrada como subproduto, como é o caso de Palabora. No Brasil os maiores recursos conhecidos de vermiculita estão no corpo Catalão I, contendo um mínimo de 10Mt com teor de 20% de vermiculita testado até a profundidade de 15m. (REIS, 2001)

A vermiculita expandida pode ser substituída por diferentes materiais, dependendo do uso final do produto. Na confecção de peças de concreto leve e recobrimento para paredes e tetos, pode ser substituída pela perlita expandida. Ainda nestas aplicações, pode-se encontrar o uso de materiais de menor custo, porém mais densos que a perlita expandida, ou seja, algumas argilas, silte e outros minerais argilosos intemperizados. Em mistura com gesso, promove maior resistência à abrasão e quebras e pode ser utilizada em painéis e divisórias (LIN, 1998).

A vermiculita tem grande aplicação dentro da indústria da construção civil, com destaque para sua utilização como: enchimento de pisos, isolamento termo-acústico em

divisórias, forros, lajes e paredes, corta fogo, câmaras a prova de som, rebocos isolantes, etc. (OLIVEIRA, 2004).

Isar (2018) destaca ainda que o mercado oferece a vermiculita em forma de placas e blocos ou em forma de concreto leve de vermiculita expandida; recomendado, para contra-piso, rebocos acústicos e como enchimento de excelente qualidade.

Segundo Reis (2001), no Brasil o mercado é ainda incipiente devido a baixa cultura de aplicativos e o alto preço devido a pequena escala de produção. Entretanto a utilização em pinturas anti-fogo e isolantes térmicos irão expandir o mercado destes aplicativos. Atualmente mais de 70 aplicações são conhecidos para o uso de vermiculita expandida, sendo as principais como:

- Absorção de óleos, pesticidas e metais;
- Filler em tintas e massas;
- Retentores de água em jardinagem e agricultura;
- Filler na formulação de fibra de vidro;
- Isolante térmico e acústico;
- Massa em blocos de concreto e tijolos leves para construção;
- Blocos e cerâmicas refratárias;
- Revestimentos de teto e paredes contra incêndio;
- Arejador de solos argilosos;
- Inibidor de lixiviação de micro e macro nutrientes de adubos;

A vermiculita tem sido estudada em diversas áreas, sendo as principais a agrícola e em isolamentos acústicos. Na área de compósitos, Oliveira (2007) estudou as propriedades térmicas e mecânicas de um compósito formado de polietileno e vermiculita, por meio de análise térmica e ensaios de flexão. No trabalho foi observado que a adição da vermiculita como carga mineral até o percentual de 20% gerou um aumento nas propriedades mecânicas com relação ao polímero isolado, com a resistência mecânica elevada de 600 MPa para próximo de 800 MPa, e a resistência e temperatura passando de 401°C para 435°C.

Oliveira (2012) estudou a produção de um compósito a base de gesso com resíduo de EVA e vermiculita, analisando as propriedades físicas da adição da vermiculita no gesso, assim como seu peso específico, sua interface, resistência a tração e resistência a

compressão, onde, é possível notar um melhoramento de todas as propriedades com a adição de 15% de vermiculita, onde a resistência a compressão passa de 3,3 MPa para 3,3 MPa, de resistência a tração passa de 1,8 MPa para 2,5 MPa.

2.3.3. Perlita

A perlita é um mineral de origem vulcânica e pode ser encontrada somente em algumas regiões do mundo. A característica que a difere dos demais minerais vulcânicos é a sua capacidade de expandir-se, quando aquecida a altas temperaturas, de quatro a vinte vezes seu volume original. Quando a perlita moída é aquecida a mais de 900°C, se expande de maneira similar ao milho de pipoca. Este fenômeno se deve a presença de água retida dentro do mineral cru. A água contida na perlita se evapora durante o processo de aquecimento, formando uma infinidade de pequenas bolhas de ar seladas e conectadas entre si. Este fenômeno faz da perlita um produto de baixa densidade com excelentes propriedades físicas, como por exemplo, o ponto de fusão (1085-1250°C), calor específico (0,20cal/g.°C), massa específica aparente (80-100 kg/m³) e umidade (<0,5%). Quimicamente a perlita é essencialmente um alumino silicato amorfo (SILVA FILHO, 2017)

A perlita expandida é um alumino silicato amorfo que apresenta em sua composição em torno de 75,0% de óxido de silício (SiO₂), possuindo também outras espécies em sua composição como óxidos de alguns metais (CaO, K₂O, Na₂O, MnO, Fe₂O₃, dentre outros) e Traços de alguns metais . Possui vasta aplicabilidade no âmbito industrial principalmente por apresentar propriedades físicas e químicas favoráveis como: baixa densidade e sua baixa inflamabilidade, sendo um perfeito isolante térmico e acústico; é um material resistente a insetos e não apodrece por ser inorgânico; é um material de baixo custo, abundante e natural. Ganhando destaque no âmbito de: materiais, cerâmica, têxteis, revestimentos, adsorção, catálise, médica e farmacêutica. As sílicas e silicatos vêm sendo empregados na área ambiental, por sua relevante atividade anti-corrosiva, em que no ramo industrial, um revestimento fino de sílica ou silicato, diretamente sobre aço ou zinco é de grande importância (ALMEIDA, 2016).

A perlita expandida possui vasta aplicabilidade no âmbito industrial principalmente por apresentar propriedades físicas e químicas favoráveis como: baixa densidade e sua baixa inflamabilidade, sendo um perfeito isolante térmico e acústico; é um

material resistente a insetos e não apodrece por ser inorgânico; é um material de baixo custo, abundante e natural (ALMEIDA, 2016).

Quando a perlita começou a ser utilizada industrialmente, era aplicada apenas na indústria da construção civil, na fabricação de tijolos e placas isolantes. A baixa condutividade térmica, baixa densidade, alta absorção de som e resistência ao fogo promovem a fabricação de rebocos de maior vantagem e eficiência que os fabricados com areia convencional. Como a maioria das perlitas encontradas apresenta, usualmente, teores de sílica acima de 70% e alta capacidade de absorção, esse material comporta-se de maneira inerte em muitos ambientes, tornando-se um excelente material para ser utilizado com auxiliar de filtragem e carga industrial (DOGAN et al., 1997).

Os Estados Unidos são um dos maiores produtores e consumidores de perlita expandida, sendo a sua utilização abrangente a diversos ramos da indústria, especialmente onde a diatomita sempre foi utilizada, como por exemplo: agregados para retenção de água na horticultura, isolante térmico contra baixas temperaturas, agregados de reboco e de enchimento de estruturas de alvenaria, agregados de concreto, auxiliar de filtragem e carga industrial. Porém, o maior uso da perlita expandida é em produtos pré-moldados. Embora o Brasil não produza perlita, a sua utilização vem crescendo, com as importações desse material da Argentina e da Turquia. Os produtos comercializados no Brasil têm, praticamente, as mesmas funções citadas acima, no caso dos Estados Unidos. São comercializados produtos com três especificações: i) grosso: granulometria de 3 a 10 mm e densidade de 80 a 100 Kg/m³; ii) fino: granulometria abaixo de 10 mm e densidade de 90 a 120 Kg/m³; e iii) extrafino: granulometria abaixo de 0,149 mm (FRANÇA, 2009).

A perlita expandida está entre os agregados inorgânicos mais leves que existem oriundos de um processo industrial de fabricação, sua massa específica é da faixa de 30 a 240 kg/ m³. O material básico pertence a um grupo de rochas efusivas densas, vítreas, com alto teor de água (2 a 6%) e estrutura interna composta de anéis concêntricos. O ponto de fusão é o mecanismo de expansão da rocha sólida, de forma que os poros se mantêm conectados pelo material fundido ao mesmo tempo em que o material permanece viscoso para manter os fluxos desenvolvidos e/ou os gases internos sob pressão. Isso expande as partículas, possibilitando o surgimento de uma

estrutura interna porosa que é mantida depois de resfriada. (TEDESCO, 2016). A composição básica da perlita pode ser apresentada na tabela 2 abaixo.

No âmbito industrial e comercial a perlita expandida é amplamente utilizada em diversos setores como (ALMEIDA, 2015):

- Construção civil: Devido a ser leve e originado através de uma expansão do mineral bruto. Podendo ser comprimida tornando-se um perfeito isolante térmico e acústico. É resistente a insetos e não apodrece por ser inorgânico, é um material de baixo custo e não inflamável.
- Agrícola: Por apresentar baixa capacidade de troca iônica, é muito usada no cultivo de sementes, plantas e cobertor para o solo.

TABELA 2: Composição básica da Perlita

CONSTITUINTE	PORCENTAGEM %
SiO₂	71,0 – 75,0
Al₂O₃	12,5 – 18
Na₂O	2,9 – 4,0
K₂O	4,0 – 5,0
CaO	0,5 – 2,0
Fe₂O₃	0,1 – 1,5
MgO	0,03 – 0,5
TiO₂	0,03 – 0,2
MnO₂	0,0 – 0,1
SO₃	0,0 – 0,1
FeO	0,0 – 0,1
Ba	0,0 – 0,1
PbO	0,0 – 0,5
Cr	0,0 – 0,1

Fonte: Alkan e Dogan, 2011

Carvalho (2017) estudou a adição de perlita e vermiculita na fabricação de um compósito concreto utilizado em conforto térmico, onde adicionou-se 50% em volume de perlita expandida e 55% de volume de vermiculita expandida em um bloco de concreto, em ambos os casos houve redução na massa específica, no entanto um aumento

significativo na absorção de água do material, e não ocorreu mudança significativa nas propriedades mecânicas do material.

2.3.4. Processo de Expansão

Os minérios e concentrados são normalmente analisados pela sua concentração seja de perlita ou vermiculita, e tamanho das partículas. A amostra seca é peneirada em várias frações, segundo a classificação granulométrica. Após o resfriamento, o mineral expandido é novamente pesado, e a ganga residual é removida por meio de separação a seco ou a úmido, esta última menos utilizada. Os padrões de granulometria mais utilizados seguem as seguintes especificações (UGARTE, 2005).

- Mícron < 0,5 mm
- Superfino entre 0,5 e 1 mm
- Fino entre 1 e 2 mm
- Médio entre 2 e 4 mm
- Grande entre 4 e 8 mm

Segundo Sznelwar (2005), os maiores volumes comercializados no Brasil estão nos padrões Superfino, Fino e Médio em função da disponibilidade dos produtores. Os teores de concentração praticados no mercado para estes produtos estão entre 85% de vermiculita contida para o minério Superfino, 90% para o Fino e 95% para o minério médio. Uma especificação restritiva do concentrado é o teor de umidade admissível variando entre 5 e 7% máximo. Durante o processo de esfoliação dos minérios a água interlamelar é expulsa em forma irreversível, deixando espaços entre placas e gerando com isto um aumento considerável do volume, chegando a ser de 10 a 15 vezes o volume original. Esta propriedade tem gerado a maior quantidade de aplicações desses minérios na indústria. É um fator decisivo na determinação da qualidade do produto final, ao ponto de ser objeto de normalização por diversas entidades tais como ASTM e ABNT.

3. METODOLOGIA

O fluxograma (Figura 4) demonstrativo abaixo nos mostra cada etapa dos processos adotados na execução desse trabalho.

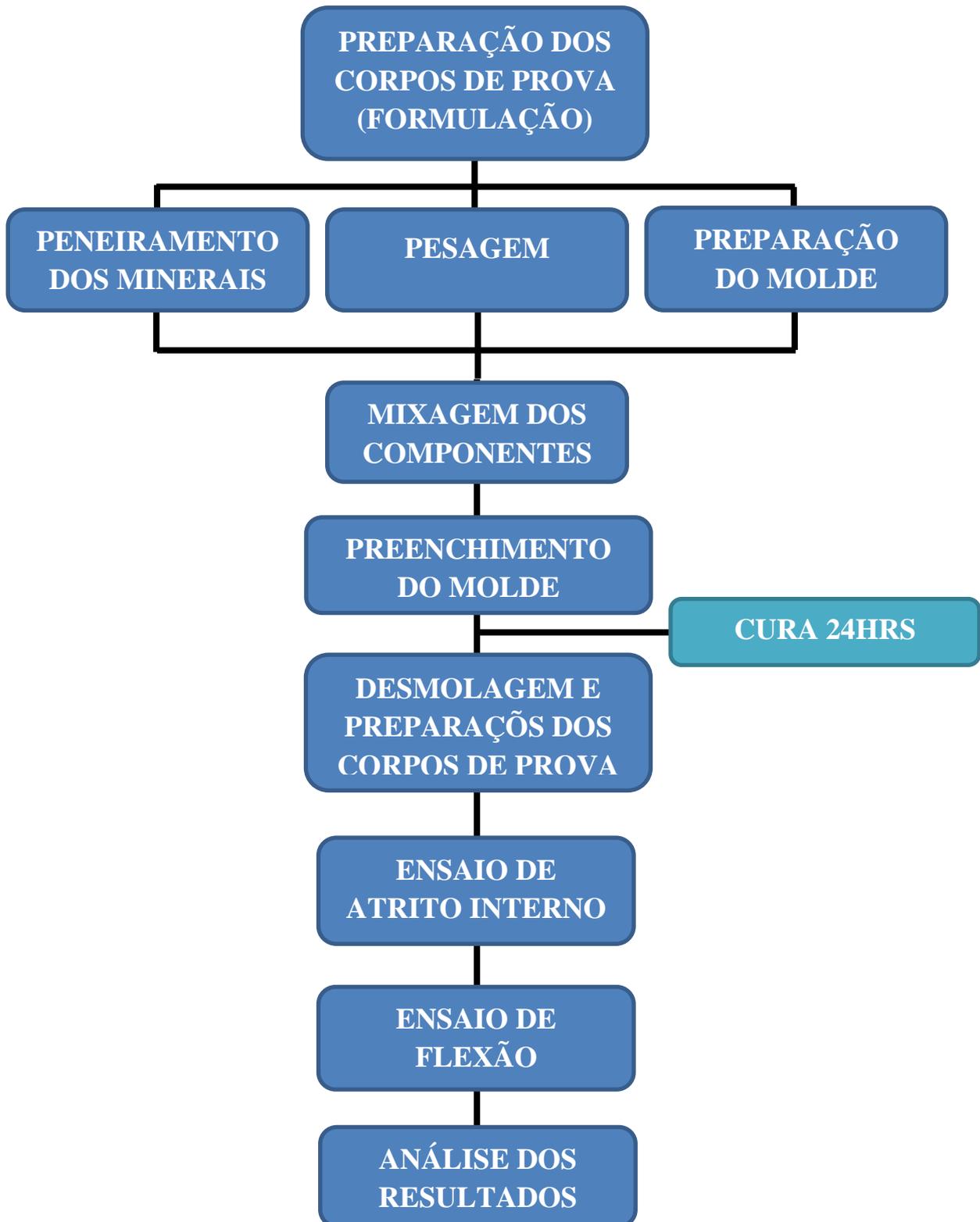


FIGURA 4 – Fluxograma das atividades executadas

3.1.FORMULAÇÃO

Inicialmente a proposta é fazer uma substituição do calcário pela vermiculita e perlita. Nessa proposta as substituições ocorreriam nos percentuais descritos a seguir referentes a cargas minerais. A Tabela 3 mostra a formulação adotada para a fabricação dos corpos de prova.

Esses mesmos parâmetros de 25% de resina e 75% de calcário foram adotados para o trabalho em questão, no entanto, o parâmetro adotado é de conservação de volume, sabe-se que para o preenchimento completo do molde são necessários 700g de resina e 2.800g de carbonato de cálcio, com a substituição do calcário por vermiculita e perlita é necessário checar sua dissolução em fase líquida, um dos objetivos desse processo é, além da manutenção das propriedades mecânicas, a redução da massa específica do novo produto.

Tabela 3: Formulação adotada para cada grupo

GRUPOS	PERCENTUAL DE NOVO MATERIAL	COMPOSIÇÃO
PSR – Pedra Sintética Referência	0%	Peça 100% de calcário, sem adição de outro mineral
PV20 – Pedra vermiculita 20%	20%	20% de vermiculita e 80% de calcário
PV40 – Pedra vermiculita 40%	40%	40% de vermiculita e 60% de calcário
PV60 – Pedra vermiculita 60%	60%	60% de vermiculita e 40% de calcário
PV80 – Pedra vermiculita 80%	80%	80% de vermiculita e 20% de calcário
PV100 – Pedra vermiculita 100%	100%	100% de vermiculita
PP20 - Pedra Perlita 20%	20%	20% de perlita e 80% de calcário
PP40 - Pedra Perlita 40%	40%	40% de perlita e 60% de calcário
PP60 - Pedra Perlita 60%	60%	60% de perlita e 40% de calcário
PP80 - Pedra Perlita 80%	80%	80% de perlita e 20% de calcário
PP100 - Pedra Perlita 100%	100%	100% perlita

A vermiculita, perlita e calcário apresentam densidades diferentes, e cada um deles em base úmida podem responder de formas diferentes, cada um deles, quando mixados com resina apresentam volume final diferente do volume em base seca, assim deve-se analisar a característica de cada um nessa situação em específico.

Para esse projeto realizou-se a seguinte medição, em 4 provetas volumétricas diferentes, na primeira colocou-se 90grs de resina apenas em cada uma das outras três foi colocada 90 gramas de resina polimérica PET e 10 gramas de cada mineral.

- Proveta A – 90grs de resina
- Proveta B – 90grs de resina + 10grs de calcário
- Proveta C – 90grs de resina + 10grs de vermiculita
- Proveta D – 90grs de resina + 10grs de perlita

A proveta A, apresentou um volume de 70ml apenas com a resina (apresentando uma densidade como esperado de 1280 Kg/m^3), a proveta B com calcário apresentou um volume de 78ml, como apresentado abaixo, a proveta C com adição de vermiculita apresentou um volume de 94ml e a proveta D com perlita apresentou um volume aproximado de 96ml (conforme pode ser visto na Figura 5, abaixo).

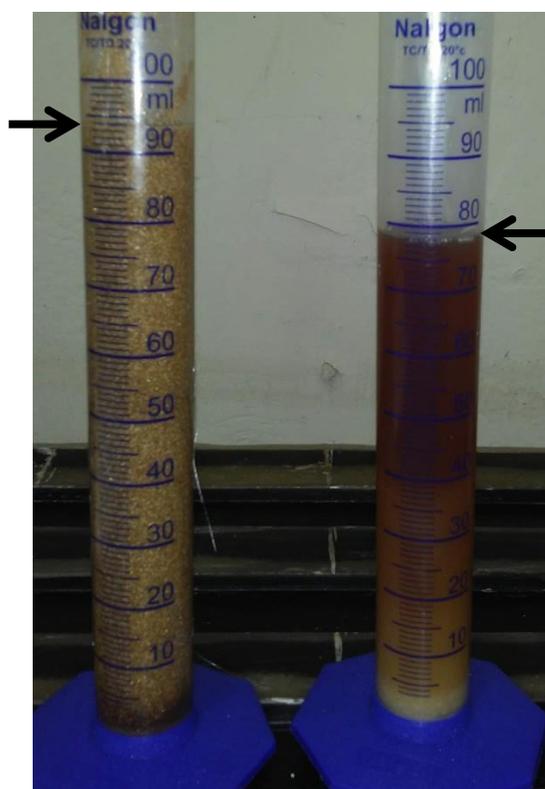


FIGURA 5 – Determinação do volume ocupado pelos minerais em resina

Com esses dados em mão, é possível apresentar uma formulação para cada uma dos corpos de prova como descrito anteriormente. A tabela 4 apresenta a formulação adequada para a produção dos 35 corpos de prova. Em todos os conjuntos de amostras, ou em cada formulação foi usado 700grs de resina como adotado por Rabahi (2015). E os percentuais de cargas minerais foram analisados abaixo.

Além da composição, o percentual de catalizador também é bastante importante, pois o tempo de solidificação da resina influencia no processo. Após alguns testes e verificou-se que para que a secagem ocorresse em um tempo entre 25 e 30 minutos o percentual de catalizador deve ser de 0,7% de resina, onde abaixo desse valor não há catálise completa e a pedra produzida não apresenta características esperadas, e acima desse valor a catálise é acelerada, não permitindo a mixagem completa e a moldagem para a conclusão do processo. O catalizador usado foi o Akzo Nobel a base de Metil-Etil-Cetona.

