



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE
UM COMPÓSITO COM RESINA DE POLIÉSTER E
CARGA DE PÓ DE CIMENTO

EDINESIO JALES DA SILVA

NATAL - RN, 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE
UM COMPÓSITO COM RESINA POLIÉSTER E
CARGA DE PÓ DE CIMENTO

EDINESIO JALES DA SILVA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

NATAL – RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Edinesio Jales da.

Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito com resina poliéster e carga de pó de cimento / Edinesio Jales da Silva. - 2020.

77 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

1. Compósitos poliméricos - Tese. 2. Cimento - Tese. 3. Resina de poliéster - Tese. 4. Pedra artificial - Tese. I. Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 677: 666.942

OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM COMPÓSITO COM RESINA POLIÉSTER E CARGA DE PÓ DE CIMENTO

EDINESIO JALES DA SILVA

Tese **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Banca Examinadora da Tese

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof^a. Dra. Amanda Melissa Damiano Leite

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. Marcello Filgueira

Universidade Estadual do Norte Fluminense - Avaliador Interno

Prof. Dr. Luiz Guilherme Vieira Meira de Souza

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Avaliador Externo

Prof. Dr. Jonathan Paulo Pinheiro Pereira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – Avaliador Externo

NATAL, 05 de novembro de 2020.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela força, coragem, por estar comigo, principalmente nos momentos mais difíceis da minha vida, sempre iluminando e guiando meus passos.

Não poderia deixar de dar um agradecimento especial ao meu orientador o *Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza*, pela oportunidade e ensinamentos transmitidos através de suas experiências e seus conhecimentos na área. Por acreditar no meu esforço, sendo paciente durante toda minha trajetória. Meu muito obrigado e toda minha gratidão.

Ao *Prof. Dr. Luiz Guilherme Vieira Meira de Souza* pelas horas dedicadas durante a correção do inglês e todos os esclarecimentos durante o desenvolvimento desse Trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM/UFRN, pela oportunidade de obtenção do Título de Doutor.

Ao secretário do PPGEM/UFRN *Luiz Henrique* pelo apoio dedicado no decorrer do Doutorado.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, por proporcionarem conhecimentos para o aprimoramento dos alunos.

Agradecer ao funcionário do LMHES, *Aldo Paulino*, pelo profissionalismo e toda colaboração dada.

Aos colegas de Pós-Graduação da UFRN, em especial a *Amanda Cavalcante* e *Raimundo Neto*, por estarem sempre presentes e contribuindo uns com outros.

Quero agradecer a todos os meus familiares pelo apoio e incentivo, especialmente, aos meus pais *Damião Atanásio da Silva* (in memoriam) e *Maria José da Silva*, e aos meus irmãos. Serei eternamente grato a vocês que sempre acreditaram em mim.

A todos que participaram, de maneira direta ou indireta, na elaboração deste trabalho. Muito obrigado!

*“Educar é colher com sabedoria e
colher com paciência”.*

Augusto Cury

SILVA, E. J. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito com resina poliéster e carga de pó de cimento.** 2020. 97 p. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

Resumo

Foram estudados os processos de obtenção e caracterização de compósitos poliméricos com resina (R) poliéster e carga de cimento (C). Os compósitos foram definidos pela razão mássica entre cimento e resina: C₁ - 1,0 R + 0,25 C, C₂ - 1,0 R + 0,50 C, C₃ - 1,0 R + 0,75 C e C₄ - 1,0 R + 1,0 C. O método de fabricação usado foi o de moldagem fechada por compressão úmida a frio. Tais compósitos foram caracterizados para determinação de suas propriedades mecânicas, térmicas, densidade, absorção de água e envelhecimento. O compósito com maior viabilidade econômica foi o C₄. Verificou-se que o cimento apresentava função de carga de enchimento. Todos os compósitos apresentaram menores resistências mecânicas que a matriz, com diminuição proporcional ao aumento da quantidade de pó de cimento, com perda de 50% na tração, 78% na flexão e 11,54% no impacto para o C₄. Como aplicação do material produzido foram fabricados uma mesa de 1,5 m² e um banco com o compósito C₄. O custo de fabricação da pedra artificial da mesa foi 35% menor que o de uma de mármore ou granito, o que demonstrou a viabilidade econômica da aplicação do compósito proposto.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos, cimento, resina de poliéster, pedra artificial.

SILVA, E. J. **Obtaining, characterizing and applying a composite with polyester resin and cement powder loading.** 2020. 97 p. Doctoral Thesis in Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

Abstract

The processes for obtaining and characterizing polymeric composites with resin (R) polyester and cement filler (C) were studied. The composites were defined by the mass ratio between cement and resin: $C_1 - 1.0 R + 0.25 C$, $C_2 - 1.0 R + 0.50 C$, $C_3 - 1.0 R + 0.75 C$ and $C_4 - 1.0 R + 1.0 C$. The manufacturing method used was closed molding by cold wet compression. Such composites were characterized to determine their mechanical, thermal, density, water absorption and aging properties. The most economically viable composite was C_4 . It was found that the cement had a filling load function. All composites showed lower mechanical strengths than the matrix, with a proportional decrease with the increase in the amount of cement powder, with a 50% loss in traction, 78% in flexion and 11.54% in impact for the C_4 . As an application of the produced material, a 1.5 m² table and a bench with the composite C_4 were manufactured. The cost of manufacturing the artificial stone of the table was lower than that of marble or granite, which demonstrated the economic viability of applying the proposed composite.

