



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GABRILLY MONTEIRO MELO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS COM RESÍDUOS DE MÁRMORE E GRANITO**

ANANINDEUA
2020

GABRILLY MONTEIRO MELO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS COM RESÍDUOS DE MÁRMORE E GRANITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientadora: Bela. Karla Suellen Lino Barbosa

ANANINDEUA
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M528a Melo, Gabrilly Monteiro.

Avaliação das propriedades físico-mecânicas de compósitos poliméricos com resíduos de mármore e granito / Gabrilly Monteiro Melo. — 2020.

88 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientador(a): Bela. Karla Suellen Lino Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Ciência e Tecnologia, Ananindeua, 2020.

1. Compósitos. 2. Resíduo de Mármore e Granito. 3. Granulometria. 4. Desenvolvimento Sustentável. I. Título.

CDD 620

GABRILLY MONTEIRO MELO

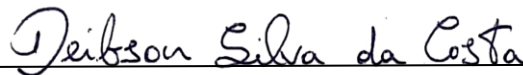
**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS COM RESÍDUOS DE MÁRMORE E GRANITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mineral.

Data de aprovação: 22 / 12 / 2020

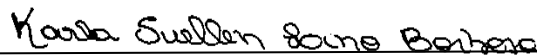
Conceito: Excelente

Banca Examinadora:



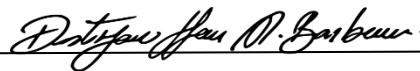
Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Orientador)



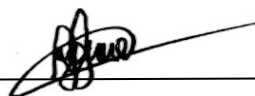
Bela. Karla Suellen Lino Barbosa

(PPGEQ/ITEC/UFPA – Coorientadora)



Prof. Me. Disterfano Lima Martins Barbosa

(FACET/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno)



Prof. Dr. Alessandro José Gomes dos Santos

(SENAI Pa – Examinador Externo)

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos por me apoiarem e acreditarem em meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Aguiar e Diana Monteiro, por todo o suporte, sustento e credibilidade que me permitiram continuar e chegar até aqui.

A Universidade Federal do Pará por fornecer a mim a oportunidade de acesso a faculdade, por permitir utilizar os serviços oferecidos de qualidade e pela disponibilização de suporte para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação por todo companheirismo, especialmente aos amigos Daniel Martins, Ana Carolina e Emille Carvalho pelos momentos de alegria e aflição em que convivemos em nossa ênfase tecnológica.

A minha amiga Ingrid Moreira, por toda a ajuda que me forneceu durante a graduação e a realização deste trabalho, e também por todos os momentos de companheirismo durante a nossa amizade.

Aos meus colegas, Adriane Pimentel e Willam Rayplham, pela cumplicidade e disposição em ajudar no desenvolvimento experimental deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Deibson Silva da Costa, pelas ajudas nas orientações, correções e a oportunidade do presente trabalho.

A minha coorientadora, Bela. Karla Suellen Lino Barbosa, pelas insistentes e persistentes correções e ajudas em minhas dúvidas quando precisei, pela disposição, assim também como a oportunidade de fazer parte desta pesquisa e trabalho, sendo ela de suma importância em cada etapa até o fim desta labuta.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação
determina o que você conquista.”

(Aldo Novak)

RESUMO

O território brasileiro compõe uma vasta rede de indústrias de produção de rochas ornamentais a considerar os apelos econômicos da extração mineral, onde eventualmente, o empenho da engenharia não é o mesmo em relação ao descarte de resíduos, o que proporciona considerável impacto ao meio ambiente. Dentro de um contexto de desenvolvimento sustentável, este trabalho busca o reaproveitamento dos resíduos de mármore e granito como inserção de carga em materiais compósitos de matriz polimérica para avaliação da influência da granulometria nas propriedades físico-mecânicas. Para a confecção, utilizou-se do método de fabricação por laminação manual *hand lay-up* associado à prensagem em molde fechado. As proporções mássicas de resíduo de mármore e granito incorporado aos compósitos foram de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 %. O resíduo de mármore e granito foi fornecido pela empresa Brilasa Britagem e Laminação de Rochas S/A sendo este peneirado nas granulometrias de 100, 200, 325 e 400 *meshs* na série de Tyler. Como matriz polimérica utilizou-se da resina poliéster insaturada isoftálica, juntamente com materiais catalíticos como acelerador de cobalto (1,5 % v/v) e catalisador mek-p (1 % v/v). Foi realizada a caracterização morfológica por MEV e análise mineralógica por DRX no resíduo. Foram confeccionados corpos de prova para os ensaios dos compósitos como a caracterização física, que inclui a determinação da massa específica aparente (ASTM D 792), porosidade aparente (ASTM D 2734) e absorção de água (ASTM D 570). Houve também a realização do ensaio de flamabilidade horizontal (ASTM D 635), além do ensaio de tração (ASTM D 3039). O resíduo apresentou morfologia irregular e foi identificado os principais minerais como Quartzo, Albita e Mica. A caracterização física apontou nos compósitos que houve variação no comportamento das propriedades de acordo com a adição do resíduo de mármore e granito. Os resultados apuraram no ensaio de flamabilidade que os compósitos se mostraram dentro da determinação da ASTM D 635 se classificando como HB e dentro da norma do CONTRAN/2014, dando destaque para a proporção mássica de 10 % RMG na granulometria de 325 *mesh*, que apresentou extinção total da chama, em comparação as demais composições. Houve variação no comportamento da resistência mecânica conforme a adição de carga residual, porém todos os compósitos apresentaram boa resistência à tração, com ênfase para a proporção de 5 % RMG na granulometria de 100 *mesh* com uma resistência de 38,60 (MPa), um aumento de 133,94 % em relação da matriz plena. Com isto infere-se que os compósitos de RMG são aptos para produção de produtos como revestimento interno em automotores e construção civil.

Palavras-Chave: Compósitos; Resíduo de Mármore e Granito; Granulometria; Desenvolvimento Sustentável.

ABSTRACT

The Brazilian territory composes a vast network of ornamental stone production industries to consider the economic appeals of mineral extraction, where eventually, the engineering commitment is not the same in relation to waste disposal, which has a considerable environment impact. Within a context of sustainable development, this work seeks the reuse of marble and granite residues as load insertion in polymer matrix composite materials to evaluate the influence of granulometry on the physical-mechanical properties. For the production, we used the manual hand lay-up lamination manufacturing method associated with closed mold pressing. The mass proportions of marble and granite residue incorporated in the composites were 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % and 25 %. The marble and granite residue was supplied by Brilasa Britagem e Laminação de Rochas S/A and sieved in the grain sizes of 100, 200, 325 and 400 meshes in Tyler's series. Isophthalic unsaturated polyester resin was used as a polymer matrix, along with catalytic materials such as cobalt accelerator (1,5 % v/v) and Mek-p catalyst (1 % v/v). Morphological characterization by SEM and mineralogical analysis by ESRD in the residue were performed. Test bodies were created for the tests of composites such as physical characterization, which includes the determination of the apparent specific mass (ASTM D 792), apparent porosity (ASTM D 2734) and water absorption (ASTM D 570). The horizontal flammability test (ASTM D 635) was also performed, in addition to the tensile test (ASTM D 3039). The residue presented irregular morphology and the main minerals were identified as Quartz, Albite and Mica. The physical characterization indicated in the composites that there was variation in the behavior of the properties according to the addition of the residue of marble and granite. The results showed in the flammability test that the composites were within the determination of ASTM D 635 to be classified as HB and within the CONTRAN/2014 standard, highlighting the 10 % RMG mass ratio in the 325 mesh particle size, that showed total extinction of the flame, in comparison to the other compositions. There was variation in the behavior of mechanical resistance according to the addition of residual load, but all composites presented good tensile strength, with emphasis on the 5% RMG ratio in 100 mesh granulometry with a resistance of 38.60 (MPa) an increase of 133,94 % in relation to the full matrix. This implies that RMG composites are suitable for the production of products such as internal coating in railcars and construction.

Keywords: Composites; Marble and Granite Residue; Granulometry; Sustainable Development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos compósitos.....	20
Figura 2 – Estrutura molecular dos polímeros.....	21
Figura 3 – Resina poliéster isoftálica	23
Figura 4 – Estrutura de comercialização de rochas ornamentais no Brasil.....	25
Figura 5 – Jazida de Mármore	26
Figura 6 – Jazida de Granito.....	27
Figura 7 – (a) Resina poliéster insaturada isoftálica e (b) iniciador mek-p e acelerador de cobalto	31
Figura 8 – Resíduo de mármore e granito	32
Figura 9 – (a) Balança analítica; (b) estufa; (c) molde metálico; (d) prensa hidráulica	33
Figura 10 – Fluxograma dos processos realizados	33
Figura 11 – Resíduo sendo peneirado e (b) resíduo peneirado.....	34
Figura 12 – Peneiramento mecânico	35
Figura 13 – Difrátômetro de Raios-X.....	36
Figura 14 – Microscópio Eletrônico de Varredura.....	37
Figura 15 – Sequência da fabricação dos compósitos	39
Figura 16 – Máquina de corte.....	40
Figura 17 – a) Dimensões do corpo de prova e b) corpos de prova utilizados nos ensaios físicos e (c) balança e aparato para obtenção da massa imersa	41
Figura 18 – (a) Ensaio de flamabilidade na posição horizontal e (b) corpo de prova sendo queimado no ensaio	42
Figura 19 – Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração (sem escala) ...	43
Figura 20 – (a) Corpo de prova-tab e (b) ensaio de tração	44
Figura 21 – Gráfico tensão-deformação	45
Figura 22 – Difrátograma do resíduo de mármore e granito	47
Figura 23 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 100 <i>mesh</i> : (a) Aumento de 60 x. e (b) Aumento de 150 x.....	48
Figura 24 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 200 <i>mesh</i> : (a) Aumento de 60 x. (b) Aumento de 150 x.....	49
Figura 25 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 325 <i>mesh</i> : (a) Aumento de 60 x. (b) Aumento de 150 x.....	50

Figura 26 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 400 <i>mesh</i> : (a) Aumento de 60 x. (b) Aumento de 150 x.....	51
Figura 27 – Placa de RMG	52
Figura 28 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 100 <i>mesh</i>	54
Figura 29 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 200 <i>mesh</i>	55
Figura 30 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 325 <i>mesh</i>	57
Figura 31 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 400 <i>mesh</i>	58
Figura 32 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 100 <i>mesh</i>	60
Figura 33 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 200 <i>mesh</i>	62
Figura 34 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 325 <i>mesh</i>	64
Figura 35 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 400 <i>mesh</i>	66
Figura 36 – Gráfico comparativo de valores da taxa de chama dos compósitos das literaturas entre as normas	67
Figura 37 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 100 <i>mesh</i>	69
Figura 38 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 200 <i>mesh</i>	72
Figura 39 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 325 <i>mesh</i>	73
Figura 40 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 400 <i>mesh</i>	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores utilizados para a confecção dos compósitos.....	37
Tabela 2 – Resultados dos ensaios físicos para 100 <i>mesh</i>	53
Tabela 3 – Resultados dos ensaios físicos para 200 <i>mesh</i>	54
Tabela 4 – Resultados dos ensaios físicos para 325 <i>mesh</i>	56
Tabela 5 – Resultados dos ensaios físicos para 400 <i>mesh</i>	57
Tabela 6 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 100 <i>mesh</i>	59
Tabela 7 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 200 <i>mesh</i>	61
Tabela 8 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 325 <i>mesh</i>	62
Tabela 9 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 400 <i>mesh</i>	64
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 100 <i>mesh</i>	68
Tabela 11 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 200 <i>mesh</i>	70
Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 325 <i>mesh</i>	72
Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 400 <i>mesh</i>	74
Tabela 14 – Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos com resíduos citados na literatura.....	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

0 % RMG	0 % de Resíduo de Mármore e Granito
5 % RMG	5 % de Resíduo de Mármore e Granito
10 % LV	10 % de Lama Vermelha
10 % RCD	10 % de Resíduos de Construção e Demolição
10 % RMG	10 % de Resíduo de Mármore e Granito
10wt%	10 % de Peso
15 % RMG	15 % de Resíduo de Mármore e Granito
20 % RMG	20 % de Resíduo de Mármore e Granito
25 % RMG	25 % de Resíduo de Mármore e Granito
40 % RC	40 % de Resíduo Industrial de Cobre
40 % RMG	40 % de Resíduo de Mármore e Granito
60 % RC	60 % de Retardante de Chama
AA	Absorção Aparente
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaCO ₃	Calcita
CaO	Óxido de Cálcio
Co	Cobalto
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CPS	Corpos de Prova
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
HB	Horizontal Burning
LABEM	Laboratório de Engenharia Mecânica
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
LM	Lama Vermelha
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Etil Metil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgCa(CO ₃) ₂	Dolomita
MgO	Óxido de Magnésio

M _i	Massa Imersa
MPa	Mega Pascal
M _s	Massa Seca
M _u	Massa Úmida
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PA	Porosidade Aparente
PET	Politereftalato de Etileno
PMC	Polymer Matrix Composites
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PRODERNA	Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia
Rca30	30 % de Rejeito de Caulim
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCMG	Resíduo do Corte do Mármore e Granito
Resina/40 % CA	Resina Poliéster Isoftálica Insaturada com 40 % de Caulim
RMG	Resíduo de Mármore e Granito
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNIFESSPA	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Materiais compósitos.....	19
2.2	Matriz polimérica	20
2.2.1	Resina poliéster isoftálica.....	22
2.3	Compósitos com carga	23
2.3.1	Resíduo de mármore e granito.....	24
2.3.2	Trabalhos com utilização de resíduos	28
2.4	Influência da granulometria das partículas nos compósitos	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	Materiais	31
3.1.1	Materiais sintéticos.....	31
3.1.2	Resíduo de mármore e granito.....	32
3.2	Equipamentos utilizados.....	32
3.3	Métodos	33
3.3.1	Desagregação do RMG	34
3.3.2	Difração de Raios-X do resíduo	35
3.3.3	Morfologia do resíduo	36
3.3.4	Fabricação dos compósitos.....	37
3.3.4.1	Caracterização física.....	40
3.3.4.2	Caracterização de flamabilidade	42
3.3.4.3	Caracterização mecânica	43
3.3.4.4	Ensaio de tração.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Difração de Raios-X do resíduo	47
4.2	Morfologia do resíduo	48
4.3	Fabricação dos compósitos	52
4.3.1	Caracterização física.....	52

4.3.2	Caracterização de flamabilidade	59
4.3.3	Caracterização mecânica	67
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	78
5.1	Conclusões	78
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Um desafio atual do século XXI é a reutilização dos materiais descartados das usinas de beneficiamento de rochas ornamentais, e estes tratados como rejeitos. Uma alternativa viável na visão de uma engenharia ambientalista tem sido promover a realização de estudos e trabalhos proporcionando o reaproveitamento destes materiais, descartados de forma irregular, em novos produtos. As principais rochas ornamentais de revestimento dos setores industriais são o mármore e granito, que causam grande movimentação econômica. Estes setores industriais, por inúmeras vezes, visando somente os fins lucrativos, não mantêm uma preocupação ambiental para com os resíduos provenientes de corte, serragem e polimento. Por isso, a importância em reintroduzir estes materiais para variados fins, dando um tratamento que coincida no reaproveitamento destes materiais de uma forma mais sustentável, de modo que não ignore as vertentes e ramificações do crescimento econômico do mercado das rochas ornamentais, como por exemplo, na utilização desses resíduos como carga em materiais compósitos (RODRIGUES, 2016; SANTOS *et al.*, 2014).

Os materiais compósitos são oriundos de fabricações de materiais sintéticos multifásicos a fim de melhorias comportamentais, com combinações e propriedades específicas, que se distinguem das classes dos polímeros, metais e cerâmicas. Exemplos de aplicações tecnológicas destes materiais estão nas indústrias submarinas, aeroespacial, bioengenharia, transporte, entre outros (CALLISTER, 2016).

Uma das principais indústrias consumistas de recursos naturais é a construção civil, e em seus eventos, buscam-se propriedades destes recursos que se combinem com suas adequadas capacidades de resistência mecânica, térmica, acústica e dentre outros. Os danos ao meio ambiente são evidentes, pois o consumo energético é de 40 %, e de matérias primas de 50 %, por isso a importância da utilização de novos materiais cuja composição contém resíduos, justificando o destaque para os materiais compósitos. Sendo assim, denota-se a necessidade de produzir e aplicar produtos que acarretam mínimos impactos aos recursos energéticos e ecológicos (SANTOS, 2014).

As rochas mais populares comercialmente são os mármore e os granitos e a partir delas são produzidos vários produtos. Por exemplo, na serragem da produção das pedras ornamentais, cerca de 25 % a 30 % do material se deposita e é transportado para grandes pátios nas empresas (MOURA e LEITE, 2011). Estudos deste material já são realizados, principalmente para a análise da propriedade mecânica, e têm-se obtido resultados positivos.

Outras vantagens de se trabalhar com este respectivo resíduo como material compósito em matriz polimérica são o baixo custo de produção, a reduzida utilização de resina, controle da densidade e principalmente a evolução das propriedades mecânicas do material, tais como resistência à tração, flexão, impacto e dureza (RODRIGUES, 2016).

A razão em estudar a granulometria dos resíduos de mármore e granito nas propriedades mecânicas dos compósitos de matriz polimérica está em disponibilizar aspectos qualitativos tanto em produção, na reutilização de resíduos, quanto em termos ecológicos, sendo interessante para o ramo da ciência e tecnologia, assim como para as engenharias.

Para Santos (2014) a produção e aplicação dos materiais compósitos em relação as suas propriedades são pertinentes, pois houve a necessidade de amenizar impactos ambientais causados pela gama de resíduos industriais depositados nas indústrias, tais como resíduo de mármore e granito.

Em vista disso, sucedeu à viabilidade de reaproveitamento de forma ecológica destes materiais, que geram vários problemas (devido cortes provenientes de polimento e serragem) tanto a comunidade ao redor, quanto para as empresas produtoras (RODRIGUES, 2016).

Além disto, é um trabalho economicamente viável, pois se trata de materiais de baixo custo, além de ser um insumo facilmente acessível, viabilizando assim uma economia sustentável. Portanto, este trabalho objetiva produzir um material compósito utilizando um resíduo industrial de mármore e granito para análise de suas propriedades físico-mecânicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da granulometria do resíduo de mármore e granito nas propriedades físico-químicas e resistência a chama de materiais compósitos de matriz polimérica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento mineralógico do resíduo de mármore e granito através do ensaio de Difração de Raios-X (DRX);
- Avaliar a morfologia do RMG através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- Fabricar compósitos de matriz polimérica com Resíduo de Mármore e Granito (RMG) nas proporções em massa pré-determinadas de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 % nas diferentes granulometrias;
- Realizar análises físicas de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) nos compósitos;
- Avaliar a resistência à chama dos compósitos poliméricos através do ensaio de flamabilidade horizontal;
- Avaliar o comportamento mecânico à tração dos compósitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

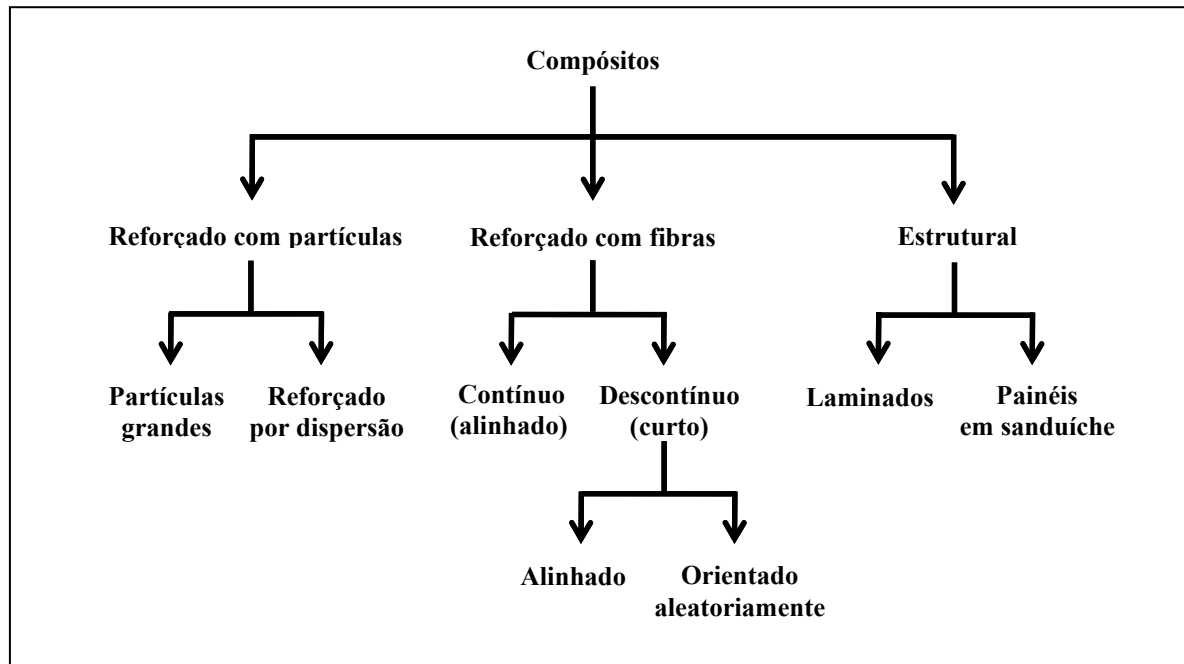
O compósito tem por definição a junção de dois ou mais materiais distintos, cuja suas características e propriedades também se diferem; estes podem ou não ser constituídos por fibras, sendo estas analisadas por técnicas de microscopia. Na formação deste composto multifásico, a constituição do compósito vai além da detenção de propriedades individuais de cada constituinte, pois forma-se uma área intermediária que interage ligando os dois sistemas ou duas fases, chamada de região interfacial (SILVA, 2014).

As propriedades dos compósitos estão interligadas as fases formadas no processo, sendo uma fase denominada de matriz continua que envolve a outra fase, a fase dispersa, que contém carga ou reforço. O comportamento do compósito é denominado tal qual a geometria da fase dispersa, que envolve distribuição, orientação e forma das partículas. O bom resultado das propriedades finais requeridas irá depender da compatibilidade dos materiais, bem como seu volume para a interação dos agentes envolvidos, resultando na conexão maior ou menor entre os materiais (CALLISTER, 2016; MENDES, 2019).