Tabela 4: Formulação volumétrica de cada grupo adotado

ORDEM	PERCENTUAL	COMPOSIÇÃO
PSR	0%	2.800grs de calcário
PV20	20%	2240grs de calcário + 186,5grs de vermiculita
PV40	40%	1680grs de calcário + 369,6grs de vermiculita
PV60	60%	1120grs de calcário + 554,4grs de vermiculita
PV80	80%	560grs de calcário + 739,2grs de vermiculita
PV100	100%	924grs de vermiculita
PP20	20%	2240grs de calcário + 168grs de perlita
PP40	40%	1680grs de calcário + 336grs de perlita
PP60	60%	1120grs de calcário + 504grs de perlita
PP80	80%	560grs de calcário + 672grs de perlita
PP100	100%	840grs de perlita

Outros fatores importantes de se destacar é que 4 granulometrias foram adotadas. Assim como no comercial as granulometrias adotadas foram de 100 mesh, 50 mesh, 28 mesh e 20 mesh, esses valores de tamanhos de grãos são vendidos comercialmente sem muitas dificuldades, no entanto, a vermiculita e a perlita como suas aplicações em geral não requer esse nível de mistura e cuidado são vendidos em pacotes unitários de

granulometrias mixadas. Assim, foi necessário o peneiramento das peças. Segundo os critérios adotados, os pós foram peneirados segundo o padrão de suas malhas.

- Peneira de aço inox – ASTM 100 – MESH 100 – Abertura de 0,150mm
- Peneira de aço inox – ASTM 50 – MESH 48 – Abertura de 0,300mm
- Peneira de aço inox – ASTM 30 – MESH 28 – Abertura de 0,600mm
- Peneira de aço inox – ASTM 20 – MESH 20 – Abertura de 0,850mm

A vermiculita e a perlita são minerais altamente higroscópicos, assim, a umidade presente nos pós principalmente em dias de alta umidade podem resultar em dificuldades de secagem ou cura na pedra sintética produzida, assim, para evitar esse problema, os pós depois de serem peneirados antes de serem utilizados foram colocados em uma estufa, a temperatura de 150°C durante 2 horas antes da produção dos corpos de prova, a vermiculita e perlita são pós higroscópicos e afetados pela umidade, para evitar uma possível contaminação e que possa impedir a secagem da peça. Assim, todos os pós 2 horas antes da produção dos cps todos os pós foram submetidos à estufa.

3.2.FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O Molde foi preparado antes da fabricação dos corpos de prova, processos para preparação dos moldes seguiram as orientações gerais para a fabricação de compósitos. O molde em primeiro foi encerado, utilizando cera de carnaúba. Primeiramente o molde foi encerado, utilizando cera de carnaúba. Este processo foi realizado por 3 vezes com o intervalo de 20 minutos entre cada um dos enceramentos. Após o enceramento foi aplicado o desmoldante líquido (Alcool polivinílico) no molde com o auxílio de um pincel para facilitar a retirada dos corpos de prova do molde.

Para a fabricação dos corpos de provas foram pesados cada um dos componentes conforme os valores mostrados anteriormente inicialmente na Tabela 4. Após as pesagens, foi adicionado o catalisador a resina com a solução misturada a baixa velocidade por 1 minuto, após a mistura inicial as cargas minerais de granulometria 100mesh foram adicionados na batedeira e novamente mixados por 1 min, Na sequencia foram adicionados as cargas com 50mesh, 40 mesh e 20 mesh todas com intervalo 1 minuto na batedeira em velocidades médias. Após a adição de toda carga mineral a massa foi misturada a velocidade máxima por 5 minutos para uma mixagem completa e

uma maior homogeneidade do material. Ao todo, o tempo de permanência na bateadeira industrial foi de 10 minutos, permitindo uma completa mixagem da massa.

Após a mixagem, a massa de material composto foi vertida até o completo preenchimento das cavidades do molde. O molde era composto por 5 cavidades, cada uma com 1000 mm de comprimento, 40 mm de largura e uma altura de 8 mm. A figura 6 mostra o molde durante o preenchido pela massa de material compósito. O molde possui na parte frontal um furo com diâmetro de 1 polegada, onde durante o processo de produção dos corpos de prova foi introduzido um vibrador com o objetivo de compactar a massa fabricada nas cavidades do molde. Este processo é análogo ao utilizado na indústria.



FIGURA 6 - Molde sendo preenchido com compósito a base de perlita

Após o processo, a desmoldagem ocorrerá em um prazo de 24 horas para gerar uma uniformidade em todos os corpos de prova. Após a desmoldagem, o filete de 1,00m x 40,00mm x 8mm é cortado em sete partes subdivididas de A a G no mesmo filete; e utilizado de 1 a 5 para diferenciar os cinco filetes que são produzidos a cada moldagem. Serão confeccionados 11 grupos de formulações diferentes com 30 CPs cada, as variações destas formulações e processos serão descritas nos resultados e análises, uma vez que poderá haver alterações durante a execução dos grupos para adequação da formulação que seja homogênea aos diversos tipos de carga utilizada.

No entanto, como o preenchimento é manual, assim como é na indústria, há uma irregularidade no preenchimento dos moldes, assim é importante realizar operações de acabamento para a completa realização dos ensaios posteriores. As peças foram cortadas através de uma cortadeira de bancada de disco abrasivo. Os corpos de provas foram colocados em um molde para acabamento após cortadas, esse molde metálico foi feito com as dimensões ideais para permitir que as superfícies ficassem planas entre si. E com o auxílio de uma esmerilhadeira removido o excesso de material para a melhor planicidade dos corpos de prova.

Após o processo de acabamento todas as peças foram pesadas com balança de precisão e depois medidas com a utilização de um paquímetro de precisão 0,05mm. Para uma melhor precisão nas medidas das peças foram tomadas 4 medidas em cada sentido da peça (comprimento, largura e espessura) e o valor considerado será a média desses valores. As médias das medidas de cada um dos corpos de prova utilizados estão apresentados no Anexo I, sobre as informações referentes a cada um dos corpos de prova, como medidas, massas e propriedades inerentes aos corpos de prova (momentos e pesos específicos).

A norma D790-03 pede para que a confecção dos corpos de prova sejam de 5 para cada condição adotada, serão 6 condições para cada tipo de material, assim sendo, produz-se 30 corpos de prova para cada formulação.

Os corpos de prova produzidos, segundo o estabelecido tem dimensões aproximadas de 8mm x 40mm x 135 mm, e foram classificados de acordo com cada posição o molde possuía 5 ranhuras de 1 metro (classificados com I, II, III, IV e V), onde os corpos de prova foram produzidos. Cada viga é dividida em 7 para produção dos corpos de prova padrão (classificados em A, B, C, D, E, F e G), assim com capacidade produtiva de até 35 corpos de prova, que vão de AI até o GV, podendo assim descartar eventuais peças defeituosas que possam ocorrer no processo produtivo.

Após preparados e identificados os corpos de prova foram medidos, a figura 7 mostra os pontos de medição dos corpos de prova, e após tomadas as medidas determinou-se a média como a medida utilizada.

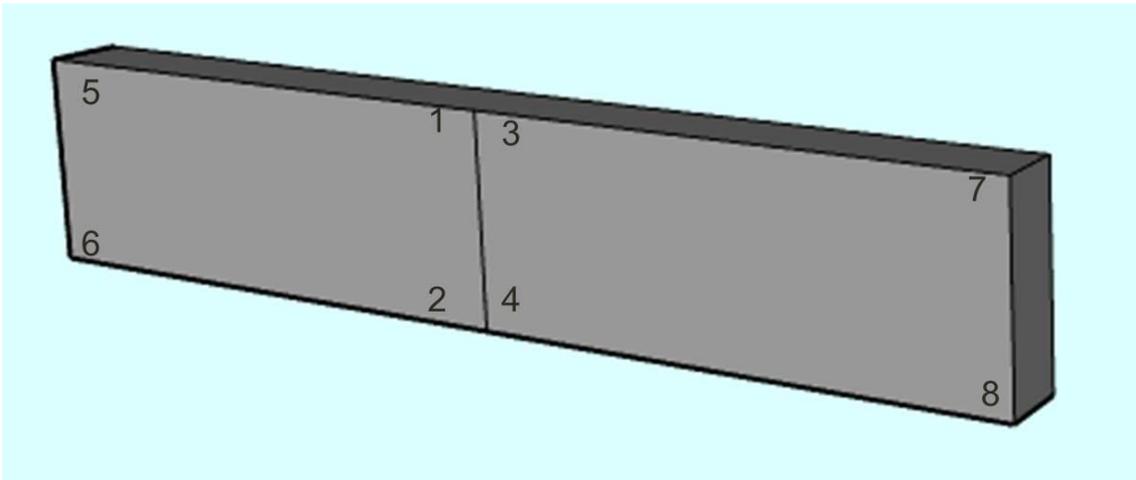


FIGURA 7 – Pontos de medição dos corpos de prova

3.3. ENSAIO DE ATRITO INTERNO

A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) ou Atrito interno é um ensaio não-destrutivo para a caracterização das propriedades elásticas dos materiais. Este método é normatizado pela ASTM E1876, em que estão contidas informações referentes ao procedimento para o emprego da técnica, assim como as equações para o cálculo dos módulos elásticos. O ensaio consiste essencialmente na excitação mecânica do corpo de prova, na captação da resposta acústica através de um sensor. Um software especializado realiza o processamento dos dados para a obtenção do espectro de frequências e calcula os módulos elásticos a partir das frequências presentes (OTANI, 2014).

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica, sendo particularmente sensível à presença de trincas e micro-trincas. O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e fluídico. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade e impurezas do material e a efeitos termo elásticos causados por gradientes locais de temperatura. Já o estrutural está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semi-rígidas. Por último, o fluídico ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar (PEREIRA, 2011).

Segundo Cossolino (2019) o decremento logarítmico, que é consequência de um simples impulso provocado no sistema que está em vibração livre é obtido através da

razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal. O termo decremento logarítmico refere-se à taxa de redução logarítmica, relacionada com a redução do movimento após o impulso, pois a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento. Representa o método mais utilizado para calcular o amortecimento. Quando um sistema oscilatório com um grau de liberdade, com amortecimento viscoso é excitado por um impulso sua resposta vem na forma de decaimento no tempo é expressa semelhante à figura 8.

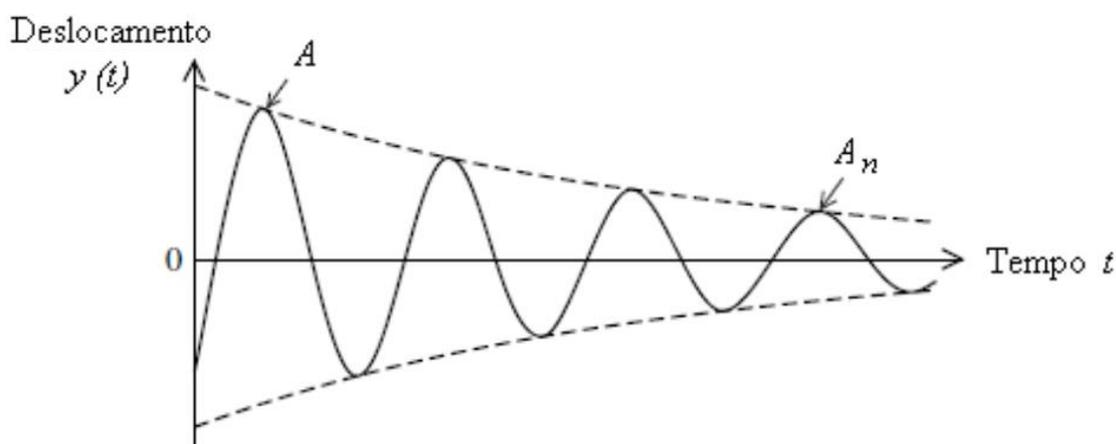


FIGURA 8 - Resposta de um impulse para oscilador simples

Os Sistemas utilizado foi através do sistema Sonelastic que são instrumentos de teste para a caracterização precisa e não-destrutiva dos módulos de elasticidade e do amortecimento de materiais de acordo com o atrito interno (norma ASTM E-1876). A norma ASTM-E1876, que rege a Técnica de Excitação por Impulso, recomenda a utilização de suportes que possibilitem o apoio do corpo de prova nas linhas nodais do modo de vibração desejado (Sonelastic, 2019).

Após as medições das peças, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio não destrutivo de atrito interno, as informações anteriormente obtidas (dimensões e massa) foram carregadas no programa e o ensaio foi realizado.

A Figura 9 mostra um esquema básico do posicionamento da amostra para medida das frequências de ressonância flexional para este método. O pulsador (parte inferior) é o equipamento que aplica o impacto no corpo de prova para gerar as vibrações mecânicas, sem danificá-lo; e o transdutor (superior) o que capta a resposta acústica e

a transforma em sinal elétrico de maneira que possamos ler as frequências de ressonância (Sonelastic, 2019).

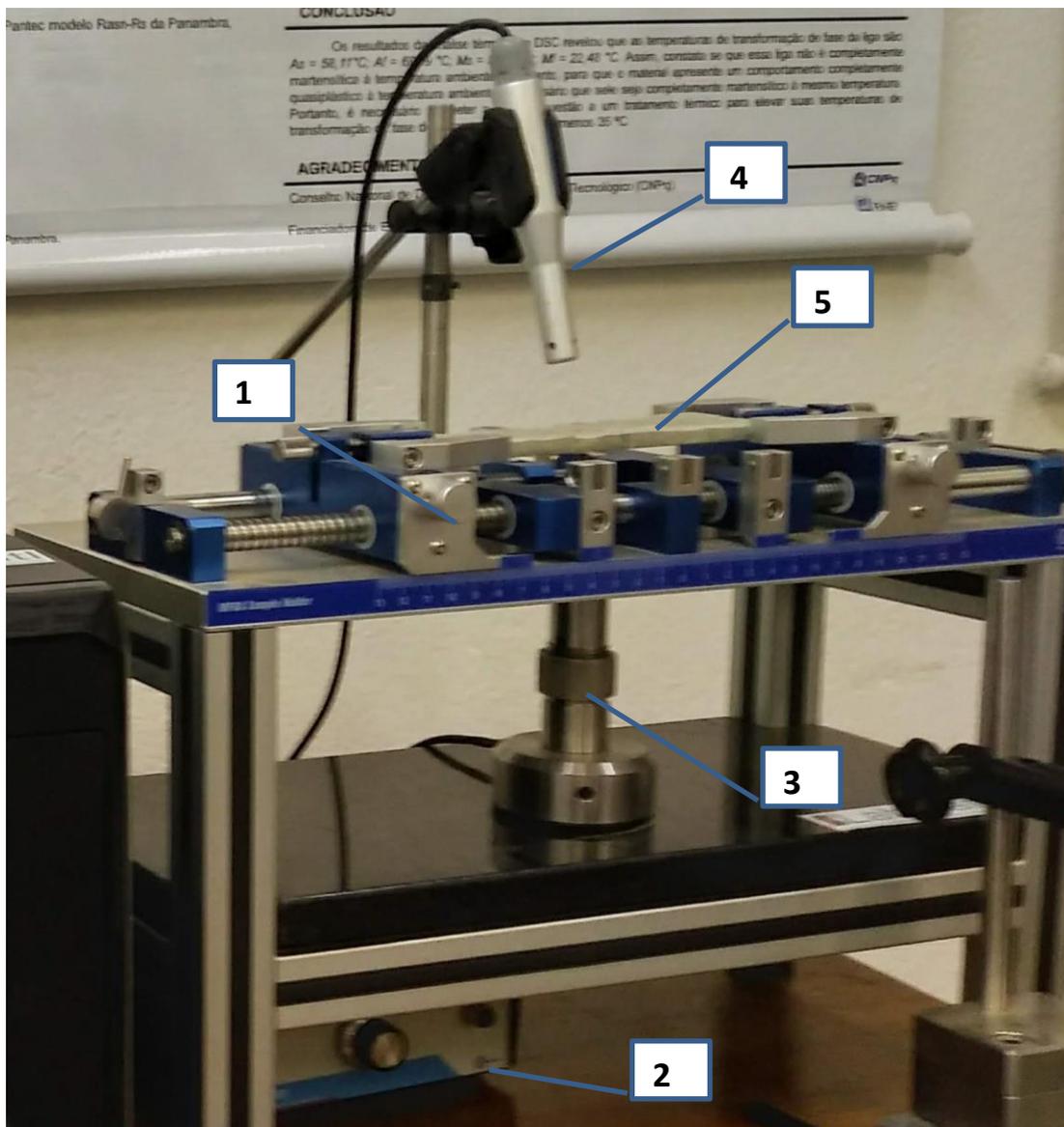


FIGURA 09 – Suporte do sistema de atrito interno, sendo: 1) Suporte dos corpos de prova; 2 e 3) atuador sonelástico. 4) Captor Acústico; 5) Corpo de prova

Esse sistema possui uma ampla gama de aplicações no desenvolvimento de materiais compósitos e no controle de qualidade de madeiras e derivados, como:

- Caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento.
- Classificação.
- Detecção de defeitos.
- Monitoramento dos processos de cura e secagem.

- Refinamento de simulações pelo Método de Elementos Finitos (FEM).
- Estudo da influência da temperatura sobre as propriedades elásticas.

O módulo de elasticidade flexional dinâmico é calculado através da Equação (5), fornecida pela ASTM E 1876.

$$E_d = 1,6067 \cdot m \cdot f_1^2 \left[\frac{L^3 \cdot T_1}{w^2 \cdot t^2} \right] \quad eq. 1$$

Onde:

L = Largura da peça (mm);
 m = Massa da peça (g);
 f1 = Frequência fundamental flexional (Hz);
 T1 = Fator de correção para o módulo flexional
 w = Largura da peça (mm);
 t = Espessura da peça (mm);

Foram realizados, para cada corpo de prova, 10 repetições dos ensaios de excitação por impacto, sendo uma intensidade de aplicação de 5. As informações obtidas pelos ensaios foram recebidas para análise posterior. A figura 10 mostra um esquema básico demonstrativo de cada item do equipamento.

As informações básicas fornecidas pelo ensaio são a frequência natural do material, amortecimento, e módulo de elasticidade dinâmico, com seus respectivos erros, tudo isso tendo como entrada as dimensões e massas do corpo de prova. As frequências detectadas foram de detecção automática das maiores amplitudes na placa de aquisição.

3.4. ENSAIO DE FLEXÃO

A resistência mecânica de cerâmicas, aços ferramenta e metal duro em geral não são avaliados a partir da curva tensão-deformação gerada no ensaio de tração, devido à dificuldade na preparação e no teste dos corpos de prova (elevando o custo do ensaio), assim como pela alta sensibilidade à fratura do corpo de prova nos pontos de fixação. Portanto, em função desta demanda e pelo uso predominante dos materiais cerâmicos foi desenvolvido um ensaio de flexão com o objetivo de ser utilizado em materiais frágeis para determinar a tensão e flecha de ruptura. Este ensaio também permite avaliar outras propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade à flexão

(FREDEL, 2015).

O ensaio de flexão é realizado em materiais frágeis e em materiais resistentes, como o ferro fundido, alguns aços, estruturas de concreto e outros materiais que em seu uso são submetidos a situações onde o principal esforço é o de flexão. Nos materiais frágeis, as flexas medidas são muito pequenas. Conseqüentemente, para determinar a tensão de flexão, utilizamos a carga que provoca a fratura do corpo de prova (COZACIUC, 2002).

Outra relação importante é que o ensaio de flexão de três pontos é uma maneira simples de submeter um espécime a tensão, compressão e cisalhamento transversal, simultaneamente. Assim, esse ensaio proporciona uma medida direta da integridade estrutural do material, submetido a diferentes esforços combinados (tração, compressão e cortante) (Rabahi, 2015).

A figura 10 apresenta uma representação do ensaio de flexão de três pontos, como adotado comumente.

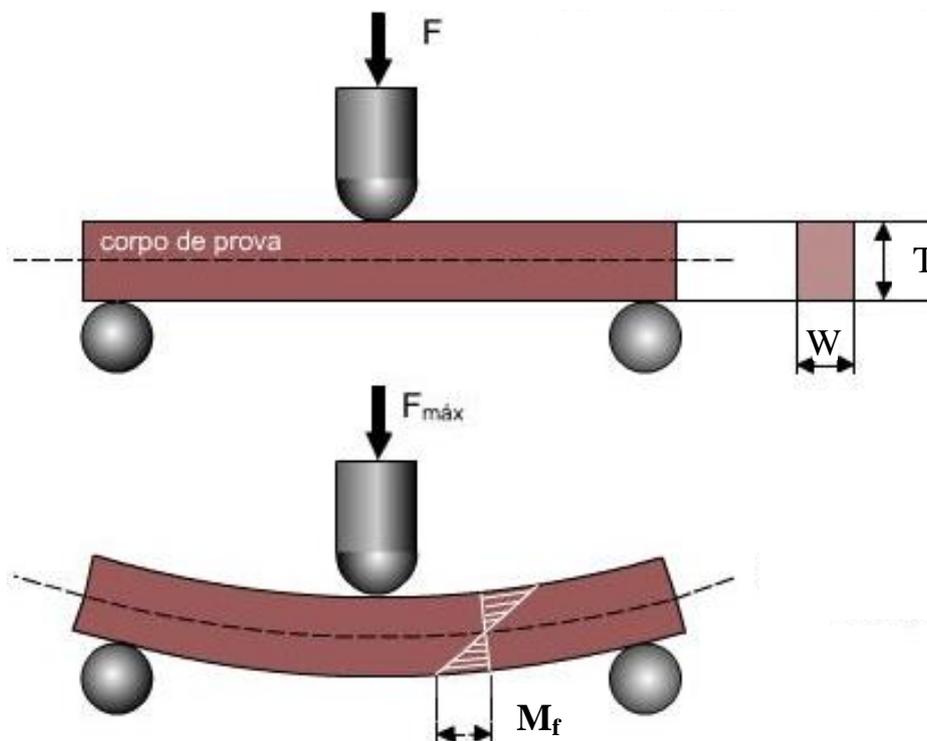


FIGURA 10: Esquema básico de ensaio de flexão de 3 pontos.