Keywords: Polymeric composites, cement, polyester resin, artificial stone.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema das características geométricas espaciais das partículas dos compósitos. | 14 |
| Figura 2 - Classificação de materiais compósitos. | 14 |
| Figura 3 - Classificação de materiais compósitos conforme o tipo de matriz. | 15 |
| Figura 4 - Reação da resina cristal formando polímero..... | 17 |
| Figura 5 - Mero da resina poliéster ortoftálica. | 18 |
| Figura 6 - Molde metálico 01 utilizado na fabricação dos corpos de prova dos ensaios de resistência à tração e à flexão. | 26 |
| Figura 7 - Molde metálico 02 utilizado na fabricação dos corpos de prova dos ensaios de resistência ao impacto. | 26 |
| Figura 8 - Molde metálico 03 utilizado na fabricação dos corpos de prova do ensaio de propriedades térmicas. | 27 |
| Figura 9 - Prensa hidráulica MARCON – MPH10..... | 28 |
| Figura 10 - Etapas do processo de fabricação das placas dos compósitos para produção dos corpos de prova para ensaios de caracterização..... | 29 |
| Figura 11 - Fluxograma dos ensaios de caracterização dos compósitos e da resina poliéster..... | 31 |
| Figura 12 – Corpos de prova para todos os ensaios de caracterização dos compósitos e da resina poliéster. | 31 |
| Figura 13 - Máquina universal utilizada nos ensaios de tração e flexão (a) e pêndulo analógico para ensaio de impacto (b)..... | 32 |
| Figura 14 - CPs do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de tração. | 33 |
| Figura 15 – CPs do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de flexão..... | 34 |
| Figura 16 – CPs do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de impacto..... | 34 |
| Figura 17 – O densímetro digital DSL 910 (a), os corpos de prova do compósito (b) e da resina (c) no ensaio de densidade..... | 35 |
| Figura 18 - Algumas etapas dos ensaios de absorção de água destilada e de água do mar. | 36 |
| Figura 19 - Analisador KD2 PRO (a) utilizado para o levantamento das propriedades térmicas, dos corpos de prova do compósito (b) e da resina (c) no ensaio de análise térmica. | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - Corpos de prova dos compósitos e de resina poliéster submetidos ao ensaio de envelhecimento. | 38 |
| Figura 21 - Analisador térmico utilizado no ensaio de TGA. | 39 |
| Figura 22 - Equipamentos para análise de microestrutura - MEV. | 40 |
| Figura 23 - Etapas do processo de fabricação do tampo de mesa. | 41 |
| Figura 24 - Etapas do processo de fabricação do tampo do banco: a) molde preenchido com compósito e b) compósito após a cura. | 42 |
| Figura 25 - Amostras do teste de envelhecimento. a) Antes do ensaio de envelhecimento b) após um ano expostas às variações das condições climáticas..... | 52 |
| Figura 26 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado numa amostra da resina poliéster. | 53 |
| Figura 27 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C ₁ | 53 |
| Figura 28 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C ₂ | 54 |
| Figura 29 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C ₃ | 54 |
| Figura 30 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C ₄ | 55 |
| Figura 31 - Micrografia da resina poliéster ampliada em 1000 vezes. | 58 |
| Figura 32 - Micrografia no compósito C ₁ ampliada em 1000 vezes. | 59 |
| Figura 33 - Micrografia no compósito C ₂ ampliada em 1000 vezes. | 60 |
| Figura 34 - Micrografia no compósito C ₃ ampliada em 200 vezes. | 61 |
| Figura 35 - Micrografia no compósito C ₄ ampliada em 200 vezes. | 62 |
| Figura 36 - Conjunto de mesa e banco fabricado no LMHES com compósito C ₄ | 64 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tipos de resina poliéster. | 17 |
| Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland..... | 19 |
| Tabela 3 – Tipos e composição dos cimentos Portland. | 21 |
| Tabela 4 - Propriedades da resina poliéster ortoftálica. | 25 |
| Tabela 5 – Nomenclatura utilizada para os compósitos produzidos..... | 29 |
| Tabela 6 - Dimensões e quantitativos dos corpos de prova e normas utilizadas nos ensaios de caracterização..... | 30 |
| Tabela 7 - Resultados dos parâmetros do ensaio de resistência à tração dos compósitos e da resina poliéster. | 43 |
| Tabela 8 - Resultados dos parâmetros do ensaio da resistência à flexão dos compósitos e da resina poliéster. | 45 |
| Tabela 9 - Resultados da energia de absorção de impacto dos compósitos e da resina poliéster..... | 46 |
| Tabela 10 - Resultados da densidade dos compósitos e da resina poliéster. | 47 |
| Tabela 11 - Resultados do ensaio de absorção de água destilada e água do mar nos compósitos e na resina poliéster. | 48 |
| Tabela 12 - Resultados das propriedades térmicas dos compósitos e da resina poliéster..... | 49 |
| Tabela 13 - Resultados da variação da perda de massa no ensaio de envelhecimento dos compósitos e resina poliéster. | 51 |
| Tabela 14 - Valores de temperatura onset, temperatura de pico e perda de massa dos compósitos e da resina..... | 56 |
| Tabela 15 - Perda de massa para vários níveis de temperatura dos compósitos e da resina poliéster. | 57 |
| Tabela 16 - Comparativo entre tampos de mesa de compósito, mármore, granito e vidro..... | 63 |

Listas de Abreviaturas e Siglas

| | |
|----------------------|---|
| ABNT | - Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | - <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| C₁ | - 1,0 R + 0,25 C (100% Resina + 25% Cimento) porcentagem de massa |
| C₂ | - 1,0 R + 0,50 C (100% Resina + 50% Cimento) porcentagem de massa |
| C₃ | - 1,0 R + 0,75 C (100% Resina + 75% Cimento) porcentagem de massa |
| C₄ | - 1,0 R + 1,0 C (100% Resina + 100% Cimento) porcentagem de massa |
| C x L x E | - Comprimento x Largura x Espessura |
| CPs | - Corpos de prova |
| CPV ARI | - Cimento Portland de alta resistência inicial |
| DEM | - Departamento de engenharia mecânica |
| DTG | - Termogravimetria derivada |
| EPS | - Poliestireno expandido; |
| IFRN | - Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte |
| LMHES | - Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar |
| MDF | - <i>Medium Density Fiberboard</i> |
| MEV | - Microscopia eletrônica de varredura |
| PPGEM | - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica |
| PVC | - Cloreto de polivinila |
| RPM | - Resíduos de pó de mármore |
| RT | - Resistência à tração |
| SI | - Sistema Internacional de Unidades |
| TGA | - Termogravimétrica |
| UFRN | - Universidade Federal do Rio Grande do Norte |
| UV | - Ultravioleta |

Lista de Símbolos

| | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Ab_{H₂O} | - Absorção de água |
| % | - Porcentagem |
| " | - Polegada |
| μm | - Micrometro |
| °C | - Grau Celsius |
| C | - Cimento |
| CTV | - Capacidade térmica volumétrica |
| °C/min | - Grau Celsius por minuto |
| °C.cm/W | - Grau Celsius centímetro por Watt |
| D | - Difusividade térmica |
| G | - Grama |
| GPa | - Gigapascal |
| g/cm³ | - Grama por centímetro cúbico; |
| J | - Joule |
| J/cm² | - Joule por centímetro quadrado |
| K | - Condutividade térmica |
| Kg | - Quilograma |
| kg/hab/ano | - Quilograma por habitante por ano |
| M | - Metro |
| m² | - Metro quadrado |
| MJ/ m³.K | - Mega Joule por metro cúbico Kelvin |
| MPa | - Mega Pascal |
| mm | - Milímetro |
| mm²/s | - Milímetro quadrado por segundo |
| ml/min | - Mililitro por minuto |
| Min | - Minuto |
| R | - Resina |
| P | - Resistividade térmica |
| W/m.k | - Watt por metro Kelvin |

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução..... | 10 |
| 1.1. Objetivos..... | 12 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 12 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 12 |
| 2. Revisão Bibliográfica..... | 13 |
| 2.1. Materiais Compósitos | 13 |
| 2.1.1. Caracterização de Materiais Compósitos..... | 15 |
| 2.2. Resinas..... | 16 |
| 2.2.1. Resinas Sintéticas..... | 16 |
| 2.2.1.1. Resina Poliéster..... | 17 |
| 2.3. Cimento Portland..... | 18 |
| 2.3.1. Composição do Cimento Portland..... | 19 |
| 2.3.2. Tipos de Cimento Portland..... | 20 |
| 2.4. Utilização de compósitos para fabricação de pedras artificiais..... | 21 |
| 3. Materiais e Métodos | 24 |
| 3.1. Materiais | 24 |
| 3.1.1. Cimento Portland..... | 24 |
| 3.1.2. Resina Poliéster | 24 |
| 3.1.3. Desmoldante | 25 |
| 3.1.4. Moldes Metálicos..... | 25 |
| 3.1.4.1. Molde 01 | 25 |
| 3.1.4.2. Molde 02..... | 26 |
| 3.1.2.3. Molde 03..... | 27 |
| 3.1.5. Balança de Precisão | 27 |
| 3.1.6. Serra Elétrica de Bancada | 27 |
| 3.1.7. Prensa Hidráulica..... | 28 |
| 3.2. Métodos..... | 28 |
| 3.2.1. Processo de Obtenção dos Compósitos | 28 |
| 3.2.2. Ensaio Mecânicos | 32 |
| 3.2.2.1. Ensaio de Resistência à Tração | 32 |
| 3.2.2.2. Ensaio de Resistência à Flexão..... | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.2.3. Ensaio de Impacto Charpy..... | 34 |
| 3.2.3. Ensaio de Densidade | 35 |
| 3.2.4. Ensaio de Absorção de Água Destilada e de Água do Mar..... | 35 |
| 3.2.5. Ensaio de Análise Térmica..... | 37 |
| 3.2.6. Ensaio de Envelhecimento Natural | 38 |
| 3.2.7. Ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA) | 39 |
| 3.2.8. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 39 |
| 3.2.9. Aplicação do Compósito..... | 40 |
| 3.2.9.1. Fabricação da Mesa | 40 |
| 3.2.9.2. Fabricação do Tampo de Banco..... | 42 |
| 4. Resultados e Discussões | 43 |
| 4.1. Ensaio Mecânicos | 43 |
| 4.1.1. Ensaio de Resistência à Tração..... | 43 |
| 4.1.2. Ensaio de Resistência à Flexão | 45 |
| 4.1.3. Ensaio de Impacto Charpy | 46 |
| 4.2. Ensaio de Densidade Aparente | 47 |
| 4.3. Ensaio de Absorção de Água Destilada e Água do Mar | 48 |
| 4.4. Ensaio de Análise Térmica | 49 |
| 4.5. Ensaio de Envelhecimento Natural | 50 |
| 4.6. Ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA)..... | 52 |
| 4.7. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 57 |
| 4.8. Fabricação da Mesa e do Banco | 63 |
| 5. Conclusões e Sugestões | 65 |
| 5.1. Conclusões | 65 |
| 5.2. Sugestões..... | 66 |
| 6. Referências Bibliográficas | 67 |