Para haver uma melhor interação nesse intermédio das fases dos compostos, utilizam-se os “agentes de acoplamento”, com características químicas de interação compatíveis com ambas as fases. Os parâmetros que definem as condições interfaciais também ajudam a definir o caráter do compósito, e estes irão definir futuros comportamentos físico, mecânico e químico (MENDES, 2019).

De acordo com Macêdo Neto (2016) a fabricação de materiais compósitos emerge da necessidade de materiais com propriedades e condições de encarar eventos externos, esta é a vantagem. Já a desvantagem de se trabalhar com materiais compósitos de matriz polimérica são em algumas aplicações estruturais, porém há um ganho significativo quando se aplica reforços, principalmente para a propriedade mecânica. As desvantagens, em geral, são sensibilidade à radiação, inviabilidade de ser empregado a altas temperaturas – pois em geral os coeficientes de expansão térmica são altos – e absorção de umidade do meio ambiente. A classificação dos compósitos está para a geometria do objeto de reforço, a natureza e a função do tipo de matriz. No que se refere a matriz, é classificado como matriz polimérica, metálica ou cerâmica. A classificação referente ao tipo de reforço está disposta na Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos compósitos



Fonte: Adaptado de Callister (2016).

2.2 Matriz polimérica

A industrialização dos polímeros se deve a fabricação de materiais compósitos. A fabricação de materiais compósitos de matriz polimérica (PMC - polymer matrix composites) consiste na fase matriz com a utilização de uma resina polimérica reforçada com fibras. Variadas aplicações são realizadas com a utilização destes materiais compósitos, devido a facilidade de fabricação em temperatura ambiente e baixo custo, portanto, podendo produzir em maiores quantidades (CALLISTER, 2016).

A modernização dos polímeros deriva da sintetização das moléculas orgânicas pequenas, assim como a produção de materiais plásticos, fibras e de borracha, que são exemplos de polímeros sintéticos. Produtos plásticos substituíram facilmente os produtos de madeira e metálico, o que explica o baixo custo de produção (CALLISTER, 2016).

Os materiais compósitos poliméricos são formados por duas regiões ou mais, onde uma é denominada de matriz polimérica e a outra é a fase de reforço/carga. Nesse processo, tem que haver a junção destas duas áreas, decorrendo que a região polimérica irá transmitir os esforços mecânicos/físicos para a fase com carga (AGNELLI, 2000).

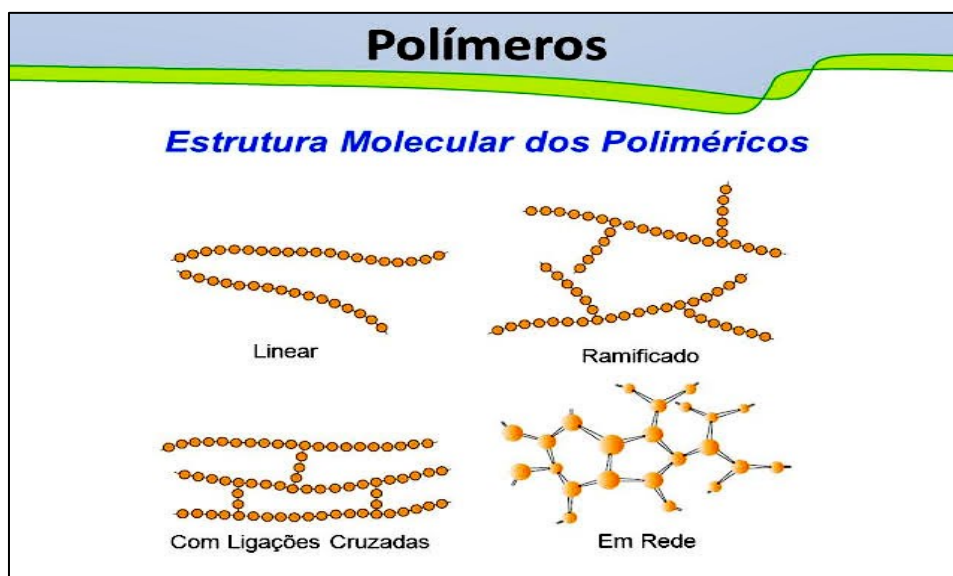
Os materiais compósitos de matriz polimérica são formados por macromoléculas, que foram formadas por monômeros (pequenas partículas que se ligam a outros monômeros e assim formam o polímero). Os polímeros possuem interações intermoleculares e intramoleculares,

além disso, entre as moléculas ocorrem repetidas ligações covalentes ao longo da cadeia, formando os meros. Cada uma destas moléculas que geram a polimerização possui uma baixa massa. Em relação as classificações dos meros, temos a relação de estrutura molecular linear, com ligações cruzadas, ramificado e em rede (GAMA, 2017; SPINACÉ e DE PAOLI, 2005) como mostrado a seguir:

- Polímeros ou meros lineares: em uma única cadeia são unidas várias unidades repetidas, de extremo a extremo. Com ligações em cadeias longas e flexíveis, o tipo linear tem ocorrência de muitas ligações de Van Der Waals;
- Polímeros ou meros com ligações cruzadas: através de ligação covalente, as cadeias que se formam próxima de outra cadeia se ligam em variadas posições, então elas se cruzam. A formação se dá durante a síntese do polímero ou por uma reação química irreversível;
- Polímeros ou meros ramificados: ocorrendo durante a síntese polimérica, as cadeias adjacentes vizinhas se ligam as cadeias principais. Este efeito pode ter ocorrido durante o processo paralelo de produção do polímero sintético. Esta formação aumenta assim a resistência ou compactação do material e diminuição da massa específica do polímero;
- Polímeros ou meros em rede: são cadeias que formam uma estrutura tridimensional, ou acima de três ligações covalentes, ou também que possuem muitas ligações cruzadas, esses polímeros costumam apresentar nos materiais distintas propriedades mecânicas e térmicas.

A Figura 2 ilustra melhor a forma em que se apresentam as estruturas moleculares poliméricas.

Figura 2 – Estrutura molecular dos polímeros



Fonte: Ramos (2017).

Em relação a temperatura, a estrutura e a propriedade mecânica, os polímeros se comportam tal qual a sua variação, e estes também têm suas classificações denominadas de polímeros termoplásticos e polímeros termofixos. Ao se elevar a certa temperatura, os termoplásticos (meros em ramos) se debilitam, ficam macios e por vezes passam pelo estado de liquefação facilmente, e se enrijecem quando se resfriam, tornando o processo irreversível. Ademais, suas respectivas características são a alta taxa de deformação e baixo tempo de cura. Já os polímeros termofixos (que estão em rede) possuem baixa taxa de deformação permanecendo menos flexível possível. As ligações entre as cadeias moleculares em rede, sob aquecimento, se prendem umas às outras para que haja maior resistência à agitação e rotação, por isso o material não amolece durante o processo. Também com um processo irreversível de rede, sob altas temperaturas, se obtém suas características que são a resistência mecânica elevada, alta resistência a altas temperaturas e taxa de deformação baixa (CALLISTER, 2016; GAMA, 2017).

2.2.1 Resina poliéster isoftálica

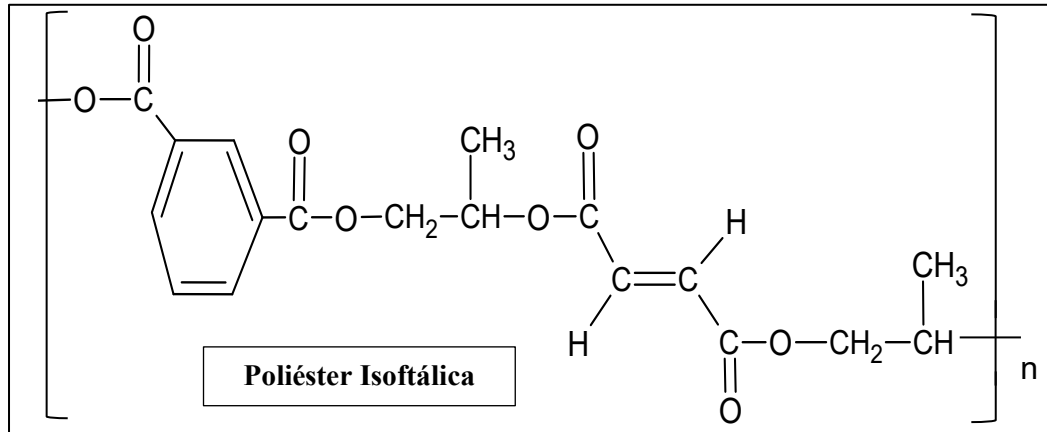
A tecnologia da resina poliéster tornou-se persistente ao tratamento de polímeros, principalmente na construção civil, devido as suas apropriadas características que são favoráveis pelo bom desempenho, com boas propriedades químicas e mecânicas. Quando expostas ao calor, as resinas preservam sua dureza. Elas possuem a capacidade de ao serem expostas ao calor não se fundirem, demonstrando um processo totalmente irreversível, já que possui uma ligação molecular rígida (GORNINSKI, 2002).

Segundo Pereira (2016) além de deter propriedade de cura à temperatura ambiente, a resina poliéster oferece outras vantagens que podem variar de macio a flexível e de rígido a quebradiço. Ademais, pode-se acrescentar como vantagem a rápida cura, a baixa viscosidade, assim como baixo custo. Porém, também tem algumas desvantagens como alta contração volumétrica, que permite que na hora da moldagem da peça, haja depressões na superfície moldada.

O que diferencia a resina poliéster isoftálica das demais são as suas melhores condições de resistência mecânica e química, sendo ela resistente a impactos e a água, se diferenciando da resina ortoftálica, por exemplo. A resina poliéster isoftálica é um isopoliéster que tem origem de um diácido ou ácido isoftálico, apresentando a carboxila na posição meta do anel benzênico. Sua obtenção se dá por meio de poliésteres de massa molecular alta (com cadeias de ligações maiores) (PEREIRA, 2016). A Figura 3 apresenta a estrutura molecular da resina poliéster

isoftálica.

Figura 3 – Resina poliéster isoftálica



Fonte: Adaptado de Silaex (2018).

2.3 Compósitos com carga

A viabilidade da utilização de resíduo industrial como carga em polímeros na forma de materiais compósitos é tecnicamente viável, haja vista que o estudo se dá em diversos trabalhos, por exemplo, em polímeros termoplásticos como o polipropileno (PP), em razão da tecnologia permitir a versátil utilização destas cargas devido às diversas possibilidades de processamentos. Outras alternativas para a aplicação no mercado dos resíduos industriais, é utilizá-los como carga de enchimento em blocos de concreto, no asfalto, na produção de clínquer, e também como fonte energética para as cargas fibrosas. A produção se dá em composições que utilizam a fabricação de molde fechado. A preferência da utilização do material em pó ocorre no resultado de uma peça final mais leve, comparada à utilização de uma carga virgem (como carbonato de cálcio, por exemplo), sem alterações na flexibilidade e nas propriedades mecânicas, até mesmo aumentando-as, dependendo da proporção mássica (CAVALCANTE e CANTO, 2012; PINTO, 2002).

O uso de carga em materiais compósitos possui o aproveitamento sustentável de materiais, a redução da quantidade de resina, barateamento de custos sem afetar a peça, além disso, somam características químicas e físicas na fabricação dos corpos de prova. De forma sólida, elas são adicionadas tal qual a necessidade respectiva específica do material polimérico (RODRIGUES, 2016).

A classificação das cargas se dá de acordo com a sua composição química, sendo elas orgânicas ou inorgânicas, porém dando destaque às cargas diluentes ou de reforço. A caracterização responsável pelas cargas devido à química do material varia como estabilidade térmica, disponibilidade, densidade baixa, neutralidade, fácil manuseio, baixa absorção de água e óleo, zero absorção do polímero ou impedir o escoamento. Comumente são envolvidas as resinas fenólicas e amínicas, por exemplo, cargas como madeira, mica pulverizada e fibras curtas de celulose, porém, as fibras de aramida, boro e grafite são processadas como reforços na resina epóxi. As fibras de vidro tratadas com alquil-silanos são exemplos de utilização de carga imersa na resina poliéster (PASSATORE, 2013).

2.3.1 Resíduo de mármore e granito

Rochas ornamentais são rochas carbonáticas e metamórficas submetidas nas indústrias em setores de revestimento e construções de acordo com Sá (2014). E estas, na maioria das vezes, recebem tratamentos como extração, desdobramento, polimento e acabamento.

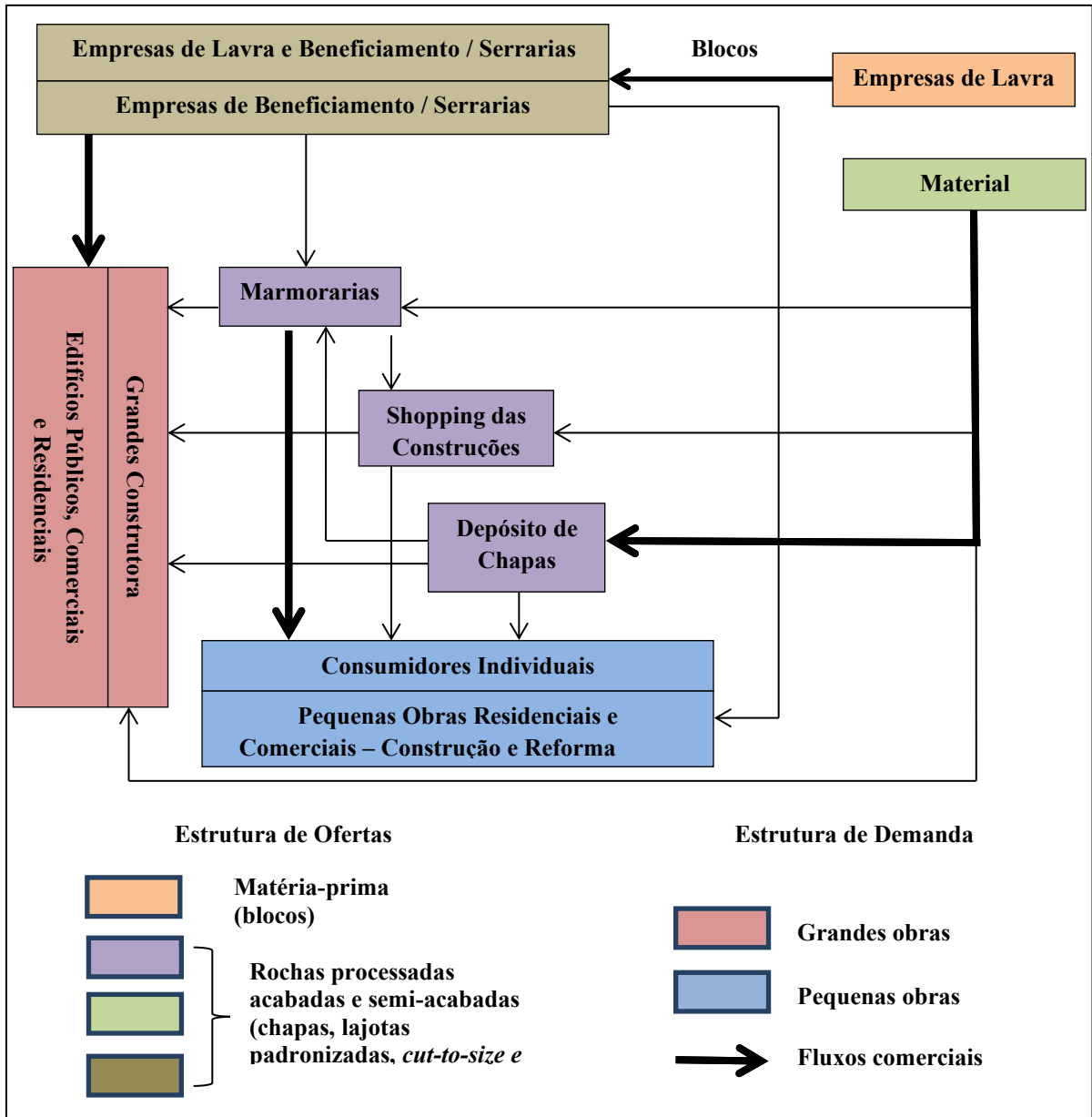
As denominadas rochas ornamentais começaram a ganhar visibilidade no mercado nos dias atuais quando comparamos as jazidas de metais e de gemas. No menu do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) as rochas ornamentais têm ganhado maior aparição, na estatística, os depósitos minerais com tais rochas se alternam no decorrer do desaparecimento e formação das jazidas, aceitando minerais cadastrados e não cadastrados. A nível comercial, as rochas ornamentais de maior importância são denominadas de mármore e granito, e elas são um conjunto de rochas carbonáticas e silicáticas, respectivamente. Suas manipuláveis condições de desdobramento e beneficiamento são responsáveis por suas capacidades de revestimento e para fim ornamental (BEZERRA, 2017; VARGAS *et al.*, 2001).

De acordo com Bezerra (2017) na indústria da produção e derivados das rochas ornamentais existem três diferentes etapas e abordagens de acordo com suas características, e são elas:

- Mineração: empresas podem realizar exploração das rochas em blocos e escavação de lavras;
- Serraria: fabricação e transformação dos blocos em chapas através do desdobramento;
- Marmoraria: esta etapa compreende o corte das chapas, polimento e acabamento dos produtos finais.

A indústria, comercialização e destinação das rochas ornamentais é apresentada na Figura 4 na qual mostra a estrutura em que se dá estes processos.

Figura 4 – Estrutura de comercialização de rochas ornamentais no Brasil



Fonte: Adaptado de Bezerra (2017).

A industrialização causa impactos ambientais ao meio ambiente, e os vários efluentes deste setor geram rejeitos que estão sendo descartados sem o certo reaproveitamento. O impacto maior é proveniente do beneficiamento que, devido ao descarte, o material pode atingir aos lençóis freáticos, pois o fluido pós-beneficiamento não recebe o adequado tratamento para reuso, é o exemplo das lamas, oriundas das indústrias de mármore e granito. Estas perdas de

material chegam ser em torno de 30 % a 40 %, na maioria dos casos, o rejeito acaba sendo despejado em rios e lagoas. A classificação deste resíduo é classe I, apesar de ser de baixa periculosidade, não deixa de trazer malefícios para o meio ambiente (MORAES, 2006). A Figura 5 mostra a jazida de mármore do estado do Espírito Santo.

Figura 5 – Jazida de Mármore



Fonte: Instituto Minere (2017).

Para o processo de beneficiamento, primeiramente é realizado estudos geológicos e geoestatísticos para saber acerca da formação dos depósitos minerais e do teor mineral das *commodities* (produtos produzidos em larga escala cujo seu preço é definido pela oferta e demanda mundial). Um exemplo de quantificação e caracterização é a amostragem, para poder prosseguir para um dos passos primordiais, que é a escavação das lavras das jazidas ou reservas de minérios, que é denominado o processo de extração e beneficiamento do minério. Neste processo, são utilizados dispositivos facilitadores da extração como martelotes, fios diamantados, explosivos e massas expansivas para a completa extração dos blocos (AGUIAR, 2012; STURARO, 2015). Assim como a Figura 5, a Figura 6 apresenta jazida de rocha ornamental do minério de granito.

Figura 6 – Jazida de Granito



Fonte: PR Grupo Paraná (2018).

A associação mineralógica que caracteriza o granito, oriundo de rocha ígnea, reúne o conjunto de rochas silicáticas, ou seja, apresenta comumente a composição de minerais como quartzo, feldspatos, micas (biotita e muscovita), anfibólio (horniblenda) e piroxênios (augita, hiperstênio e aegirina), também podem ter a ocorrência em menor percentagem em forma de cristais de magnetita, zircão, apatita, topázio, granada, fluorita, ilmenita, e cordierita. O granito possui maior resistência e durabilidade em comparação ao mármore. Já o mármore é proveniente de rocha metamórfica vindo do calcário, e pode ser encontrado nas cores branca, rósea, preta ou esverdeado. Basicamente sua constituição é feita de óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) (AGUIAR, SILVA e GADIOLI, 2016; ALENCAR, 2013; NOGAMI, 2013).

No Brasil a diversidade geológica é cotada em vários setores comerciais e sua competitividade é também embasada em rochas ornamentais, tal qual à indústria de mineração e beneficiamento do setor mineral. O Território brasileiro possui uma vasta reserva de rochas de mármore e granito dos mais variados aspectos estéticos. A construção civil é a grande detentora das principais atividades de serragem e polimento das rochas ornamentais. Os resíduos são também produzidos pelo processo de desdobramento de blocos de rochas na produção e chapas, e esse sedimento precipita em forma de lama (polpa abrasiva). Para a geração desta polpa, utiliza-se água, granada e cal moída, assim como também calcário moído, escória de alto forno e/ou cal (BARROS, 2008; RIBEIRO, 2005).

Empresas vêm sendo as grandes responsáveis pelo descarte insustentável causando impactos ambientais. Problemas hidrológicos são gerados na fase de pesquisa mineral, e também na geração de grande quantidade de resíduos na obtenção de blocos com dimensões padronizadas. Teares são utilizados para a realização do corte dos blocos de rochas graníticas para atingir o bloco final. Os teares são grandes equipamentos que realizam movimentos pendulares para os cortes, e estes são feitos de aço carbono de alta dureza para melhor suportar aos esforços de tração e abrasão. A granalha tem o papel de abrasão no procedimento do corte, formando uma mistura abrasiva, e ela é então bombeada. As perdas de material podem chegar a cerca de 30 % em cifra incluindo serragem, manufatura e polimento das pedras (LISBÔA, 2004).

Há uma legislação vigente na qual se trata da Lei nº. 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Ela ajuda a prevenir problemas ambientais, sociais e econômicos, devido à manipulação indevida dos resíduos sólidos. Também prevê a redução da geração dos resíduos de forma sustentável, com uma gama de ferramentas para promover a reciclagem e reutilização dos resíduos e a destinação ambiental adequada. A Lei institui também a responsabilidade aos titulares de mau manejo e cria metas importantes para contribuir com a correta eliminação dos resíduos (SÁ, 2014).

2.3.2 Trabalhos com utilização de resíduos

Vários trabalhos com a inserção de resíduos em matriz polimérica na confecção de materiais compósitos para melhoria das propriedades dos materiais estão surgindo e, de acordo com as literaturas, a inserção de material residual ajuda, principalmente, nas propriedades mecânicas, tal qual enuncia Borges (2018) em seu trabalho com resíduo industrial de minério de cobre. Em seus resultados, houve uma significativa melhora na qualidade da propriedade de resistência mecânica do compósito com carga de cobre na fração volumétrica de 40 %.