De acordo com Fredel, para calcular a tensão fletora pode ser dada pela equação 1:

$$\sigma = \pm \frac{M_f \cdot c}{I} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

σ é a tensão fletora (tensão normal de compressão ou de tração);

M_f é o momento fletor;

I é o momento de inércia da secção transversal;

c é a distância da linha neutra até a fibra mais afastada.

Assim, temos que, para cada um dos dados acima, para uma corpo de prova com secção retangular a seguinte relação expressa pela equação 2 em relação a figura 10:

$$M_f = \frac{F \cdot L}{4} \quad \text{Eq. 3}$$

$$c = \frac{W}{2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$I = \frac{W \cdot T^3}{12} \quad \text{Eq. 5}$$

F = Força aplicada (N);

L = Distância entre apoios do suporte de flexão (mm);

Assim, podemos então escrever as equações acima substituindo as equações 3, 4 e 5 na equação 2, temos:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\frac{F \cdot L}{4} \cdot \frac{T}{2}}{\frac{W \cdot T^3}{12}} = \frac{12 F \cdot L}{8 W \cdot T^2} = \frac{3 F \cdot L}{2 W \cdot T^2} \quad \text{Eq. 6}$$

Pode-se também calcular o modulo de elasticidade por flexão, que pode ser determinada usando-se a equação 4.

$$E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad \text{Eq. 7}$$

Na equação acima, temos os valores obtidos no ensaio de flexão, que nos fornece a força até a ruptura, o momento de inércia (I) e a distância entre os pontos de apoio (L) são dados já programados e o valor de deflexão (f) também sai como resultado. O ensaio de flexão não fornece a deformação, mas a flexão visto que apresenta unidade de medida.

Segundo a norma ASTM D790 o cálculo da deformação para o ensaio de flexão pode ser dado por:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot T}{L^2} \quad eq.8$$

O ensaio a flexão foi utilizado com a máquina universal de ensaios mecânicos, com capacidade para 600KN. Utilizando-se uma célula de carga de 20 KN e um transdutor com precisão de 0,001mm, para uma melhor precisão dos ensaios, e em respeito a norma ASTM D970 que rege a utilização de 3 casas decimais para a análise da deflexão. A figura 11 apresenta a máquina de ensaios utilizada e preparada para a realização dos ensaios.



FIGURA 11 – Máquina de ensaios universal

A precisão do equipamento é de 1N, todos os ensaios destrutivos a deflexão foi mantida constante, a velocidade de 2 mm/min, o equipamento de aquisição de dados

registava o valor de cada informação, sendo a força aplicada (F), o tempo (t) e a deflexão (f). Junto ao equipamento de flexão de 3 pontos foi adicionado um extensômetro, posicionado na parte inferior de cada corpo de prova, permitindo a conversão mais precisa da deflexão em deformação, como pode ser visto no anexo 2.

As distâncias entre os corpos de prova, segundo o estabelecido pela norma D790 deve permitir um apoio excedente de 6,5mm de cada lado, e um vão entre apoios de 115mm, exigindo assim corpos de prova de 128mm ou superior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos em cada um dos ensaios e análises realizados podem são apresentados e discutidos ao longo desse capítulo.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS

Uma questão de importante destaque que deve ser analisada é a composição de cada um dos minerais utilizados. Além do Carbonato de cálcio (CaCO_3), e da resina PET cuja composição básica é apresentada no corpo do trabalho, mas as composições precisas dos novos materiais que substituirão o calcário não possuem precisão na composição, assim quantificar esses valores pode nos ajudar a identificar e justificar cada um dos resultados obtidos. Assim, utilizando o método de fluorescência de Raio-X, conseguiu-se determinar a composição dos minerais como descrito na tabela 5.

Tabela 5: Composição dos pós por difração dos óxidos maiores analisados.

AMOSTRAS ANALISADAS

Óxidos Analisados (%)	<i>Vermiculita</i>	<i>Perlita</i>
SiO₂	45,38	73,99
TiO₂	0,94	0,13
Al₂O₃	11,38	12,86
Fe₂O₃	7,92	0,87
MnO	0,11	<LQ
MgO	24,38	0,22
CaO	2,23	0,86
Na₂O	<LQ	3,31
K₂O	0,87	4,46
P₂O₅	<LQ	<LQ
SO₃	<LQ	<LQ
LOI(%)	6,64	2,46
SOMA (%)	99,85	99,15

Segundo o que foi proposto foi possível identificar pelo menos 99% da composição básica dos minérios analisados. É importante destacar que os dois materiais possuem

composição básica bem similar em vários cerâmicos, no entanto a perlita se destaca no percentual de dióxido de Silício (SiO_2) que na vermiculita aparece, porém em uma quantidade bem inferior. Outra importante observação a ser verificada é a presença significativa de Oxido de Magnésio (MgO) que é o segundo óxido em maior proporção e que na perlita aparece quase que de forma residual.

Essa variação, apesar de não parecer tão significativa é o suficiente para apresentar uma grande diferença, seja de forma visual, como por densidade, a perlita expandida é o mineral mais leve do mundo, bem mais leve que a vermiculita por exemplo.

4.2.FABRICAÇÃO

4.2.1. Pedra sintética de Referência

As peças produzidas pela formulação industrial (20% de resina e 80% de carga mineral) contendo apenas calcário como carga mineral, apresentaram um bom aspecto visual, com consistência firme e com o mínimo percentual de defeitos visíveis. As peças puderam ser cortadas e lixadas sem muitas dificuldades para a execução.

A figura 12 abaixo mostra alguns dos corpos de prova unicamente com a presença de calcário, pode-se ver que não há defeitos visíveis e aparentes.



FIGURA 12 - Pedra sintética de Referência com 100% de carga como calcário

4.2.2. Pedra sintética com adição de vermiculita

A adição de vermiculita no corpo de prova permitiu a fabricação dos mesmos porém com alguns problemas. A concentração de catalizador utilizada foi para permitir a produção dos corpos de prova, se colocar menos do que foi posto as amostras não seria

possível a produção dos corpos de prova, pois a catálise não seria completa o que impossibilitaria a realização dos ensaios segundo as normas. A adição de mais catalizador levaria ao aceleração da catalização da resina, que endureceria mais rápido, impedindo a completa mistura dos pós e a moldagem da peça final.

A formulação com adição de 20% de vermiculita apresentou características bastante interessantes, formando um material era extremamente frágil assim, algumas amostras se quebraram durante a desmoldagem e tratamento das peças. Mesmo assim, foi possível analisar as peças produzidas nessa composição As peças produzidas com 40 e 60% de vermiculita apresentaram uma fragilidade muito intensa, impossibilitando a desmoldagem e a preparação das amostras. A quebra das amostras ocorreu desde a desmoldagem, corte e lixamento. Qualquer impacto simples levava a fratura e inutilização da amostra, o que permite estabelecer a inviabilidade dessas formulações, tendo em vista que para uso industrial o tratamento e desmoldagem do material deve ser aplicado, um material com extrema fragilidade que não permite nem mesmo a desmoldagem torna o processo inviável para uso industrial.

A figura 13 abaixo apresenta alguns dos corpos de prova de composição 40 e 60% que se romperam em diversas partes após a simples desmoldagem da peça.



FIGURA 13 – Corpos de prova a) com 40% de vermiculita e b) 60% de vermiculita

Pode-se verificar com a adição da vermiculita o material apresentou grande fragilidade impedindo a produção de peças com tamanhos mínimos para os ensaios de flexão.

A vermiculita é um material altamente higroscópico e com uma densidade bem inferior dos minérios convencionais. O percentual de resina não permitiu uma mistura completa, mesmo com o tempo de homogeneização a mistura ficou porosa, e não possibilitou resistência mecânica, Na figura 14 podemos ver uma peça com 100% de vermiculita como carga mineral, a figura mostra o esfarelamento e a falta de cura completa das amostras, o material fica extremamente quebradiço, o que impossibilitou a realização de qualquer tratamento ou análise do material.



FIGURA 14 - Peça produzida com 100% de vermiculita

4.2.3. Pedra sintética com adição de perlita

As peças produzidas com a adição de perlita como carga mineral apresentou uma perda na qualidade superficial, apresentando bolhas e um acabamento pior que as peças produzidas a base de calcário. No entanto, em todas as condições foi possível produzir as peças com uma considerável qualidade, permitindo o tratamento das peças e as análises mecânicas de cada uma. A figura 15 a seguir nos apresenta um imagem do grupo PP40 com 40% de perlita, pode-se verificar nesse caso que todos os corpos de prova produzidos apresentam um bom aspecto visual, em todos os modelos produzidos notou-se as mesmas características, um bom acabamento, no entanto com necessidade de um polimento superficial. Os resultados obtidos para cada formulação serão discutido nos próximos itens desse capítulo.



FIGURA 15: Amostras PP40 após preparação prévia

4.3. ENSAIO DE ATRITO INTERNO

O ensaio de impulso permite a obtenção das frequências naturais das estruturas e os fatores de amortecimento dos mesmos. Os gráficos 3 e 4 apresentam um comparativo entre as frequências de amortecimentos dos produtos à base de vermiculita e de perlita se comparados com o mármore sintético tradicional.

Gráfico 3 – Frequência de amortecimento comparativo dos grupos a base de calcário e vermiculita

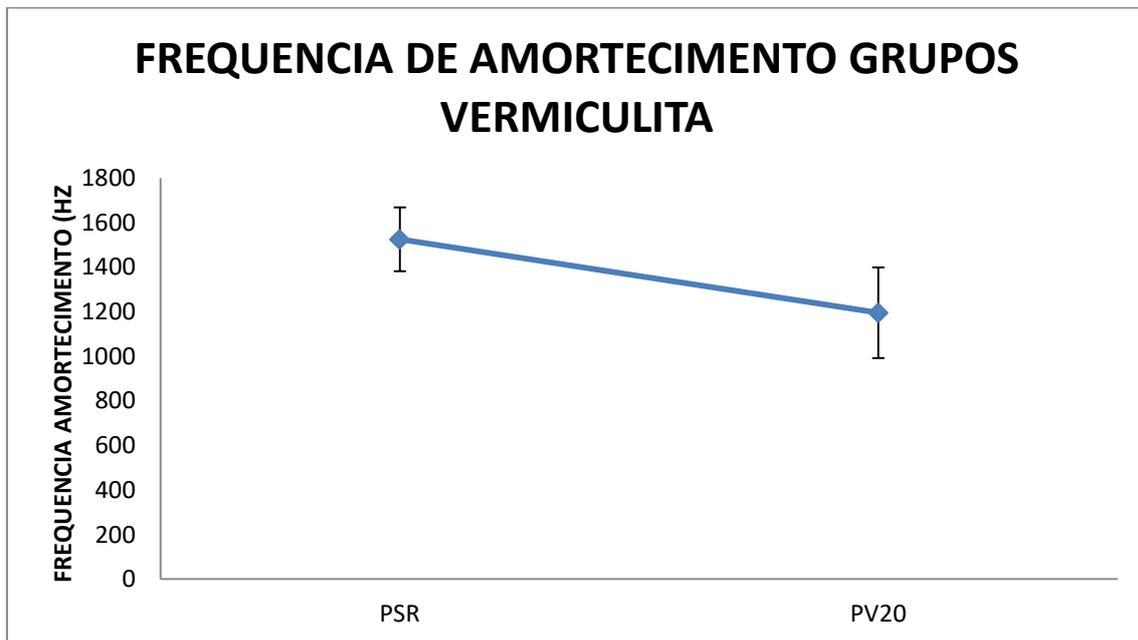
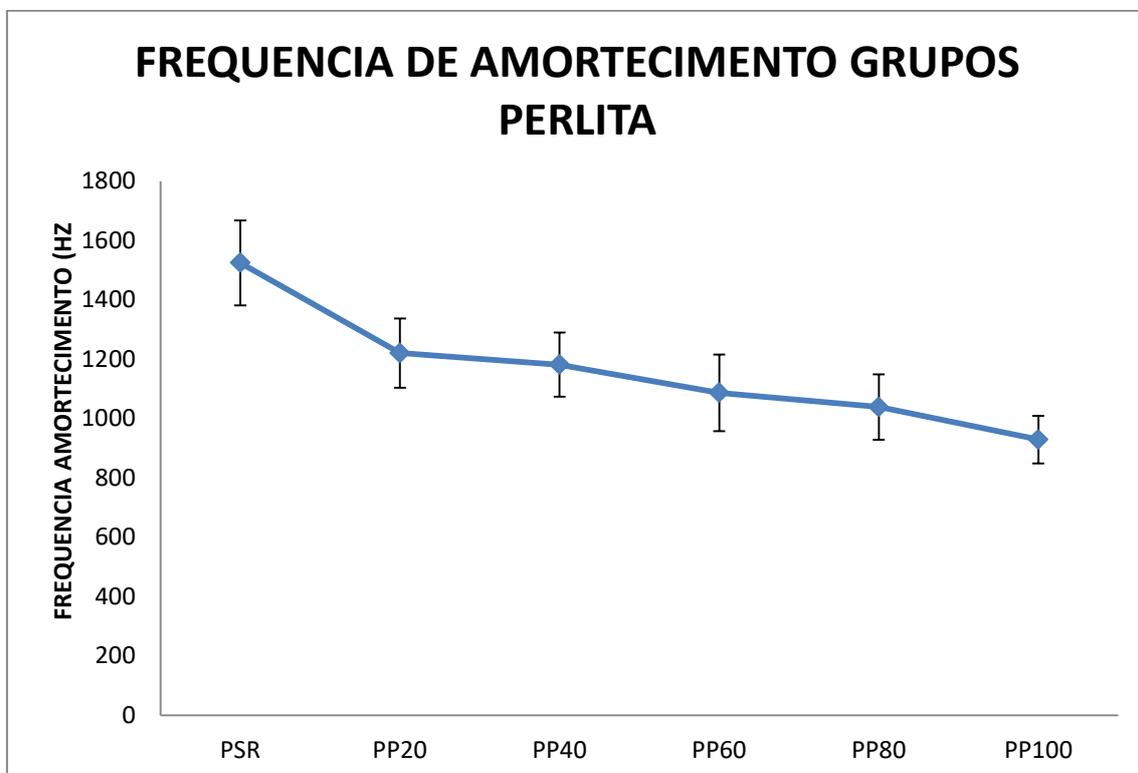


Gráfico 4 – Frequência de amortecimento comparativo dos grupos a base de calcário e perlita



Para os materiais a base de perlita, observa-se o mesmo acontecimento que a vermiculita, assim, é possível também verificar uma tendência decrescente na frequência de amortecimento com a adição de perlita na pedra sintética. Nesse caso é possível perceber que há uma redução progressiva da frequência de amortecimento desse material, logo, o percentual de perlita expandida tem relação direta com a frequência de forma decrescente.

Com base nas informações apresentadas, a tabela 6 as médias dos resultados obtidos para cada uma dos grupos de corpos de prova, as suas máximas e mínimas e os desvios para melhor análise dos resultados. Assim como a tabela abaixo apresenta os valores médios, o anexo 3 apresenta todos os resultados obtidos pelo ensaio de atrito interno (sonelástico), de cada corpo de prova e grupos, assim como as médias, máximas, mínimos e desvios padrões.

Para os produtos a base de vermiculita é possível ver uma redução do valor da frequência de amortecimento, ou frequência natural da estrutura, os produtos fabricados a base de calcário possuem uma maior frequência natural, com uma redução que segue um decréscimo. As frequências naturais são propriedades intrínsecas dos materiais, determinada pelo tamanho, forma e composição, sendo assim, pode-se verificar que a adição da vermiculita em substituição de calcário gera uma redução nessa frequência do material, apesar de não ser possível de determinar a linearidade ou se esse valor poderia chegar a subir em algum percentual superior.

Como pode ser visto nos gráficos 3 e 4, a frequência natural e na tabela 6 há uma redução tanto nos módulos de elasticidade dinâmico, em GPa, quanto na frequência de amortecimento (Hz). Com relação a frequência de amortecimento é possível verificar que a PSR apresenta uma frequência de 1524,375 Hz, com a adição de vermiculita (PV20) tem-se uma redução de 21,6% indo para 1195,1 Hz, a Adição de perlita resultou em uma redução sequente da frequência de amortecimento, sendo o grupo PP20 de 1220,39Hz (redução de 20%), e depois ocorrendo reduções mais brandas nas demais composições, o grupo PP40 tem frequência de 1181,27Hz (3,2 % de redução), o grupo PP60 tem frequência 1086,64 Hz (redução de 8%), o grupo PP80 com 1038,71 Hz (redução 4,4%) e o PP100 com 928,865 (redução de 10,6%).

Tabela 6 – Média dos resultados obtidos pelo ensaio de atrito interno

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)	FREQUENCIA AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO $\times 10^4$ (Adm.)
PSR	\bar{X}	23,01	1524,38	75,81
	σ	2,1	143,06	23,92
PV20	\bar{X}	13,86	1195,1	169,74
	σ	2,16	203,07	62,76
PP20	\bar{X}	14,59	1220,39	93,34
	σ	1,66	117,1	47,5
PP40	\bar{X}	11,42	1181,27	146,72
	σ	1,05	108,25	29,41
PP60	\bar{X}	8,04	1086,64	168,98
	σ	0,92	129,37	32,89
PP80	\bar{X}	6,27	1038,71	188,84
	σ	0,58	110,5	25,05
PP100	\bar{X}	5,05	928,87	212,18
	σ	0,49	80,02	61,72

A Pedra sintética de referência apresentou uma variação nos módulos de elasticidades, apresentando reduções sucessivas em todos os casos a partir da adição minérios estudados. O grupo PSR apresentou em média, um módulo de elasticidade dinâmico de 23,01 MPa, enquanto a PV20 tem um decréscimo linear chegando a 13,86 MPa (redução de 40%), uma redução considerável, mesmo não sendo possível ver a continuidade desse evento. Enquanto adiciona-se a Perlita é possível ver uma redução, porém um pouco mais branda, apresentando as amostras PP20 uma redução para 14,59MPa (36,6%), as continuidades das amostras PP40 tem módulo de 11,415 MPa (-21,8%), na proporção seguinte PP60 temos módulo de 8,035 MPa (redução de 29,6%), o grupo PP80 tem 6,27 MPa (-22%) e a formulação de 100% perlita (PP100) tem-se um módulo de 5,045 MPa (-19,5%).

. Os gráficos 5 e 6 apresentam as taxas de crescimento dos valores de amortecimento dos materiais, sendo vermiculita e perlita respectivamente.