1. Introdução

Há poucos anos, os puristas na área dos compósitos só admitiam que um material fosse assim denominado se apresentasse resistência mecânica mais elevada que a da matriz utilizada. O uso de materiais compósitos tem ganhado dimensão significativa em várias áreas industriais no mundo, automobilística, naval, aeronáutica, balística e artesanal. Tal inserção tem se tornado prioridade por características de boa estética, apropriadas resistências mecânicas, leveza e significativas resistências térmica e acústica (SOUZA, 2019).

A diminuição da massa de componentes industriais tem sido uma vertente bastante buscada por novos materiais que apresentem características próprias para cada aplicação.

Nesse sentido os compósitos poliméricos, cerâmicos e metálicos têm ganho espaço em eventos científicos, destacando-se os que utilizam resíduos industriais e materiais reutilizáveis.

Nos compósitos poliméricos, as matrizes mais utilizadas tem sido as de poliéster, polipropileno, epóxi, látex, poliuretano de petróleo e de mamona, com maior destaque para a resina poliéster em função de seu baixo custo, fácil processabilidade, rápida cura e boa estética. Para ter uma ideia mais precisa, 1,0 quilograma de resina poliéster custa cerca de 20% do relativo à resina epóxi.

O estudo de pedras artificiais é largamente abordado pela literatura utilizando principalmente resíduos industriais. Tais propostas visam a retirada do ambiente de produtos altamente nocivos e de grande tempo de vida útil, contribuindo para a preservação da natureza. O armazenamento de resíduos de mármore, granito e vidro causa problemas ambientais muito significativos (COSTA, 2017).

As principais vantagens das pedras artificiais obtidas com materiais compósitos poliméricos são a significativa diminuição de massa em relação ao mármore e granito e o menor custo de fabricação. Apesar de terem menor massa e menor custo apresentam estética apreciável, conforme já foi demonstrado em outros estudos (RIBEIRO, 2015; COSTA, 2017).

O cimento Portland é um material mundialmente utilizado de forma massiva para a construção civil, na edificação de residências capazes de propiciar abrigo e conforto ao ser humano. Porém a indústria de cimento é caracterizada pela elevada

emissão de gases poluentes durante seu processo de produção, sendo o dióxido de carbono (CO₂) um dos mais preocupantes. Atualmente a indústria cimentícia vem desenvolvendo novas tecnologias para diminuir o impacto causado ao ambiente pela emissão de poluentes atmosféricos (BELATO, 2013).

O cimento pode ser definido como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, obtido da calcinação e clinquerização da mistura de calcário e argila. Todos os cimentos Portland em geral são utilizados na fabricação de blocos de concreto, pois possuem propriedades adesivas e coesivas quando misturados com água, e são capazes de unir e aglomerar fragmentos como areia, cal, entre outros, de modo a formar um único compacto (IZQUIERDO, 2011).

No Brasil 60% do cimento comercializado é vendido em sacos de cinquenta quilos, sendo usado para construções e reformas. Em razão dos consumidores não perceberem as diferenças entre um tipo e outro, os revendedores comercializam geralmente apenas um tipo, o CP-II (Lima, 2011).

Este estudo consistiu em obter compósitos de matriz de resina de poliéster e carga de pó de cimento. Tais compósitos podem ser aplicados na fabricação de estruturas de baixa solicitação de carga, como mesas, cadeiras, prateleiras e painéis, apresentando características de maior leveza, de boa estética, com menor custo e competitivos em relação ao mármore, granito e vidro.

Os ineditismos do trabalho consistiram em obter um compósito derivado da combinação das duas matrizes, uma polimérica (resina poliéster) e outra cerâmica (cimento) e estudar de forma combinada às vertentes mecânica, térmica e de envelhecimento.

A presença de compósitos utilizando cimento de alta resistência em matriz polimérica não foi encontrada na literatura especializada. A ideia da obtenção de um compósito com duas matrizes, resina poliéster e pó de cimento representa uma inovação científica.

Em função do baixo custo do cimento e da possibilidade de o percentual de carga alcançar até 100% em relação a matriz de resina polimérica, tende a gerar um compósito bastante competitivo principalmente em relação ao mármore, granito e vidro.

Uma das aplicações do compósito proposto é a produção de pedras artificiais para substituir o mármore, o granito e o vidro tão utilizados em residência. Pretende-se fabricar estruturas e compará-las com as fabricadas com os materiais

convencionalmente utilizados, sendo parâmetros de comparação a massa, a qualidade estética e o custo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Obter, caracterizar e avaliar as viabilidades de aplicação de um compósito com resina de poliéster e carga de pó de cimento Portland tipo CP V-ARI.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Obter o compósito com resina poliéster e pó de cimento Portland CP V-ARI;
2. Definir a quantidade mássica máxima do pó de cimento a ser misturado na resina;
3. Definir as formulações dos compósitos, proporções mássicas do pó de cimento contido na resina poliéster;
4. Fabricar as placas dos compósitos e da resina poliéster para a retirada dos corpos de prova para os ensaios de caracterização;
5. Caracterizar os compósitos obtidos;
6. Determinar o compósito mais viável;
7. Fabricar estruturas para demonstrar a viabilidade de aplicação dos compósitos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais Compósitos

Um material compósito é resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos no que diz respeito às suas propriedades. O objetivo desse tipo de combinação heterogênea é a obtenção das características de seus componentes, para que apresente melhor desempenho estrutural em condições específicas de uso. Os elementos de um compósito são a matriz e a carga, que pode ser de enchimento ou de reforço (CALLISTER, 2016).

Segundo Mendonça (2005), as propriedades de um material compósito mais buscadas, conforme as necessidades do projeto, são a resistências à tração, flexão, compressão, corrosão, abrasão e fadiga; rigidez, tenacidade, dureza, massa, capacidade de trabalho em baixa e alta temperaturas, isolamento, condutividades térmica e elétrica, absorção acústica e aparência estética.

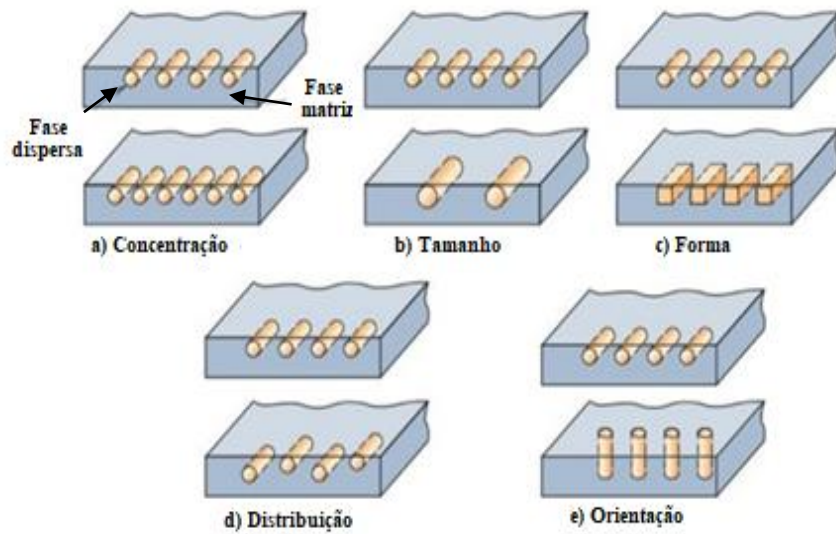
A evolução dos materiais compósitos está na utilização dos resíduos industriais e fibras naturais. O Brasil possui uma grande variedade de vegetais que podem ser utilizadas na obtenção de materiais com diferentes propriedades química, física e mecânica. Em todas as regiões do Brasil essa diversidade e disponibilidade estão presentes, com maior ênfase na região norte (MARINELLI, 2008).