Na busca de averiguar também o desenvolvimento e efeito de cargas residuais em materiais compósitos, a produção de Poletto (2017) busca avaliar o uso em potencial das propriedades mecânicas nos compósitos a base de poliestireno preenchido com resíduos de farinha de madeira, que apresentou melhorias nas propriedades mecânicas em ensaios de tração e flexão, quando adicionado agente de acoplamento.

Através de compósitos de cimento, resíduo industrial de lodo de celulose e flakes de PET (politereftalato de etileno) Gomes Júnior *et al.* (2018) em seu trabalho trouxeram, em seus resultados, a conclusão deste compósito como potencial alternativa de material para a indústria

na construção civil, através de análises físico-mecânicas.

Trazendo também uma alternativa de melhor designação de resíduos industriais, Moraes *et al.* (2019) fizeram avaliações mecânica e de resistência a chama para aferir propriedades de compósitos poliméricos com resíduos de cinzas volantes e mármore e granito. Seus resultados asseguraram os materiais compósitos em questão com excelente desempenho para o retardo a chama e com uma boa resistência mecânica.

2.4 Influência da granulometria das partículas nos compósitos

A granulometria é um importante agente a ser considerado, pois utiliza-se como fator a caracterizar a distribuição de tamanhos de partículas, como por exemplo em cargas minerais utilizados em compósitos de matriz polimérica. Geralmente, as partículas das cargas desta matriz encontram-se inferior a 45 μm . O tamanho de partículas e sua área de superfície específica, as propriedades físico-químicas e o hábito cristalino (morfologias da partícula) influenciam no comportamento da dispersão da carga mineral, da adesão e reologia, e isto influi no processo de fabricação de compósitos e suas propriedades, assim como no resultado de peças futuras (LIMA, 2007).

O comportamento da granulometria na presença de carga nos compósitos influencia na resistência mecânica do material. Então, quanto menor a granulometria das partículas, maior será a resistência mecânica do corpo. Foram testadas inúmeras possibilidades da não aglomeração de carga através de condições de extrusões. Foi visto que a resistência à tração aumenta à proporção que o tamanho das partículas diminui. Também há sugestões da influência granulométrica, que é a relação linear entre a tensão deformação (σ_t) e o diâmetro das partículas (d^{-1}), outros sugerem ligação à raiz quadrada do diâmetro ($d^{-\frac{1}{2}}$), e dentre outros modelos que relacionam estes parâmetros. O fato é que a redução do diâmetro acomete no aumento da área superficial da carga, aumenta a interação entre a matriz e a carga, diminui a concentração de tensões, e isto aumenta a resistência à tração (DALPIAZ, 2006).

Com a aplicação da carga, as propriedades dos compósitos sofrem variação, tendo efeito no núcleo ou estrutura cristalina, sendo assim, as menores partículas têm uma tendência de maior nucleação do corpo. Então, temos que em virtude do tamanho da granulometria do material, esta irá determinar a temperatura de cristalização do mesmo, sendo que estes parâmetros são inversamente proporcionais. Isto faz com que enquanto for baixo a granulometria da carga, a temperatura e a área superficial aumentam (DALPIAZ, 2006).

Haddad *et al.* (2016) dizem em seu trabalho que para uma melhor avaliação do aperfeiçoamento das propriedades dos materiais compósitos, faz-se um estudo a respeito da composição das partículas, e ao ser inserido certo tipo de aglomerado no sistema da matriz polimérica, tem-se como efeito a interferência nas propriedades dependendo do tamanho das partículas presentes. Em termos gerais, Haddad *et al.* (2016) apresentam resultados em seu estudo sobre análise da influência granulométrica de 200 *mesh* (0,075 mm) do agregado miúdo, em que a influência do tamanho das partículas oferece avanços nas propriedades mecânicas, sendo ela do tipo de distribuição granulométrica contínua devido apresentar um melhor arranjo entre os diâmetros.

Jarzabek *et al.* (2016) com o mesmo propósito de averiguar o desempenho da influência do tamanho das partículas em compósitos na adesão entre as partículas cerâmicas e matriz metálica, constataram em seus resultados a boa qualidade de CuAl_2O_3 em compósitos devido a boa distribuição granulométrica e uniforme do reforço. Em relação a adesão na interface, foi verificado que houve boa qualidade nesta propriedade, com ênfase em amostras feitas com alumina de particulado mais grosso, sendo estas exibindo valor para tração igual a 74 ± 4 (MPa), em comparação aos particulados mais finos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Materiais sintéticos

Para a produção da matriz polimérica foi utilizada a Resina Poliéster Insaturada Isoftálica da empresa Centerglass Ind. Com. R. e Fibras Ltda, sendo a sua densidade de valor $1,15 \text{ g/cm}^3$ de acordo com os dados fornecidos pela fabricante. Foi fornecido pela fabricante informações sobre as características do produto como resistência ao calor em altas temperaturas até $85 \text{ }^\circ\text{C}$, resistências químicas e mecânicas durante o processo de fabricação, no qual precisa-se adicionar acelerador de cura durante a confecção. Os materiais de cura utilizados foram o cat met umedecido (acelerador de octato de cobalto 1,5 %), sua massa específica é equivalente a $0,83 \text{ g/cm}^3$ e o peróxido de etil-metil cetona (mek-p) 1,0 % de massa específica igual a $1,15 \text{ g/cm}^3$ (Butanox M-50), ambos fornecidos pela empresa AEROJET Brasileira de Fiberglass Ltda. Os dados de massa específica do acelerador e iniciador foram fornecidos pela fabricante. A Figura 7 a seguir ilustra os materiais utilizados, representados por (a) resina poliéster insaturada isoftálica; (b) iniciador mek-p e o acelerador de cobalto.

Figura 7 – (a) Resina poliéster insaturada isoftálica e (b) iniciador mek-p e acelerador de cobalto



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.2 Resíduo de mármore e granito

O resíduo de mármore e granito foi fornecido pela empresa Brilasa Britagem e Laminação de Rochas S/A, na cidade de Ananindeua no Estado do Pará. A disposição do material residual se apresentava de forma aglomerada contendo outros elementos utilizados nas etapas de britagem e laminação. Foi utilizada para os métodos experimentais a densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ de acordo com a pesquisa de Spala *et al.* (2017). A Figura 8 apresenta o RMG.

Figura 8 – Resíduo de mármore e granito

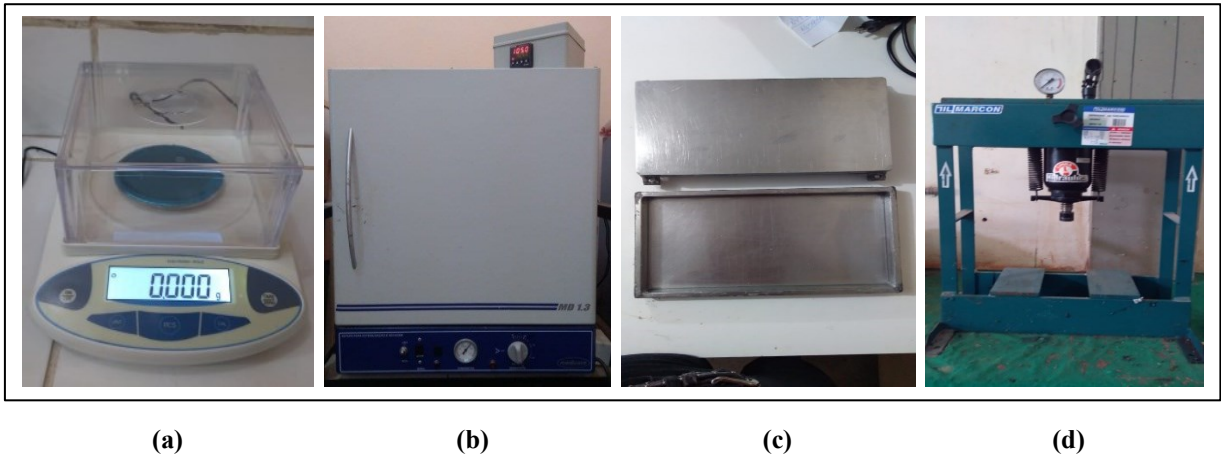


Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 Equipamentos utilizados

Para a produção das placas de materiais compósitos utilizou-se de equipamentos de suma importância nos procedimentos experimentais. Estes equipamentos foram disponibilizados pelo LAMPS (Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados), sendo eles: a balança analítica do modelo Eletronic Scale; a estufa da marca Medicate, do modelo MD 1.3 – Esterilização e secagem, T 50 °C a 250 °C; o molde metálico nas dimensões (320 mm x 172,5 mm x 5 mm); e a prensa hidráulica da marca MARCON modelo MPH-15, com capacidade de 15 Ton. A seguir, a Figura 9 ilustra os equipamentos utilizados.

Figura 9 – (a) Balança analítica; (b) estufa; (c) molde metálico; (d) prensa hidráulica

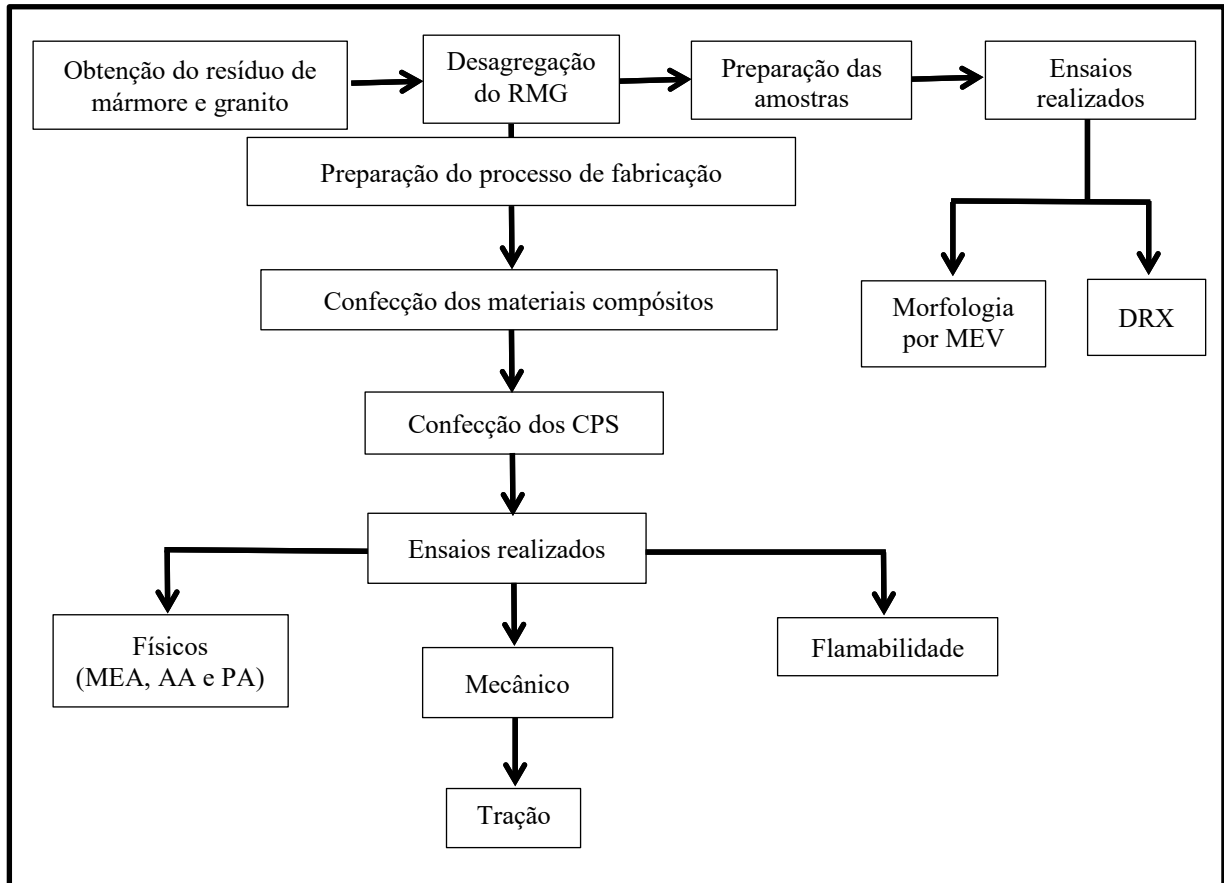


Fonte: Autoria própria (2020).

3.3 Métodos

O fluxograma dos métodos realizados para o resíduo de mármore e granito e os compósitos é apresentado de acordo com a Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma dos processos realizados



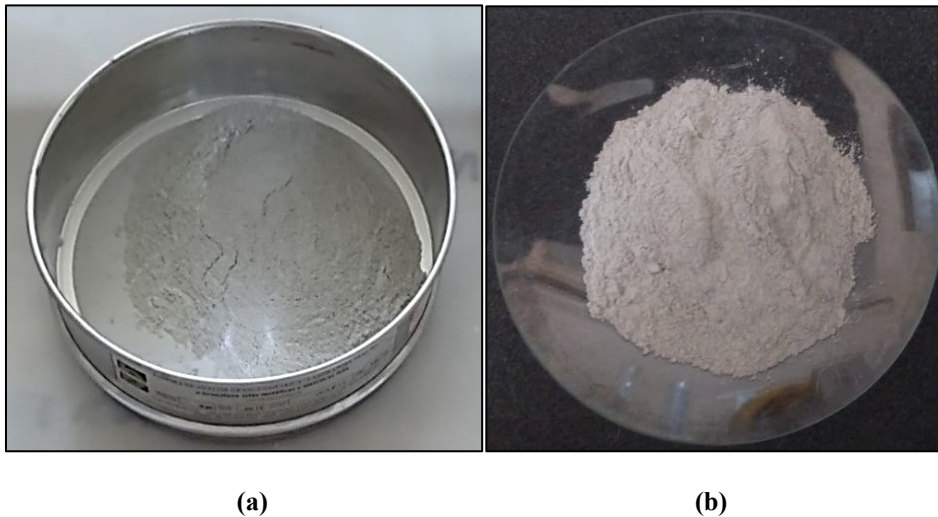
Fonte: Autoria própria (2020).

3.3.1 Desagregação do RMG

O material de resíduo de mármore e granito passou pelo procedimento de cominuição e peneiramento. A cominuição antecedeu o processo de peneiramento. A cominuição consiste em fragmentar o material de interesse, reduzindo o tamanho de centímetros até micrometros. Após isto, o material foi peneirado nas séries de Tyler nas granulometrias de 100 (0,149 mm), 200 (0,075 mm), 325 (0,045 mm) e 400 (0,038 mm) *meshs*, onde o resíduo foi submetido a uma separação dos passantes e não passantes, cujo material de interesse são os passantes.

Os passantes de 100, 200 e 325 *meshs* da série de Tyler passaram por peneiramento manual, a Figura 11 apresenta (a) o resíduo sendo peneirado manualmente e (b) o resíduo após peneirado.

Figura 11 – Resíduo sendo peneirado e (b) resíduo peneirado



Fonte: Autoria própria (2020).

Para os passantes de 400 *mesh* foi necessário a utilização do agitador mecânico. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA) campus Belém. A Figura 12 mostra o agitador de peneiras em que o resíduo foi submetido, um produto da Produtest da Telastem Peneiras para análises LTDA.

Figura 12 – Peneiramento mecânico



Fonte: Autoria própria (2020).

3.3.2 Difração de Raios-X do resíduo

A técnica utilizada para a caracterização mineralógica de materiais é a Difração de Raios-X (DRX), com o propósito de análise de parâmetros cristalinos e verificação do fenômeno de difração por cristais. O ensaio dispõe de um equipamento chamado Difratorômetro de Raios-X, utilizado para dar resultados que dispõe de um difratograma. Sendo assim, o resíduo de mármore e granito foi submetido para análise de DRX. O ensaio de caracterização mineralógica do RMG foi realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA/Marabá). A Figura 13 apresenta o equipamento.

Figura 13 – Difratorômetro de Raios-X

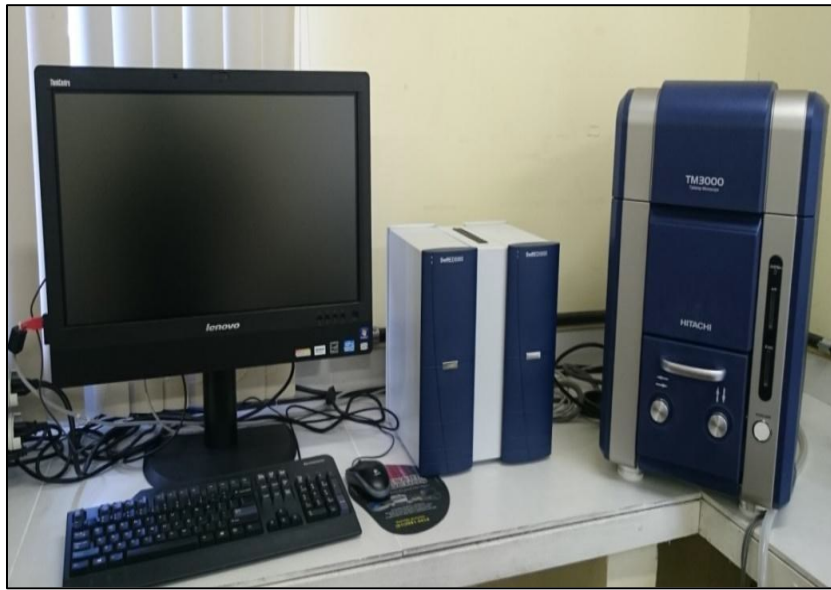


Fonte: LAMULT (2020).

3.3.3 Morfologia do resíduo

A morfologia (hábito cristalino) foi documentada através da análise do aspecto da superfície do material residual, que demonstra as formas e variação de tamanhos das partículas, esfericidade, arredondamento e relação de aspecto dos minerais do resíduo de mármore e granito. O equipamento para a observação utilizada foi o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca HITACHI de modelo TM 3000, localizado no Laboratório de Microscopia do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA). A metodologia se utilizou de técnicas de aumento de imagem nos tamanhos 60 x e 150 x, para uma melhor descrição da morfologia do resíduo, sendo assim melhor descrita para posteriores comparações, como a influência no desempenho das propriedades mecânicas do material. A Figura 14 mostra o Microscópio Eletrônico de Varredura.

Figura 14 – Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Costa (2016).

3.3.4 Fabricação dos compósitos

Para a fabricação e geração dos corpos de prova, foi utilizado o método de fabricação *hand lay-up* associado com prensagem em molde fechado. Foram realizados alguns cálculos para se conhecer as massas dos materiais utilizados para a sua manipulação, para assim, determinar as quantidades adequadas de materiais inseridos nas placas de compósito em massa e volume. Estes dados são descritos na Tabela 1, sendo os valores utilizados para a confecção dos compósitos de matriz polimérica plena e compósitos de matriz polimérica com resíduo de mármore e granito, de acordo com as respectivas composições.

Tabela 1 – Valores utilizados para a confecção dos compósitos

Composição	Resina (g)	Resíduo (g)	Co (1,5 %) (ml)	MEK-P (1,0 %) (ml)
0 % RMG	203,14	0	2,64	1,76
5 % RMG	192,98	22,96	2,52	1,68
10 % RMG	182,82	45,93	2,38	1,59
15 % RMG	172,67	68,90	2,25	1,50
20 % RMG	162,51	91,85	2,12	1,41
25 % RMG	152,35	114,82	1,99	1,32

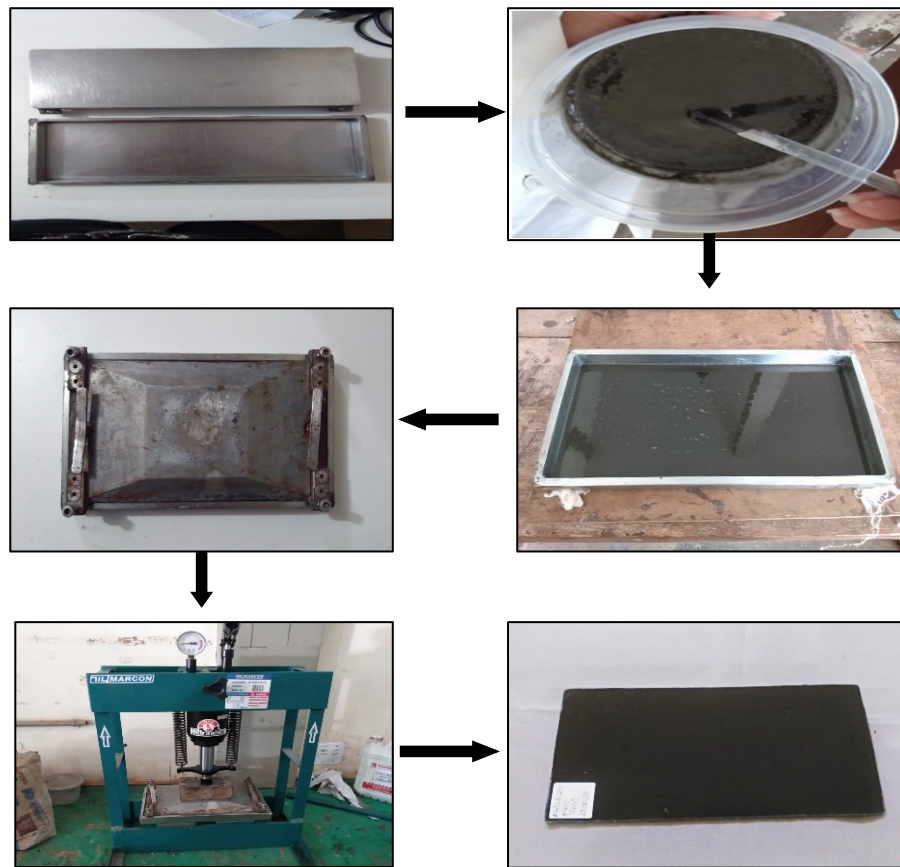
Fonte: Autoria própria (2020).

Foram extraídos os dados numéricos de acordo com cada granulometria preterida. Então, cada material foi aferido a massa em balança analítica para a fabricação unitária dos corpos de prova dos compósitos. De início foi produzida a placa de matriz plena (0 %) em relação a carga, com apenas o material sintético da resina poliéster isoftálica inserida.

Seguindo o procedimento, iniciou-se a geração dos compósitos poliméricos com carga de resíduo de mármore e granito, sendo cada placa fabricada nos seus respectivos *meshs* de 100, 200, 325 e 400 nas proporções em massa pré-determinadas de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 %. De acordo com o processo de fabricação de Rodrigues (2016) e BARBOSA *et al.* (2019), o processo de fabricação adotado obteve boa trabalhabilidade e efetividade.