Gráfico 5 – Amortecimento dos materiais a base de calcário e vermiculita

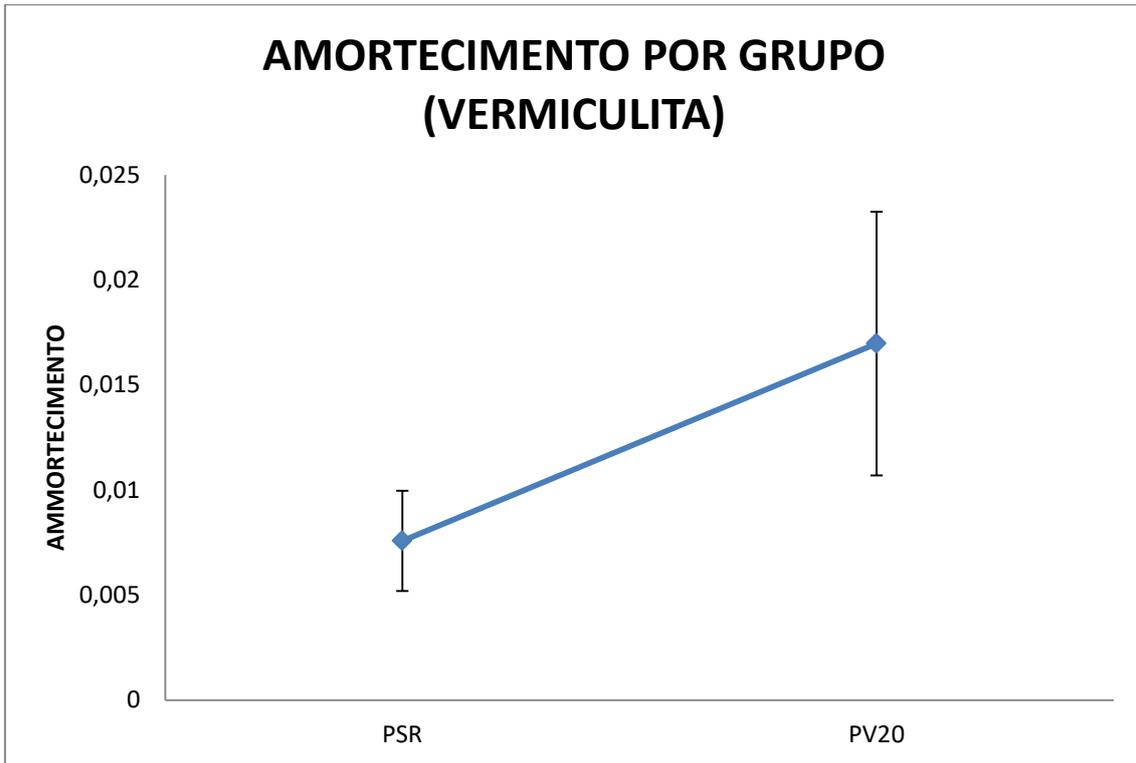
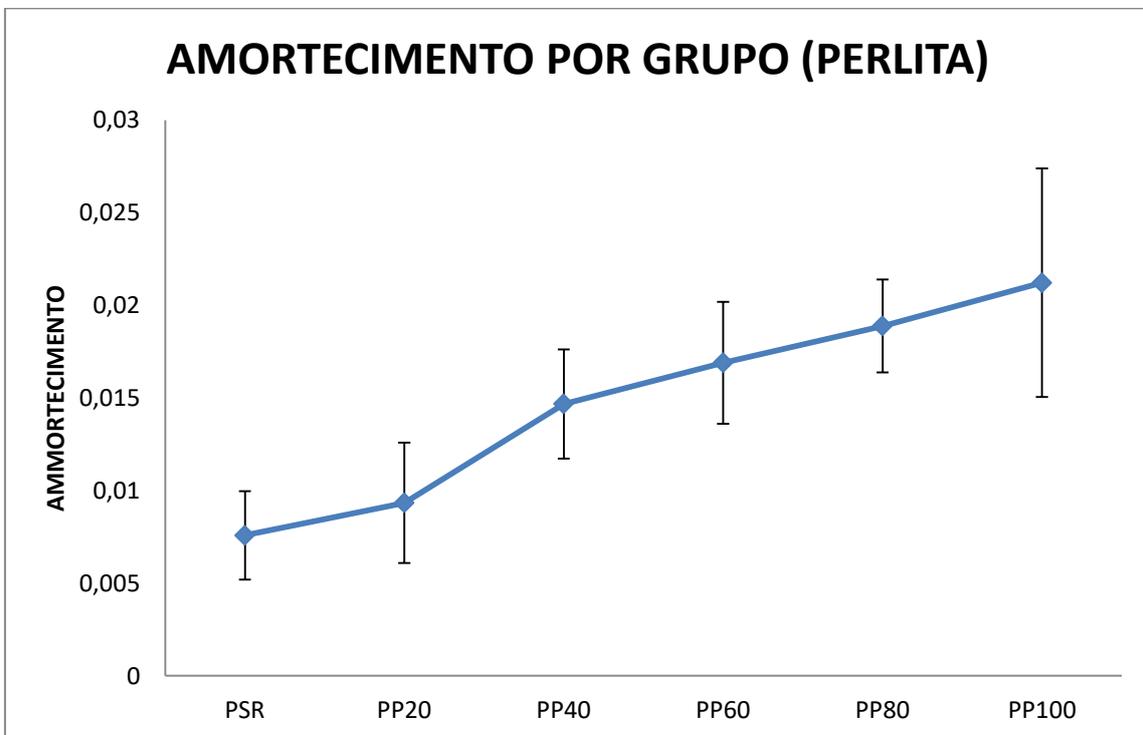


Gráfico 6 – Amortecimento dos materiais a base de calcário e perlita



O amortecimento por sua vez, ao contrário dos demais materiais sofreu um aumento nas

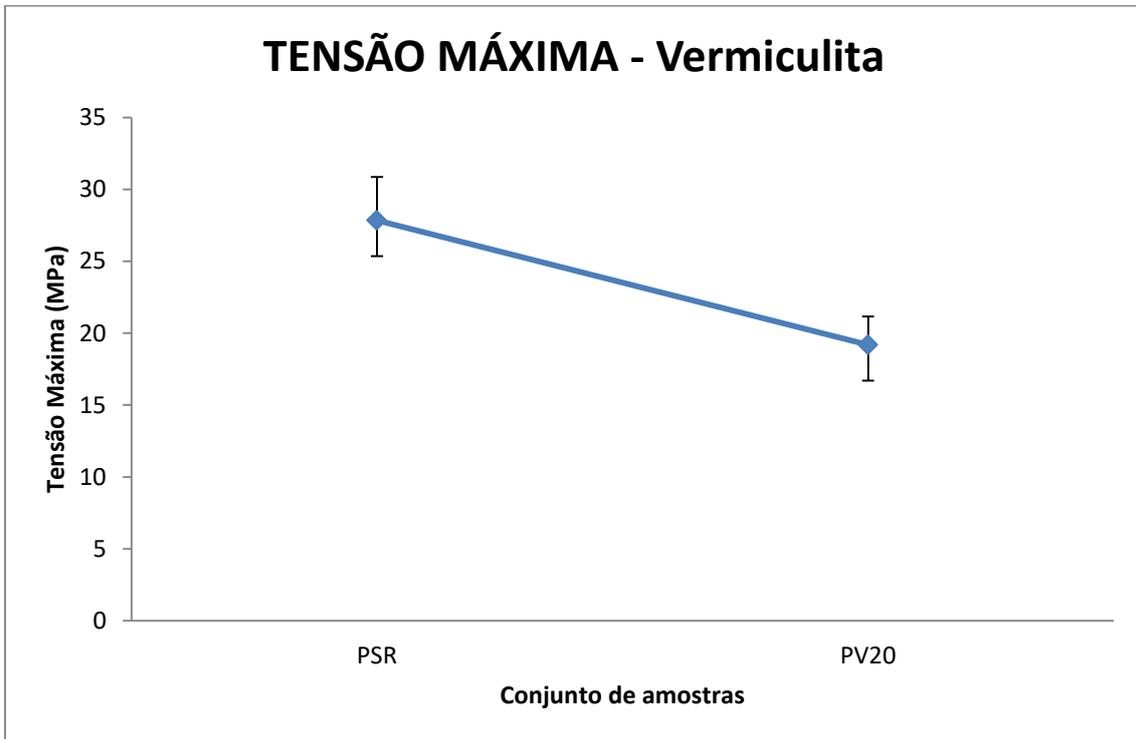
suas novas formulações obtidas. As pedras sintéticas do PSR apresentaram um amortecimento (percentual) médio de 0,007581, enquanto o PV20 (a base de vermiculita) apresentaram um crescimento para 0,016974, o que pode indicar um valor considerável analisando apenas o valor percentual. Do PP20 ao PP100, ocorreu um aumento, que apesar de ser em uma menor proporção, acontece, chegando a uma taxa de amortecimento na formulação de 100% de 0,0212184

Nos gráficos anteriores é observado esse crescimento no amortecimento dos materiais estudados, tanto a adição de vermiculita quanto a de perlita ocasionaram um crescimento do amortecimento segundo uma linearidade expressa nas equações propostas. É interessante destacar, que nota-se o motivo de tanto a perlita quanto a vermiculita serem aplicadas como isolantes térmicos, ou acústicos, assim como na prática, nos novos materiais produzidos, observa-se que os materiais respondem melhorando a característica de isolante dos materiais, seja acústico ou de vibrações.

4.4. ENSAIO DE FLEXÃO

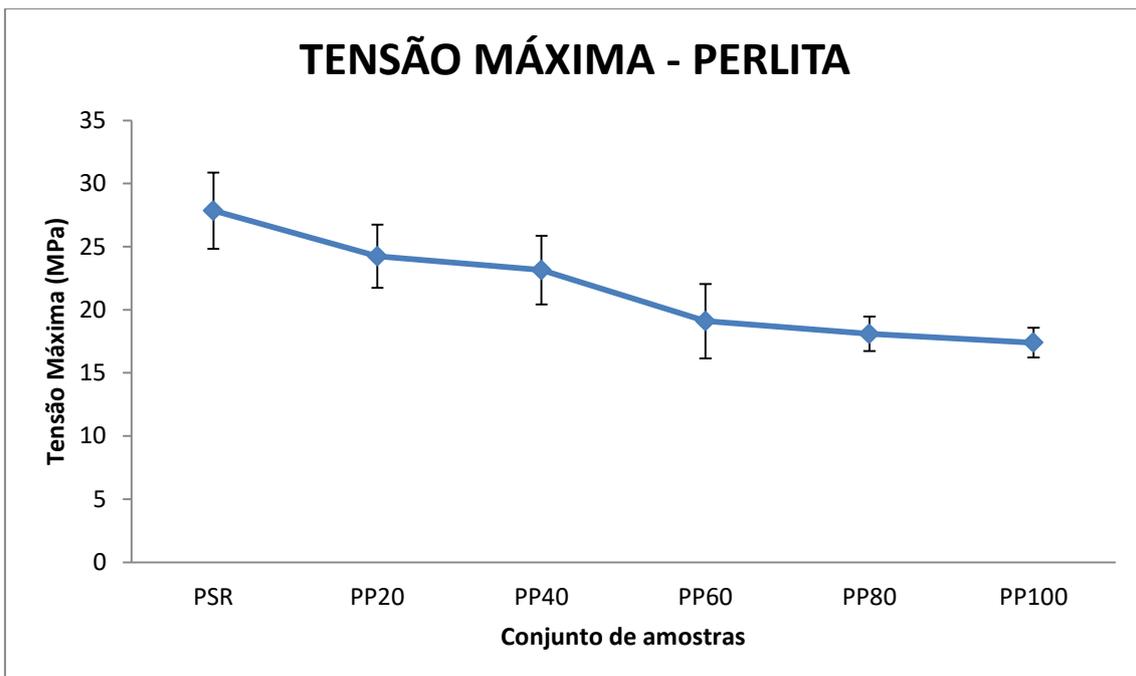
A partir do ensaio de flexão de 3 pontos, obtém-se uma relação entre a tensão máxima obtida para cada corpo de prova. Assim, pode-se estabelecer uma relação entre as tensões máxima obtidas em cada um dos corpos de prova de cada uma das situações propostas, assim como os módulos de elasticidades estático, obtido em cada uma das situações. Os gráficos 7 e 8 apresentam as tensões máximas obtidas em cada uma das formulações e no gráfico 9 pode-se verificar os módulos de elasticidade para cada uma das situações.

Gráfico 7 - Tensão máxima comparativo do mármore tradicional em comparação a base de vermiculita



Para a vermiculita observa-se uma linearidade na redução das tensões máximas, uma redução considerável de resistência mecânica é observada nessa situação.

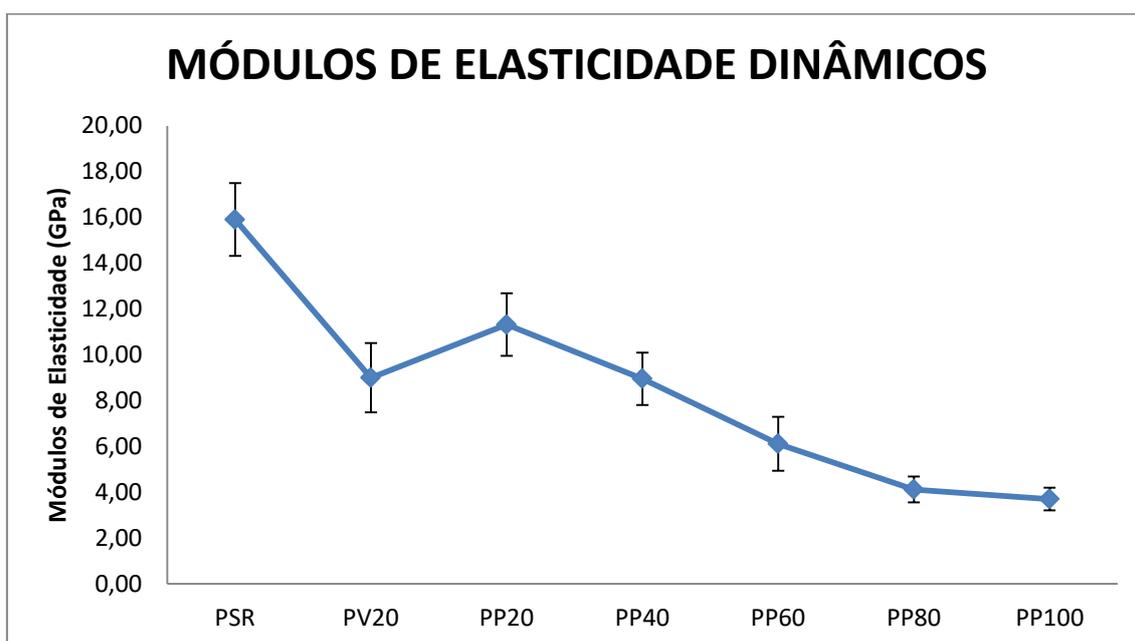
Gráfico 8 – Tensões máximas comparativas do mármore tradicional em comparação a base de perlita



Para a situação onde há a substituição do calcário pela perlita observa-se uma redução. Porém em menor escala, observando os valores médios pode-se verificar uma linearidade na redução dessa tensão, seguindo a equação apresentada no gráfico acima.

Observa-se assim, que a substituição do calcário pela perlita ou vermiculita resulta, em todas as condições de perda de resistência mecânica o que resulta no módulo de elasticidade do material.

Gráfico 9 – Comparação dos módulos de elasticidades dos materiais analisados



Assim como a resistência mecânica, observa-se uma também no módulo de elasticidade de cada um dos novos produtos criados. Outro fator importante a se analisar é que a drástica redução dos módulos para os materiais a base de vermiculita, já para os materiais a base de perlita a redução foi um pouco mesmo acentuada.

Percebe-se a partir disso, que a substituição do calcário pelos demais materiais, se comparados exclusivamente à resistência à flexão temos uma queda das propriedades em todos os itens, assim como há uma queda da densidade do material. A tabela 7 mostra as médias dos resultados, tanto dos ensaios de flexão, assim como a média das massas específicas dos materiais. O anexo 2 apresenta os valores obtidos pelos ensaio de flexão de 3 pontos de cada corpo de prova e cada grupo, apresentando a força máxima aplicada, deflexão, deformação, tensão máxima e módulo de elasticidade estático.

Tabela 7- médias obtidas a partir do ensaio de flexão de 3 pontos

		Peso específico (ρ) (kg/m³)	Força Máx. (N)	Flexa (mm)	Tensão Máx (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Elasticidade Estático (Gpa)
PSR	\bar{X}	2074,36	490,3	0,45	27,85	0,00176	15,91
	σ	64,4	72,49	0,05	3,02	0,00014	1,59
PV20	\bar{X}	1727,7	277,7	0,58	19,19	0,00215	9
	σ	60,84	47,2	0,09	1,97	0,00026	1,51
PP20	\bar{X}	1838,46	362,2	0,61	24,24	0,00221	11,32
	σ	76,35	52,27	0,06	2,5	0,00019	1,37
PP40	\bar{X}	1630,5	363,3	0,7	23,15	0,00254	8,96
	σ	45,95	51,57	0,06	2,72	0,00023	1,14
PP60	\bar{X}	1429,7	298,5	0,87	19,1	0,00324	6,11
	σ	62,42	64,92	0,17	2,95	0,00049	1,18
PP80	\bar{X}	1228,24	268,7	1,25	18,09	0,00431	4,12
	σ	31,3	41,6	0,19	1,37	0,00062	0,56
PP100	\bar{X}	1057	221	1,4	17,4	0,00477	3,71
	σ	24,32	36,5	0,21	1,17	0,00065	0,49

Como apresentado na tabela acima, existe uma redução considerável de peso com a substituição do calcário, seja pela perlita ou pela vermiculita. Uma observação simplista pode nos mostrar que as peças a base de calcário tem peso específico de 2074,36 Kg/m³, já as peças com substituição total de perlita apresenta um peso de 1026,75 Kg/m³, pode-se verificar assim uma redução de 49,1% no peso específico dos materiais mais extremos. O que indica uma redução de massa de quase 50%, um valor considerável, enquanto a resistência mecânica do material apresenta uma redução de menos de 40%. Se verificarmos as peças de vermiculita elas apresentam propriedades inferiores se comparadas as peças a base de perlita. Tanto em peso específico quanto em tensões máximas resistidas. Com relação a tensão máxima resistida, a peça com 20% de vermiculita tem propriedades semelhantes a peça com 60% de perlita, apesar de pesar mais.

As deformações e as tensões máximas sofreram reduções sucessivas com relação a pedra sintética de referência, tendo os grupos apresentados reduções em relação a tensão, sendo o grupo PSR com 27,817 MPa, e as amostras PV20 tem máximo de 19,19 MPa (redução de 31%), nos grupos a base de perlita temos PP20 de 24,24 MPa (perda de 12,86%), as seguintes sendo PP40 resistindo a 23,15 MPa redução de 4,5%, seguindo por PP60 tensão máxima de 19,1 MPa (-17,5%), PP80 18,09 MPa (-5,3%) e as amostras

PP100 com limite de 17,4 MPa (reduzindo 3,8%),

4.5.MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

È interessante observar, como apresentado nos gráficos seguintes, a existência de uma relação entre os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de flexão de três pontos (estático) e o obtido pelo ensaio de atrito interno (dinâmico), os gráficos 10 e 11 a seguir apresentam um comparativo entre os módulos estático e dinâmico para a vermiculita e perlita respectivamente.

O gráfico acima mostra uma diferença entre os módulos de elasticidade estático (azul) e dinâmico (vermelho), é interessante destacar que em todos os casos, houve um aumento percentual de 40 a 50% entre os valores dos módulos estáticos e dinâmicos médios dos corpos de prova avaliados. Por possuir poucos dados, apenas 2 tipos de amostras determina-se uma linearidade de redução dos valores obtidos tanto pro módulo de elasticidade estático e dinâmico, mas não há possibilidade pelas poucas informações de concluir se que essa linearidade continuaria.