Os compósitos que utilizam resíduos industriais vêm crescendo, uma vez que a destinação de materiais de rejeitos tem se tornado uma grande preocupação na busca pela minimização dos impactos ambientais de seus descartes inadequados.

Os compósitos a partir de materiais renováveis ganharam muita importância mundialmente, devido à sua natureza biodegradável. Com o crescimento do preço e escassez de petróleo bruto, os produtos biodegradáveis estão se tornando cada vez mais atraentes. Os resíduos naturais de celulose e fibras particulados estão sendo bastante utilizadas como carga de enchimento nos compósitos poliméricos (ASOKAN; FIRDOOUS; SONAL, 2012).

As propriedades dos compósitos dependem da concentração, do tamanho, da forma, da distribuição e da orientação das suas fases: matriz e dispersa (carga). A Figura 1 mostra o esquema das características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos (CALLISTER, 2016).

Figura 1 - Esquema das características geométricas espaciais das partículas dos compósitos.

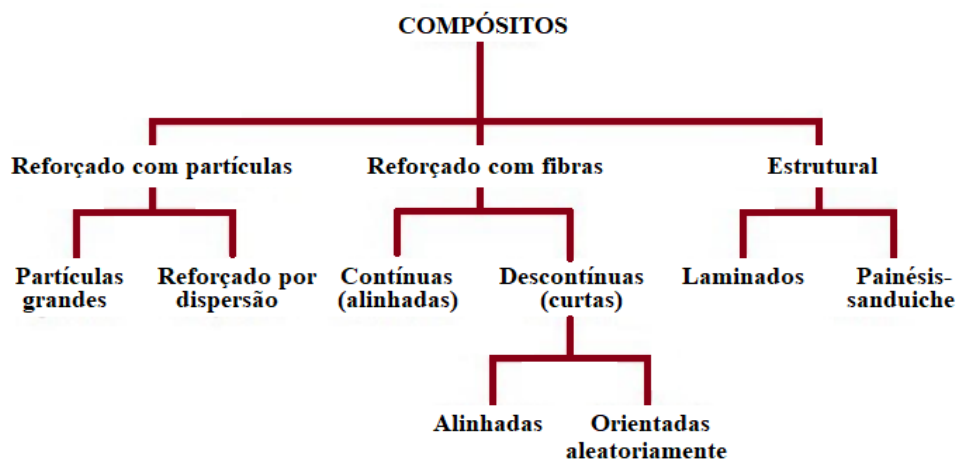


Fonte: Callister (2016)

A definição tradicional de compósito era, até pouco tempo, a de um material que apresentasse aumento de resistência mecânica em relação à matriz, ou seja, que o novo constituinte representasse uma função de reforço. Porém, a necessidade de minimizar os efeitos danosos de materiais de descarte no meio ambiente e a imensa diversidade vegetal do mundo levaram uma mudança dessa definição, incluindo as cargas de enchimento como constituintes de um compósito.

Callister (2016) propõe uma classificação de materiais compósitos de acordo com os elementos constituintes, mostrada na Figura 2.

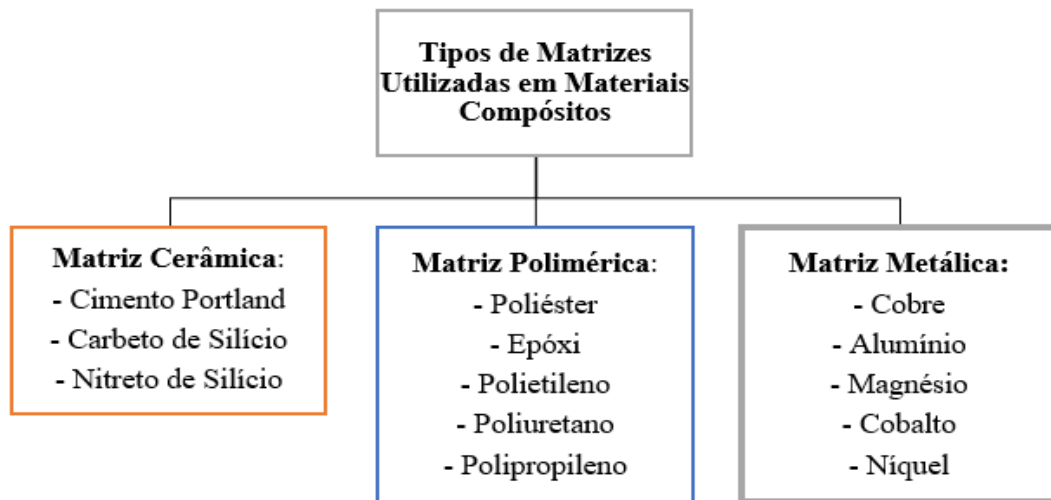
Figura 2 - Classificação de materiais compósitos.



Fonte: Callister (2016).

Além da classificação de acordo com a morfologia dos elementos formadores, os materiais compósitos podem ainda ser classificados conforme o tipo de matriz utilizada, mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Classificação de materiais compósitos conforme o tipo de matriz.



Fonte: Souza (2019).

A seguir, são abordados alguns aspectos dos materiais constituintes do compósito proposto, resina e carga de pó de cimento industrial.

2.1.1. Caracterização de Materiais Compósitos

A caracterização de um material compósito é imprescindível para sua comparação em relação à matriz e a outros materiais já estudados e apontados pela literatura. Nesse contexto a caracterização deve ser a mais ampla para espelhar o novo material produzido, que deve ter propriedades específicas para cada aplicabilidade pretendida.

Geralmente os materiais produzidos e estudados são caracterizados de forma específica e restrita, priorizando-se os comportamentos mecânico, ou térmico, ou acústico e ou de resistência ao envelhecimento, como também densidade, absorção de água, porosidade, emissividade, resistência à inflamabilidade e leveza.

O comportamento térmico que a maioria das caracterizações especifica é relativa à perda de massa que um material sofre com a variação de temperatura, não sendo abordadas as propriedades condutividade térmica, difusividade térmica e

capacidade térmica volumétrica, relativas à capacidade de utilização dos materiais como isolantes térmicos.

O custo de obtenção e fabricação de peças a partir da utilização de compósitos raramente é abordado em estudos de caracterização de materiais, o que representa uma lacuna importante, uma vez que na busca de um material compósito, se deve priorizar a competitividade econômica em relação a matriz utilizada.

Outra abordagem falha em muitos estudos sobre materiais compósitos é a definição dos percentuais mássicos entre matriz e carga de reforço/enchimento, que muitas vezes não é explicada com profundidade, deixando dúvidas de como foi definida essa relação. Porém, a maior deficiência dos estudos sobre materiais compósitos reside na aplicação que terão. Inúmeros trabalhos abordam apenas a fabricação de corpos de prova atendendo às normas pertinentes para a caracterização, sem que posteriormente um novo produto obtido seja apresentado.

2.2. Resinas

2.2.1. Resinas Sintéticas

A descoberta da primeira resina sintética ocorreu em 1907 pelo norte-americano Leo Hendrik Baekeland, que desenvolveu uma resina fenólica através de um processo controlado, denominada de baquelite, considerado como o primeiro polímero sintético termorrígido produzido em escala comercial (PAULO, 2014).