Foi aplicado através de método simples manual que consistiu no uso de um molde retangular metálico fechado com uso de desmoldante, para facilitar a retirada da placa. O produto distribuído de maneira uniforme, não interferiu nas reações intrínsecas ao processo de fabricação, sendo possível a produção do produto final. O resíduo foi colocado à estufa a fim de se retirar umidade superficial do material, numa temperatura de 105° C durante o tempo de 30 minutos. Após isto, foi feita a homogeneização manual dos materiais em recipiente, depositando a resina, o acelerador de cobalto, o resíduo e o catalisador mek-p, durante 4 minutos de tempo até a deposição da solução em molde metálico. Posteriormente, aguardou-se o processo catalítico do sistema para o ponto de gel (em torno de 7 a 15 minutos). Após este processo, o molde foi conduzido à prensa hidráulica sob uma carga de 2,5 toneladas durante 20 minutos, para assim, quando retirada a placa, ser iniciado o processo de cura de 24 horas. A Figura 15 a seguir mostra a sequência da fabricação dos compósitos.

Figura 15 – Sequência da fabricação dos compósitos



Fonte: Autoria própria (2020).

Após o procedimento de confecção dos compósitos, foram realizados os cortes de todas as placas com o auxílio da máquina de corte da marca DeWalt, modelo DW860B, de acordo com as dimensões das normas American Society for Testing and Materials (ASTM). Para os ensaios físicos, foram realizados cortes para a determinação da massa específica aparente (MEA) na norma ASTM D 792, absorção de água (AA) na norma ASTM D 570 e para a porosidade aparente (PA) na norma ASTM D 2734. Para o ensaio de flamabilidade foram realizados cortes de acordo com a norma ASTM D 635. Para os cortes dos corpos de prova para o ensaio de tração utilizou-se da norma ASTM D 3039. Os cortes foram realizados na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química da UFPA. A Figura 16 apresenta a máquina de corte utilizada na confecção dos corpos de prova.

Figura 16 – Máquina de corte

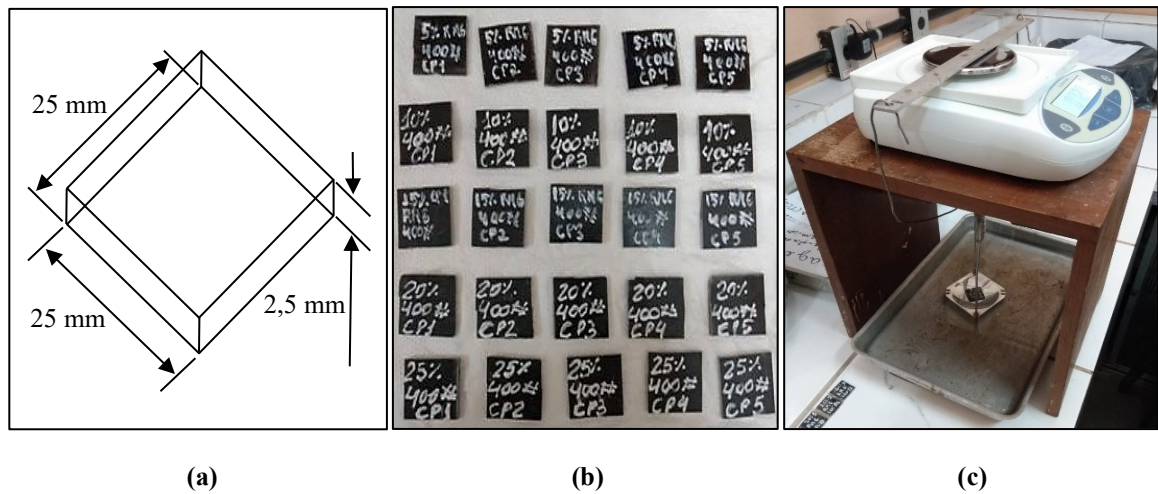


Fonte: Autoria própria (2020).

3.3.4.1 Caracterização física

Os ensaios físicos realizados foram para análise da determinação da Massa Específica Aparente (MEA) (ASTM D 792), Absorção de Água (AA) (ASTM D 570) e Porosidade Aparente (PA) (ASTM D 2734). Sendo estes procedimentos feitos para todos os materiais compósitos. Para este fim, foram confeccionados 5 corpos de prova (CPS) de cada proporção mássica e estes foram colocados na estufa à temperatura de 105 °C no período de 24 horas para retirar-se umidade dos CPS, em seguida foram medidas suas massas em balança analítica de precisão e assim determinou-se a massa seca. Seguindo o processo, os corpos de prova foram imersos em água destilada em um recipiente por um período de 24 horas, posteriormente, a massa úmida foi determinada em balança. Depois deste procedimento, em um mecanismo de suporte à temperatura ambiente, em um recipiente os CPS foram colocados sob água destilada até que fossem totalmente cobertos pelo fluido, e então foram medidas as massas hidrosticamente em seguida, determinando assim a massa imersa. A Figura 17 ilustra a) dimensões do corpo de prova e b) corpos de prova utilizados nos ensaios físicos e (c) aparato para obtenção da massa imersa.

Figura 17 – a) Dimensões do corpo de prova e b) corpos de prova utilizados nos ensaios físicos e (c) balança e aparato para obtenção da massa imersa



Fonte: (a), (b) e (c) Autoria própria (2020).

As fórmulas listadas a seguir foram utilizadas conforme cada parâmetro de ensaio físico como determinação da massa específica aparente (MEA), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA). O MEA é referente a equação (1), a AA equação (2) e PA equação (3):

Para a determinação do MEA:

$$MEA \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (1)$$

Para a determinação da AA:

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Para a determinação da PA:

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (3)$$

Elementos para a equação (1), (2) e (3):

M_s = massa seca em g;

M_u = massa úmida em g;

M_i = massa imersa em g.

3.3.4.2 Caracterização de flamabilidade

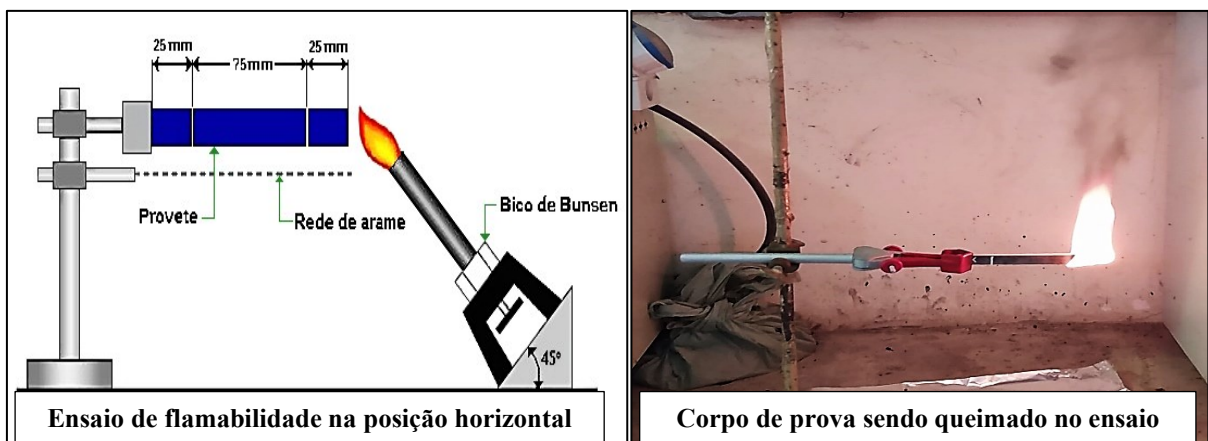
O ensaio de flamabilidade é decorrente e fundamentado na norma ASTM D 635 e tem como característica a resistência e retardância à chama. Compósitos de matriz polimérica costumam ter baixa resistência ao fogo, por isso a importância do teste para futuras utilizações do material. Em método comparativo, a adição de carga tem maior influência nas características de queima do que a resina adicionada no sistema (RIBEIRO *et al.*, 2013).

A norma estabelece o ensaio determinado pela ASTM D 635 para aferir a flamabilidade de um material, e em posição horizontal foi realizado o processo de queima, sendo classificado dependendo da velocidade de combustão.

Os corpos de prova dos compósitos foram confeccionados nas dimensões 127 mm x 12,7 mm e foram submetidos ao ensaio de flamabilidade no Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da UFPA. Para a realização do ensaio, foi feita uma marcação de medidas de 25 mm e 100 mm ao longo dos corpos de prova, no qual o comprimento útil se dá em 75 mm. Ao ser exposto à chama, em posição horizontal, cada corpo de prova iniciou o seu processo de queima, sendo iniciada a contagem de tempo quando a chama atingia a primeira marca de 25 mm, finalizando a contagem ao atingir a segunda marca de 100 mm. A norma estabelece ainda que no momento em que o corpo de prova entrar em combustão e não cessar a chama, o ensaio deve ser repetido em 3 corpos de prova. Quando a chama se extingue, o processo deve ser repetido em 10 corpos de prova.

A Figura 18 (a) mostra a esquematização do ensaio de flamabilidade que foi realizado e (b) o corpo de prova sendo queimado.

Figura 18 – (a) Ensaio de flamabilidade na posição horizontal e (b) corpo de prova sendo queimado no ensaio



(a)

(b)

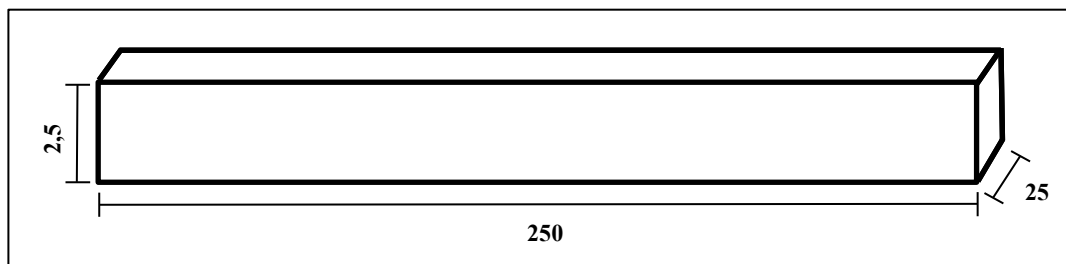
Fonte: (a) Caetano (2011) e (b) autoria própria (2020).

3.3.4.3 Caracterização mecânica

O ensaio de tração permite a ampla caracterização quantitativa de propriedades mecânicas dos materiais, e depende de uma determinada tensão de carga aplicada continuamente na extremidade do corpo, a fim de que se estenda até a ruptura do corpo de prova.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) da UFPA de acordo com a norma ASTM D 3039 com uma célula de carga 5 kN com velocidade igual a 2 mm/min, na máquina de ensaio universal (modelo KE 2000 MP, fabricante KRATOS, Brasil). A quantidade de corpos de prova testados foram 9 (nove). A Figura 19 ilustra a geometria e dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.

Figura 19 – Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaios de tração (sem escala)



Fonte: Adaptado de Costa (2016).

Foram confeccionados “tabs”, em que são utilizadas espécies de peças de interface fabricadas para ensaios de tração, peças estas encontradas no trabalho de Reis (2019), de modo que estes sejam colados nos compósitos, para a melhor adesão da superfície de contato da garra da máquina com o corpo de prova. Os “tabs” foram cortados em máquina de corte obedecendo as dimensões 25 mm x 35 mm, e então foram colados nas extremidades dos corpos de prova, utilizando como solução colante o cianocrilato, da fabricante Tek Bond, para o conjunto corpo de prova-tab não deslizar nas garras da máquina de ensaio de tração. A Figura 20 apresenta (a) corpo de prova-tab e (b) ensaio de tração.

Figura 20 – (a) Corpo de prova-tab e (b) ensaio de tração



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2020).

3.3.4.4 Ensaio de tração

Comumente, o ensaio de tração é conduzido para análises de propriedades do material como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, dureza, fragilidade, resiliência e limite de elasticidade. O corpo de prova submetido tem tamanhos padronizados sendo este tracionado, a uma taxa constante, até a sua ruptura. A carga aplicada é em função ao alongamento causado, e para a determinação dos parâmetros de tensão e deformação são definidas relações (CALLISTER, 2016; LEITE *et al.*, 2017), como a relação da tensão aplicada determinada de acordo com a equação (4):

Para a determinação da tensão aplicada é dado que:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

Onde F é a força aplicada ao corpo de prova e A_0 é a área da seção inicial antes da aplicação da força.

A deformação atuante é definida de acordo com a equação (5):

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

Onde l_i é o comprimento instantâneo e l_0 é o comprimento inicial antes de qualquer aplicação de carga. A expressão $l_i - l_0$ pode ser substituída por Δl .

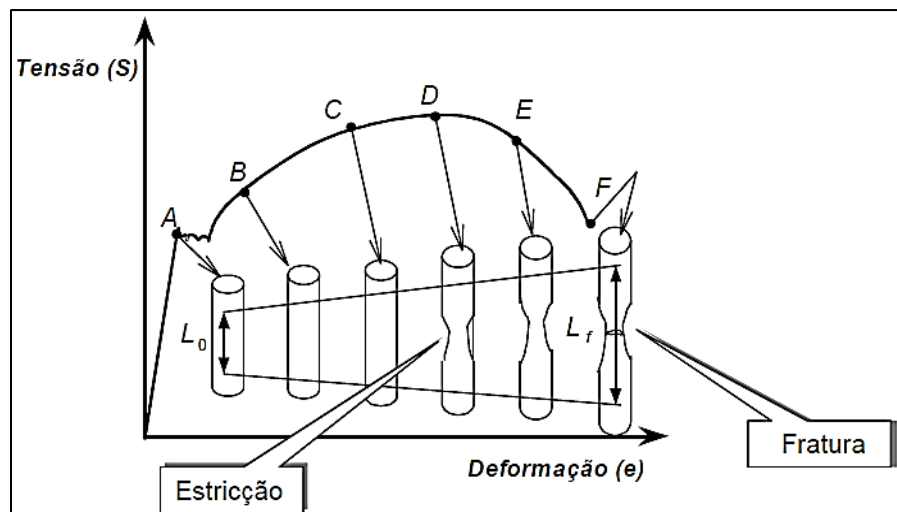
O comportamento típico do ensaio de tração gera um gráfico cuja suas características na Figura 21, apresentando o gráfico de tensão em função da deformação, onde a curva do gráfico tensão-deformação se dá de maneira proporcional de tal maneira ao ponto em que é aplicada uma carga relativamente baixa de tensão. A primeira deformação sofrida é a elástica, que se aplica a Lei de Hooke ou também conhecida como Módulo de Young, é definida de acordo com a equação (6):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Onde E é definido pela tangente da reta da região elástica do material.

A deformação elástica se dá de forma que há um limite quando a aplicação da força é regredida, o alongamento do corpo de prova é revertido ao seu comprimento inicial, indicado no ponto A, onde inicia-se também o limite de escoamento. Acima deste limite, temos a região da deformação plástica, que ocorre a deformação permanente no material indicado no ponto B,

Figura 21 – Gráfico tensão-deformação



Fonte: Lovato Neto, 2006.

O ponto D pode ser considerado como o limite de resistência a tração em que o corpo suporta sobre carga aplicada, pois quando a curva atinge o ponto E, o corpo de prova sofre o processo de estricção em que adquire a resistência a deformação elástica fazendo a área da seção

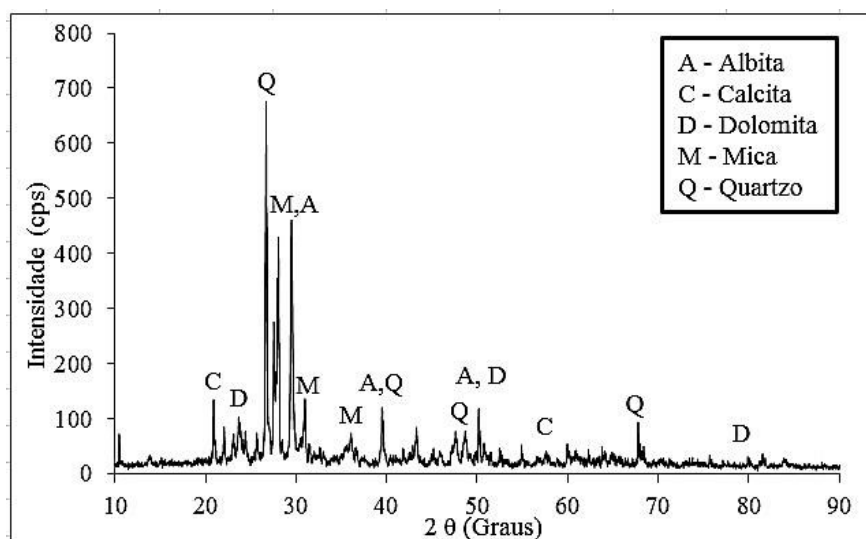
diminuir. A medida da deformação da área, haverá o momento em que precisará de menos tensão a ser aplicada, havendo a ruptura do corpo de prova como mostra o ponto F. A característica da propriedade da ductilidade, indica a medida da deformação plástica suportada até a fratura, definindo o material como frágil ou a dúctil (LOVATO NETO, 2006; MACIEL, 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Difração de Raios-X do resíduo

Este ensaio foi realizado para identificar as principais fases minerais presentes no resíduo de mármore e granito. Segundo Barbosa (2018) e Lima (2006) a difração de Raios-X (DRX) expõe os principais minerais que compõe o material. A Figura 22 apresenta o difratograma do RMG.

Figura 22 – Difratograma do resíduo de mármore e granito



Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados presentes no difratograma da Figura 22 demonstram a composição mineralógica do resíduo de mármore e granito, portanto, os picos de predominância dos minerais se sobressaltam e verifica-se a presença pertinente do Quartzo (SiO_2), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) (ambos minerais pertencentes ao grupo mineral tectossilicato) e Mica (um grupo de minerais filossilicatos) caracterizaram a presença do granito. Picos de intensidade baixa como os minerais Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Calcita (CaCO_3) (ambos os minerais fazem parte do grupo dos carbonatos) identificaram a presença do mármore. Estas fases cristalinas mencionadas foram identificadas nas literaturas (ACCHAR *et al.*, 2006; DHANAPANDIAN e GNANAVEL, 2009; RODRIGUES, 2016).

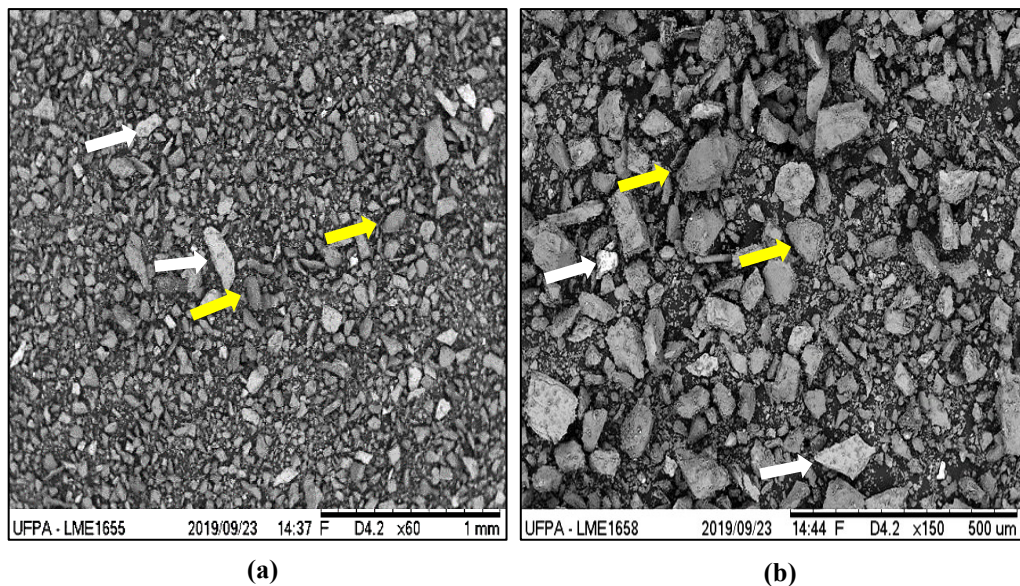
4.2 Morfologia do resíduo

A caracterização morfológica do resíduo de mármore e granito foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de verificar aspectos e formas do RMG, sendo esta análise realizada no material nas granulometrias de 100, 200, 325 e 400 *meshs* com aumentos de 60 x e 150 x.

- **Microscopia do resíduo de mármore e granito de 100 *mesh***

Através das micrografias do resíduo de mármore e granito na granulometria de 100 *mesh* foi possível por meio da realização do MEV com aumentos de 60 x e 150 x como mostra a Figura 23, a fim de análises morfológicas.

Figura 23 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 100 *mesh*: (a) Aumento de 60 x. e (b) Aumento de 150 x



(a)

(b)

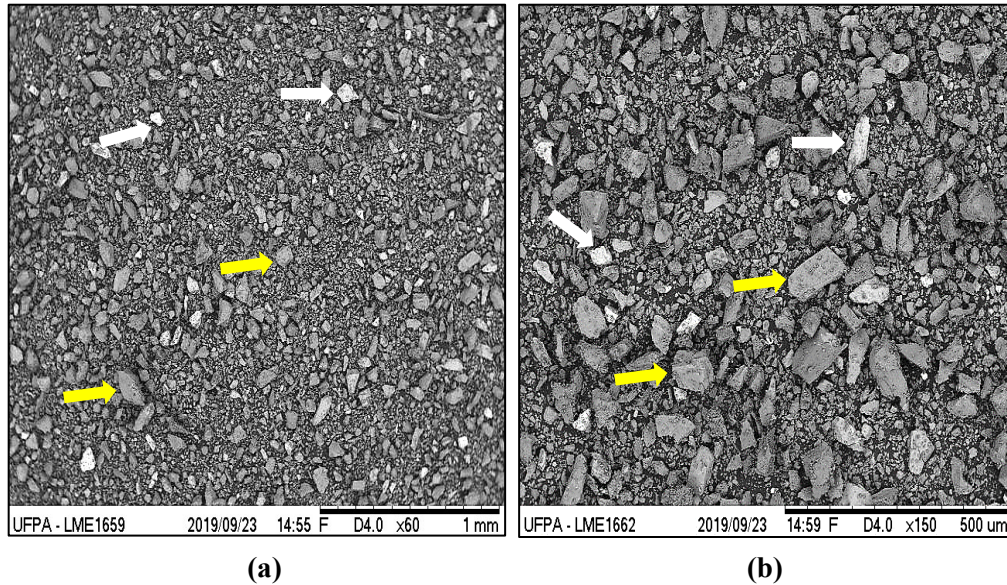
Fonte: Autoria própria (2020).