Gráfico 10 – Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico das pedras convencionais e da vermiculita

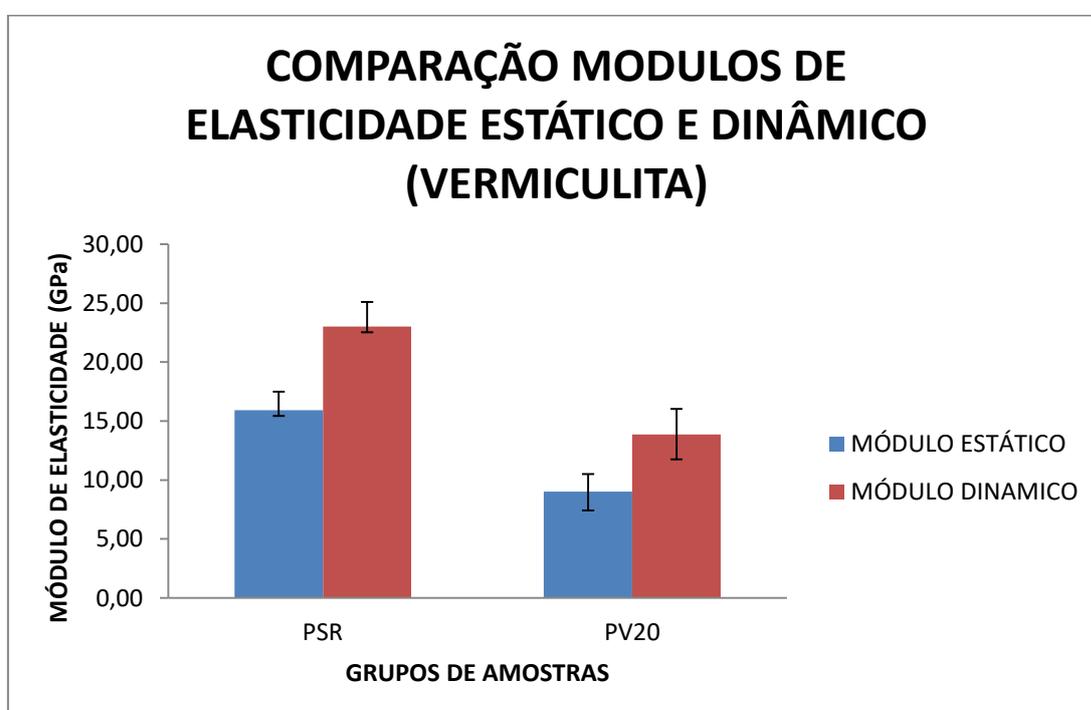
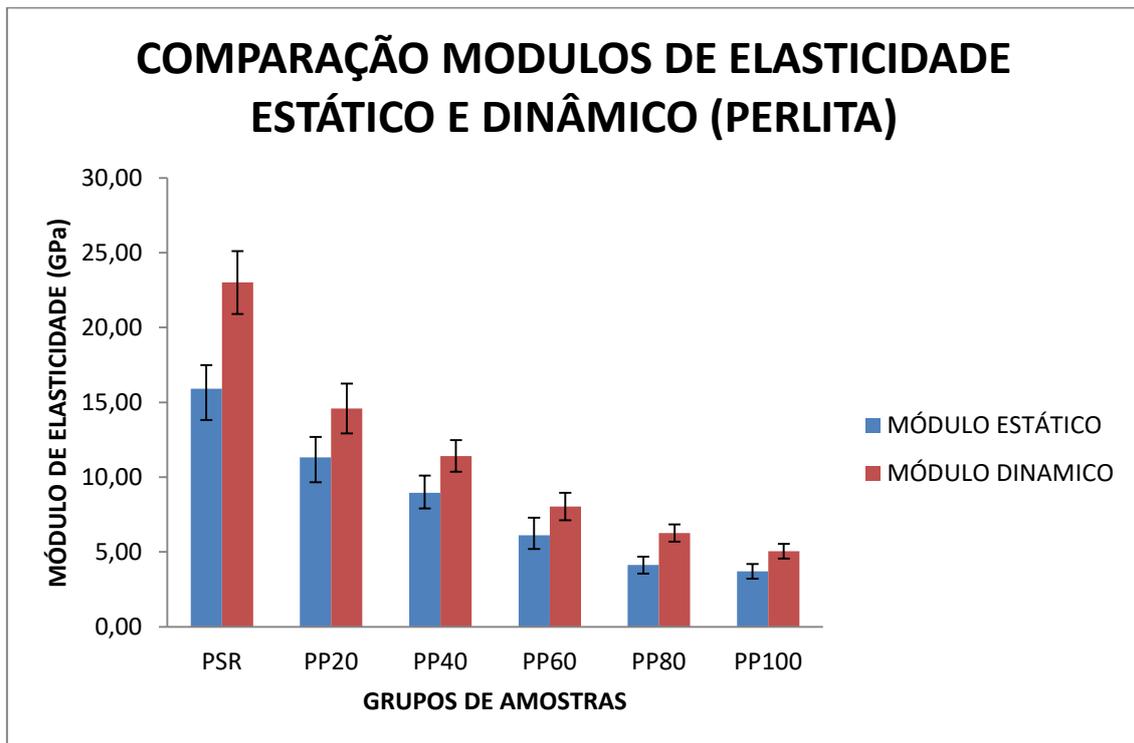


Gráfico 11 – Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico das pedras convencionais e da Perlita



Para o gráfico dos corpos de prova a base de perlita é possível verificar uma redução clara nos valores, tanto do módulo de elasticidade estático quanto do dinâmico, em todos os casos, há uma relação polinomial entre os corpos de prova. No gráfico acima podemos destacar uma relação direta entre os módulos dos materiais, regidos pelas equações presentes acima.

Nos dois casos, tanto para a perlita, vermiculita e calcário é possível verificar uma diferença considerável entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos, para os materiais metálicos, a diferença entre os módulos de elasticidade estático e dinâmicos variam em 0,5%, considerando que o material seja isotrópico e o mais homogêneo possível. Já em materiais compósitos, há uma heterogeneidade no material, durante o processo de fabricação, uma camada de material polimérico é depositado na superfície dos corpos de prova, fazendo com que a rigidez do corpo de prova seja diferente na superfície em comparação ao centro, além da presença de poros, trincas e outras discontinuidades ao longo da estrutura, fazendo com que haja discrepâncias entre seus valores estáticos e dinâmicos.

4.6.MICROSCOPIA

A microscopia analisada foi através de um microscópio eletrônico de varredura, que nos permite algumas conclusões e observações acerca das peças produzidas. Analisou-se uma peça de calcário puro, outra com 20% de perlita e 40% de vermiculita. A figura 16 abaixo representa a primeira peça com 100% de calcário como carga mineral.

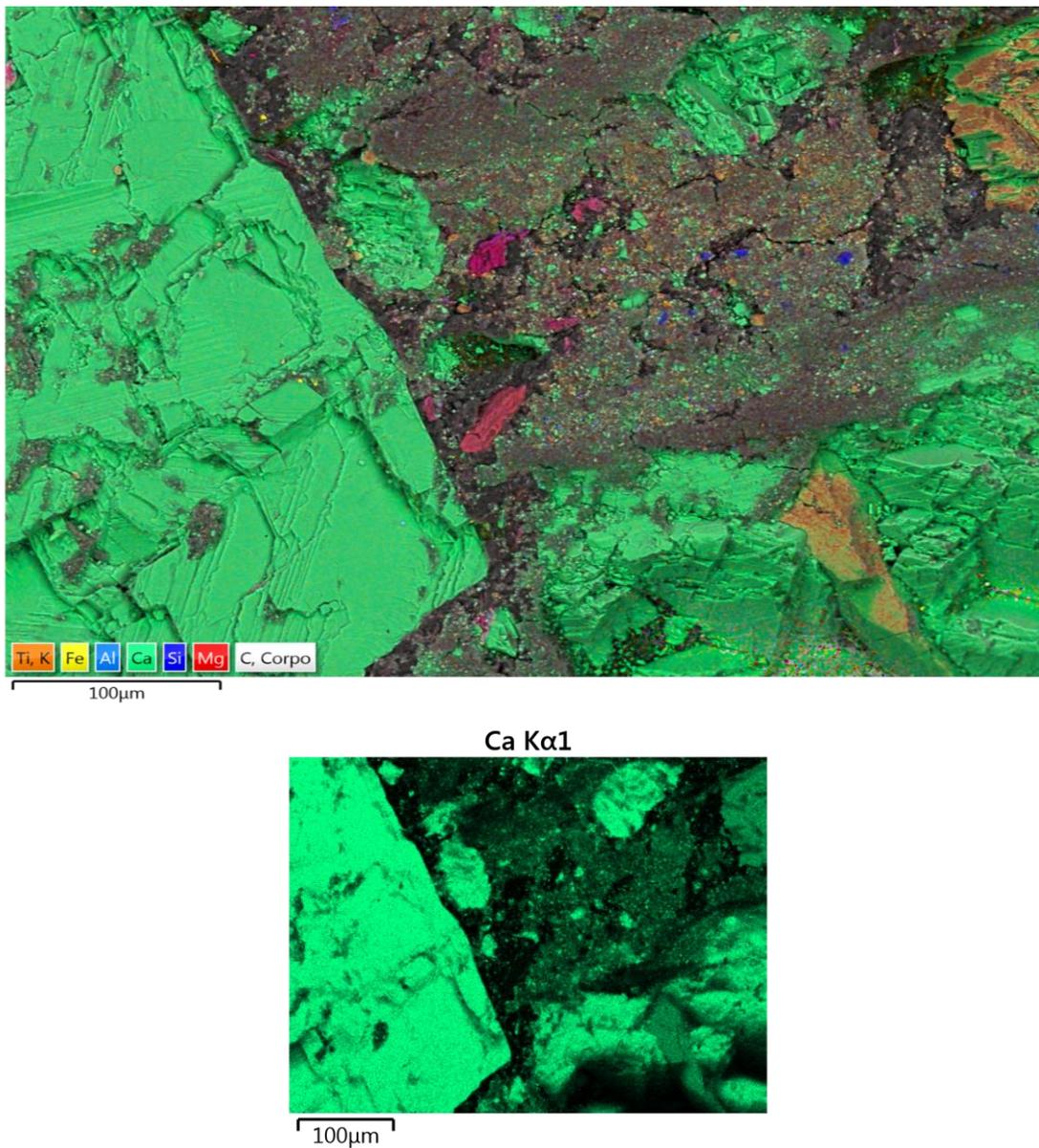


FIGURA 16 - Microscopia da seção transversal peça com 100% de calcário como carga mineral

Como apresentado na figura, o calcário (que é a carga mineral mais usada na produção de pedras sintéticas) adicionado a mistura é envolvido de forma consistente na matriz polimérica, pode-se verificar que o corpo de prova foi realmente agregado a matriz,

visto que não pode-se perceber nenhuma lacuna com ausência de carga mineral, o que é muito comum quando não há uma mistura completa do material na matriz. Pode ser visto também a existência de poros, e algumas micro-trincas ao longo do material, o que prova as diferenças obtidas entre os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico, tendo em vista que esses fatores alteram de forma significativa esses valores.

A seguir podemos analisar os corpos de prova com 20% de carga mineral perlita, como apresentado da figura 17.

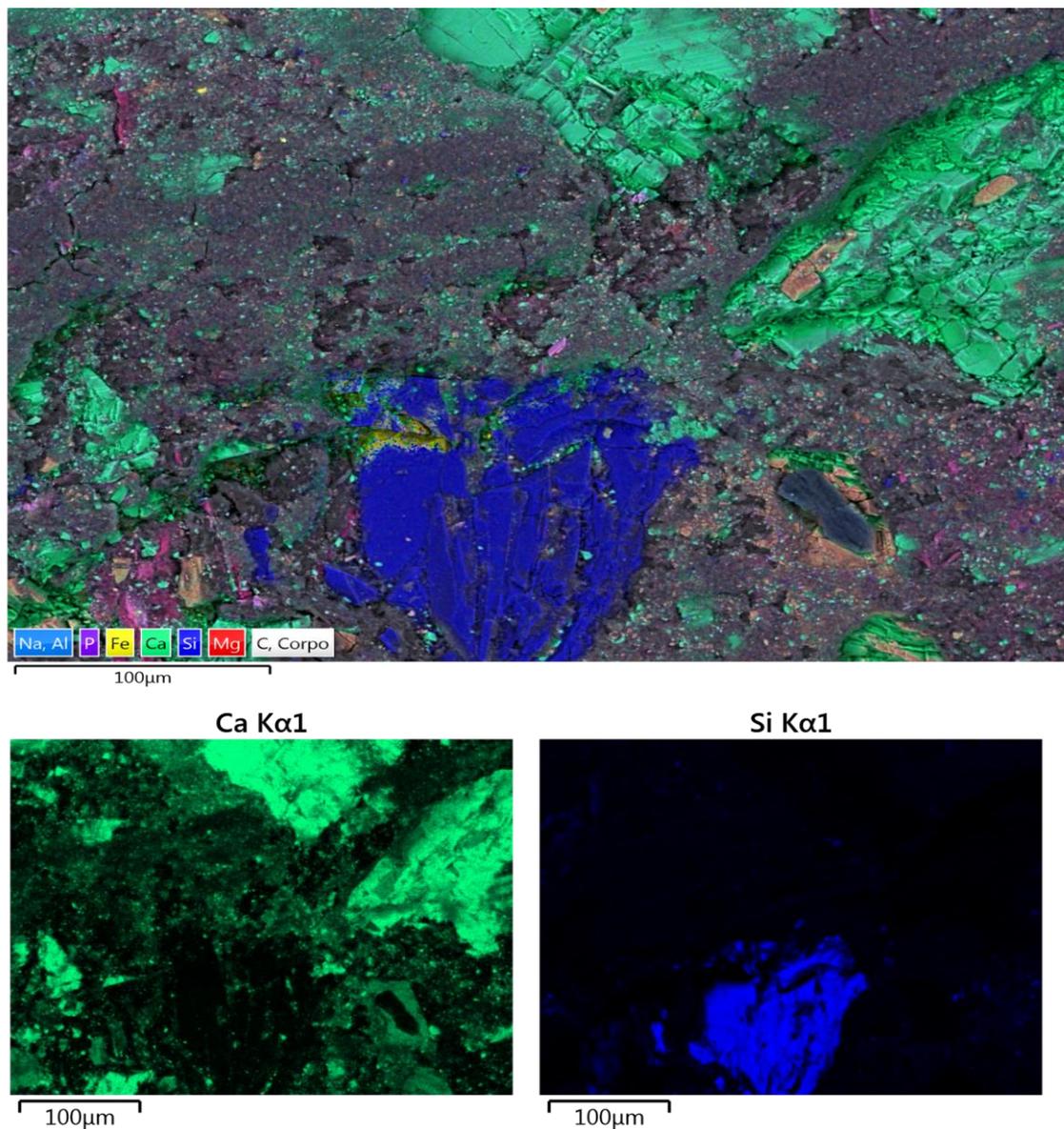


FIGURA 17 - Amostra com 20% de perlita como carga mineral.

Na amostra a base de perlita e calcário é possível verificar a presença de grãos de calcário (ricos em cálcio) e a presença de uma carga mineral perlítica rica em silício. Nota-se também nesse corpo de prova a variação das granulometrias, onde pode-se

verificar tanto no calcário quanto na perlita a presença de diferentes granulometrias, apesar de, por ser em menor percentual, aparecer menos nas microscopias. Mas, pode-se verificar a agregação dos pós nas duas misturas. É visível também a presença de microtrincas e poros ao longo do material.

Podemos assim, analisar também as misturas a base de vermiculita, como apresentado na figura 18.

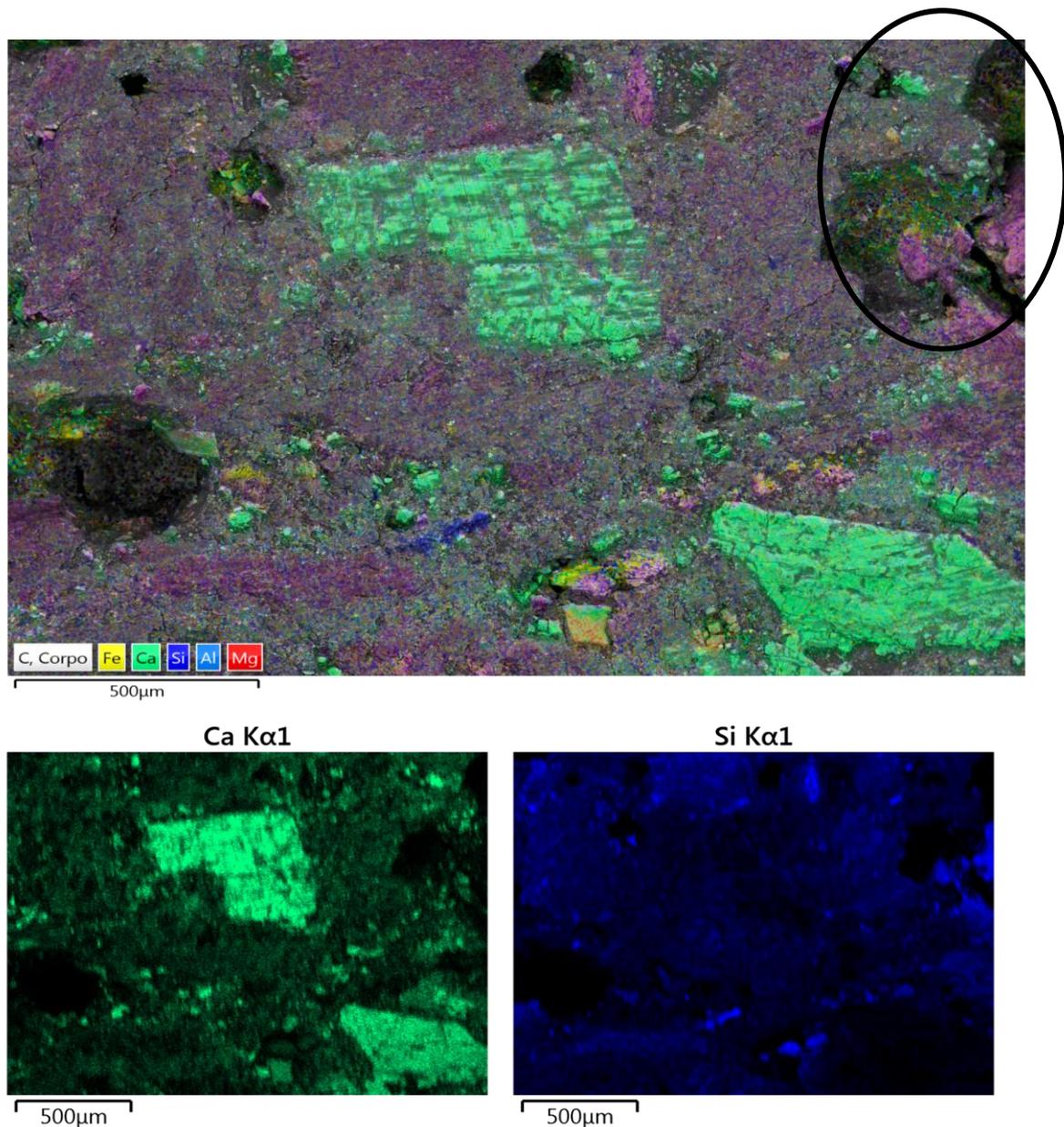


Figura 18 - Peça a base de vermiculita (40%) como carga mineral.

Na figura acima é possível verificar a mistura do calcário e da vermiculita como cargas minerais dos materiais. No destaque observado na figura acima pode-se verificar o ausência de partículas de vermiculita na seção, assim, pode-se notar que os grãos

principalmente os de maiores granulometrias se desprendem com maior facilidade da matriz, o que não foi observado nos outros casos analisados. Atenuado a essa questão observa-se a presença de trincas e poros, assim como nas outras microscopias, a ausência de grãos maiores de vermiculita, note que na parte inferior esquerda e na superior direita da primeira imagem é possível notar diferentes lacunas, as mesmas apresentam formas irregulares, os que nos sugerem a existência de um material que preencha anteriormente esses espaços, assim, podem entender que, diferente dos outros materiais a vermiculita, principalmente quando se fala de grãos maiores não possui aderência na matriz polimérica. Assim, podemos entender porque, após uma determinada concentração de vermiculita não é possível à produção de um compósito consistente, os pós de vermiculita não se aderem de forma permanente a matriz do material polimérico, o que impede a formação de um compósito consistente e impede até mesmo a catálise completa do material e conseqüentemente a sua formação.

4.7.VIABILIDADE ECONÔMICA

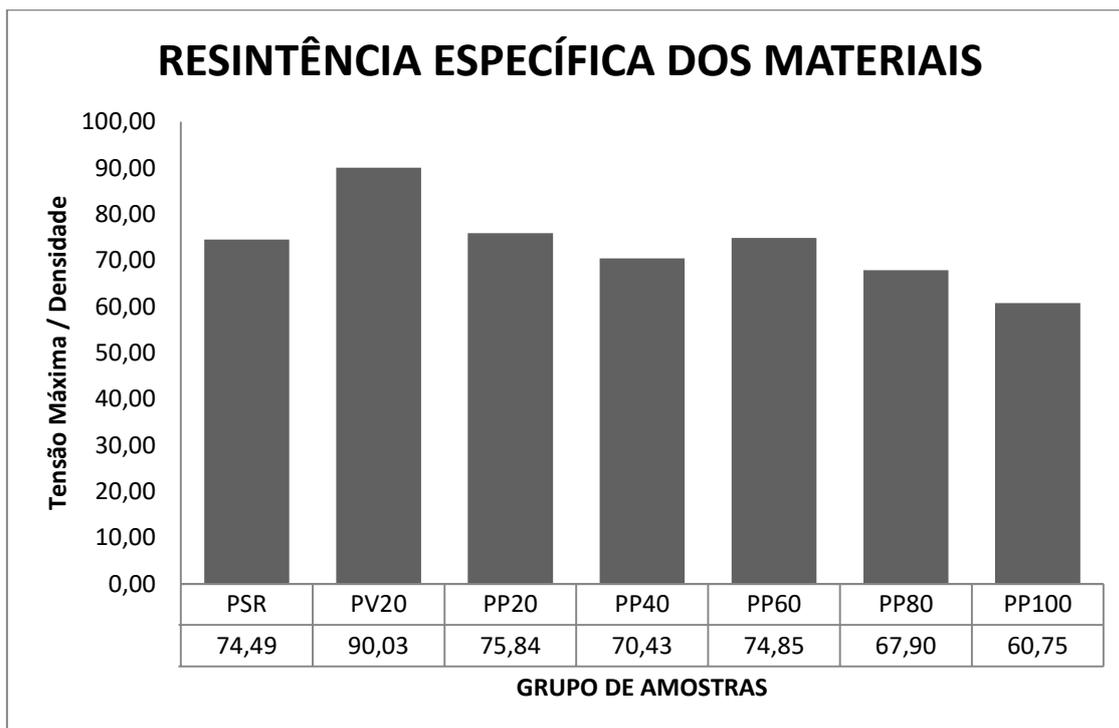
Com base nos dados apresentados anteriormente, é possível realizar algumas análises econômicas sobre os materiais. De forma genérica, nem a vermiculita nem a perlita agregaram resistência mecânica ao novo material compósito, no entanto, pode-se verificar que as mesmas permitiram a fabricação de um compósito com um peso específico ou com uma menor densidade que o material anterior. Tendo em vista que, atualmente, em vários casos, busca-se materiais alternativos que sejam mais leves que os materiais usados, principalmente na indústria automobilística e aeronáutica, a fabricação de um novo produto com propriedades similares, no entanto com densidades bem diferentes é um fator bem interessante a se analisar.