As resinas sintéticas são produzidas de fontes não renováveis, geralmente do petróleo. Algumas das principais resinas sintéticas existentes no mercado são resinas fenólicas, resinas epóxi, resinas poliéster e resinas polipropileno.

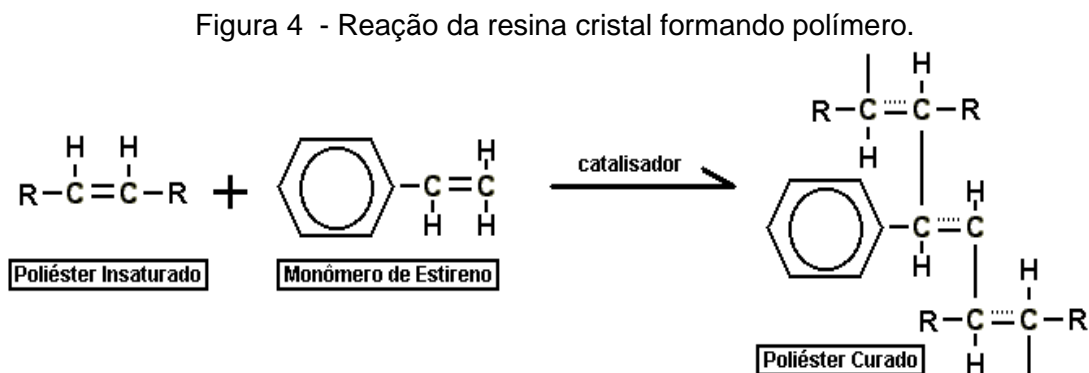
As matrizes poliméricas podem ser classificadas em termoplásticas, que permitem ser moldadas, conformadas ou recicladas em alta temperatura controlada e termofixas ou termorrígidas, que não permitem modificação em sua forma ou reciclagem depois de curados ou solidificados.

As matrizes termorrígidas são as mais utilizadas no processamento dos compósitos poliméricos, em função do seu fácil processamento de manuseio, boa molhabilidade com a fase dispersa e uma gama de propriedades, além de estarem disponíveis no mercado comercial com custo relativamente baixo (GOMES, 2015).

2.2.1.1. Resina Poliéster

A resina poliéster é formada de polímeros obtidos por meio de uma reação entre ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis, gerando, após a reação, moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia nas propriedades finais das resinas poliésteres ortoftálicas, tereftálicas e isoftálicas, pois se um ou ambos constituintes principais contiverem uma ligação dupla entre átomos de carbono, a resina poliéster resultante será insaturada (SILVA, 2010).

As resinas poliéster apresentam como vantagens a estabilidade dimensional, resistência a ambientes quimicamente agressivos, excelentes propriedades elétricas, fácil pigmentação, cura a frio e utilização de moldes simples e barato. A Figura 4 mostra a reação entre o poliéster insaturado e o monômero de estireno, que sob ativação do catalisador, resulta na resina ortoftálica.



Fonte: Silaex (2020).

A Tabela 1 apresenta algumas resinas do tipo poliéster existentes no mercado para diversas áreas.

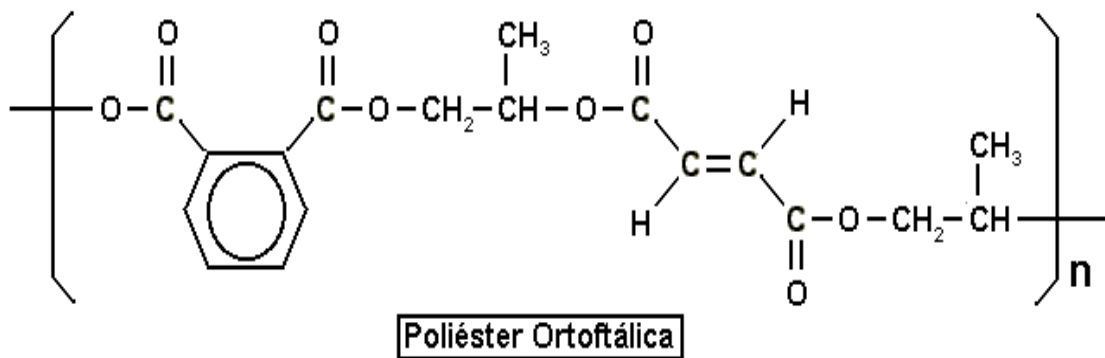
Tabela 1 - Tipos de resina poliéster.

| Tipos | Comentários |
|----------------|--|
| Ortoftálica | A mais comum e de menor custo |
| Teraftálica | Baixa resistência UV, resistência física pouco superior a anterior |
| Isoftálica | Melhores características físicas, mecânicas e térmicas que as anteriores |
| Isoftálica NPG | NPG melhora resistência a hidrólise |
| Bisfenólica | Melhores características químicas e térmicas |

Fonte: Silaex (2020).

O resultado final da reação química entre o poliéster insaturado e o monômero de estireno é a resina poliéster curada. O poliéster insaturado ainda na fase solúvel com monômero de estireno ainda em instaurações, ao adicionar o catalisador as ligações duplas são quebradas fazendo reagirem entre si formando o mero do polímero, cuja estrutura molecular é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Mero da resina poliéster ortoftálica.



Fonte: Silaex (2020).

2.3. Cimento Portland

A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. No Egito antigo seus imponentes monumentos já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. O Panteão e o Coliseu, grandes obras gregas e romanas, foram construídas com solos que possuíam propriedades de endurecimento com a ação da água de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli (BATTAGIN, 2018).

A palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que na antiga Roma designava uma espécie de pedra natural de rochedos não esquadrejada. Em meados de 1830 o inglês Joseph Aspdin patenteou o processo de fabricação de um ligante que resultava da mistura calcinada em proporções certas e definidas de calcário e argila. Foi denominado “cimento Portland”, por apresentar cor e características semelhantes a uma pedra abundante na ilha de Portland. O produto tornou-se um componente básico para a fabricação do concreto (ABCP, 2020).

No Brasil os primeiros estudos relativos à produção do cimento Portland ocorreram no final do século XIX. Em 1924 ocorreu a implantação de uma indústria do cimento no Brasil, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, em Perus, no

estado de São Paulo. As primeiras toneladas do cimento Portland foram fabricadas e colocadas no mercado em 1926. Até então o consumo do cimento no país dependia exclusivamente de importação (BATTAGIN, 2018).

O Brasil entrou num processo de desenvolvimento industrial e de sua infraestrutura após a 2ª guerra mundial. Entre 1945 e 1955 com a inauguração de 16 novas fábricas o país se tornou autossuficiente no consumo de cimento com uma produção percapita, saltando de 12,9 kg/hab/ano em 1935, para 22,3 kg/hab/ano após fim da guerra e para 67,7 kg/hab/ano em 1962 (SNIC, 2018).

2.3.1. Composição do Cimento Portland

O cimento Portland possui como principais constituintes os silicatos de cálcio. As pedras calcárias, giz, mármore e conchas do mar são as principais fontes de cálcio presente na natureza, utilizadas pela indústria de cimento, e tendo argilas e dolomitas como principais impurezas. As argilas são as principais fontes de alumina (Al_2O_3), e frequentemente fornecem também óxidos de ferro (Fe_2O_3) e álcalis para a produção do clínquer de cimento Portland (RUBERT, 2015).

Quando não estão presentes em quantidades desejadas, a alumina e os óxidos de ferro são propositalmente adicionados à mistura, por adições secundárias, como bauxita e minério de ferro. Após o processo de clinquerização, além dos silicatos de cálcio, o produto final também contém aluminatos e ferroaluminatos de cálcio (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os principais elementos químicos do processo de clinquerização são apresentados na Tabela 2, formados à partir da reação entre calcário e argila.

Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland.

| Nome do composto | Composição em óxidos | Abreviatura |
|------------------------------|---|---------------------------|
| Silicato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | (C_3S) |
| Silicato dicálcico | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | (C_2S) |
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | (C_3A) |
| Ferro aluminato tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | (C_4AF) |

Fonte: Metha e Monteiro (2008).

2.3.2. Tipos de Cimento Portland

Durante muitos anos, apenas um único tipo de cimento Portland era produzido e comercializado no Brasil. Com a evolução dos conhecimentos técnicos sobre o assunto foram sendo fabricados novos tipos.

A maioria dos tipos de cimento Portland hoje existente no mercado serve para o uso geral. Entretanto, alguns deles têm certas características e propriedades que os tornam mais adequados para determinados usos, permitindo que se obtenha um concreto ou uma argamassa com a resistência e durabilidade desejadas, de forma bem econômica (ABCP 2020).

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou mundialmente a busca de medidas para diminuição do consumo energético. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos, respectivamente (ABCP 2020).

Segundo Belato (2013), os tipos de cimento Portland, se diferenciam principalmente pela sua composição. Os principais tipos utilizados na maioria das construções são o cimento Portland comum, o composto, o de alto-forno e o pozolânico. Existe também no mercado o cimento Portland de alta resistência inicial, o resistente aos sulfatos e o cimento Portland branco.

Os diferentes tipos de cimento são regidos no Brasil pelas normas da ABNT, que em 2018, reuniu todos os tipos de cimento em uma única norma de especificação, a ABNT NBR 16697, que aponta os tipos de cimentos mais apropriados para determinadas aplicações, com suas respectivas dosagens (NBR 16697, 2018).

O mercado nacional dispõe de dez opções, que atendem com igual desempenho aos mais variados tipos de obras. Os cimentos Portland são designados por seus tipos e identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis (NBR 16697, 2018).

A Tabela 3 apresenta os tipos de cimentos Portland, com suas designações normalizadas, siglas e classes, além dos limites da composição dado em porcentagem de massa.

Tabela 3 – Tipos e composição dos cimentos Portland.

| Designação normalizada | Sigla | Classe de resistência | Sufixo | Clínquer + sulfatos de Cálcio | Escória granulada de alto-forno | Material Pozolânico | Material Carbonático |
|---|----------------|-----------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| Cimento Portland comum | CP I | 25, 32 ou 40 | RS ou BC | 95 – 100 | 0 – 5 | | |
| | CP I-S | | | 90 – 94 | 0 | 0 | 6 – 10 |
| Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno | CP II-E | | | 51 – 94 | 6 – 34 | 0 | 0 – 15 |
| Cimento Portland composto com material pozolânico | CP II-Z | | | 71 – 94 | 0 | 6 – 14 | 0 – 15 |
| Cimento Portland composto com material carbonático | CP II-F | | | 75 – 89 | 0 | 0 | 11 – 25 |
| Cimento Portland de alto forno | CP III | | | 25 – 65 | 35 – 75 | 0 | 0 – 10 |
| Cimento Portland pozolânico | CP IV | | | 45 – 85 | 0 | 15 – 50 | 0 – 10 |
| Cimento Portland de alta resistência inicial | CP V | | | ARI | 90 – 100 | 0 | 0 |
| Cimento Portland branco | Estrutural | 25, 32 ou 40 | --- | 75 – 100 | --- | --- | 0 – 25 |
| | Não estrutural | | | --- | --- | --- | 26 – 50 |

Fonte: NBR 16697 (2018)

2.4. Utilização de compósitos para fabricação de pedras artificiais

Apenas dois artigos científicos foram encontrados sobre o uso de cimento em compósitos poliméricos, ambos utilizando matriz de resina epóxi, diferentemente de nossa opção, a resina poliéster.

Alves, R. A. A. (2017), obteve compósitos para reparar desgastes superficiais, substituir partes danificadas e produzir réplicas de esculturas fabricadas em esteatito, utilizando resina epóxi com cimentos Portland branco e cinza como matrizes. Demonstrou que o compósito obtido com 70% de partículas de esteatito e 30% de resina epóxi apresentou maior potencial restaurações de monumentos históricos fabricados em pedra sabão.

Panzer *et al.* (2010), utilizou cimento Portland branco estrutural como carga em um compósito com resina epóxi para aplicações na construção civil. Comprovou que o compósito produzido quando comparado individualmente com as suas matérias-primas originais, promoveu um aumento da resistência mecânica à compressão,

redução da massa específica e mudança significativa do comportamento mecânico. Concluiu que as mudanças nas propriedades mecânicas estavam associadas à hidratação da fase cimentícia na presença da resina, comprovadas através da análise espectroscópica na região do infravermelho.

Em função da pouca abordagem da literatura de compósitos que continham pó de cimento como carga, apresentam-se alguns trabalhos com cargas de enchimento de resíduos com similaridade à utilizada nessa pesquisa. Como a aplicação do compósito proposto foi a fabricação de pedras artificiais, são apresentados vários estudos utilizando resíduos de rochas ornamentais, destacando-se, sempre, a preocupação ambiental com o armazenamento nocivo geralmente dado a esses materiais.

Wang, J.G. *et al.* (2010) obtiveram e caracterizaram um compósito de matriz polimérica de resina poliéster e carga de pó de mármore. Utilizaram a proporção mássica de duas partes de pó de mármore e uma parte de resina, 200g de pó de mármore e 100g de resina poliéster. Provaram que a viabilidade de processamento da mistura, ressaltando que o compósito apresentava inúmeras possibilidades de utilização.

Ahmetli, G. *et al.* (2012) obtiveram e caracterizaram compósitos com resíduos de mármore gerados por processos industriais. Utilizaram formulações com até 20% em massa de resíduos na resina epóxi matriz. Concluíram que os resíduos de mármore estiveram presentes como carga de reforço, uma vez que produziam nos compósitos aumento da dureza superficial, resistência à tração, alongamento e tensão na carga máxima, em relação à resina matriz quando comparado com os resultados obtidos com a resina matriz.

Ribeiro C. E. G. *et al.* (2012 a, b; 2014 a, b, c; 2015) estudaram a produção de rochas artificiais através dos processos de moldagem por transferência de resina e de vibro-compressão à vácuo. Para o material produzido foram determinadas a densidade, capacidade de absorção de água e as resistências à compressão e Flexão. Demonstraram a viabilidade de obtenção dos compósitos, porém apresentaram propriedades mecânicas inferiores à da matriz polimérica. Produziram pedras artificiais demonstrando a viabilidade dos compósitos para obtenção de materiais competitivos com o mármore e o granito. Demonstraram boa resistência ao manchamento das pedras artificiais produzidas, a substâncias vinho, café, ketchup e

mostarda. Estudaram também a influência do tamanho das partículas dos resíduos de mármore nas propriedades dos compósitos analisadas.

Oral, I. *et al.* (2015) mostraram que o uso de técnicas não destrutivas representa uma alternativa para a caracterização de compósitos. Obtiveram e estudaram compósitos de resina epóxi e resíduo de pó de mármore pelo método de ultrassom, destacando a influência do percentual de pó de mármore em relação à matriz. As velocidades de ondas de ultrassons nos compósitos foram medidas com o método de pulso eco, à temperatura ambiente, por um detector de falha.

Kumar, S. *et al.* (2016) afirmaram que compósitos híbridos com fibras naturais estão oferecendo "eco-materiais" para o mundo, ganhando importância fundamental na preservação do nosso meio ambiente. Enfatizaram que devido ao excesso de geração de resíduos sólidos os problemas de armazenagem e eliminação ambientais e ecológicas têm se acentuado. Ressaltaram que os resíduos sólidos estão sendo usados como cargas de enchimento para a fabricação de compósitos poliméricos de fibras naturais, proporcionando a melhoria de suas propriedades mecânicas e da absorção de umidade. Analisaram o uso e propriedades das fibras naturais e abordaram a utilização de inúmeros resíduos sólidos, seus processos de reciclagem e seus usos.