A estrutura morfológica do resíduo de mármore e granito de 100 *mesh* demonstrado na Figura 23 ilustra a dispersão dos diferentes minerais em maior escala e seus diferentes tamanhos de partículas. O material residual revela as partículas com morfologia irregular com formato angular e, além disto, de acordo com Almeida, Leite e Holanda (2015), a micrografia mostra a clivagem do mármore (seta amarela) caracterizando a presença da calcita. No trabalho de Taguchi *et al.* (2012) explicam que a distribuição entre grandes e pequenas partículas graníticas ou granitóides (seta branca) é devido aos cortes dos blocos em rochas ornamentais o que explica a morfologia irregular e heterogênea na imagem.

- **Microscopia do resíduo de mármore e granito de 200 mesh**

Foi realizado MEV no resíduo de mármore e granito na granulometria 200 mesh em aumentos de 60 x e 150 x como mostra a Figura 24 para fim de análise morfológica.

Figura 24 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 200 mesh: (a) Aumento de 60 x. (b) Aumento de 150 x



Fonte: Autoria própria (2020).

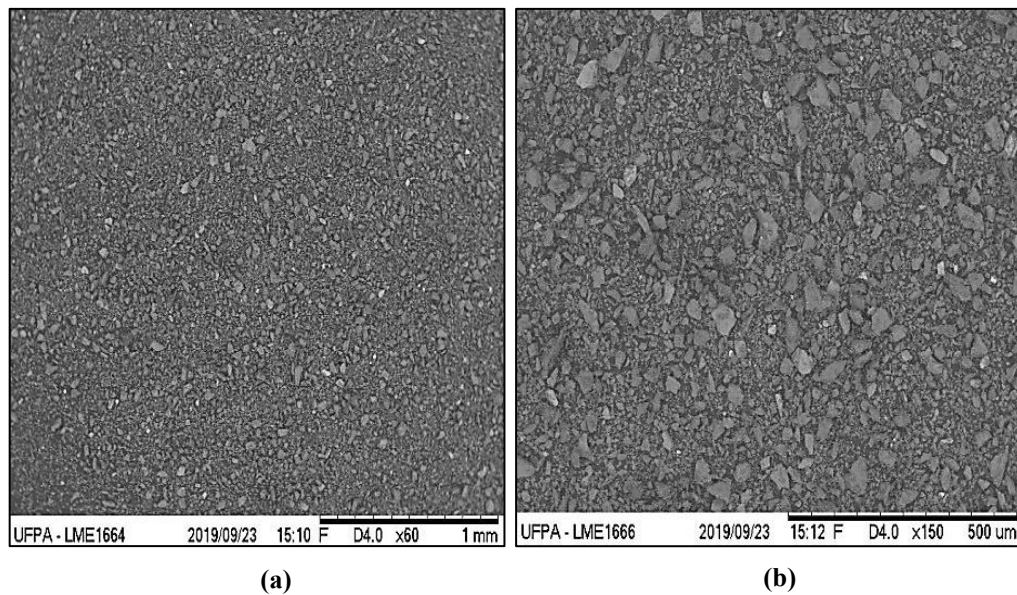
Nas imagens da Figura 24 se percebe o conjunto de aglomerados residuais e formato ainda mais expressivos devido ao maior refinamento da faixa granulométrica das partículas, comparado ao trabalho de Melo (2013). De acordo com o trabalho de Demartini (2017) os minerais de mármore (seta amarela) são descritos como minerais de sistema cristalino hexagonal, exemplo disto é a dolomita, que geralmente apresenta em seu sistema, cristais romboédricos de faces curvadas. Aguiar (2012) cita em seu trabalho que os resíduos de granito (seta branca) são identificados devido aos minerais de quartzo bem delineados, aglomerados porosos, e claro, sua morfologia irregular com arestas angulosas.

Levando em consideração que a maior quantidade em volume do resíduo é de granito, pode se dizer que a maioria dos grãos são amplamente irregulares, devido ao processo de laminação sofrido, provocando grandes alterações não uniformes no material (AZEVEDO *et al.*, 2019).

- **Microscopia do resíduo de mármore e granito de 325 mesh**

A micrografia realizada do RMG de granulometria de 325 *mesh* é ilustrada na Figura 25 por meio de imagens de MEV nos aumentos de 60 x e 150 x para se fazer avaliação morfológica.

Figura 25 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 325 *mesh*: (a) Aumento de 60 x. (b) Aumento de 150 x.



Fonte: Autoria própria (2020).

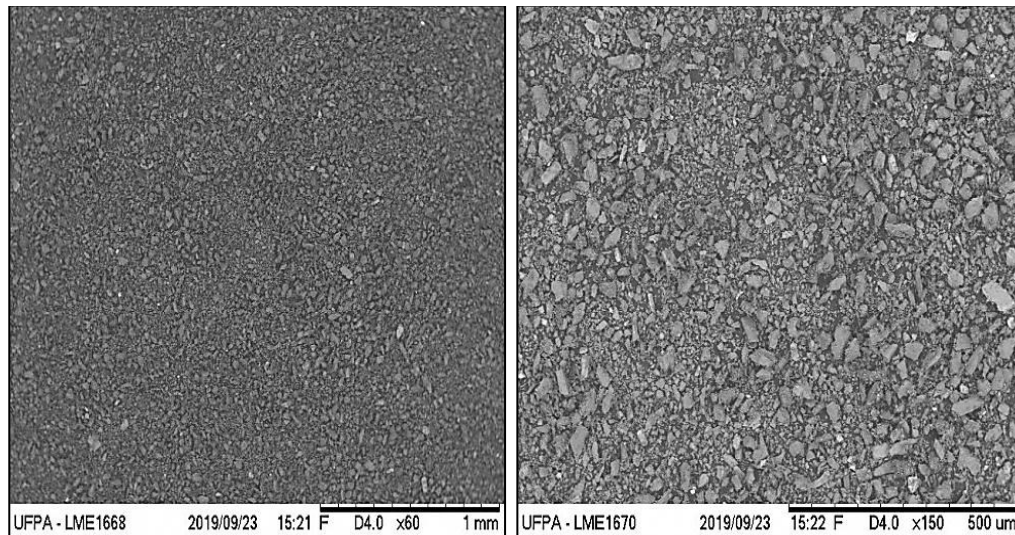
A Figura 25 evidencia ainda mais o campo micrográfico na imagem (a) no aumento de 60 x, demonstrando o material residual em maior quantidade, e no aumento de 150 x na imagem (b), é possível expor de forma mais detalhada a morfologia do resíduo. De acordo com Callister (2016), o tamanho das cargas influencia nas propriedades mecânicas do material, e para um reforço efetivo, as partículas devem ser pequenas e de alto teor em número.

Observa-se o maior refinamento das partículas de RMG, caracterizando como "silte", que engloba grãos entre 0,002 mm a 0,063 mm, no qual a granulometria de 325 *mesh* se encaixa, pois a abertura em milímetro do tamanho da malha granulométrica é de 0,044 mm (AGUIAR, SILVA e GADIOLI, 2016; NBR 7181, 2018).

- **Microscopia do resíduo de mármore e granito de 400 mesh**

A morfologia do resíduo de mármore e granito na granulometria de 400 *mesh* identificado na Figura 26 foi realizado por meio do MEV nos aumentos de 60 x e 150 x.

Figura 26 – Micrografia adquirida por MEV do RMG de 400 *mesh*: (a) Aumento de 60 x. (b) Aumento de 150 x



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2020).

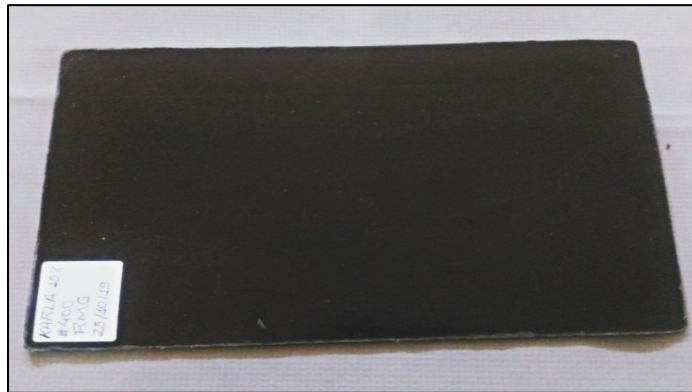
Na micrografia da Figura 26 é de melhor visualização a disposição dos finos grãos distribuídos. A literatura indica a melhor ênfase nas propriedades mecânicas à medida da adição de carga no material compósito, e sua baixa granulometria indica que as partículas irão melhor interagir e formar uma barreira impedindo movimento de discordâncias, aumentando a dureza e resistência ao escoamento (CALLISTER, 2016).

Porém, há um limite no qual à medida do aumento de carga se torna um efeito contrário de acordo com Bessa (2017), e isto está ligado a granulometria do RMG de 400 *mesh*, considerando que quanto menor a partícula maior o volume ocupado. A granulometria presente é visualmente mais refinada em seus grãos, e também é classificada como “silte”, pois possui tamanho 0,037 mm, tamanho este entre as dimensões das partículas já indicadas.

4.3 Fabricação dos compósitos

O método de fabricação utilizado foi eficiente para a confecção dos compósitos, pois as placas apresentaram poucos defeitos, vazios, bolhas, ausência de saturação e ocorreu a cura total, condizente com o resultado esperado. A Figura 27 apresenta placa de matriz polimérica de RMG mostrando o compósito.

Figura 27 – Placa de RMG



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.1 Caracterização física

Foi realizada a caracterização física através do ensaio físico nos compósitos, a partir das normas ASTM D 792, ASTM D 570, ASTM D 2734 para fim de explorar as propriedades da massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente respectivamente.

- **Compósitos de RMG de 100 mesh**

A Tabela 2 expõe os resultados dos ensaios físicos para as propriedades de massa específica aparente (MEA), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) dos materiais compósitos com RMG na granulometria de 100 mesh.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios físicos para 100 *mesh*

Composição	MEA (g/cm³)	AA (%)	PA (%)
0 % RMG	1,2159 ($\pm 0,0052$)	1,2816 ($\pm 0,4395$)	1,5569 ($\pm 0,5277$)
5 % RMG	1,2475 ($\pm 0,0255$)	0,7582 ($\pm 0,0698$)	0,9467 ($\pm 0,0989$)
10 % RMG	1,3525 ($\pm 0,0108$)	1,6418 ($\pm 0,4915$)	2,2164 ($\pm 0,6450$)
15 % RMG	1,2915 ($\pm 0,1151$)	0,8971 ($\pm 0,1854$)	1,1493 ($\pm 0,2081$)
20 % RMG	1,4966 ($\pm 0,0922$)	1,6185 ($\pm 0,6435$)	2,4192 ($\pm 0,9868$)
25 % RMG	1,5948 ($\pm 0,0102$)	0,8093 ($\pm 0,3212$)	1,2881 ($\pm 0,5020$)

Fonte: Autoria própria (2020).

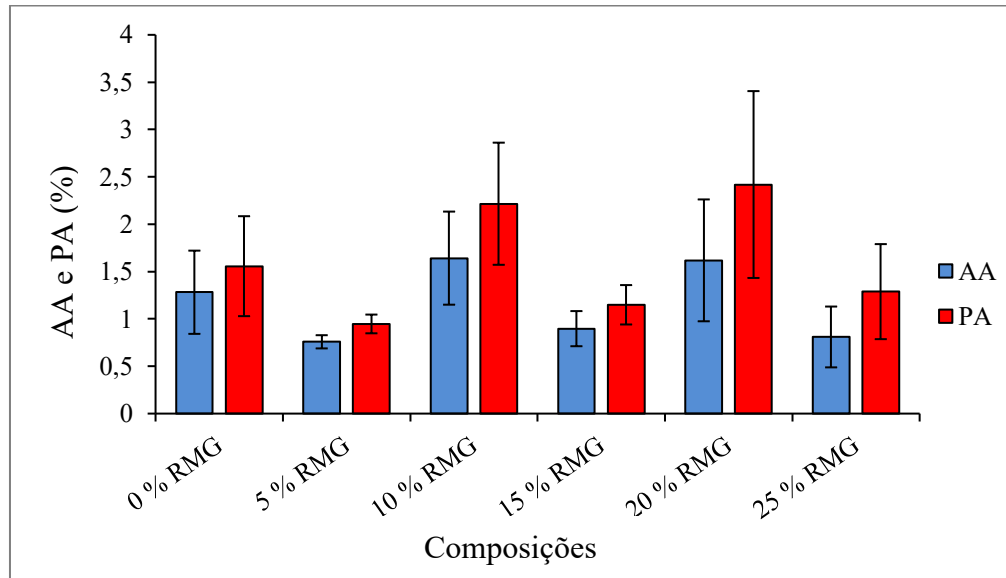
Observa-se de acordo com a Tabela 2 que os resultados físicos dos compósitos com inserção da carga residual de mármore e granito na granulometria de 100 *mesh* apresentaram aumento na propriedade de massa específica aparente em relação à matriz plena (0 % RMG) conforme o aumento de resíduo dentro da matriz, dado que a proporção mais significativa foi a de 25 % RMG (25 % de mármore e granito). Segundo Callister (2016) enunciou, o comportamento dos compósitos com partículas grandes está relacionado à regra da mistura, pois enfatiza que as propriedades dependem das frações volumétricas das fases constituintes, com base em estimativas aproximadas.

O acréscimo da massa específica aparente também pode se explicar devido à densidade dos materiais adicionados, que no caso do resíduo, apresenta a densidade de 2,7 g/cm³ e da resina igual a 1,15 g/cm³.

Em relação às propriedades de porosidade aparente e absorção de água, os compósitos apresentaram nas proporções de 10 % RMG e 20 % RMG valores superiores em comparação a matriz plena, e as demais proporções mantiveram-se inferior ao limite da matriz plena. Este fato pode se dá devido à criação de bolhas de ar na matriz decorrente do processo de fabricação dos compósitos, e o surgimento de espaços vazios podem ter acomodado o conjunto destas bolhas conforme a adição de carga como explica Rodrigues (2016). O resíduo possui em sua natureza o caráter hidrofóbico, o que ajuda na não absorção de água no material compósito.

A Figura 28 mostra o gráfico comparativo ilustrando os resultados das propriedades de AA e PA dos compósitos de RMG da granulometria de 100 *mesh*.

Figura 28 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 100 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos de RMG de 200 *mesh***

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios físicos para a massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente dos materiais compósitos de RMG na granulometria de 200 *mesh*.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios físicos para 200 *mesh*

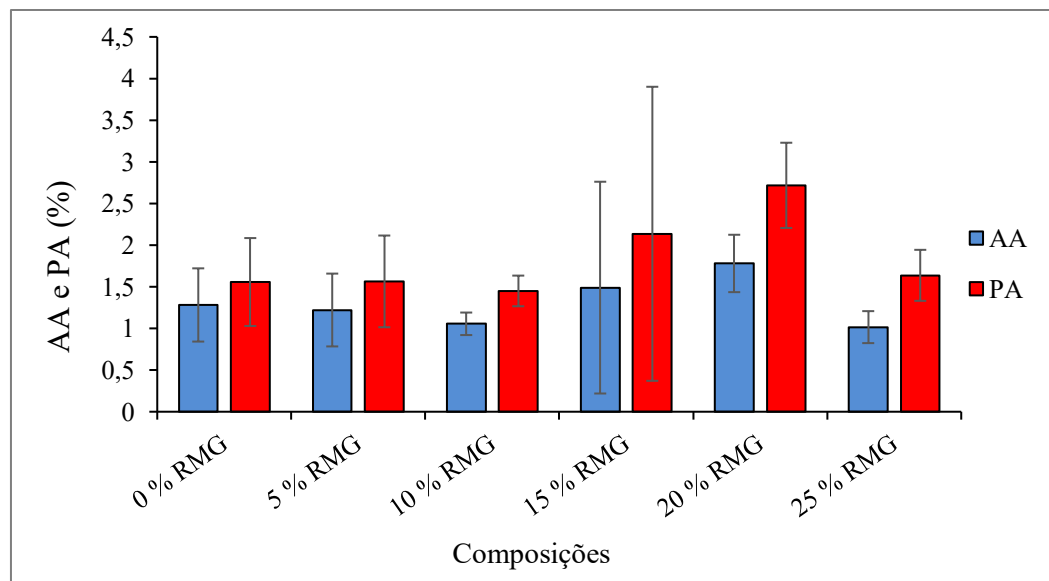
Composição	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)
0 % RMG	1,2159 (±0,0052)	1,2816 (±0,4395)	1,5569 (±0,5277)
5 % RMG	1,2839 (±0,0083)	1,2210 (±0,4372)	1,5647 (±0,5504)
10 % RMG	1,0554 (±0,0022)	1,0554 (±0,1352)	1,4501 (±0,1839)
15 % RMG	1,4526 (±0,0285)	1,4899 (±1,2712)	2,1358 (±1,7651)
20 % RMG	1,5281 (±0,0083)	1,7799 (±0,3444)	2,7175 (±0,5117)
25 % RMG	1,6126 (±0,0056)	1,0156 (±0,1920)	1,6372 (±0,3061)

Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados para os compósitos com RMG na granulometria de 200 *mesh* da Tabela 3 indicaram também um aumento na massa específica aparente de maneira progressiva em relação a matriz plena, principalmente na proporção de 25 % RMG, fato este devido a regra da mistura, como já citado de acordo com Callister (2016). Já para as propriedades de absorção de água e porosidade aparente obtiveram acréscimos em relação à matriz plena para as composições 15 % RMG e 20 % RMG. Segundo explica Oliveira (2015) em seu trabalho sobre o reaproveitamento de resíduos de marmoraria, de modo geral, os valores das propriedades de absorção de água e porosidade aparente podem se comportar de acordo com o teor do material residual adicionado, tendo participação da densidade aparente, nos materiais compósitos.

A Figura 29 apresenta o comportamento dos ensaios físicos dos compósitos de RMG da granulometria de 200 *mesh* em gráfico comparativo que indica os resultados das propriedades de AA e PA.

Figura 29 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 200 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos de RMG de 325 mesh**

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios físicos para a massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente dos materiais compósitos de RMG na granulometria de 325 mesh.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios físicos para 325 mesh

Composição	MEA (g/cm³)	AA (%)	PA (%)
0 % RMG	1,2159 (±0,0052)	1,2816 (±0,4395)	1,5569 (±0,5277)
5 % RMG	1,2958 (±0,0044)	1,0894 (±0,2582)	1,4108 (±0,3305)
10 % RMG	1,3619 (±0,0082)	1,2083 (±0,2558)	1,6441 (±0,3404)
15 % RMG	1,4623 (±0,0090)	0,7843 (±0,2186)	1,1463 (±0,3173)
20 % RMG	1,5519 (±0,0061)	0,5923 (±0,1818)	0,9184 (±0,2791)
25 % RMG	1,6311 (±0,0073)	0,5461 (±0,2411)	0,8905 (±0,3930)

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 4 os resultados para os ensaios físicos do compósito de RMG na granulometria de 325 mesh indicaram maior aumento da massa específica aparente em relação à matriz plena, como já mencionado, aplica-se a teoria da regra da mistura, pois foram adicionados materiais para a fabricação dos compósitos que possuem diferentes densidades.

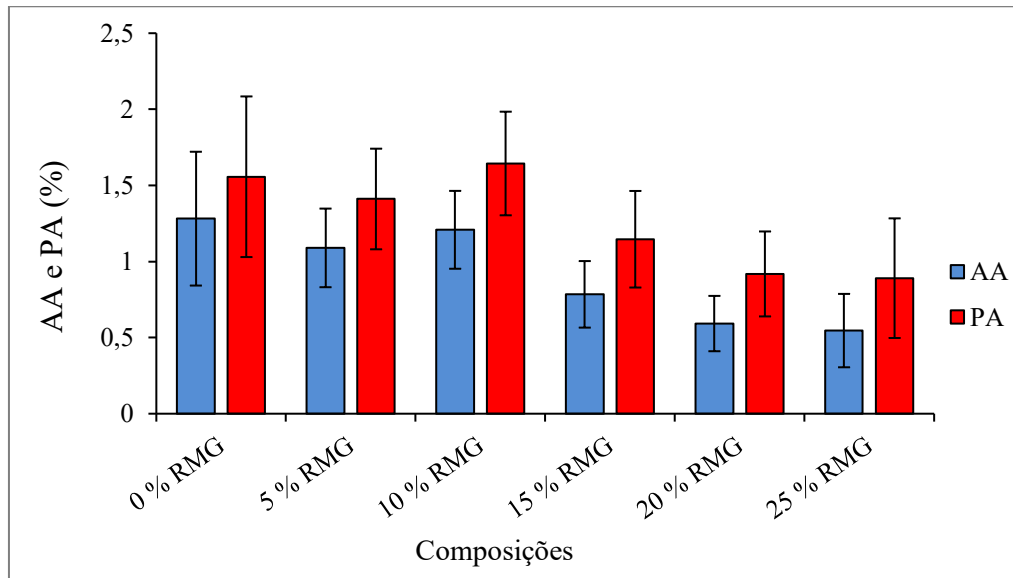
Em análise geral, as propriedades de AA e PA dos compósitos relataram tendência ao decréscimo em comparação à matriz plena, porém, somente a proporção de 10 % RMG se sobressaiu com acréscimo. Este fato pode ter ocorrido em decorrência de alguma falha no processo de fabricação e homogeneização da mistura ou por composições menores de 10 % RMG apresentarem sedimentação do resíduo dentro do polímero.

De acordo com Apolinário (2014), outra explicação para este decréscimo de AA e PA na variação do teor de resíduo pode ser devido o RMG atuar como *filler*, que significa dizer que o resíduo causou um preenchimento nos espaços vazios, promovendo assim o empacotamento das partículas, e como consequência disto, se incorporou melhor na mistura da fabricação do compósito. Isto pode ter sido causado devido ao aumento da área superficial específica da carga, tendo a função de pontos de nucleação de hidratos. Deste modo, o diâmetro dos poros diminui e há uma boa distribuição da carga, e conseqüentemente, na fabricação há uma crescente considerável na densidade do volume ocupado pelo resíduo onde o autor também observou em seu trabalho esse comportamento nas propriedades de argamassas com o teor de RCMG

(resíduo do corte de mármore e granito).

A Figura 30 mostra um gráfico comparativo que exhibe o comportamento das propriedades de AA e PA dos compósitos de RMG na granulometria de 325 *mesh*.