Com relação a custo, é interessante destacar que a tonelada do calcário hoje custa em média R\$ 150,00, e o valor médio da perlita ou da vermiculita, segundo dados da mineradora Brasil minérios está em R\$ 300,00. Aparentemente a perlita e vermiculita apresentam um maior custo, mas devemos levar em consideração que são produtos expandidos, o que faz com que, para a produção de uma pedra sintética a base de calcário, se eu utilizo 1 tonelada de calcário, precisarei de utilizar 333kg de vermiculita e 300 kg de perlita. O que faz com que os gastos com carga mineral, para a produção de um mesmo volume de material utilizando 100% de cada carga mineral seja, de R\$ 150,00 para as pedras de calcário puro, R\$ 99,00 para a vermiculita e de R\$ 90,00 para

as pedras sintéticas a base de perlita.

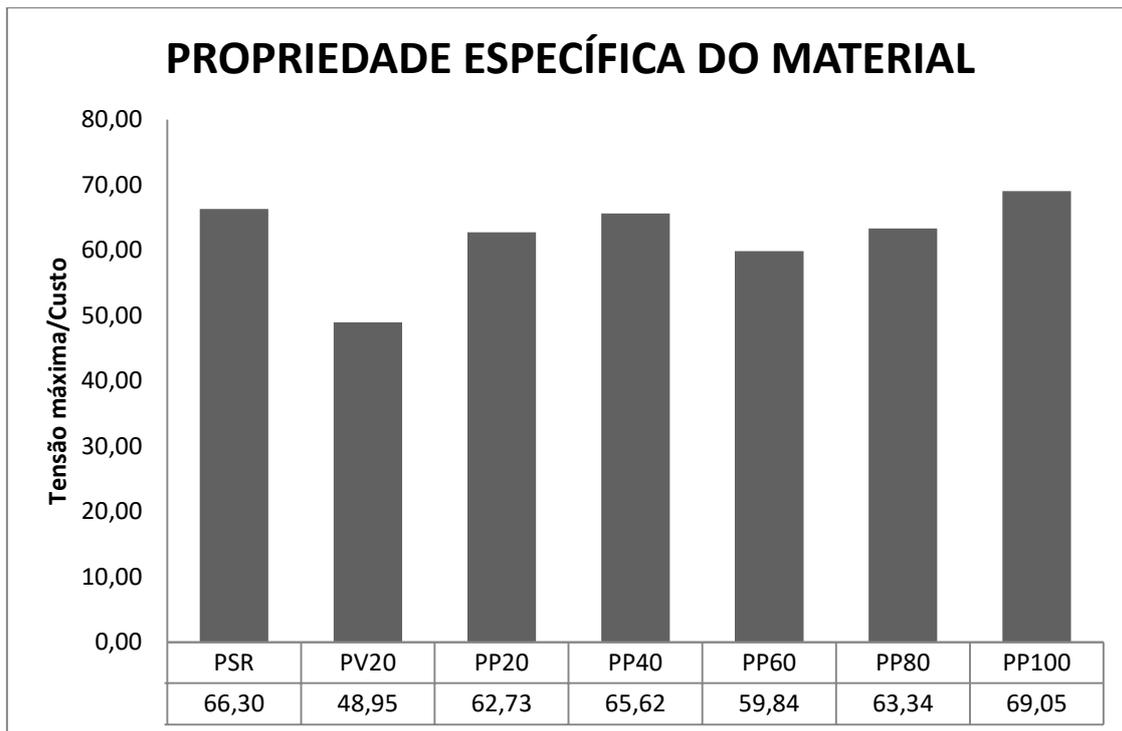
O gráfico 12 apresenta propriedades específicas dos materiais, calculado pela razão entre a tensão máxima e a densidade, para cada um dos grupo de amostras ensaiadas. No gráfico 13 é apresentado a razão da tensão máxima e o custo de produção estimado, também para os grupos de amostras ensaiadas.

Gráfico 12 – Resistência específica dos materiais fabricados



O gráfico indica que as amostras PV20, PP20 e PP60 apresentam valores superiores da relação entre tensão máxima e densidade quando comparadas a amostra de referência (PSR). Entretanto, a amostra PV20 se destaca com um aumento de 20% com relação a amostra de referência.

Gráfico 13 – Propriedades específicas dos materiais fabricados (Tensão e Custo)



Como apresentado pode-se verificar que com relação aos custos e as propriedades mecânicas, é interessante observar que a razão de tensão máxima (MPa) pelo custo (R\$), levou-se em consideração que a média das tensões máximas de cada grupo e o custo de produção dos mesmos grupos, tendo em vista que nos grupos os gastos com a parte polimérica não apresentou alteração (700g em todos os grupos), apenas os gastos com a carga mineral sofreram mudanças ao longo do trabalho.

Com relação a razão entre resistência e custos pode-se verificar que apenas a peça com 100% de perlita apresentou um aumento de 4% em relação às peças de referência, os grupos PP40 e PP80 apresentaram uma relação próxima ao de referência porém ainda inferior. Mesmo que não houve uma significativa mudança na relação, a tabela 8 mostra os custos para produção de cada grupo de corpos de prova.

Tabela 8: Custos das cargas minerais das peças produzidas

GRUPO DE AMOSTRAS	CUSTO CARGA MINERAL (R\$/Grupo)
PSR	0,42
PV20	0,39
PP20	0,39
PP40	0,35
PP60	0,32
PP80	0,29
PP100	0,25

Percebe-se uma redução nos custos relativos dos materiais, no entanto se comparados com as propriedades mecânicas tem-se uma relação mais favorável no percentual de 100% de perlita

5. CONCLUSÃO

A partir do observado, é possível verificar que há a possibilidade de substituição da carga mineral usual que é o calcário por outras cargas minerais com percentual de 100%, com um custo de produção menor que o custo do calcário. Observa-se uma redução considerável nos pesos específicos de cada material, uma redução de até 50%, quando se compara as pedras sintéticas convencionais e as pedras com substituição total de perlita.

Observa-se também uma redução das propriedades mecânicas a medida que se substitui a carga mineral de calcário para perlita ou vermiculita. As pedras sintéticas convencionais apresentam tensões máximas em média de 27,847 MPa, já as pedras com 20% de vermiculita e as com 100% de perlita apresentam tensões máximas de 19,19MPa e de 17,4MPa respectivamente, de forma gradual e linear. As peças apresentam também uma redução gradual dos módulos de elasticidade dos materiais, obtidos pelos ensaios de flexão de 3 pontos.

Observa-se também que a frequência natural dos materiais também sofreram reduções, se comparadas as pedras sintéticas originais. No entanto é interessante observar um aumento do amortecimento do material, tornando os novos materiais melhores dissipadores de vibrações que as pedras originais. Característica interessante tendo em vista que a vermiculita e perlita em forma de mineral são usados como isolante térmico e de vibração.

Uma outra questão de destaque é a redução do peso específico dos novos materiais se comparado as pedras sintéticas convencionais, sem a adição de custos, pelo contrário, apesar de pequena, há uma redução dos custos de fabricação, sendo gasto com carga mineral 150 reais no calcário enquanto para a perlita o custo com carga mineral reduz-se para 90,00.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., VISCONTE, L. L. Y. **Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas.** Química Nova, vol. 36, n. 1, p. 114-122., 2013.

ALKAN, M.; DOGAN, M.; **Adsorption of Copper(II) onto Perlite,** Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 243, Pages 280-291, Nov.-2011

ALMEIDA, JANIELE MAYARA FERREIRA DE, **Aplicação da perlita expandida modificada com ortofenantrolina na remoção do negro de eriocromo T em águas residuais geradas em laboratórios de ensaios de ensino em química,** UFRN, Natal-RN, 2015.

ALMEIDA, J.M.F.; DAMASCENO JUNIOR, E.; OLIVEIRA, E.S.; FERNANDES, N.S.; **avaliação da resistência da perlita expandida a lixiviação ácida: variação dos parâmetros concentração, tempo e agente lixiviante,** 22º CBECIMAT, NATAL – RN, 2016.

ALVES, RICARDO OLIVEIRA, **Análise de viabilidade econômica da implantação de uma indústria de reciclagem de embalagens de PET na região de Ouro Preto,** UFOP, Ouro Preto – MG, 2003.

ASM INTERNATIONAL. **Engineered Materials Handbook: Composites.** 4th ed. United States of America: ASM, v.1, 983p., 1993.

ATLAS da história do mundo: The Times. Sao Paulo: Folha de Sao Paulo, 1995.

CALLISTER, Jr. W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**”, Editora LTC, São Paulo, 5ed., p. 78-100, 2002.

CAROTHER. W. **Studies on Polymerization And Ring Formation.** I. An Introduction To The General Theory Of Condensation Polymers. Vol. 51. Experimental Station of E. I. 1929.

CARVALHO, M.; **Inclusão de compósitos cimentícios em blocos estruturais cerâmicos com foco em conforto térmico,** UFRS, Porto Alegre – RS, 2017.

COSSOLINO, L.C.; PEREIRE, A.H.A.; **Amortecimento: Classificação e métodos de determinação**, Informativo Técnico-Científico, Disponível em: <<https://sonelastic.com/images/ITC04-ATCP.pdf>>, acesso em 28/05/2019.

COZACIUC, IVAN; SILVA, LUÍS RODRIGUES DA; TOGNI, MARCOS ANTONIO; **Ensaio dos materiais**, SENAI, cap. 8, São Paulo – SP, 2002.

DEMARTINI, TCHARLLIS JOÃO DA CUNHA; **Produção e caracterização de mármore artificial com resíduo fino de mármore dolomítico beneficiado em teares de lâminas diamantadas**, UENF, Campos dos goytacazes – RJ, 2017.

DOGAN M. ALKAN M. and ÇAKIR, Ü. **Electrokinetic Properties of Perlite**, Journal of Colloid and Interface Science, 2017.

FRANÇA, SILVIA CRISTINA ALVES; LUZ, ADÃO BENVINDO DA; INFORÇATI, PAULO FRANCISCO; **Diatomita**, CAP.20, Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações., 2009.

FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A.; COUTO, H.J.B.; GONÇALVES, C.C.; **vermiculita, mais que um mineral termo acústico, iv simpósio de minerais industriais do nordeste**, João Pessoa, PB, 2016.

FREDEL, M.C., ORTEGA, P., BASTOS, E.; **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais**, Vol. 1, CEMART, UFSC, Florianópolis – SC, 2015.

GONÇALVES, GABRIEL PEREIRA; **Estudo da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore na produção de argamassa**, UENF, Dissertação, Campos dos Goytacazes – RJ, 2011;

ISAR. Site Institucional da Empresa ISAR – Isolamentos térmicos. **Lã de vidro – Isolamento acústico**, 2018. Disponível em: <<http://www.isar.com.br/>>. Acesso em: 02/12/2018.

KERSTING, D. F. **Avaliação de Resinas Epoxi para Fabricação de Materiais Compositos pelo Processo de Pultrusão**. Porto Alegre 2004.

LEVY N. F., PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blücher, 2006.

MARTINS, J.G., PEREIRA, M.E., **Materiais de construção: rochas artificiais (aglomerados de pedra natural)**. Universidade Fernando Pessoa, Porto-Pt, 2010.

MILANESE, M. C.; **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro**, UNESP, Guaratinguetá – SP, 2008.

OLIVEIRA, M.P. de; BARBOSA, N.P.; TORRES, S.M.; LEAL, A.F.; SILVA, C.G.; **Compósitos à base de gesso com resíduos de EVA e vermiculita**, *Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.6, p.684–689, Campina Grande – PB, 2012.

OLIVEIRA, I.T.D.; VISCONTE, L.L.Y.; **Análise térmica e resistência à flexão de compósitos de hdpe e vermiculita**, 9º CBPOL, São Carlos – SP, 2007

OLIVEIRA, LUCAS SANTOS MENEZES E; UGARTE, JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA. **Utilização da vermiculita como adsorvente de óleo da indústria petrolífera**. Publicação do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/795/1/21Artigo%20JIC%202004%20Lucas%20Santos%20e%20Jose%20Ugarte.pdf>>. Acesso em: 14/09/2018.

OTANI, L.B.; PEREIRA, A.H.A.; **Influência do tipo de suporte na caracterização do módulo de elasticidade de amostras pequenas pela técnica de excitação por impulso**, 21º CBECIMAT, Cuiabá – MT, 2014.

PARAHYBA, RICARDO EUDES, **Calcário Agrícola**, DNPM – CE, disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-1-2013-calcario-agricola>>, acesso em: 20/02/2019

Pedra artificial. Disponível em: <www.pedraartificial.com.br> Acesso em 27/11/2018

PEREIRA, A. H. A.; MUSOLINO, B.; MACIEL, C. D.; RODRIGUES, J. A.; **Algoritmo para determinação do amortecimento de materiais cerâmicos pela técnica das frequências naturais de vibração via excitação por impulso**, *Cerâmica* vol.58, Nº.346, São Paulo-SP, Apri./June, 2012

PEREIRA, MURILO GIATTI FURQUIM, **Potencial de utilização de agregados leves na produção de concretos estruturais**, UFSC, São Carlos – SP, 2012.

PINTO, KELLY NANJI CARNEIRO, **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**, USP, São Paulo – SP, 2002.

RABAHI, R.F.; LEVY NETO, F.; **Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético com carga reciclada**, TESE, UnB, Brasília – DF, 2015.

RABAHI, R.F.; LEVY NETO, F.; **Análise da resistência de vigas de mármore sintético através da distribuição estatística de weibull**, UnB, dissertação, Brasília – DF, 2010.

RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins**. iSmithers. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, United Kingdom. 2009.

REIS, E. (2002). **Vermiculita no Brasil – Situação atual**. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).

REIS, ELPIDIO, ET AL. - **Levantamento da Situação e das Carências Tecnológicas dos Minerais Industriais Brasileiros – Com enfoque na mineração de: Argila para cerâmica, barita, Bentonita, Caulim para carga, talco/Agalmatolito e Vermiculita**. – MCT – CGEE– 2001.

REIS, LIGIA REGHIN; **Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão**, UNIFEI, Itajubá – MG, 2016.

RIBEIRO, CARLOS EDUARDO GOMES, **Produção de rocha artificial utilizando resíduo da indústria de mármore em matriz poliéster**, UENF, CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ, 2011.

SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M., **Calcário e Dolomito** – Capítulo 16, in Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações, Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins, 2009.

SANTOS, ALEXANDRE MANEIRA. **Estudo de compósitos Híbridos Polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em Engenharia**. Dissertação de

Engenharia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, H. P.; **Comportamento Mecânico de Compósitos de Fibra de Vidro/Epoxy Nano-Reforçados**. Universidade de Coimbra, 2010.

SILVA, JOSÉ OTÁVIO DA, **produto rt 38 perfil do calcário**, Ministério de minas e energia, 2009.

SILVA FILHO, S.H.DA; VINACHES, P.; PERGHER, S.B.C.; **caracterização estrutural da perlita expandida**, perspectiva, Erechim. v. 41, n.155, p. 81-87, setembro/2017.

SILVEIRA, D. M. **Adsorção de um ácido graxo utilizado em flotação por vermiculita hidrofóbica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

SOARES JUNIOR, ALDO BATISTA; **Produção do poli(tereftalato de etileno) modificado com glicerol e derivados**, UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2010.

Sonelastic, disponível em: <<https://www.sonelastic.com/pt/>>, acesso em: 20/05/2019

SOUSA, J. G. de; **Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: aplicação em cachoeiro de itapemirim – ES**, UFJF, Juiz de fora – MG, 2007.

SZNELWAR, J.J.; SCALABRIM, R.; **Perfil da Vermiculita**, Ministério de minas e energia, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P28_RT48_Perfil_da_Vermiculita.pdf/92473abd-64d9-4001-9937-cd0f92db8222>, acesso em: 23/12/2018.

TEDESCO, THAIS DELAQUA COSTA, **desenvolvimento de argamassas utilizando granulometrias distintas de perlita**, UFSC, Joinville – SC, 2016.

TORRES, R. B.; **Desenvolvimento de compósito híbrido de fibra de vidro e micropartículas de sílica e cimento para uso em caneleiras**, UFSJ, PPMEC, São João del Rei – MG, 2013.

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações.** [S.l.: s.n.], 2005.

ZOLIN, IVAN, **Ensaio mecânicos e análises de falhas**, UFSM, 3ª Ed., E-tec Brasil, Santa Maria – RS, 2011.

ANEXO I – MEDIDAS E INFORMAÇÕES FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA

PSR – 100% Calcário

		COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	MASSA (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A2	138,8	40,3	9,1	104,3	2049,03041	2530,74261
	A3	145,3	40,3	9,1	104,28	1956,99164	2530,74261
	A4	140,1	39,4	8,7	102,71	2138,74555	2162,08485
	B1	144,1	39,2	8,8	104,67	2105,66609	2226,14187
	B2	134,9	40	9,6	106,95	2064,60804	2949,12
	B3	127,6	39,4	7,9	80,47	2026,09598	1618,81138
	B4	129,4	39,6	7,8	79,76	1995,54295	1566,0216
	C1	129,4	39,2	8,6	94,67	2170,16914	2077,78293
	C2	132,4	40,2	9,2	103,15	2106,52863	2608,6048
	C3	136,4	39,4	8,6	93,26	2017,83833	2088,38387
	C4	133,8	39,5	8,8	97,55	2097,44892	2243,17867
	D1	138	39,3	8	92,24	2125,97264	1676,8
	D2	135,9	40,3	8,8	102,67	2130,27851	2288,61013
	D3	137,7	39,4	7,5	84,15	2068,05791	1385,15625
	D4	139,3	39,5	8,6	98,67	2085,15558	2093,68433
	E1	135	39,3	9,1	95,73	1982,80656	2467,94503
	E2	135	40	9,1	98,83	2011,19251	2511,90333
	E3	136,8	39,3	7,8	83,52	1991,66933	1554,1578
	E4	129,7	39,3	9,2	97,54	2079,99551	2550,2032
	E5	142,8	40,2	8,6	102,13	2068,71479	2130,7876
	F1	140	39,3	8,1	95,56	2144,22589	1740,46928
	F2	142	39,9	9	104,93	2057,7657	2423,925
	F3	137,4	39,4	7,4	85,37	2131,03512	1330,48547
	F4	144	39,4	8,9	107,86	2136,05138	2314,64822
	F5	137,4	40,2	8,9	101,04	2055,37252	2361,64615
	G1	137	39,3	8,5	96,65	2111,88281	2011,25938
	G2	138,6	40	9,1	105,4	2089,18066	2511,90333
	G3	139	39,3	8,7	96,05	2021,02072	2156,59733
	G4	139,5	39,5	8,4	102,81	2221,18519	1950,984
	G5	143,5	40,2	8,3	93,57	1954,25208	1915,48645
	MÉDIA	137,6	39,45	8,7	98,11	2074,36	2159,3
	DESVIO	4,585	0,3989	0,54516	7,902	64,4042	397,69
	MÁXIMO	145,3	40,3	9,6	107,86	2221,1852	2949,12
	MÍNIMO	127,6	39,2	7,4	79,76	1954,2521	1330,485

PV20 – 20% Vermiculita

		COMPRIMENT O (mm)	LARGUR A (mm)	ESPESSUR A (mm)	MASS A (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A3	150,5	39,6	8,6	89,62	1748,536903	2098,9848
	A4	141,2	39,7	7,7	71,3	1651,861386	1510,3633
	B2	120	40,4	7,9	65,37	1706,824163	1659,898
	B4	136,1	39,9	7,9	73,35	1709,786982	1639,3547
	C1	133,1	39,4	8	72,16	1720,015103	1681,0667
	C3	137,9	39,5	8,1	68,78	1558,891147	1749,3266
	C4	134	39,9	7,4	68,66	1735,37919	1347,3698
	D3	147,3	37,8	9	84,9	1694,223238	2296,35
	D5	130,5	40,3	8,3	79,73	1826,535485	1920,2513
	E2	148,4	40,4	7,8	83,52	1785,996555	1597,6584
	E4	133,7	39,6	8,3	77,23	1757,443409	1886,8971
	E5	147,9	40,5	8,6	91,99	1785,743058	2146,689
	F2	120,8	40,2	7,9	67,42	1757,392099	1651,6807
	F3	150,5	39,6	9,3	93,5	1686,929669	2654,3781
	F4	138	39,6	7,6	70,95	1708,301551	1448,6208
	F5	129,4	40,4	8,2	72,86	1699,650683	1856,2723
	G4	138,1	39,5	7	66,67	1745,989553	1129,0417
	G5	142,7	40,4	8,1	83,92	1797,111892	1789,1847
	MÉDIAS	138	39,8	8,05	73,11	1727,7	1715,2
	DESVIO	9,232	0,6355	0,55144	9,105	60,8425	359,12
	MÁXIMOS	150,5	40,5	9,3	93,5	1826,5355	2654,378
	MÍNIMOS	120	37,8	7	65,37	1558,8911	1129,042