SILVA, F. S. *et al.* (2015) investigaram a obtenção de rochas artificiais compostas por resíduo de mármore calcita e resina epóxi, gerando um compósito com boas propriedades físicas e mecânicas. As rochas produzidas artificialmente apresentaram propriedades mecânicas competitivas com seus similares comerciais.

Costa, L. C. F. (2017) obteve e estudou um compósito formado por resina poliéster e carga de resíduos de pó de mármore produzidos pelo corte de pedras ornamentais. O resíduo produzido foi processado para a obtenção de pós. Várias formulações do compósito foram testadas, variando-se o percentual de carga em relação à resina poliéster. Todas as formulações escolhidas apresentaram viabilidade de processamento e obtenção do compósito. O compósito demonstrou-se viável para a fabricação de mesas, cadeiras, pranchas, obras de arte, peças para banheiros, divisórias para ambientes, estruturas que não requerem resistência à grandes esforços, mostrando-se viável para substituir pedras de mármore e granito naturais.

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo são descritos os materiais e processos utilizados na obtenção das placas de compósitos para a retirada dos corpos de prova (CPs). Faz-se, também, uma ampla caracterização do material compósito produzido, além da produção de estruturas que representam a aplicação do novo material produzido.

São descritos os procedimentos de aquisição e experimentais usados na fabricação das placas de compósitos, bem como os ensaios para caracterização, atendendo às normas pertinentes (resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao impacto, densidade, resistência térmica, envelhecimento, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise termogravimétrica (TGA) e absorção de água).

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento Portland

O Cimento Portland utilizado foi da marca Nacional, tipo CP V-ARI, de alta resistência inicial, em saco de 40kg. É usado no preparo de concreto de argamassa e em todas as aplicações que necessitam de resistência inicial elevada e desmoldagem rápida, sendo composto por clínquer, sulfatos de cálcio entre 90 e 100% e material carbonário entre 0 e 10% (NBR 16697, 2018). Tem como principais elementos químicos, os óxidos de alumínio, ferro, cálcio e sulfúrico e o dióxido de silício (Castro, Liborio e Pandolfelli 2011).

3.1.2. Resina Poliéster

A resina poliéster ortoftálica utilizada foi adquirida em loja especializada, da marca EMBRAPOL[®], ao preço de R\$ 20,00 (vinte reais) por quilo. Os principais motivos para a escolha da resina poliéster foram ao seu menor valor, fácil trabalhabilidade e baixo risco de manuseio. A Tabela 4 apresenta as propriedades da resina poliéster ortoftálica do fabricante.

Tabela 4 - Propriedades da resina poliéster ortoftálica.

| Propriedades da resina líquida AZ 1.0 – Padrão | |
|---|-------------------------------|
| Gel Time a 25° C | 9 – 13 min |
| Pico Exotérmico | 130 – 160° C |
| Aspecto | Cristal |
| Densidade a 25°C | 1,08 – 1,15 g/cm ³ |
| Cor depois de curada | Incolor |
| Resistência a Tração | 51,55 MPa |
| Módulo de Tração | 3348,5 MPa |
| Alongamento % | 2,02 |
| Resistência a Flexão | 85,31 MPa |
| Módulo na Flexão | 3073 |

Fonte: EMBRAPOL® (2018).

3.1.3. Desmoldante

O desmoldante utilizado nos experimentos foi a cera de carnaúba (Tec Glaze-N), empregada para se obter um melhor acabamento superficial e facilitar o processo de desmoldagem dos moldes metálicos.

3.1.4. Moldes Metálicos

Para a fabricação das placas de compósitos, para obtenção dos CPs para os ensaios de caracterização, foram fabricados dois moldes metálicos que satisfaziam a critérios específicos, como geometrias e dimensões, preconizadas pelas Normas ASTM D3039/D3039M-17 (2017) / ASTM D7264/ D7264M-15 (2015) para o molde 01 e ASTM D6110-18 (2018) para o molde 02. Para os ensaios térmicos foi utilizado o molde 03 que atendia a Norma ASTM D5930-17 (2017).

3.1.4.1. Molde 01

O molde 01 foi utilizado para a fabricação das placas dos compósitos e da resina poliéster para retirada dos corpos de prova dos ensaios de resistência à tração e flexão. Foi fabricado com chapas laminadas de aço 1020 com 7,0 mm de espessura e cantoneira padrão “L” de aço 1020 com dimensões 1/2” x 1/2” x 1/8”, com dimensões de 8,0 mm x 200 mm x 200 mm, mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Molde metálico 01 utilizado na fabricação dos corpos de prova dos ensaios de resistência à tração e à flexão.



Fonte: Autor

3.1.4.2. Molde 02

O molde 02 foi utilizado para a fabricação das placas dos compósitos e da resina poliéster para retirada dos corpos de prova dos ensaios de resistência ao impacto. Foi fabricado com chapas laminadas de aço 1020 com 7,0 mm de espessura e cantoneira padrão "L" de aço 1020 com dimensões 1/2" x 1/2" x 1/8", com dimensões de 10 mm x 100 mm x 100 mm, mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Molde metálico 02 utilizado na fabricação dos corpos de prova dos ensaios de resistência ao impacto.



Fonte: Autor

3.1.2.3. Molde 03

Para a fabricação dos corpos de prova dos compósitos e resina poliéster para o ensaio das propriedades térmicas, utilizou-se o mesmo molde metálico do ensaio de resistência à compressão em argamassa, com diâmetro interno de 50 mm e altura de 100 mm, mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Molde metálico 03 utilizado na fabricação dos corpos de prova do ensaio de propriedades térmicas.



Fonte: Autor

3.1.5. Balança de Precisão

Utilizou-se uma balança de precisão Marte - AL500 com sensibilidade de 0,001g e capacidade de até 500 gramas, para determinação das massas da resina poliéster e do pó de cimento.

3.1.6. Serra Elétrica de Bancada

Utilizou-se uma serra elétrica de bancada com disco de corte diamantado para cortar as placas da resina poliéster e dos compósitos, conforme as normas pertinentes.

3.1.7. Prensa Hidráulica

Utilizou-se uma prensa hidráulica MARCON – MPH15 com capacidade de até 15 toneladas, para comprimir os moldes com uma carga de 2,0 toneladas, etapa que faz parte do processo de fabricação das placas dos compósitos e da resina poliéster, mostrada na Figura 9.

Figura 9 - Prensa hidráulica MARCON – MPH10.



Fonte: Autor

3.2. Métodos

3.2.1. Processo de Obtenção dos Compósitos

A fabricação das placas dos compósitos e de resina poliéster, para a retirada dos corpos de prova, foi realizada em ambiente aberto, na temperatura ambiente. A primeira etapa foi determinar a quantidade máxima de pó de cimento que poderia ser misturada à resina poliéster para garantir uma boa processabilidade manual da mistura.

A processabilidade manual dos compósitos ficava comprometida quando mais de uma parte do pó de cimento era utilizada em uma parte da resina. Isso porque, com o aumento da viscosidade, começavam a surgir dificuldades na homogeneização e fluência da mistura para preenchimento nos moldes.

Apesar da quantidade de particulado de cimento presente no compósito, de até 100% em massa em relação à resina de poliéster, o compósito obtido é classificado como polimérico particulado.

Foram definidos quatro compósitos (C₁, C₂, C₃ e C₄), com percentuais em massa de 25%, 50%, 75% e 100% e em volume de 23,4%, 46,8%, 70,2% e 93,6% de pó do cimento (C) contido na resina (R) poliéster, além da matriz de resina poliéster, utilizada como comparativa. A Tabela 5 apresenta os compósitos escolhidos e suas cargas de pó de cimento.