Figura 30 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 325 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos de RMG de 400 *mesh***

A Tabela 5 mostra os resultados dos ensaios físicos para a massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente dos materiais compósitos com RMG de 400 *mesh*.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios físicos para 400 *mesh*

Composição	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)
0 % RMG	1,2159 (±0,0052)	1,2816 (±0,4395)	1,5569 (±0,5277)
5 % RMG	1,3075 (±0,0049)	1,2736 (±0,1693)	1,6649 (±0,2179)
10 % RMG	1,3617 (±0,0028)	0,8227 (±0,2226)	1,1201 (±0,3022)
15 % RMG	1,4389 (±0,0026)	0,6326 (±0,0370)	0,9103 (±0,0523)
20 % RMG	1,5057 (±0,0075)	1,2799 (±0,2367)	1,9258 (±0,3465)
25 % RMG	1,6062 (±0,0102)	0,8498 (±0,2583)	1,3631 (±0,4070)

Fonte: Autoria própria (2020).

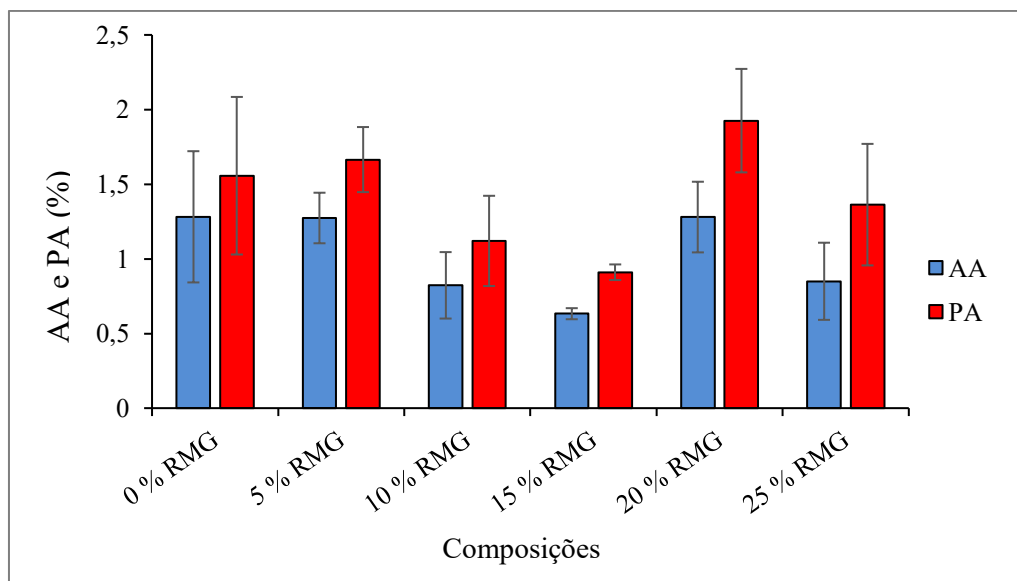
A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios físicos realizados para os compósitos de RMG na granulometria de 400 *mesh*, sendo que a propriedade de MEA obteve maior aumento na fração mássica de 25 % RMG em comparação à matriz plena.

Ao observar a variação de AA e PA nos compósitos entre as proporções, pode-se considerar a ideia desta variação está relacionada aos espaços vazios surgidos no material compósito durante o processo de fabricação. Esta ocorrência dos espaços vazios pode estar relacionada à agitação na fabricação dos compósitos, sendo assim, bolhas de ar podem ser inseridas ou desprendidas no processo da mistura, fato este observado por Santos *et al.* (2014).

De uma forma geral, os compósitos de 400 *mesh* obtiveram propensão à diminuição nos valores das propriedades de AA e PA com variações dos valores entre as frações mássicas de modo que se interpolassem, assim como foi observado nos compósitos de 100 *mesh*, diferente da análise feita nos compósitos de 325 *mesh*, que houve tendência linear à diminuição nos valores destas propriedades. As faixas granulométricas de 325 e 400 *meshs* alcançaram acréscimos das propriedades já dita, em comparação as demais granulometrias. O compósito de 200 *mesh* foi a granulometria que melhor apresentou predisposição evolutiva nas propriedades de AA e PA em relação à matriz plena.

A Figura 31 exhibe os resultados das propriedades do ensaio físico como AA e PA dos compósitos de RMG na granulometria de 400 *mesh*.

Figura 31 – Gráfico comparativo das propriedades de AA e PA dos compósitos de 400 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.2 Caracterização de flamabilidade

Todos os compósitos foram submetidos ao ensaio de flamabilidade horizontal para fim de obter-se resultados sobre a velocidade da propagação à chama para avaliar as propriedades de acordo com a norma ASTM D 635.

- **Compósitos de RMG de 100 mesh**

Os resultados exibidos na Tabela 6 mostram os valores obtidos a partir do ensaio de resistência à chama horizontal para os compósitos de carga de RMG na granulometria de 100 mesh.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 100 mesh

Composição	Taxa de queima (mm/min)
0 % RMG	27,97 ($\pm 0,81$)
5 % RMG	25,64 ($\pm 1,00$)
10 % RMG	20,94 ($\pm 1,13$)
15 % RMG	16,76 ($\pm 0,53$)
20 % RMG	16,23 ($\pm 0,79$)
25 % RMG	14,50 ($\pm 0,23$)

Fonte: Aatoria própria (2020).

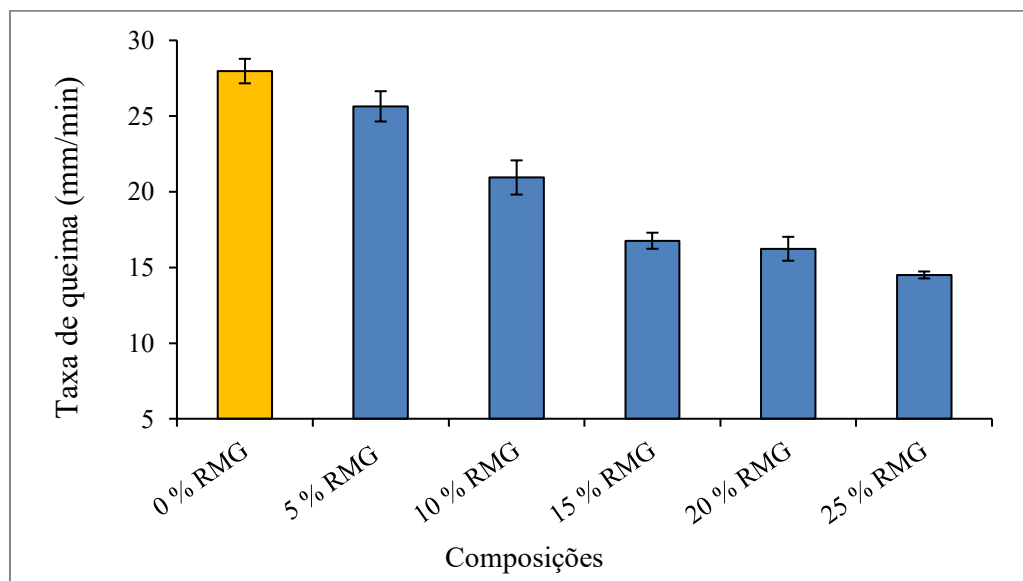
Foi observado em relação à propagação da taxa de queima dos compósitos de RMG na granulometria de 100 mesh que, de modo geral, apresentaram redução gradativa de acordo com a composição do material residual adicionado. A proporção de 25 % RMG (25 % de resíduo de mármore e granito) se destacou, pois teve um decréscimo de aproximadamente 48,15 % em comparação à matriz plena, sendo considerada a mais satisfatória redução da velocidade da propagação da chama. A norma ASTM D 635 estabelece que a propagação da queima linear não exceder 40 mm/min, sendo assim, o compósito se encaixa na categoria HB (Horizontal Burning) da norma. Além disto, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN)/2014 estabelece para os materiais de revestimento interno automotores, o limite da velocidade da propagação de chama de, no máximo, 100 mm/min.

Todos os compósitos de granulometria de 100 *mesh* tiveram queima total com gotejamento durante o ensaio de flamabilidade. Uma das hipóteses para este comportamento da redução da taxa de queima pode ser observada através das características dos compósitos nas propriedades físicas de AA e PA, que apresentaram variação ao se adicionar RMG, podendo assim indicar o comportamento da redução da chama devido a presença de água na estrutura.

Segundo Rodrigues (2016), conforme a adição do resíduo de mármore e granito e a redução do quantitativo de resina (material inflamável) no compósito, pode corroborar com o decréscimo da taxa de chama.

A Figura 32 apresenta um gráfico dos compósitos de RMG na granulometria de 100 *mesh* indicando tendência do retardo à chama à medida da crescente proporção, na qual a proporção de 25 % RMG mostra o melhor resultado com o menor valor da taxa de queima.

Figura 32 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 100 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos de RMG de 200 mesh**

Os resultados exibidos na Tabela 7 mostram valores obtidos a partir do ensaio de resistência a chama horizontal para os compósitos de RMG na granulometria de 200 *mesh*.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 200 *mesh*

Composição	Taxa de queima (mm/min)
0 % RMG	27,97 ($\pm 0,81$)
5 % RMG	23,03 ($\pm 1,12$)
10 % RMG	20,69 ($\pm 1,11$)
15 % RMG	18,89 ($\pm 0,52$)
20 % RMG	18,31 ($\pm 1,32$)
25 % RMG	20,45 ($\pm 1,30$)

Fonte: Autoria própria (2020).

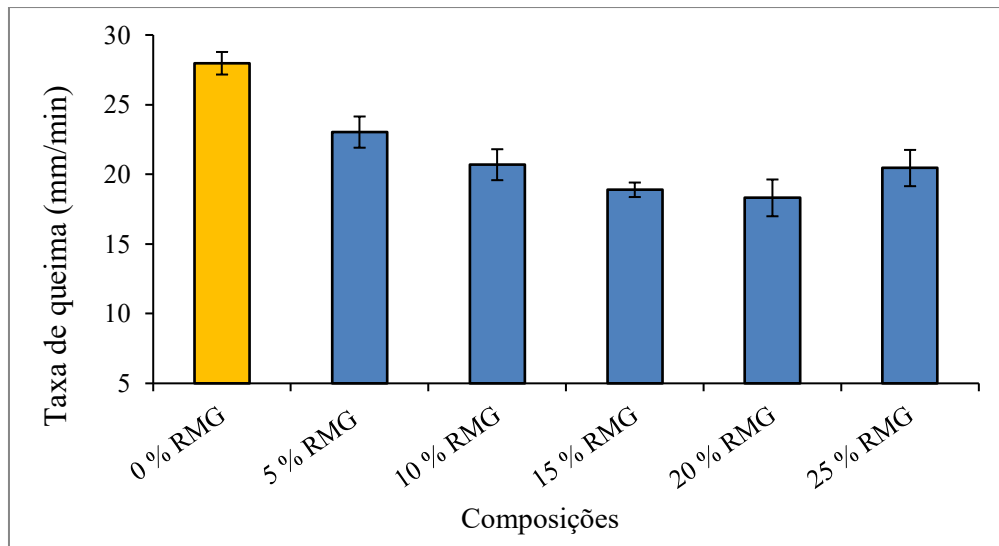
Nos resultados apresentados na Tabela 7 do ensaio de flamabilidade horizontal do compósito de RMG na granulometria de 200 *mesh*, observa-se que a taxa de queima, em comparação à matriz plena, do compósito de melhor desempenho na proporção de 20 % RMG tendo um decréscimo de 34,53 %. De acordo com Costa *et al.* (2016) os materiais compósitos costumam ter resistência à propagação à chama, porém sendo necessário demais estudos para verificar a veracidade desta hipótese.

Os compósitos atenderam resultados também satisfatórios para a norma ASTM D 635 apresentando valores de taxa linear de queima inferior ao limite de 40 mm/min, aderindo aos critérios de classificação HB. Assim como também adere às normas do CONTRAN/2014 de não exceder o valor máximo de propagação de chama de 100 mm/min para materiais de revestimentos de veículos.

O comportamento da redução da chama do compósito de RMG na granulometria de 200 *mesh* se mostrou regressivo em relação à matriz plena, designando um resultado satisfatório até a proporção de 20 % RMG. Nos ensaios físicos nas propriedades de AA e PA a proporção de 20 % RMG apresentou o maior resultado quando comparado a matriz plena, indicando assim o limite da eficiência da resistência às chamas até esta proporção. Conforme o trabalho de Vivaldini *et al.* (2014), a presença da porosidade, falhas e defeitos nas microestruturas de materiais influencia o comportamento da condução térmica, considerando que quanto maior for o quantitativo de porosidade, menor será a condução térmica.

A Figura 33 mostra os resultados através do gráfico comparativo exibindo a tendência do retardo à chama dos compósitos de RMG na granulometria de 200 *mesh* a qual a proporção de 20 % RMG apresenta o melhor resultado com o menor valor da taxa de queima.

Figura 33 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 200 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos de RMG de 325 *mesh***

Os resultados exibidos na Tabela 8 mostram os valores obtidos a partir do ensaio de resistência à chama horizontal para os compósitos de carga de RMG na granulometria de 325 *mesh*.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 325 *mesh*

Composição	Taxa de queima (mm/min)
0 % RMG	27,97 ($\pm 0,81$)
5 % RMG	19,72 ($\pm 0,48$)
10 % RMG	Ø
15 % RMG	17,42 ($\pm 2,84$)
20 % RMG	17,99 ($\pm 0,59$)
25 % RMG	17,72 ($\pm 0,81$)

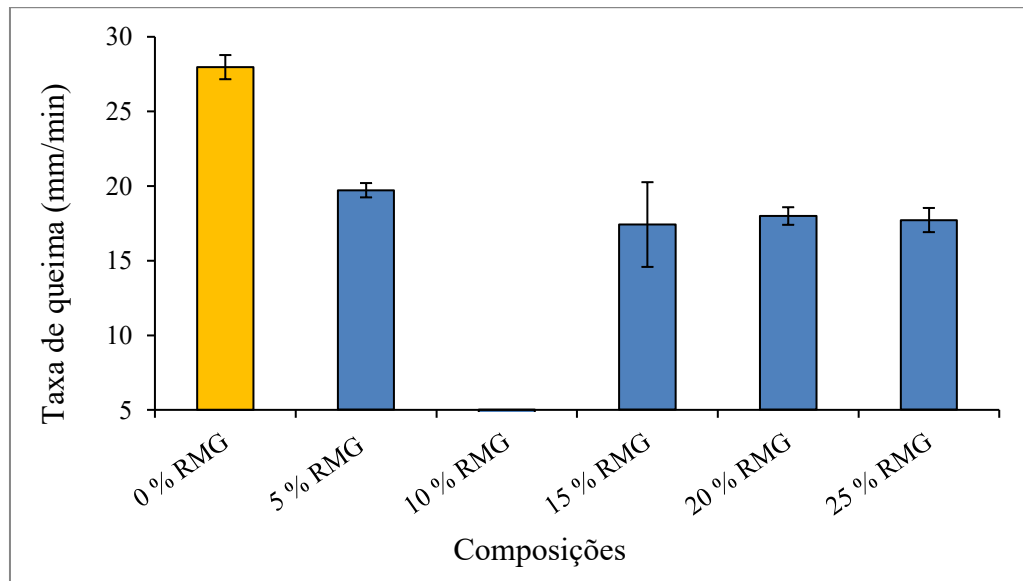
Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 8 mostra os resultados do ensaio de flamabilidade para os compósitos com carga de RMG na granulometria de 325 *mesh*, compósitos estes que apresentaram taxa de queima com relevante decréscimo em comparação a matriz plena, com destaque para a proporção de 10 % RMG que obteve maior redução com 100 % de recuo da chama no ensaio aplicado, pois o compósito no primeiro momento apresentou ínfima ignição, porém sem a sustentação da chama, com a mesma se extinguindo. Ademais, os compósitos atendem também as normas do CONTRAN/2014 de não exceder o valor de taxa de queima de 100 mm/min.

Outro fator que pode ter contribuído seria a capacidade de interação das partículas quando adicionado 10 % de RMG para com a dispersão na matriz, fazendo com que a dependência do comportamento do fogo não se atenha somente aos óxidos, havendo assim a possibilidade da interação com o polímero, restringindo então a mobilidade da cadeia no sistema catalítico e sobre a dimensão das partículas. Este comportamento é explicado de acordo com o trabalho de Tibiletti *et al.* (2011) que relacionam o comportamento perante a chama de poliéster não saturado com óxidos metálicos, ao ponto em que a sinergia reduziu o poder de fogo que resultou da área de superfície específica das nano partículas de alumínio, com melhor resultado com o carregamento de 10wt% (10 % de peso).

O comportamento da taxa de queima dos compósitos de RMG na granulometria de 325 *mesh* se mostraram satisfatórios. Fatores como absorção de água e porosidade aparente também podem acarretar mudança no comportamento da chama frente ao ensaio de flamabilidade. Na proporção de 10 % RMG nos ensaios físicos, a propriedade da PA apresentou valor superior a matriz plena, diferentemente da AA, que manteve em todas as proporções, valores inferiores a matriz plena. A participação das propriedades físicas, deste modo, pode ter colaborado à não ignição no ensaio de flamabilidade na proporção de 10 % RMG. De acordo com Fonseca *et al.* (2016) em seu trabalho com a porosidade em materiais cerâmicos, explica que, em certa temperatura atingida, o material pode gerar muitos poros abertos, que são poros em contato com a superfície do material. Os poros abertos podem dissolver a fase sólida. Sendo assim, a queima provocada irá consumir o oxigênio ou o ar dos espaços vazios, fazendo o volume diminuir, sendo que o tempo de queima poderá reduzir a um tempo mínimo, ou neste caso, a zero.

O comportamento dos valores dos compósitos de RMG na granulometria de 325 *mesh* é representado no gráfico comparativo na Figura 34, mostrando o decréscimo da taxa de queima de acordo ao aumento da proporção de RMG, onde o melhor resultado é o de 10 % RMG ao passo que a proporção indicada não entrou em ignição.

Figura 34 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 325 *mesh*

Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos de RMG de 400 *mesh***

Os resultados exibidos na Tabela 9 mostram os resultados obtidos a partir do ensaio de resistência à chama horizontal para os compósitos de carga de RMG na granulometria de 400 *mesh*.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal – RMG 400 *mesh*

Composição	Taxa de queima (mm/min)
0 % RMG	27,97 ($\pm 0,81$)
5 % RMG	20,16 ($\pm 1,46$)
10 % RMG	22,24 ($\pm 1,14$)
15 % RMG	18,39 ($\pm 0,74$)
20 % RMG	15,29 ($\pm 0,21$)
25 % RMG	15,08 ($\pm 0,88$)

Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme a Tabela 9 do comportamento da taxa de queima para os compósitos com carga de RMG na granulometria de 400 *mesh*, verificou-se que o compósito de melhor desempenho de retardo a chama foi o de 25 % RMG com redução de 46,05 % comparado a matriz plena. Todos os compósitos se classificaram como HB na norma ASTM D 635, assim

como estão dentro dos padrões do CONTRAN/2014 não evoluindo além da taxa de combustão de 100 mm/min.

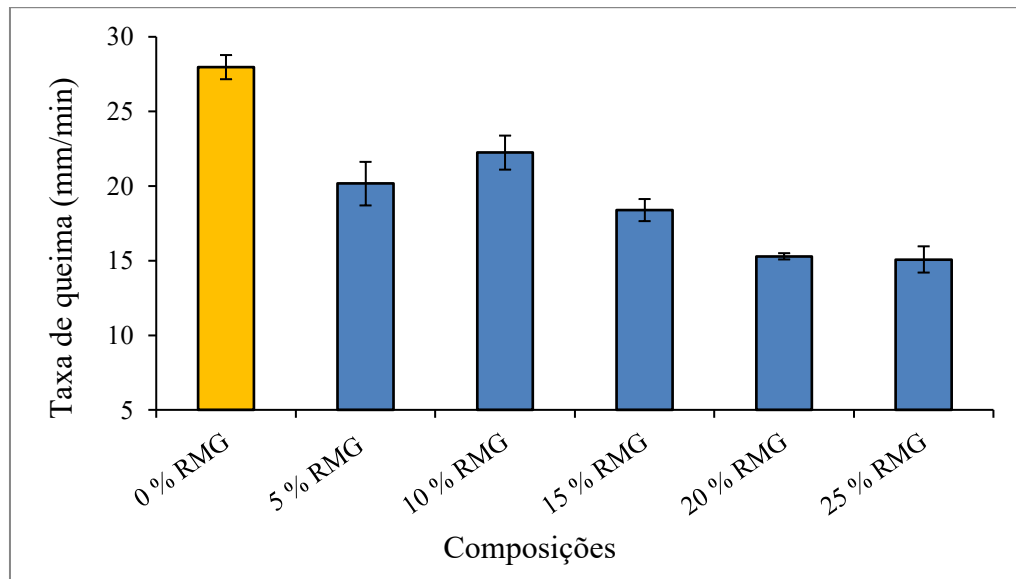
Importante também ressaltar que a partir da inserção de carga de RMG, a propagação da chama vai se reduzindo, fazendo analogia a explicações dos comportamentos já citados com acréscimo de carga, porém a proporção mássica de 10 % RMG obteve menor decréscimo de chama quando comparado a matriz plena, talvez devido ao comportamento de PA nos ensaios físicos, que alcançou valor elevado em relação a matriz plena. Uma das etapas particulares e naturais do processo de queima procedendo como agentes de resistência à chama são as ações químicas.

De acordo como Martins (2017) relata em seu trabalho com retardantes de chamas em compósitos de matriz polimérica, o material aquecido pode ter uma estrutura heterogênea no processo de pirólise e difusão de gases formados, podendo não atingir o ponto em que o polímero não se degrada, sem alcançar a temperatura suficiente pra decomposição do material polimérico (fase esta antes da combustão e propagação da chama), se extinguindo então. Em concordância com o autor, outra explicação seria que, durante a queima, tenha ocorrido a liberação de certa quantidade de carbono pela superfície polimérica, atuando por sua vez como uma camada protetora, agindo com ação desidratante, pois assim gerando carbonização por meio de ligações duplas que geram ligações cruzadas, ciclização e dentre outros processos.