PP20 – 20% PERLITA

		COMPRIMENT O (mm)	LARGUR A (mm)	ESPESSUR A (mm)	MASS A (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A3	134,6	39,6	8,5	85,624	1889,88919	2026,6125
	A4	139	39,6	7,4	72,914	1790,066718	1337,2392
	A5	139,3	40	7,9	82,863	1882,445682	1643,4633
	B2	140,7	40,3	7,3	77,553	1873,598796	1306,4488
	B3	123,55	39,7	8	80,593	2053,875332	1693,8667
	B4	132,5	39,6	7,4	70,619	1818,774177	1337,2392
	B5	133,3	40	8,1	82,977	1921,2442	1771,47
	C1	134,8	39,5	8,2	76,036	1741,479722	1814,9197
	C2	137,3	40,3	8	81,71	1845,906249	1719,4667
	C3	133,75	39,7	8,3	76	1724,452366	1891,662
	C4	126	40,1	8,2	81,707	1972,107092	1842,4881
	C5	133,8	40	7,7	82,226	1995,273038	1521,7767
	D1	135,1	39,5	8,3	76,42	1725,347172	1882,1322
	D2	127,6	40,3	8,4	80,313	1859,305878	1990,4976
	D3	139,1	39,3	7,7	79,329	1884,61036	1495,1456
	D5	139,4	40	7,9	80,306	1823,048145	1643,4633
	E1	134,6	39,5	7,8	75,45	1819,376102	1562,067
	E2	135,2	40	8	79,99	1848,881287	1706,6667
	E3	138,6	39,3	8,1	81,658	1850,793388	1740,4693
	E4	137,3	39,5	8,1	83,757	1906,638954	1749,3266
	E5	137,6	40,5	8,4	82,921	1771,380207	2000,376
	F2	136,1	40	7,6	75,77	1831,325651	1463,2533
	F3	136,5	39,4	8,2	79,99	1813,814925	1810,3249
	F4	134,6	39,4	8,4	80,875	1815,489435	1946,0448
	F5	138	40,3	8,6	89,523	1871,768109	2136,0881
	G2	136,6	40,1	8,1	80,431	1812,772806	1775,8987
	G3	138	39,4	7,9	77,644	1807,613189	1618,8114
	G4	138,5	39,3	7,6	76,052	1838,462279	1437,6464
	G5	139,6	40,2	8,4	82,221	1744,182791	1985,5584
	MÉDIA	136,6	39,85	8,05	80,31	1838,46	1730
	DESVIO	4,051	0,364	0,3411	3,916	76,3516	218,8
	MÁXIMO	140,7	40,5	8,6	89,523	2053,8753	2136,09
	MÍNIMO	123,55	39,3	7,3	70,619	1724,4524	1306,45

PP40 – 40% PERLITA

		COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	MASSA (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A3	131,9	39,3	7,8	65,03	1608,3546	1554,1578
	A4	137	39,4	8,2	73,46	1659,66442	1810,3249
	A5	131,4	40,1	8,5	72,07	1609,14751	2052,201
	B1	136,1	39,1	8,1	69,74	1617,93862	1731,6119
	B2	133,6	40,4	8,6	72,99	1572,45088	2141,3885
	B3	133,2	39,6	7,6	65,44	1632,41391	1448,6208
	B4	133,1	40	8	69,48	1631,29226	1706,6667
	B5	133,5	40,3	8,2	74,3	1684,18056	1851,6775
	C1	136,1	39,1	8,7	75,45	1629,69041	2145,6223
	C2	133,8	40,2	8,7	77,62	1658,71671	2205,9851
	C3	131,9	39,5	8,1	69,31	1642,36238	1749,3266
	C4	130,5	39,9	7,6	66,26	1674,38156	1459,5952
	C5	131,6	40,3	8,4	73,73	1655,02292	1990,4976
	D1	136	39,3	8,7	72,87	1567,10486	2156,5973
	D2	133,8	40	8,2	72,12	1643,3337	1837,8933
	D3	138,3	40	7,8	66,47	1540,4546	1581,84
	D4	136,6	39,8	8,2	73,9	1657,66518	1828,7039
	D5	139,3	40,1	8	70	1566,43567	1710,9333
	E1	143	39,5	8,5	76,95	1602,71597	2021,4948
	E2	133,7	39,8	8,4	74,13	1658,4418	1965,8016
	E3	136	39,4	8	67,22	1568,09869	1681,0667
	E4	143	39,6	8,1	75,34	1642,51511	1753,7553
	E5	140,1	40	7,5	66,1	1572,68618	1406,25
	F1	138,8	39,6	8,6	82,36	1742,34131	2098,9848
	F2	143,4	39,9	8,1	78,15	1686,24982	1767,0413
	F3	137,1	39,2	8	73,41	1707,42531	1672,5333
	F4	131,2	39,5	8,5	71,06	1613,15221	2021,4948
	F5	137,8	40,2	8	70,47	1590,15337	1715,2
	G2	157	40,1	8,3	84,9	1624,74636	1910,7216
	G3	145,3	39,5	8,4	78,41	1626,40784	1950,984
	MÉDIA	136,1	39,8	8,2	72,93	1630,5	1819,5
	DESVIO	5,503	0,381	0,33418	4,846	45,948	221,38
	MÁXIMO	157	40,4	8,7	84,9	1742,341	2205,985
	MÍNIMO	130,5	39,1	7,5	65,03	1540,455	1406,25

PP60 – 60% PERLITA

		COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	MASSA (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A3	132	39,3	6,7	46,83	1347,35759	984,998825
	A4	140,8	39,6	7,3	55,21	1356,42894	1283,7561
	A5	136,6	40	8,3	63,43	1398,63995	1905,95667
	B2	135,2	40	8,6	69,04	1484,45025	2120,18667
	B3	137,5	39,2	7,3	54,43	1383,33291	1270,78887
	B4	136,3	39,6	7,8	58,43	1387,87465	1566,0216
	B5	134	40	9,1	69,92	1433,49188	2511,90333
	C1	139,5	39,2	8,3	67,43	1485,64413	1867,83753
	C2	136,3	40	8,6	65,57	1398,46269	2120,18667
	C3	134	39,3	7,6	53,79	1343,97318	1437,6464
	C4	132,2	39,6	8,3	63	1449,89254	1886,8971
	C5	132,3	40	8,3	64,12	1459,80748	1905,95667
	D1	132,3	39,2	8,1	59,47	1415,68623	1736,0406
	D2	136,1	40,3	8,5	69,31	1486,66734	2062,43646
	D3	139	39,3	8,8	69,11	1437,64239	2231,8208
	D4	138,7	39,6	8	60,37	1373,91398	1689,6
	D5	143	40,1	8,3	66,14	1389,65082	1910,72156
	E1	130,8	39,3	8,4	58,9	1364,06704	1941,1056
	E2	138	40	8,9	77,36	1574,66211	2349,89667
	E3	133,5	39,2	8,4	64,3	1462,73062	1936,1664
	E4	132,5	39,2	8,2	63,04	1480,13186	1801,13547
	E5	129,4	40	7,8	56,07	1388,80633	1581,84
	F1	140,4	39,2	8	60,77	1380,21288	1672,53333
	F2	137,7	40	8,6	67,49	1424,77749	2120,18667
	F3	137,6	39,5	8,4	67,71	1483,05753	1950,984
	F4	136,9	39,3	8	60,86	1413,98878	1676,8
	F5	131,9	40	7,9	67,81	1626,90377	1643,46333
	G1	130,5	39,2	8,3	62,51	1472,22717	1867,83753
	G2	136,9	39,8	8,2	64,69	1447,89403	1828,70387
	G3	140	39,2	7,5	60,88	1479,10593	1378,125
	G4	133,3	39,3	8,1	62	1461,11356	1740,46928
	G5	138,6	40,2	8,1	64,35	1425,85134	1780,32735
	MÉDIA	136,3	39,6	8,25	63,24	1429,7	1848,3
	DESVIO	3,428	0,377	0,49513	5,896	62,424	320,45
	MÁXIMO	143	40,3	9,1	77,36	1626,904	2511,903
	MÍNIMO	129,4	39,2	6,7	46,83	1343,973	984,9988

PP80 – 80% PERLITA

		COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	MASSA (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A2	135,3	40,1	8,3	55,82	1239,56576	1910,7216
	A3	143	39,2	7,8	52,51	1200,95106	1550,2032
	A4	134	39,4	8,1	52,61	1230,21853	1744,898
	A5	141	40	7	45,39	1149,69605	1143,3333
	B1	133,3	39,1	8,2	53,49	1251,56047	1796,5407
	B2	130	40,1	7,7	47,81	1191,07825	1525,5811
	B3	128	39,1	8,1	48,91	1206,49608	1731,6119
	B4	133,1	39,5	8,5	55,61	1244,39661	2021,4948
	B5	137,5	40,3	6,3	44,26	1267,83611	839,74118
	C1	130	39	8,6	52,33	1200,1743	2067,182
	C2	132,6	40	7,9	51,24	1222,865	1643,4633
	C3	135,2	39,7	7,9	53,43	1260,05901	1631,1374
	C4	135,6	39,7	7,4	50,44	1266,17333	1340,6161
	C5	126,4	40	7,4	45,02	1203,28002	1350,7467
	D1	135	39,1	8,1	52,39	1225,3294	1731,6119
	D2	137,4	40,1	7,5	49,51	1198,12066	1409,7656
	D3	134	39,3	8	51,32	1218,14591	1676,8
	D4	131,4	39,4	7,9	49,62	1213,21587	1618,8114
	D5	140,5	40	7,6	51,03	1194,74621	1463,2533
	E1	135,5	39,2	8,1	52,98	1231,40687	1736,0406
	E2	133	40	7,5	51,09	1280,45113	1406,25
	E3	133,5	39,1	8,7	53,95	1187,9938	2145,6223
	E4	133,4	39,5	7,2	49,39	1301,82799	1228,608
	F1	140,4	39,2	8,5	57,43	1227,6278	2006,1417
	F2	133,1	39,6	8,1	51,23	1199,95814	1753,7553
	F3	134,8	39,4	8,6	56,28	1232,16686	2088,3839
	F4	137,9	39,3	6,7	44,62	1228,84738	984,99883
	G1	141	39,2	8,6	59,32	1247,95094	2077,7829
	G2	140	39,2	8,5	57,41	1230,70657	2006,1417
	G3	134,1	39,1	8,5	54,96	1233,16805	2001,024
	G4	132,1	39,3	7,1	42,08	1141,62117	1172,1585
	MÉDIA	134,5	39,4	8,05	51,83	1228,24	1704,2
	DESVIO	3,961	0,4	0,595	3,864	31,2993	339,22
	MÁXIMO	143	40,3	8,7	59,32	1301,828	2145,622
	MÍNIMO	126,4	39	6,3	42,08	1141,6212	839,7412

PP100 – 100% PERLITA

		COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	MASSA (g)	Peso específico (ρ) (kg/m ³)	Momento Inércia (Kg.m ²)
	A2	139,1	40,1	8,6	50,65	1055,86768	2125,4871
	A3	138	39,2	7,9	44,3	1036,60066	1610,5941
	A4	138,3	39,2	7,4	41,34	1030,4585	1323,7317
	A5	135,7	39,8	7,3	41,71	1057,92385	1290,2397
	B2	134,3	39,8	8,1	46,65	1077,47585	1762,6127
	B3	133,5	39,1	7,4	39,66	1026,74588	1320,3549
	B4	133,1	39,4	7	39,14	1066,22412	1126,1833
	B5	132	39,9	7,1	40,94	1094,81985	1190,0541
	C1	130,5	39,1	7,2	40,11	1091,77437	1216,1664
	C2	133,7	39,9	8,6	49,28	1074,15745	2114,8862
	C3	132,9	39,3	7,5	42,22	1077,80311	1381,6406
	C5	132,8	40	7,8	43,71	1054,94092	1581,84
	D1	130,6	39,2	7,2	40,11	1088,1554	1219,2768
	D2	137	40,1	8,4	49,61	1075,04093	1980,6192
	D3	134,2	39,3	7,4	41,38	1060,26323	1327,1086
	D4	135,1	39,3	7,4	42,91	1092,14146	1327,1086
	D5	136,9	40	7,6	43,77	1051,7185	1463,2533
	E1	135,5	39,2	7,8	43,53	1050,67573	1550,2032
	E2	137,6	39,9	8,1	46,54	1046,52602	1767,0413
	E3	141,6	39	7,5	45,07	1088,17422	1371,0938
	E4	139,5	39,2	6,7	40,37	1101,85303	982,49247
	F1	139,8	39,2	7,8	44,88	1049,94127	1550,2032
	F2	135,5	39,8	7,6	43,19	1053,77343	1455,9371
	F3	136,2	39,2	6,9	41,5	1126,51202	1073,1294
	G1	135,2	39,2	8,6	47,95	1052,02825	2077,7829
	G2	133,5	39,8	7,2	40,11	1048,46956	1237,9392
	G3	135	39	7,4	40,81	1047,45771	1316,978
	G4	136,5	39	7,6	41,59	1027,96439	1426,672
	MÉDIA	135	39,3	7,5	42,6	1057	1376
	DESVIO	2,75	0,38	0,51	3,21	24,32	312
	MÁXIMO	141,6	40,1	8,6	50,65	1126,512	2125,487
	MÍNIMO	130,5	39	6,7	39,14	1026,7459	982,4925

ANEXO II – RESULTADOS ENSAIO DE FLEXÃO DE 3 PONTOS

PSR – 100% CALCÁRIO

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A2	580,4	0,5025	36,21	0,002074594	14,4609107
	A3	462,6	0,4337	23,91	0,00179055	13,35428108
	A4	558,2	0,447	32,29	0,00176434	18,3004538
	B1	536,7	0,4926	30,50	0,001966675	15,5073159
	B2	533,3	0,3456	24,96	0,001505222	16,57897548
	B3	380,9	0,5186	26,72	0,001858725	14,37588183
	B4	311,7	0,492	22,32	0,001741066	12,81817614
	C1	502,8	0,443	29,92	0,001728454	17,30787109
	C2	564,4	0,4373	28,61	0,001825252	15,67658719
	C3	440,5	0,4488	26,08	0,001751084	14,89138249
	C4	452,2	0,3789	25,50	0,001512735	16,85754666
	D1	383	0,4342	26,27	0,001575924	16,66786496
	D2	565,8	0,4258	31,27	0,00169998	18,39660795
	D3	327,6	0,5275	25,50	0,001794896	14,2061026
	D4	469,6	0,4696	27,73	0,001832239	15,13355921
	E1	451,5	0,4295	23,93	0,00177321	13,49619638
	E2	515,3	0,454	26,84	0,001874359	14,31705361
	E3	370,5	0,503	26,73	0,001779992	15,01680006
	E4	521,5	0,3909	27,04	0,001631583	16,57548099
	E5	482	0,4394	27,96	0,001714408	16,31169561
	F1	448,8	0,4712	30,02	0,001731593	17,339377
	F2	529,1	0,405	28,24	0,001653686	17,07716773
	F3	416,9	0,5395	33,33	0,001811251	18,40274443
	F4	560,3	0,4232	30,97	0,0017088	18,12350748
	F5	498,6	0,3951	27,01	0,001595338	16,93100357
	G1	445,32	0,4347	27,05	0,001676348	16,13863362
	G2	575,5	0,4691	29,97	0,0019367	15,47495007
	G3	505,6	0,5108	29,32	0,002016163	14,54251091
	G4	502,8	0,4576	31,12	0,001743897	17,84464157
	G5	465,4	0,5176	28,99	0,001949072	14,87323058
	MÉDIA	490,3	0,4479	27,847	0,0017577	15,90761
	DESVIO	72,49	0,047	3,0212	0,0001368	1,590159
	MÁXIMO	580,4	0,5395	36,2093	0,002074594	18,40274443
	MÍNIMO	311,7	0,3456	22,3173	0,001505222	12,81817614

PV20 – 20% VERMICULITA

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A3	332,4	0,5395	19,57754	0,002104968	9,30063404
	A4	222,3	0,6859	16,29133	0,002396112	6,799069919
	B2	252,8	0,5332	17,2954	0,001911053	9,050192557
	B4	277	0,7042	19,18853	0,002523938	7,602616932
	C1	324,1	0,5911	22,17134	0,002145391	10,3344036
	C3	228,5	0,7203	15,20926	0,002647	5,745848451
	C4	238,9	0,6713	18,86118	0,002253741	8,368834461
	D3	322,7	0,5014	18,18073	0,002047304	8,880324531
	E2	277,7	0,5228	19,48922	0,00185006	10,53437217
	E4	333,8	0,5749	21,10688	0,002164841	9,749853506
	E5	367,1	0,4576	21,14081	0,001785419	11,84081297
	F2	279,1	0,5759	19,18972	0,002064095	9,29691715
	F3	347,7	0,5921	17,51188	0,002498237	7,009695097
	F4	238,9	0,639	18,01702	0,002203282	8,177355123
	F5	257,6	0,4884	16,35784	0,001816959	9,002866514
	G4	233,4	0,7438	20,8016	0,002362163	8,806168513
	G5	322,7	0,5608	21,00084	0,00206086	10,19032578
	MÉDIAS	277,7	0,5759	19,19	0,002145	9,002866514
	DESVIO	47,2	0,0862	1,973	0,000255	1,510921905
	MÁXIMOS	367,1	0,7438	22,1713	0,002647	11,84081297
	MÍNIMOS	222,3	0,4576	15,2093	0,001785419	5,745848451

PP20 – 20% PERLITA

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A3	407,2	0,5176	24,5507	0,001996038	12,29971556
	A4	293	0,6385	23,30763	0,002143622	10,8730129
	A5	369,8	0,7386	25,553	0,002647232	9,652723543
	B2	309,6	0,6067	24,86791	0,002009335	12,37618693
	B3	351,1	0,564	23,83688	0,002047032	11,6446057
	B4	304,7	0,6567	24,23834	0,002204724	10,99382001
	B5	457,8	0,6286	30,09088	0,002310016	13,02626453
	C1	327,6	0,6359	21,27689	0,002365692	8,993939152
	C2	385,1	0,6072	25,75595	0,002203826	11,68692557
	C3	413,5	0,5838	26,08062	0,002198355	11,86370036
	C4	351,8	0,5937	22,50675	0,002208699	10,19005167
	C5	376,8	0,6864	27,40681	0,002397859	11,42970397
	D1	329,7	0,6573	20,90041	0,002475126	8,444179796
	D2	439,1	0,5541	26,63722	0,002111655	12,61438008
	D3	385,8	0,7021	28,56126	0,002452705	11,64480054
	D5	331	0,6375	22,87194	0,002284877	10,0101381
	E1	349,1	0,6682	25,05836	0,002364594	10,5973189
	E2	347	0,5749	23,38184	0,002086594	11,20574521
	E3	403,1	0,6124	26,96741	0,002250483	11,98294425
	E4	422,5	0,5525	28,12216	0,002030359	13,8508303
	E5	380,2	0,5916	22,95026	0,002254566	10,17945661
	F2	308,2	0,5895	23,01095	0,002032605	11,32091648
	F3	382,3	0,5608	24,89255	0,002086303	11,93141753
	F4	373,3	0,553	23,16287	0,002107463	10,990876
	F5	515,3	0,5687	29,82272	0,002218898	13,44033347
	G2	362,2	0,6776	23,74779	0,002490084	9,536942169
	G3	325,5	0,6364	22,8344	0,002280935	10,01098604
	G4	275,6	0,5197	20,94347	0,001791933	11,68763658
	G5	362,2	0,676	22,02688	0,002576212	8,550103432
	MÉDIA	362,2	0,6072	24,24	0,002209	11,32092
	DESVIO	52,27	0,0555	2,5	0,000192	1,369087
	MÁXIMO	515,3	0,7386	30,0909	0,002647232	13,8508303
	MÍNIMO	275,6	0,5176	20,9004	0,001791933	8,444179796