De forma geral, os valores da taxa de queima dos compósitos de granulometria de 400 *mesh* se apresentaram de forma satisfatória, em comparação a matriz plena, se apresentando com valores de resistência a chama inferior aos compósitos de granulometria de 100 *mesh* e 200 *mesh*, porém os compósitos da série granulométrica de 325 *mesh* manifestaram o menor somatório das taxas de queima, superando as demais granulometrias. No entanto, o resultado que mais se sobressaiu foi o compósito de 325 *mesh* na proporção de 10 % RMG. Observa-se que no presente ensaio do compósito da granulometria de 400 *mesh*, foi registrado também o maior valor da taxa de queima para a proporção de 10 % RMG, vale lembrar os ensaios físicos, no qual foi sinalizado valores excedentes à mesma proporção para as propriedades de AA e PA, decorrente da possibilidade de produção de bolhas de ar, vazios e defeitos, e isto pode ter influenciado o comportamento perante a chama.

A Figura 35 mostra os resultados dos compósitos de RMG na granulometria de 400 *mesh* no gráfico comparativo, indicando predisposição do retardo à taxa de queima, de modo geral, na medida do aumento da proporção de resíduo, na qual a proporção de 25 % RMG apresenta o melhor resultado com o menor valor de retardo à chama.

Figura 35 – Gráfico comparativo da taxa de queima dos compósitos na granulometria de 400 *mesh*



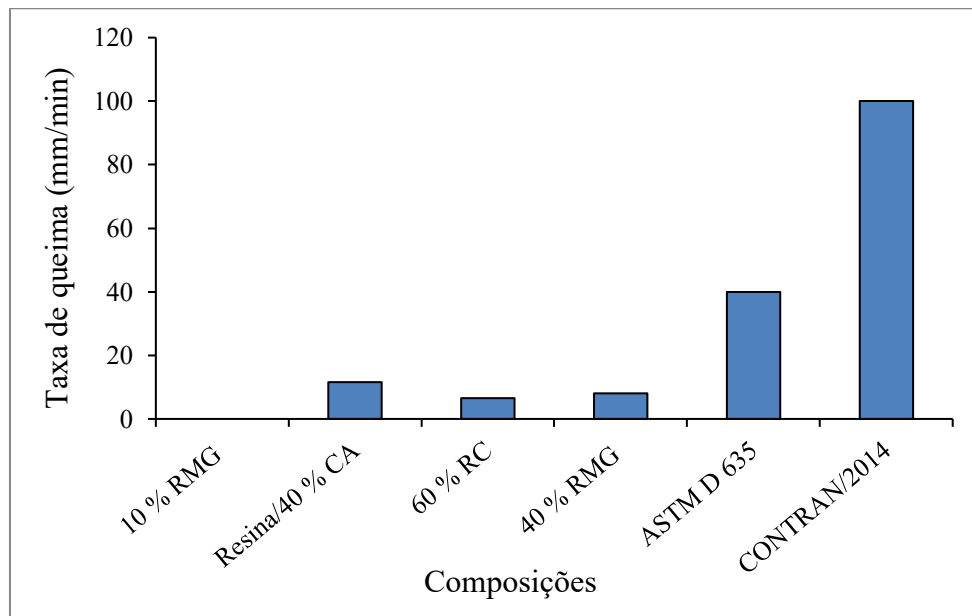
Fonte: Autoria própria (2020).

- **Gráfico comparativo entre as taxas de chama das literaturas e das normas**

Foi comparado os resultados entre literaturas e normas para um melhor entendimento e análise do comportamento da taxa de queima em si. Os resultados mostraram-se com o comportamento favorável da propagação da chama ao permanecerem inferior em relação a taxa de queima das determinações das normas. Pelas análises o compósito na granulometria de 100 *mesh* com resina/40 % CA (resina poliéster isoftálica insaturada com 40 % de Caulim) do trabalho de Costa (2016) apresentou uma satisfatória taxa de chama com o valor de 11,59 mm/min, porém mostrando-se inferior ao trabalho de Rodrigues (2016) no material compósito apresentado com 40 % de resíduo de mármore e granito (40 % RMG) de granulometria de 100 *mesh*, onde este, por sua vez, se apresenta sob o resultado do compósito com resina poliéster insaturada ortoftálica com 60 % de retardante de chama (60 % RC) uma vez que é composto de alumina hidratada $Al(OH)_3$, com valor 6,61 mm/min do trabalho de Ribeiro *et al.* (2013). Os três resultados das literaturas apresentados tiveram o comportamento aceitáveis para a propagação da chama, porém o compósito de 10 % RMG na granulometria de 325 *mesh* do presente trabalho exibiu melhor rendimento no resultado do que os demais compósitos e em comparação as normas propostas, pois o compósito se comportou resistente a ignição, se mostrando mais eficaz em oposição ao processo de combustão.

Os resultados do gráfico da Figura 36 registram valores de compósitos com resíduos encontrados nas literaturas, para a taxa de queima do ensaio de flamabilidade com seus respectivos melhores resultados, a considerar os valores de desvio padrão, comparados às normas da ASTM D 635 e do CONTRAN/2014.

Figura 36 – Gráfico comparativo de valores da taxa de chama dos compósitos das literaturas entre as normas



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.3 Caracterização mecânica

Para a caracterização mecânica dos compósitos de RMG foi necessário a realização do ensaio mecânico de tração na máquina de ensaio universal, tal qual a norma ASTM D 3039, foi realizado em todas as granulometrias, para determinar as propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

- **Compósitos com carga de RMG na granulometria de 100 mesh**

A Tabela 10 apresenta os resultados para a resistência mecânica dos materiais compósitos de RMG na granulometria de 100 mesh para resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade de cada proporção mássica.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 100 *mesh*

Composição	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0 % RMG	16,50 ($\pm 3,25$)	1,88	1,57
5 % RMG	38,60 ($\pm 1,40$)	3,83	1,81
10 % RMG	28,78 ($\pm 6,32$)	4,68	1,11
15 % RMG	31,59 ($\pm 3,84$)	2,59	2,19
20 % RMG	32,43 ($\pm 4,53$)	2,10	2,78
25 % RMG	29,90 ($\pm 4,70$)	1,67	3,22

Fonte: Autoria própria (2020).

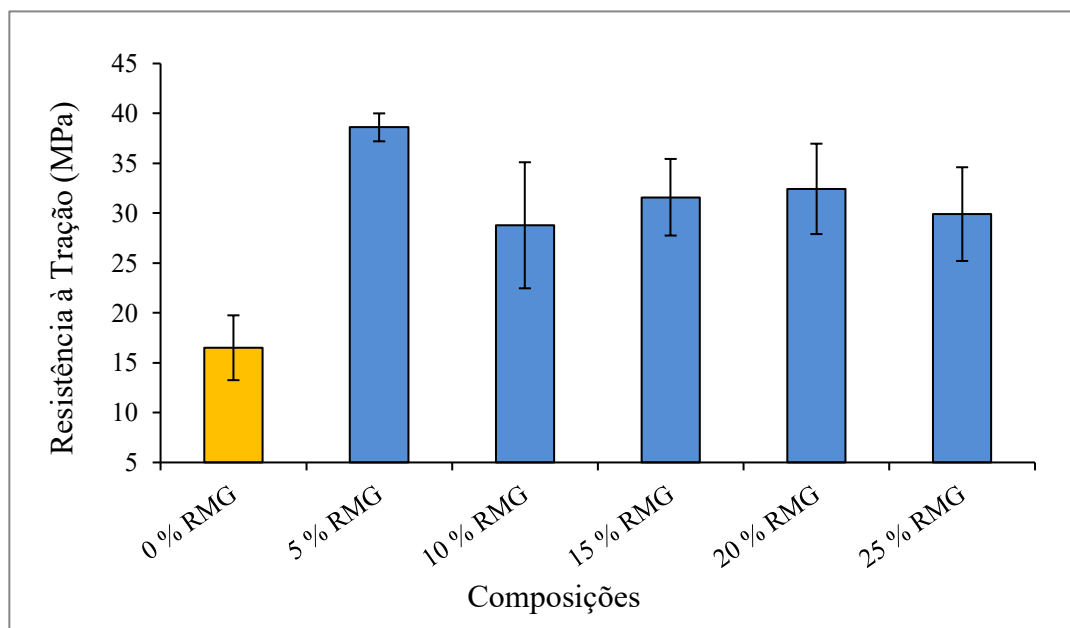
Os resultados apresentados na Tabela 10 para os materiais compósitos com carga de RMG na granulometria de 100 *mesh* mostram valores de resistência mecânica superior da matriz plena, a composição de 5 % RMG foi a que obteve o melhor resultado, demonstrando melhora de 133,94 % em relação à matriz plena. A configuração do compósito permitiu boa trabalhabilidade para a série granulométrica. Também pôde-se observar a alteração do comportamento das propriedades mecânicas de acordo com a incorporação de resíduo nos compósitos. Segundo Callister (2016), isto pode ocorrer devido a influência do aumento da resistência das interações das discordâncias na matriz entre partículas dispersas. Sabe-se que o acréscimo do teor particulado possibilita o aumento das propriedades mecânicas dos compósitos, e isto ocorre se a carga granulométrica contém partículas pequenas e distribuídas uniformemente na matriz polimérica. Barbosa *et al.* (2018) mostram em seu trabalho com agregados contendo resíduos de mármore, os resultados da eficiência da melhoria das propriedades de argamassa, possibilitando a produção de materiais de construção ao incluir areia contendo rejeito de mármore. Segundo Demartini (2017) e Saab (2017) as rochas ornamentais não naturais, como o mármore artificial possuem boa resistência mecânica, possuindo comportamento de material “elástico-plástico”, diferente do mármore natural que possui comportamento de material “frágil-elástico”. Cavalcante, Baltar e Sampaio (2005) indicam que a mica (mineral identificado no presente trabalho) é um mineral que apresenta boa resistência mecânica ao aquecimento.

Em relação ao módulo de elasticidade, ou a rigidez dos compósitos, que faz a medição entre a aplicação da tensão e a deformação sofrida pelo material, os resultados exibem, de forma geral, uma evolução linear variando de acordo com o aumento de proporção de RMG. A proporção de 10 % RMG atingiu o índice mais inferior, possibilitando a estimativa da precoce

ruptura do corpo de prova, salientando sua possível característica menos rígida. O maior resultado do módulo de elasticidade comparado à matriz plena é na proporção de 25 % RMG, limitando a linearidade do comportamento do módulo de elasticidade. Segundo Braga (2008), o comportamento não-linear do módulo de elasticidade é comumente encontrado em materiais heterogêneos como os compósitos, e esta propriedade irá depender de características como isotropia e anisotropia, que irão ser definidas de acordo com o processamento de fabricação do material.

A Figura 37 ilustra o comportamento da propriedade da resistência à tração através de um gráfico comparativo, que demonstra a variação do desempenho mecânico dos materiais compósitos com RMG na granulometria de 100 *mesh*.

Figura 37 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 100 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos com carga de RMG na granulometria de 200 mesh**

A Tabela 11 expõe os valores referentes aos resultados de caracterização mecânica dos materiais compósitos de RMG na granulometria de 200 *mesh*, onde exibiu valores para resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade para cada proporção de RMG.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 200 *mesh*

Composição	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0 % RMG	16,50 (±3,25)	1,88	1,57
5 % RMG	27,98 (±3,97)	2,30	2,19
10 % RMG	34,28 (±1,79)	2,81	2,20
15 % RMG	37,69 (±1,89)	2,82	2,41
20 % RMG	31,27 (±2,63)	2,66	2,12
25 % RMG	26,57 (±2,97)	1,87	2,56

Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 11 apresenta os resultados do ensaio de tração para os materiais compósitos de RMG na granulometria de 200 *mesh*. A fração do compósito que apresentou melhor resultado a resistência à tração foi a de 15 % RMG, sendo perceptível que a adição residual foi benéfica até certo ponto, tendo um acréscimo de 128,42 % de melhora em comparação à matriz plena. Este fato pode ter ocorrido devido ao aumento da porosidade aparente, visto que apresentou valores superiores a matriz plena, o que pode ter influenciado na distribuição da tensão ao longo do corpo de prova de maior fração, podendo justificar a diminuição da resistência à tração, tendo um decaimento de 61,03 %. As propriedades mecânicas para 200 *mesh* também não acompanharam um comportamento retilíneo crescente em relação às respectivas frações. Lima (2007) explica em seu trabalho com cargas minerais em polímeros que o declínio da atenuação do tamanho das partículas aumenta a área superficial das partículas e a adesão interfacial, ocasionando uma maior interação volumétrica no sistema partícula-partícula e partícula-polímero.

De acordo com Carvalho e Ribeiro (2013) no ensaio de impacto, o mineral de dolomita presente no mármore confere uma maior resistência mecânica e dureza no compósito quando comparado ao mineral calcita que apresenta baixa dureza. O comportamento contrário com inserção destes minerais em relação a resistência mecânica ocorre quando é aplicado o ensaio

de flexão. Já Ferreira (2017) em seu trabalho indica atenção ao teor da dolomita pois, apesar do mineral apresentar aumento significativo da rigidez, a grande quantidade de carga pode trazer um impacto negativo às propriedades mecânicas do material compósito, tornando-o mais frágil a ruptura.

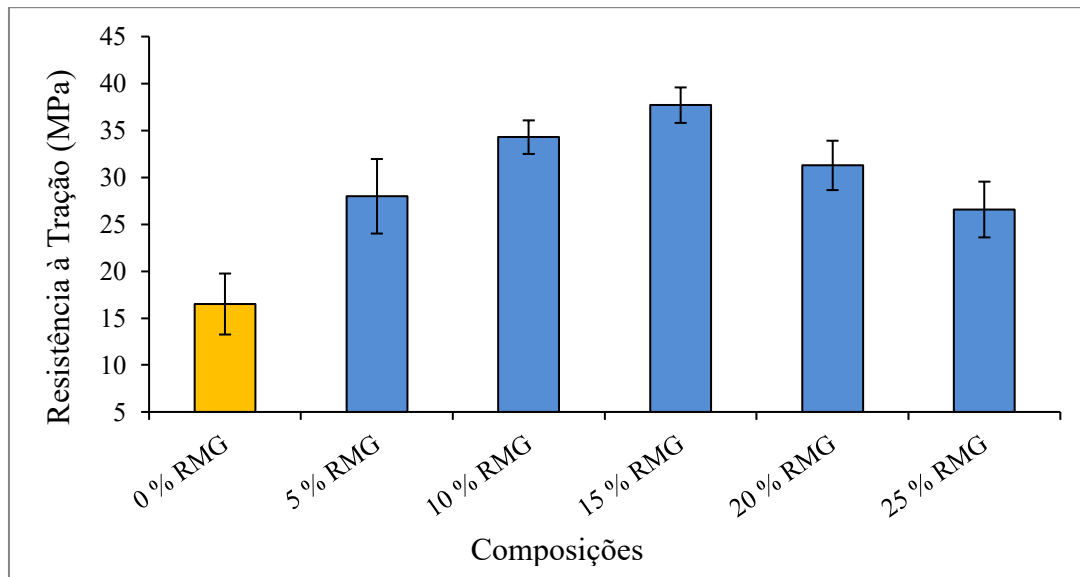
De acordo com os resultados obtidos no trabalho de Arruda e Ribeiro (2012), observa-se que o comportamento mecânico do material compósito pode estar relacionado com a formação e gênese das rochas que compõe o resíduo de mármore e granito, pois se tratam de rochas metamórficas, que no estado sólido, enfrentaram mudanças químicas, mineralógicas e também estruturais, apresentando assim alta dureza e resistência, o que possivelmente explica sobre a estruturação do comportamento da resistência mecânica no presente trabalho.

Referente ao comportamento do módulo de elasticidade, a faixa granulométrica apresentou um comportamento evolutivo em comparação a matriz plena, demonstrando características da resistência a deformação elástica do material. Segundo Callister (2016), em níveis baixos de tensão, a tração está diretamente ligada à deformação elástica, como é observado na proporção de 25 % RMG para o módulo de elasticidade.

Sendo assim, os resultados do ensaio físico podem indicar relação com o comportamento mecânico, haja vista que ao se adicionar RMG, enquanto houve uma diminuição das propriedades de AA e PA, a resistência mecânica aumentou conforme a adição do teor de resíduo (e vice-versa) da granulometria em questão.

A Figura 38 exibe o gráfico comparativo dos compósitos com RMG na granulometria de 200 *mesh*, no qual é possível observar o comportamento de resistência à tração dos materiais.

Figura 38 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 200 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos com carga de RMG na granulometria de 325 *mesh***

A Tabela 12 mostra os resultados mecânicos dos materiais compósitos de RMG na granulometria de 325 *mesh* onde se observa valores para resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade para cada proporção de RMG.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 325 *mesh*

Composição	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0 % RMG	16,50 (±3,25)	1,88	1,57
5 % RMG	36,19 (±5,81)	4,12	1,58
10 % RMG	31,55 (±6,67)	5,51	1,03
15 % RMG	26,00 (±4,90)	5,71	0,82
20 % RMG	24,64 (±4,25)	5,60	0,79
25 % RMG	27,11 (±0,57)	5,59	0,87

Fonte: Autoria própria (2020).

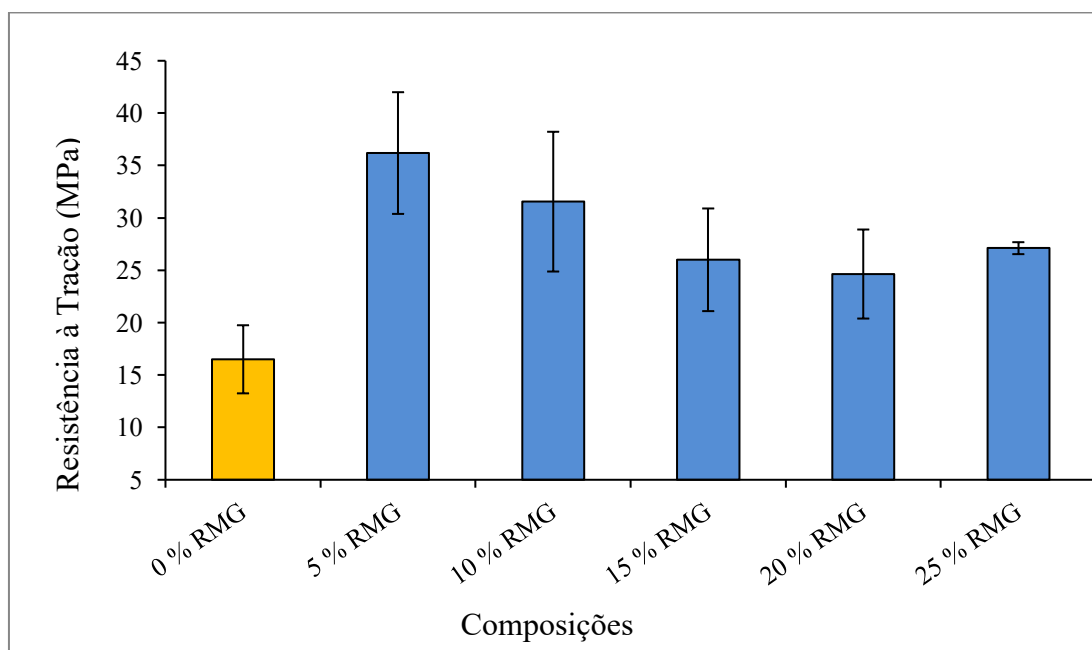
Os resultados apresentados na Tabela 12 expõe os dados das propriedades mecânicas referentes aos compósitos de RMG com granulometria de 325 *mesh*, sendo mostrado à proporção de 5 % RMG obtendo melhora de 119,33 % em comparação a matriz plena. A adição residual acompanha a resistência à tração, de forma que ao acrescentar resíduo o compósito indicou tendência a uma leve diminuição da resistência, retomando a força em 25 % RMG.

Uma explicação pode ser em decorrência da forma da trabalhabilidade ou molhabilidade do sistema matriz-carga, e por vezes o resíduo é capaz de se comportar como carga de enchimento e não como carga de reforço, deixando de influenciar a matriz polimérica segundo enuncia Carvalho *et al.* (2019) em seu trabalho sobre resíduos da construção civil e demolição em compósitos poliméricos. O comportamento mecânico do compósito do atual *mesh* pode ter sofrido influência dos minerais anteriormente identificados.

Em relação ao módulo de elasticidade dos compósitos, observa-se que houve diminuição gradativa até a fração de 20 % RMG, permanecendo inferior a matriz plena, mostrando a pouca rigidez mesmo com acréscimo de resíduo, concordando com o menor desempenho do comportamento mecânico em relação à resistência à tração também na mesma fração.

A Figura 39 mostra o gráfico dos compósitos de RMG de 325 *mesh*, no qual ilustra o comportamento da resistência mecânica em relação à adição de carga na matriz polimérica, dando ênfase a composição de 5 % RMG em relação à matriz plena.

Figura 39 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 325 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

- **Compósitos com carga de RMG na granulometria de 400 mesh**

A Tabela 13 apresenta os resultados de caracterização mecânica dos materiais compósitos de RMG na granulometria de 400 *mesh* mostrando valores para resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade para cada proporção de RMG.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração de compósitos de RMG 400 *mesh*

Composição	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0 % RMG	16,50 ($\pm 3,25$)	1,88	1,57
5 % RMG	30,75 ($\pm 5,09$)	7,75	0,71
10 % RMG	28,68 ($\pm 5,36$)	6,83	0,76
15 % RMG	23,27 ($\pm 1,60$)	5,43	0,77
20 % RMG	20,23 ($\pm 1,39$)	5,61	0,65
25 % RMG	22,09 ($\pm 1,82$)	4,64	0,86

Fonte: Autoria própria (2020).

Os compósitos de RMG na granulometria de 400 *mesh* são apresentados na Tabela 13, indicando os resultados da resistência mecânica, com destaque para a fração de 5 % RMG com uma melhora de 86,36 % em comparação a matriz plena. Percebe-se a redução substancial das propriedades mecânicas em comparação as demais granulometrias, com a possibilidade do surgimento de bolhas e falhas na homogeneização devido ao volume residual.