PP40 – 40% PERLITA

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A3	316,5	0,749	22,83395	0,002650526	8,614876738
	A4	371,2	0,7521	24,1698	0,002797983	8,638296957
	A5	349,1	0,6541	20,78532	0,002522427	8,240206204
	B1	324,1	0,6885	21,79322	0,00253014	8,613443358
	B2	380,2	0,6051	21,94941	0,002360919	9,296977298
	B3	329	0,7104	24,81205	0,00244947	10,12955839
	B4	328,3	0,7016	22,12178	0,00254645	8,687301209
	B5	461,2	0,6755	29,3593	0,002513013	11,68290571
	C1	401,7	0,7141	23,414	0,002818603	8,306954145
	C2	445,3	0,6692	25,24511	0,002641379	9,557547864
	C3	401,7	0,8194	26,73768	0,003011179	8,879474198
	C4	349,1	0,7625	26,12997	0,002629112	9,938706325
	C5	416,2	0,6176	25,24803	0,002353651	10,72717619
	D1	356	0,8459	20,64467	0,003338826	6,183212817
	D2	401	0,7672	25,71851	0,002854158	9,010891486
	D3	243,1	0,676	17,23157	0,002392197	7,203241795
	D4	403,8	0,6969	26,02823	0,002592626	10,03933048
	D5	307,5	0,7563	20,66854	0,002744983	7,529570706
	E1	347,7	0,6119	21,01643	0,00235969	8,90643483
	E2	423,3	0,6588	26,00134	0,002510663	10,35636331
	E3	320	0,7026	21,89086	0,002550079	8,584384857
	E4	378,8	0,6891	25,14976	0,002532345	9,931412202
	E5	253,5	0,7412	19,435	0,002522042	7,706058494
	F1	315,8	0,5843	18,59984	0,002279764	8,158667411
	F2	393,4	0,7792	25,92272	0,00286345	9,052968081
	F3	369,8	0,6463	25,4267	0,002345739	10,83952503
	F4	356,7	0,6067	21,56042	0,002339637	9,215285005
	F5	341,4	0,7308	22,89004	0,002652431	8,629835031
	G2	387,1	0,7104	24,17195	0,002675079	9,03597662
	G3	369,8	0,6276	22,8876	0,002391761	9,569352393
	MÉDIA	363,3	0,6993	23,15	0,002539	8,9586632
	DESVIO	49,78	0,0647	2,715	0,00023	1,1424984
	MÁXIMO	461,2	0,8459	29,3593	0,003338826	11,68290571
	MÍNIMO	243,1	0,5843	17,2316	0,002279764	6,183212817

PP60 – 60% PERLITA

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A3	158,6	1,303	15,5078	0,003960726	3,915392806
	A4	200,8	1,014	16,4139	0,003358276	4,887598433
	A5	302	0,836	18,90514	0,003148038	6,005372167
	B2	410,7	0,8293	23,94732	0,003235681	7,401013939
	B3	195,3	0,8861	16,12722	0,002934683	5,495388355
	B4	256,9	0,9867	18,39369	0,003491687	5,267851355
	B5	383,7	0,7198	19,98196	0,002971726	6,724024982
	C1	381,6	0,8882	24,37559	0,003344602	7,288040591
	C2	336,6	0,8527	19,62666	0,003326981	5,89923957
	C3	201,5	1,396	15,31244	0,004813429	3,181191656
	C4	328,3	0,8788	20,7591	0,003309205	6,273138862
	C5	340	0,9299	21,28393	0,003501627	6,078297192
	D1	313	1,066	20,99314	0,003917399	5,358947951
	D2	380,9	0,7573	22,56613	0,002920401	7,727067789
	D3	311,7	0,7198	17,66721	0,002873757	6,14777441
	D4	265,3	1,283	18,05723	0,004656635	3,877742588
	D5	242,4	0,8319	15,13635	0,003132599	4,831882572
	E1	294,3	0,9778	18,30747	0,003726361	4,912961381
	E2	340	0,6552	18,51092	0,002645571	6,996946396
	E3	287,4	0,7521	17,92385	0,002866226	6,253465809
	E4	372,6	0,871	24,38474	0,003240318	7,525417537
	E5	239,6	0,9898	16,98348	0,003502657	4,848742207
	F1	270,1	1,089	18,57153	0,003952514	4,698662013
	F2	333,1	0,7719	19,42258	0,003011723	6,448991083
	F3	251,4	0,8178	15,55961	0,003116606	4,992484705
	F4	271,5	0,8647	18,62029	0,00313842	5,933014276
	F5	290,2	0,8366	20,05268	0,002998476	6,687623457
	G1	428,7	0,9189	27,38422	0,003460206	7,914043218
	G2	337,3	0,8418	21,74176	0,003131687	6,942506904
	G3	256,2	0,8699	20,04286	0,002959962	6,771322009
	G4	337,3	0,9147	22,56539	0,003361393	6,713107238
	G5	295	0,8079	19,29368	0,002968918	6,498555433
	MÉDIA	298,5	0,8705	19,1	0,003238	6,113036
	DESVIO	64,92	0,1681	2,952	0,0004879	1,177112
	MÁXIMO	428,7	1,396	27,3842	0,004813429	7,914043218
	MÍNIMO	158,6	0,6552	15,1363	0,002645571	3,181191656

PP80 – 80% PERLITA

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A2	305,4	1,245	19,0703	0,004688166	4067,75288
	A3	249,3	1,264	18,03168	0,004472983	4031,241899
	A4	317,2	1,448	21,16684	0,005321195	3977,835947
	A5	193,2	1,576	17,00357	0,005005066	3397,272059
	B1	304,7	1,646	19,99204	0,006123493	3264,809448
	B2	239,6	1,487	17,38402	0,005194662	3346,515392
	B3	252,1	1,323	16,95177	0,004861837	3486,701087
	B4	301,3	0,9455	18,21182	0,003646163	4994,790252
	B5	179,4	1,399	19,34752	0,003998654	4838,50907
	C1	308,9	1,057	18,47334	0,004124098	4479,365389
	C2	277	1,15	19,14056	0,004121739	4643,807336
	C3	259,7	1,033	18,08075	0,003702397	4883,524571
	C4	237,5	1,174	18,84511	0,003941444	4781,271229
	C5	219,5	1,415	17,28623	0,004750548	3638,785571
	D1	284,6	1,138	19,13715	0,004181989	4576,087809
	D2	250	1,227	19,11887	0,004175047	4579,318103
	D3	211,2	0,9752	14,48473	0,003539478	4092,335581
	D4	304	1,309	21,32614	0,004691614	4545,586966
	D5	257,6	1,307	19,23303	0,004506556	4267,789913
	E1	284,6	1,159	19,08833	0,004259161	4481,711185
	E2	236,2	1,255	18,10867	0,004270321	4240,586395
	E3	295,7	1,336	17,23555	0,005273285	3268,465317
	E4	205	1,274	17,26954	0,004161573	4149,7638
	F1	288,1	1,482	17,54722	0,005715085	3070,334837
	F2	260,4	1,181	17,2888	0,004340008	3983,587578
	F3	297,8	1,122	17,62872	0,004377709	4026,927314
	F4	180,1	1,598	17,61005	0,004857437	3625,379787
	G1	329	0,9976	19,57501	0,003892337	5029,114997
	G2	283,3	1,107	17,25487	0,00426896	4041,937923
	G3	286	0,9773	17,46387	0,003768794	4633,809009
	G4	154,4	1,27	13,44396	0,004090888	3286,317415
	MÉDIA	268,7	1,25	18,09	0,004305	4121,0497
	DESVIO	41,6	0,1923	1,365	0,000618	562,05585
	MÁXIMO	329	1,646	21,3261	0,006123493	5029,114997
	MÍNIMO	154,4	0,9455	13,444	0,003539478	3070,334837

PP100 – 100% PERLITA

		FORÇA MÁXIMA (N)	DEFLEXÃO (mm)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)
	A2	299,2	1,128	17,40241	0,004401119	3954,087658
	A3	232,7	1,857	16,40761	0,006655713	2465,191538
	A4	202,2	1,556	16,24878	0,005223924	3110,454567
	A5	217,5	1,323	17,68966	0,004381656	4037,209573
	B2	281,9	1,264	18,6222	0,004645021	4009,067818
	B3	202,9	1,69	16,34673	0,0056738	2881,090866
	B4	194,6	1,569	17,3876	0,004982836	3489,499016
	B5	220,2	1,329	18,88499	0,004280938	4411,415061
	C1	211,2	1,446	17,97386	0,004723418	3805,264977
	C2	291,6	1,02	17,04539	0,003979735	4283,04491
	C3	218,8	1,266	17,07345	0,00430775	3963,42643
	C5	245,9	1,334	17,43004	0,004720696	3692,26131
	D1	211,9	1,954	17,98743	0,00638282	2818,099811
	D2	304	1,261	18,5336	0,004805626	3856,646169
	D3	219,5	1,409	17,59412	0,004730405	3719,369725
	D4	204,3	1,306	16,37576	0,004384605	3734,831473
	D5	222,3	1,446	16,59745	0,00498583	3328,924391
	E1	263,9	1,386	19,08768	0,004904711	3891,704124
	E2	250,7	1,27	16,51964	0,00466707	3539,616333
	E3	209,8	1,159	16,49709	0,003943667	4183,186049
	E4	166,2	1,518	16,29238	0,004614261	3530,874671
	F1	253,5	1,564	18,33546	0,005534609	3312,873627
	F2	236,2	1,438	17,72388	0,004958246	3574,626643
	F3	187	1,269	17,28409	0,003972522	4350,910752
	G1	299,2	1,247	17,80196	0,004865422	3658,872236
	G2	248,6	1,587	20,78462	0,005184	4009,379504
	G3	236,9	1,592	19,1349	0,005344786	3580,104973
	G4	198,1	1,565	15,16987	0,005396144	2811,242304
	MÉDIA	221	1,398	17,4	0,00477	3705,82
	DESVIO	36,5	0,211	1,17	0,00065	488,9
	MÁXIMO	304	1,954	20,7846	0,006655713	4411,415061
	MÍNIMO	166,2	1,02	15,1699	0,003943667	2465,191538

ANEXO III – RESULTADOS ENSAIO DE ATRITO INTERNO

PSR – 100% CALCÁRIO

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A2	22,23	1569,4	0,0060585
	A3	20,38	1391,7	0,0098185
	A4	29,3	1621,7	0,0069685
	B1	21,21	1368,4	0,0087055
	B2	21,31	1702,4	0,0057920
	B3	20,56	1552,3	0,0076350
	B4	19,74	1428	0,0079950
	C1	24,79	1753,1	0,0058075
	C2	23,42	1760,7	0,0054790
	C3	23,98	1583,2	0,0069980
	C4	23,81	1679,5	0,0062335
	D1	22,3	1376,05	0,0096075
	D2	23,76	1608,6	0,0060505
	D3	20,71	1251,7	0,0135415
	D4	21,78	1435,5	0,0094995
	E1	26,95	1662,10	0,0094995
	E2	21,99	1600,59	0,0064981
	E3	22,62	1367,3	0,0127930
	E4	24,46	1840,2	0,0058830
	E5	21,64	1378	0,0099370
	F1	22,98	1370,9	0,0090245
	F2	23,97	1485,6	0,0089880
	F3	26,51	1401	0,0088790
	F4	23,04	1462,3	0,0093530
	F5	23,81	1563,8	0,0070030
	G1	25,09	1563,7	0,0070505
	G2	22,92	1558,1	0,0073640
	G3	22,47	1448,4	0,0075025
	G4	25,58	1496,45	0,0075270
	G5	23,95	1363	0,0155665
	MÉDIA	23,01	1524,375	0,007581
	DESVIO	2,0985256	143,0642809	0,002391815
	MÁXIMO	29,3	1840,2	0,0155665
	MÍNIMO	19,74	1251,7	0,005479

PV20 – 20% VERMICULITA

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A3	13,18	1036,1	0,02251
	A4	13,29	1072	0,021547
	B2	12,76	1499,2	0,006658
	B4	13,32	1187,8	0,013063
	C1	13,61	1304,5	0,016499
	C3	16,79	1299,7	0,013022
	C4	13,72	1210,1	0,012169
	D3	14	1161,9	0,022275
	D5	16,97	1586,4	0,007319
	E2	14,15	1005,7	0,021056
	E4	14,4	1323,7	0,008414
	E5	16,38	1202,4	0,022263
	F2	12,94	1480,5	0,006945
	F3	11,43	1014,9	0,02212
	F4	13,2	1082,7	0,017448
	F5	20,69	1689,9	0,006537
	G4	14,53	1092,9	0,020703
	G5	16,24	1159,7	0,019217
	MÉDIAS	13,86	1195,1	0,01697
	DESVIO	2,1579129	203,07	0,00628
	MÁXIMOS	20,69	1689,9	0,02251
	MÍNIMOS	11,43	1005,7	0,006537

PP20 – 20% PERLITA

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A3	13,12	1252,77	0,016469
	A4	13,95	1087,92	0,0172201
	A5	16,39	1220,39	0,00744
	B2	14,59	1056,77	0,0172014
	B3	15,07	1437,5	0,0065297
	B4	14,06	1191,09	0,0071941
	B5	19,66	1437,6	0,0065119
	C1	11,46	1183,62	0,0122001
	C2	14,27	1198,23	0,0103652
	C3	15,6	1344,65	0,0070134
	C4	14,59	1273,01	0,0092561
	C5	14,85	1452,69	0,0069335
	D1	11,79	1159,44	0,0093342
	D2	16,6	1560,01	0,005831
	D3	16,29	1189,42	0,0201161
	D5	13,67	1131,02	0,0195579
	E1	14,33	1227,03	0,0112378
	E2	15,16	1272,15	0,0117045
	E3	15,39	1234,58	0,0074197
	E4	16,53	1305,81	0,011223
	E5	13,03	1219,8	0,0094477
	F2	14,25	1163,05	0,0078942
	F3	15,07	1286,99	0,0073156
	F4	14,04	1306,96	0,0062364
	F5	16,64	1364,88	0,006388
	G2	13,68	1210,16	0,0154476
	G3	15,04	1215,31	0,0076042
	G4	14,16	1117,91	0,0164523
	G5	12,17	1127,74	0,0205015
	MÉDIA	14,59	1220,39	0,0093342
	DESVIO	1,6646963	117,0968801	0,004750156
	MÁXIMO	19,66	1560,01	0,0205015
	MÍNIMO	11,46	1056,77	0,005831

PP40 – 40% PERLITA

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A3	10,6200	1169,7400	0,005987
	A4	11,6000	1167,6100	0,0125147
	A5	10,5000	1282,5200	0,0074166
	B1	10,8500	1147,2000	0,0129202
	B2	12,8800	1396,1900	0,00482
	B3	12,1300	1189,9200	0,0060235
	B4	10,8000	1182,9900	0,0140494
	B5	13,7500	1335,7200	0,005558
	C1	11,2500	1245,4100	0,0081363
	C2	11,3700	1251,8700	0,0145242
	C3	10,7400	1179,5500	0,0083548
	C4	12,3000	1198,4900	0,0114317
	C5	12,6400	1354,9900	0,0056208
	D1	11,5300	1054,5800	0,0183146
	D2	11,8200	1246,9700	0,0150445
	D3	10,8500	1171,9000	0,106364
	D4	12,5400	1225,6800	0,0129544
	D5	9,5900	1036,2400	0,0218905
	E1	12,6700	1317,5200	0,0112598
	E2	12,6200	1314,8000	0,0071898
	E3	10,5600	1141,1300	0,0167925
	E4	12,7500	1361,4100	0,0063614
	E5	10,4200	1133,9000	0,0156759
	F1	8,6300	1009,0700	0,021129
	F2	11,4600	1051,0000	0,0193457
	F3	11,6500	1170,4400	0,0130601
	F4	10,6400	1110,0500	0,0104261
	F5	9,4200	1113,3700	0,0137505
	G2	9,8700	1012,3300	0,019979
	G3	13,8100	1338,5700	0,0094443
	MÉDIA	11,415	1181,27	0,01271745
	DESVIO	1,2487007	108,2525047	0,01792324
	MÁXIMO	13,81	1396,19	0,106364
	MÍNIMO	8,63	1009,07	0,00482

PP60 – 60% PERLITA

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A3	5,62	807,16	0,0175863
	A4	6,56	818,66	0,0314666
	A5	7,58	1045,7	0,0157644
	B2	9,26	1191,045	0,0129130
	B3	6,96	876,83	0,0293082
	B4	6,76	953,18	0,0166911
	B5	8,47	1253,91	0,0111340
	C1	10,07	1130,373	0,0193790
	C2	7,37	1081,4	0,0152707
	C3	5,54	871,02	0,0292845
	C4	8,39	1148,38	0,0203505
	C5	8,4	1154	0,0148483
	D1	7,49	1083,58	0,0132335
	D2	9,4	1171,87	0,0113023
	D3	8	1089,7	0,0072030
	D4	6,68	934,48	0,0190843
	D5	7,11	926,13	0,0250801
	E1	6,97	1123,28	0,0138551
	E2	8,9	1164,34	0,0093882
	E3	8,89	1179,96	0,0149250
	E4	9,57	1204,22	0,0072711
	E5	6,68	1037,36	0,0171050
	F1	6,54	895,9	0,0273275
	F2	8,29	1113,15	0,0195637
	F3	6,7	967,19	0,0175743
	F4	7,52	1006,27	0,0223891
	F5	9,03	1144,13	0,0148595
	G1	10,5	1313,58	0,0091519
	G2	8,75	1096,9	0,0140647
	G3	8,32	922,41	0,2000750
	G4	8,88	1139,73	0,0099349
	G5	8,07	1021,32	0,0196345
	MÉDIA	8,035	1086,64	0,01622775
	DESVIO	1,2400676	129,3657469	0,032977159
	MÁXIMO	10,5	1313,58	0,200075
	MÍNIMO	5,54	807,16	0,007203

PP80 – 80% PERLITA

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A2	6,71	1067,96	0,0192592
	A3	6,27	890,7	0,023243
	A4	7,47	1134,49	0,0185109
	A5	6,28	771,28	0,0184983
	B1	7,49	1149,54	0,0181335
	B2	6,15	1049,05	0,0196065
	B3	5,93	1109,34	0,0166336
	B4	6,48	1162,63	0,0130031
	B5	7,56	823,15	0,0191912
	C1	6,54	1205,31	0,0172232
	C2	6,83	1080,04	0,0191863
	C3	5,85	1038,71	0,0188841
	C4	6,35	957,25	0,0193563
	C5	6,2	1067,64	0,0197215
	D1	6,82	1067,79	0,018161
	D2	6,22	915,8	0,023243
	D3	5,62	974,27	0,0207202
	D4	6,59	1087,35	0,0181319
	D5	6,71	910,23	0,0236235
	E1	6,62	1037,86	0,0185191
	E2	6,02	1018,71	0,0170251
	E3	6,12	1082,98	0,0141542
	E4	5,65	856,81	0,024672
	F1	6,1	1012,63	0,0194815
	F2	5,89	1029,45	0,0197663
	F3	5,71	1070,5	0,0188774
	F4	5,75	826,11	0,0204377
	G1	7,28	1053,73	0,0174994
	G2	5,53	976,56	0,018165
	G3	6,27	1117,3	0,0187883
	G4	5,45	849	0,0228228
	MÉDIA	6,27	1038,71	0,0188841
	DESVIO	0,5775348	110,4989998	0,002504875
	MÁXIMO	7,56	1205,31	0,024672
	MÍNIMO	5,45	771,28	0,0130031

PP100 – 100% PERLITA

		MODULO ELASTICIDADE DINÂMICO (Gpa)	FREQUENCIA DE AMORTECIMENTO (Hz)	AMORTECIMENTO (Adm)
	A3	7,62	807,16	0,0175863
	A4	7,56	818,66	0,0214666
	A5	7,58	1045,7	0,0157644
	B2	9,26	1191,045	0,0149130
	B3	7,96	876,83	0,0243082
	B4	7,76	953,18	0,0166911
	B5	8,47	1253,91	0,0141340
	C1	10,07	1130,373	0,0193790
	C2	7,37	1081,4	0,0152707
	C3	7,54	871,02	0,0232845
	C4	8,39	1148,38	0,0203505
	C5	8,4	1154	0,0148483
	D1	7,49	1083,58	0,0142335
	D2	9,4	1171,87	0,0143023
	D3	8	1089,7	0,0152030
	D4	7,68	934,48	0,0190843
	D5	7,11	926,13	0,0230801
	E1	7,97	1123,28	0,0138551
	E2	8,9	1164,34	0,0163882
	E3	8,89	1179,96	0,0149250
	E4	9,57	1204,22	0,0142711
	E5	6,68	1037,36	0,0171050
	F1	6,54	895,9	0,0233275
	F2	8,29	1113,15	0,0195637
	F3	7,7	967,19	0,0175743
	F4	7,52	1006,27	0,0223891
	F5	9,03	1144,13	0,0148595
	G1	10,5	1313,58	0,0191519
	G2	8,75	1096,9	0,0140647
	G3	8,32	922,41	0,0200075
	G4	8,88	1139,73	0,0144349
	G5	8,07	1021,32	0,0196345
	MÉDIA	8,035	1086,64	0,01689805
	DESVIO	0,9184848	129,3657469	0,00328924
	MÁXIMO	10,5	1313,58	0,0243082
	MÍNIMO	6,54	807,16	0,0138551