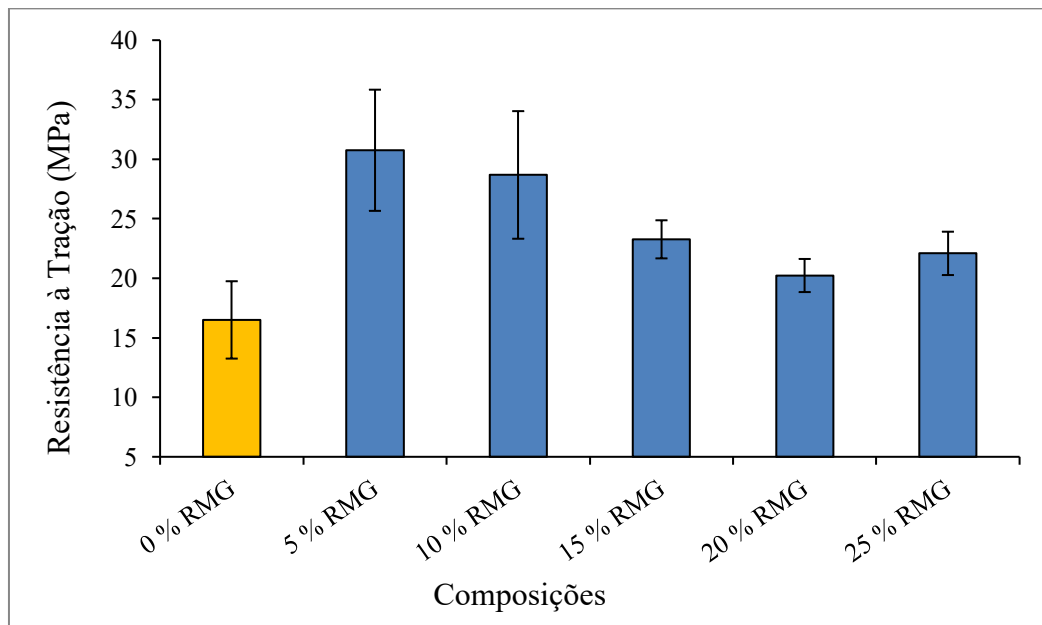
Já que o RMG contém quartzo (SiO_2), como já mencionado na caracterização mineralógica, indicando a sílica em forma livre cristalizada, o mineral pode exercer certa influência no comportamento de resistência à tração. Considerando a maior quantidade de grãos do resíduo na matriz, possivelmente logra-se um menor desempenho desta propriedade mecânica no compósito, pois a presença da sílica contribui negativamente para a redução da adesão interfacial, promovendo também a redução de volume da matriz. Portanto, havendo a chance da justificativa da relação do comportamento da propriedade mecânica de resistência à tração do presente compósito, o trabalho de Ferreira (2017) evidencia em seu estudo sobre compósitos híbridos reforçado com fibras de sisal/vidro e micropartículas de sílica, a confirmação dos seus resultados à redução da resistência mecânica à presença de sílica.

Em relação à propriedade do módulo de elasticidade, de modo geral, os compósitos de granulometria de 400 *mesh* tiveram um comportamento linear evolutivo, inversamente

proporcional a resistência à tração, porém, inferior a matriz plena, revelando a característica mais frágil para deformação a uma dada tensão. Estes compósitos podem ainda ter influência das propriedades físicas, de modo que se levou a identificar alterações do comportamento mecânico superior a matriz plena, para a proporção de 20 % RMG que obteve o menor desempenho das propriedades mecânicas. De acordo com Callister (2016) no módulo de elasticidade, há interações de ligações intermoleculares e intramoleculares em materiais submetidos a formas de tensão. Nos polímeros, estas interações são menores, e nestas diferentes ligações atômicas há atividades de estiramento das ligações interatômicas e interações em seus espaçamentos, o que pode induzir a resistência da deformação elástica e a não linearidade do comportamento da deformação elástica-módulo elástico.

Figura 40 apresenta o gráfico dos resultados dos compósitos de RMG de 400 *mesh*, indicando o comportamento da resistência mecânica em relação ao resíduo inserido como carga, e como destaque tem-se a fração de maior resistência que é a de 5 % RMG em comparação a matriz plena.

Figura 40 – Gráfico comparativo da resistência à tração dos compósitos na granulometria de 400 *mesh*



Fonte: Autoria própria (2020).

As propriedades mecânicas diante da caracterização dos compósitos com os resultados obtidos, apresentaram valores que revelaram a granulometria de 100 *mesh* como o compósito que obteve melhor comportamento e características mecânicas, em destaque à proporção de 5 % RMG com o resultado de 38,6 (MPa). As demais granulometrias apresentaram bons

resultados, por ordem crescente às granulometrias de 200 *mesh* e 325 *mesh*, variando na linearidade do comportamento entre resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade a medida das proporções mássicas. A granulometria de 400 *mesh* foi o compósito de menor desempenho mecânico e de precoce deformação sofrida antes da ruptura, possibilitando a influência da granulometria dos grãos, para a eficácia das propriedades mecânicas.

- **Tabela comparativa de resistência à tração dos compósitos com as literaturas**

A Tabela 14 apresenta os resultados mecânicos de melhores valores obtidos em relação à resistência mecânica dos compósitos com inserção de resíduos industriais, comparado com os materiais compósitos de mármore e granito fabricados deste trabalho.

Tabela 14 – Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos com resíduos citados na literatura

Constituintes	Fração mássica	Resistência à tração (MPa)	Literatura
RMG (100 <i>mesh</i>)	5 % RMG	38,60 (±1,40)	Neste trabalho
RMG (200 <i>mesh</i>)	15 % RMG	37,69 (±1,89)	Neste trabalho
RMG (100 <i>mesh</i>)	10 % RMG	38,62 (±1,31)	Barbosa <i>et al.</i> (2019)
Resíduo Industrial de Cobre (100 <i>mesh</i>)	40 % RC	40,25 (±1,88)	Borges (2018)
Lama Vermelha (100 <i>mesh</i>)	10 % LV	24,85 (±1,22)	Costa (2016)
Res. Const. Civil e Demolição (100 <i>mesh</i>)	10 % RCD	31,12 (±3,83)	Carvalho <i>et al.</i> (2019)
Rejeito Industrial de Caulim (100 <i>mesh</i>)	30 % Rca	31,44 (±4,39)	Cruz <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autoria própria (2020).

De acordo com a Tabela 14, outros materiais compósitos com inserção de carga residual tiveram bom comportamento mecânico dado a literatura, como é visto no trabalho de Costa (2016) no compósito com resina poliéster insaturada isoftálica com 10 % de lama vermelha (10 % LV), que atingiu resistência à tração de 24,85 (MPa). Contudo, outro material compósito apresentou-se com valor superior indicando maior resistência mecânica, e isto é observado no compósito com resina poliéster isoftálica insaturada com 10 % RCD (10 % de resíduos de construção e demolição com resultado de 31,12 (MPa)) presente no trabalho de Carvalho *et al.* (2019). Além disso, o compósito com resina poliéster com Rca 30 (30 % de rejeito industrial de caulim) se apresentou com melhor valor ao trabalho anterior, pois seu resultado de resistência mecânica foi de 31,44 (MPa), isto de acordo com os resultados do trabalho de Cruz *et al.* (2019). Superando os resultados anteriores, Barbosa *et al.* (2019) conseguiram obter resultado superior com o material compósito de matriz poliéster isoftálica de 10 % RMG (10 % de resíduo de mármore e granito) com valor de 38,62 (MPa) de resistência à tração. Todos os trabalhos obtiveram bons resultados, porém Borges (2018) supera em seus resultados da pesquisa sobre os compósitos com matriz polimérica isoftálica de 40 % RC (40 % de resíduo industrial de cobre) em que exibiu valor de resistência à tração de 40,25 (MPa).

Os resultados mecânicos se mantêm satisfatórios, porém os materiais do presente trabalho exibiram um dos melhores resultados mecânicos de resistência à tração, compósitos estes com proporção de 15 % RMG (15 % de resíduo de mármore e granito) na granulometria de 200 *mesh* e com proporção de 5 % RMG (5 % de resíduo de mármore e granito) de 100 *mesh* com valores de resistência de 37,69 (MPa) e 38,60 (MPa), respectivamente. Sendo assim, estes trabalhos obtiveram destaques favoráveis para o comportamento mecânico à tração.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Os compósitos de matriz polimérica produzidos pela técnica *hand lay-up* se denotaram viáveis para a fabricação com as granulometrias e as proporções estabelecidas, apresentando poucos defeitos e baixo custo.

A caracterização mineralógica do resíduo de mármore e granito foi eficiente para identificar as fases cristalinas do material, que apresentou a composição contendo principalmente os minerais de alta intensidade como o Quartzo, Mica e Albita. Também foi de possível detecção os minerais de baixa intensidade como o Dolomita e Calcita.

Em relação à morfologia do resíduo de mármore e granito, o MEV apresentou à estrutura do material residual, partículas de morfologia irregular e heterogênea com formato angular em todas as granulometrias. O refinamento das partículas mostra-se importante para visualizar em detalhes da morfologia e das características do RMG.

Os ensaios físicos exibiram aumentos para a propriedade de massa específica aparente para todas as composições e granulometrias. As propriedades de AA e PA sofreram variações de acordo com a adição de resíduo, com destaque para a granulometria de 325 *mesh* que manteve a propriedade de AA inferior da matriz plena em todas as composições.

O ensaio de flamabilidade mostrou resultados satisfatórios para todos os compósitos classificando-os em HB e atenderam especificações através das resoluções do CONTRAN/2014. Os compósitos na granulometria de 325 *mesh* na proporção de 10 % RMG adquiriram os melhores resultados para o ensaio, pois não entrou em ignição, obtendo assim melhor resistência à chama.

À análise do comportamento mecânico do compósito de RMG exibiu resultados satisfatório, no ensaio de resistência à tração, principalmente para o compósito na granulometria de 100 *mesh* na proporção de 5 % RMG, alcançando o valor de 38,60 (MPa). As demais granulometrias apresentaram variância na resistência à tração e no módulo de elasticidade conforme o aumento da proporção mássica em relação à matriz plena.

Diante dos resultados obtidos, verifica-se que a granulometria exerceu influência nas propriedades físico-mecânicas, dado a variabilidade do tamanho de grão a medida da alteração do comportamento nos ensaios realizados dos materiais compósitos.

Além do mais, constata-se que o compósito de matriz polimérica com inserção do resíduo de mármore e granito é viável à utilização e fabricação de baixo custo, baixo impacto ambiental, de peças alternativas com favoráveis propriedades a servir produtos de revestimento interno de

automóveis e na construção civil, como também na inserção em argamassas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Fabricar compósitos com diferentes matrizes poliméricas com diferentes sistemas de cargas.
- Fazer análise de propriedades mecânicas através de diferentes ensaios como flexão, compressão e impacto.
- Introduzir aditivos como retardante à chama na matriz polimérica dos materiais compósitos com o fim de potencializar a diminuição da propagação da chama.
- Verificar diferentes resíduos industriais nas faixas granulométricas e frações mássicas do presente trabalho, para explorar distintas propriedades.

REFERÊNCIAS

- ACCHAR, W. *et al.* Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science and Engineering A**, v. 419, p.306-309, 2006. DOI:10.1016/j.msea.2006.01.021
- AGNELLI, J. A. M. Boletim técnico: Glossário de termos aplicados a polímeros, Braskem PVC, n. 8, p. 9, 2000.
- AGUIAR, M. C.; SILVA, A. G. P.; GADIOLI, M. C. B. **Caracterização do resíduo de mármore para a fabricação de rocha artificial**. 22° CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016.
- AGUIAR, M. C. de. **Utilização de resíduo de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha**. 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.
- ALENCAR, C. R. A. **Rochas ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013.
- ALMEIDA. T. F.; LEITE. F. H. G.; HOLANDA. J. N. F. **Caracterização de resíduo de pó de mármore para aplicação em materiais cerâmicos**. 1° Encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro, 2015, Nova Friburgo. 2015.
- APOLINÁRIO, E. C de. A.; **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento portland**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, 2014.
- ARRUDA, C. M. R., RIBEIRO, R. C. da C. **Estudo da influência de resíduos de rochas carbonáticas ornamentais na geração de compósitos poliméricos**. XX - Jornada De Iniciação Científica - CETEM, 2012.
- ASTM D 2734. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.
- ASTM D 3039. **“Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric)”**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, EUA,2008.
- ASTM D 570. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.
- ASTM D 635. **"Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position"**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2010.
- ASTM D 792. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

AZEVEDO, A. R. G de. *et al.* Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. **Materials**. v.12, n. 9, p. 14, 2019. DOI:10.3390/ma12091449

BARBOSA, K. S. L. *et al.* **Compósito de matriz poliéster isoftálica com carga de resíduo de mármore e granito**. 74º Congresso Anual da ABM, 2019.

BARBOSA, K. S. L. **Incorporação de fibras curtas de bambu (*bambusa vulgaris*) e resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica: resistência à tração e fractografia**. 2018. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

BARBOSA, M. T. G. *et al.* High quality of mortar with marble waste aggregate. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 387-399, 2018. doi.org/10.1590/s1678-86212018000200260.

BARROS, P. G dos. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, 2008.

BESSA, M. L. T. **Estudo da dispersão e adesão de micropartículas de diamante em formulação de compósitos epoxídicos**. 2017. 104 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

BEZERRA, F. D. **Rochas Ornamentais: Novas perspectivas de investimento**. ETENE nº 21, 2017.

BORGES, D. R. **Influência do uso de fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) tratadas quimicamente em compósitos de polímero termofixo carregadas com resíduo da indústria do beneficiamento de minério de cobre**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

BRAGA, G. E. **Influência do módulo de elasticidade na mudança de estado de cabos suspensos em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. 2008. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

C, S. Poliéster Insaturado. **Silaex**, 2018. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>>. Acesso em 25 de janeiro de 2020.

CAETANO, M. J. L. **Flamabilidade: Ensaio de Resistência à Chama**. **CTB**, 2011. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-termicas/flamabilidade/ensaios-de-resistencia-a-chama/>>. Acesso em: 03 de setembro de 2020.

CALLISTER JR, W.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. 9ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARVALHO, F. V.; RIBEIRO, R. C. C. Relação da interação do polipropileno com minerais na resistência mecânica do compósito gerado. In: XXI JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 21. Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

CARVALHO, P. R. C. *et al.* **Utilização de resíduos da construção civil e demolição em compósitos poliméricos: características físicas, mecânicas e de flamabilidade.** 6º Encontro nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil – ENARC, 2019.

CAVALCANTE, A. P.; CANTO, L. B. Uso de resíduo industrial a base de resina fenólica como carga para o polipropileno. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 3, p. 245-252, 2012. DOI.org/10.1590/S0104-14282012005000031.

CAVALCANTE, P. M. T.; BALTAR, C. A. M.; SAMPAIO, J. A. Mica. In: **Rochas & minerais industriais: usos e especificações.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap.25. p.531-544.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução n°. 498 – "**Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos automotores nacionais e importados.**", 29 de julho de 2014.

COSTA, D. S. da. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais.** 2016. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

COSTA, D. S. da. *et al.* **Aproveitamento da lama vermelha e fibras vegetais (sisal e juta) em compósitos poliméricos.** 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2016.

CRUZ, D. C. P. *et al.* **Análise comparativa do ensaio mecânico de tração em compósito polimérico com carga industrial de caulim e lama vermelha.** Cobec IC – Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2019.

DALPIAZ, G. **Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEMARTINI, T. J. da C. **Produção e caracterização de mármore artificial com resíduo fino de mármore dolomítico beneficiado em teares de lâminas diamantadas.** 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

DHANAPANDIAN, S.; GNANAVEL, B. Studies on granite and marble sawing powder wastes in industrial brick formulations. **Asian Journal of Applied Sciences.** Malaysia, vol 2, p. 331-440, 2009.

FERREIRA, B. T. **Compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal/vidro e micropartículas de sílica.** 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2017.

- FERREIRA, F. L. Q. **Produção e caracterização de nanocompósitos híbridos de nanotubos de carbono e dolomita em poliéster para aplicação em dispositivos de sinalização viária.** 2017. 87 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- FONSECA, M. H. de F. *et al.* **Estudo da influência da porosidade em materiais cerâmicos.** 22° CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016.
- GAMA, D. P. N. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche.** 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- GOMES JÚNIOR, P. G. B. G. *et al.* **Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem nas propriedades físicas de compósitos constituídos de cimento, resíduo de celulose e flakes de pet.** Anais do XXI ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais, 2018.
- GORNINSKI, J. P. **Estudo da influência das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica e do teor cinza volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto polímero.** 2002. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- HADDAD, L. D. *et al.* **Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento.** **Ciência & Engenharia.** v. 25, n. 1, p. 07 – 16, 2016.
- INSTITUTO MINERE. **Espírito Santo: O Estado das rochas.** 2017. Disponível em: <<https://institutominere.com.br/blog/espírito-santo-o-estado-das-rochas>> Acesso em 20 março de 2020.
- JARZABEK, D. M. *et al.* The influence of the particle size on the adhesion between ceramic particles and metal matrix in MMC composites. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 25, n. 8, p. 7, 2016. DOI: 10.1007/s11665-016-2107-3.
- LAMULT. **Difratômetro de Raios-X – D2 Phaser Bruker.** Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/lamult/acervos-de-equipamentos/outros-acervos-ifgw/acervo-deq-lab108/difratometro-de-raios-x-d2-phaser-bruker/>>. Acesso em 3 de setembro de 2020.
- LEITE, M. C. *et al.* Ensaio de tração mecânica e análise metalográfica do aço SAE 1045. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 02, n. 01, p. 83-93, jan./ago. 2017.
- LIMA, A. B. T. L. **Aplicações de cargas minerais em polímeros.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, 2007.
- LIMA, S. C. **Estudo da técnica de difração de raios-x.** 2006. 69 f. Trabalho Acadêmico de Final de Curso (Graduação) – Departamento de física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2006.

- LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.
- LOVATO NETO, C. **Simulação numérica da laminação a frio no laminador Sendzimir número 2 da Acesita.** 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.
- MARTINS, S. **Resíduo da fabricação de catalisadores de FFC utilizado como retardante de chamas em PEAD reciclado.** 2017. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais – PPCTM) – Instituto Nacional de Tecnologia, Centro Universitário da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2017.
- MELO, P. M. A. de. **Compósitos particulados de polietileno de alta densidade e concha de molusco: Efeito do teor e da granulometria.** 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, 2013.
- MENDES, B. H. A. **Estudo da influência da incorporação de resíduo de beneficiamento de caulim nas propriedades de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*).** 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- MORAES, I. V. M. de. **Mármore e Granito: Lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos.** Dossiê técnico. Serviço brasileiro de respostas técnicas. Rio de Janeiro, 2006.
- MORAES, M. H. M. de. *et al.* **Avaliação mecânica e resistência à chama de resíduos de cinzas volantes e mármore-granito em compósitos poliméricos.** 74º Congresso Anual da ABM, 2019.
- MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Revista Escola de Minas.** v. 64, n. 2, p. 147-154, 2011. DOI.org/10.1590/S0370-4672011000200003
- MACÊDO NETO, C de. M. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço.** 2016. 76 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- MACIEL, N. de O. R. **Análise mecânica comparativa de tração, flexão e impacto entre compósitos reforçados com fibras de Curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro.** 2017. 119 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2017.
- NOGAMI, L. **Investigação da influência das características petrográficas e da rugosidade de placas de “granitos e mármore” fixadas com argamassa.** 2013. 117 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São

Paulo, São Carlos, 2013.

NBR 7181 – 2018 "**Solo – Análise granulométrica**", Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

OLIVEIRA, L. S. de. **Reaproveitamento de resíduos de marmoraria em compósitos cimentícios**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2015.

PASSATORE, C. R. **Química dos polímeros – 3º módulo – técnico em química**, 18 de out. de 2013. 84 f. Plano de Aula. PDF.

PEREIRA, T. G. T. **Compósitos produzidos com resina poliéster e fibras de eucalipto tratadas termicamente**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

PINTO, K. N. C. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. 2002. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência na área de tecnologia nuclear - materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

POLETTO, M. Mechanical, dynamic mechanical and morphological properties of composites based on recycled polystyrene filled with wood flour wastes. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, v. 19, n. 4, p. 433 - 442, 2017. DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000301.

PR Grupo Paraná. Líder em extração, industrialização e distribuição de rochas ornamentais no Brasil e também no exterior. **IARQ**, 2018. Disponível em: <<http://www.iarq.com.br/pr-grupo-parana/>>. Acesso em: 25 jan. 2020.

RAMOS, J. E. **Polímeros**. Universidade Federal do Semi-Árido, 2017. 81 slides. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/12810830/>>. Acesso em: 25 jan. 2020.

REIS, I. M. **Influência da granulometria do resíduo de mármore e granito em compósitos poliméricos com fibras vegetais de sisal**. 2019. 73 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2019.

RIBEIRO, L. M. *et al.* Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (PALF). **HOLOS**, v.01, p. 115-126, 2013.

RIBEIRO, R.P. **Influência das características de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos**. 2005. 132 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, 2005.

RODRIGUES, D. N. **Influência da adição de resíduo de mármore e granito em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de côco**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

SÁ, R. F. **Análise da água utilizada no processo de desdobramento das rochas ornamentais de uma empresa em Campina Grande – PB.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

SAAB, J. S. de. **Produção e caracterização de compósitos de rocha ornamental (mármore) e matriz polimérica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SANTOS, I. F. *et al.* **Reciclagem de resíduos de mármore e granito em matrizes poliméricas.** XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, 2014.

SANTOS, N. R. G. dos. **Caracterização mecânica, térmica e acústica de um compósito que utiliza rejeitos de mármore, granito e eps para a fabricação de blocos para a construção civil.** 2014. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, I. L. A. da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta.** 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2014.

SPALA, S. T. *et al.* **Caracterização tecnológica de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais para seu uso em concreto.** XXV Jornada de Iniciação Científica em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2017.

SPINACÉ, M. A. da S.; DE PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros.** Quim. Nova, Campinas, vol. 28, no. 1, p. 65-72, 2005.

STURARO, J. R. **Apostila de geoestatística básica.** UNESP. Rio Claro, 2015. 34 p.

TAGUCHI, S. P. *et al.* **Caracterização física e química do resíduo granítico iberê e crema boudeax, iberê golden e twilight proveniente do corte utilizando multifios.** 20° CBECiMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012.

TIBILETTI, L. *et al.* Thermal degradation and fire behaviour of unsaturated polyesters filled with metallic oxides. **Polymer Degradation and Stability**, v. 96, n.1. p. 67-75, 2011.

VARGAS, V. *et al.* Rochas Ornamentais do Brasil, seu modo de ocorrência geológica, variedade tipológica, exploração comercial e utilidades como materiais nobres de construção. **Revista de Geociências**, Maracanã, 2-2, p. 119-132, 2001.

VIVALDINI, D. O. *et al.* **Revisão: fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho.** Cerâmica, São Paulo, v. 60, n. 354, p. 297-309, jun. 2014.