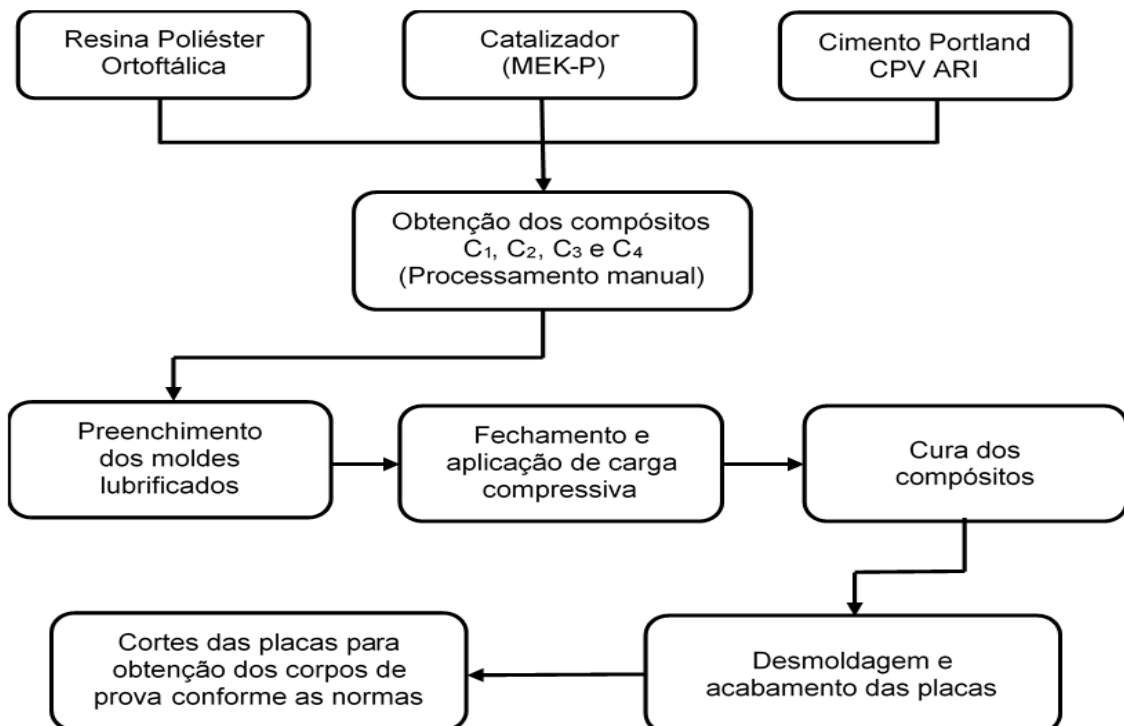
Tabela 5 – Nomenclatura utilizada para os compósitos produzidos.

| Compósitos | Formulações |
|----------------|----------------|
| C ₁ | 1,0 R + 0,25 C |
| C ₂ | 1,0 R + 0,50 C |
| C ₃ | 1,0 R + 0,75 C |
| C ₄ | 1,0 R + 1,0 C |

Fonte: Autor

O fluxograma da Fig. 10 apresenta as principais etapas do processo de fabricação das placas dos compósitos para a produção dos corpos de prova dos compósitos e de resina para os ensaios de caracterização.

Figura 10 - Etapas do processo de fabricação das placas dos compósitos para produção dos corpos de prova para ensaios de caracterização.



Fonte: Autor

Em função do volume do molde, definia-se a quantidade mássica de resina e do pó de cimento utilizando-se uma balança de precisão. O processo de fabricação das placas dos compósitos utilizado foi o de moldagem fechada por compressão úmida a frio realizada em moldes metálicos.

Aplicava-se a cera de carnaúba com uma esponja de limpeza no molde para facilitar a posterior retirada das placas e esperava-se sua completa secagem. Com uma balança de precisão determinava-se as massas da resina poliéster, do catalizador e do pó de cimento para cada formulação.

Em um recipiente descartável de 1 kg, adicionava-se 400 g de resina para fabricação no molde 01, 200 g para o molde 02 e 300 g para o molde 03, acrescentando-se 2% em massa do catalizador (MEK-P). Essa solução era agitada manualmente durante 30 segundos para tornar homogênea a mistura (resina + MEK-P), em seguida, adicionava-se pó de cimento nas proporções de cada composição.

Após sua homogeneização, os moldes eram preenchidos; aguardava-se entre 10 a 15 minutos até a mistura atingir a viscosidade ideal, estado de gel, para posteriormente, proceder-se com o fechamento dos moldes e aplicar uma carga compressiva de duas toneladas. Após 24 horas sob pressão as placas eram desmoldadas. Em seguida, as rebarbas e saliências oriundas do processo de compressão eram retiradas, usando-se uma lixa com granulometria 120.

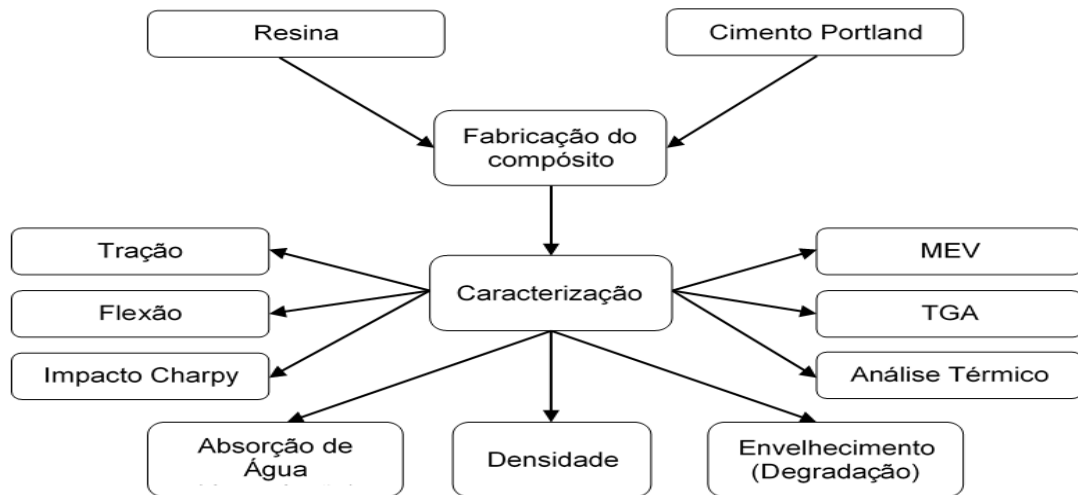
Na sequência os corpos de prova eram cortados com uma serra elétrica de bancada, nas medidas e quantitativos exigidos conforme as normas estabelecidas, para cada ensaio, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões e quantitativos dos corpos de prova e normas utilizadas nos ensaios de caracterização.

| Ensaio | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) | Quant. (un/for.) | Normas Utilizadas |
|----------------------------|------------------|--------------|----------------|------------------|---------------------------------|
| Tração | 200 | 25 | 8 | 6 | ASTM D3039/ D3039M-17 (2017) |
| Flexão | 200 | 25 | 8 | 6 | ASTM D7264/ D7264M-15 (2015) |
| Impacto Charpy | 100 | 10 | 10 | 6 | ASTM D6110-18 (2018) |
| Densidade | 25 | 25 | 8 | 6 | ASTM D792-13 (2013) |
| Absorção de água destilada | 25 | 25 | 8 | 6 | ASTM D570-98 (2010) |
| Absorção de água do mar | 25 | 25 | 8 | 6 | ASTM D570-98 (2010) |
| Prop. Térmicas | 100 | φ50 | - | 6 | ASTM D5930-17 (2017) |
| Envelhecimento | 200 | 25 | 8 | 1 | ASTM D1435-13 (2013) |
| TGA | 5 | 5 | 5 | 1 | ASTM E2550-17 (2017) |
| MEV | 8 | 8 | 8 | 1 | ----- |

O fluxograma na Figura 11 mostra as etapas dos ensaios de caracterização dos corpos de prova dos compósitos e da resina poliéster.

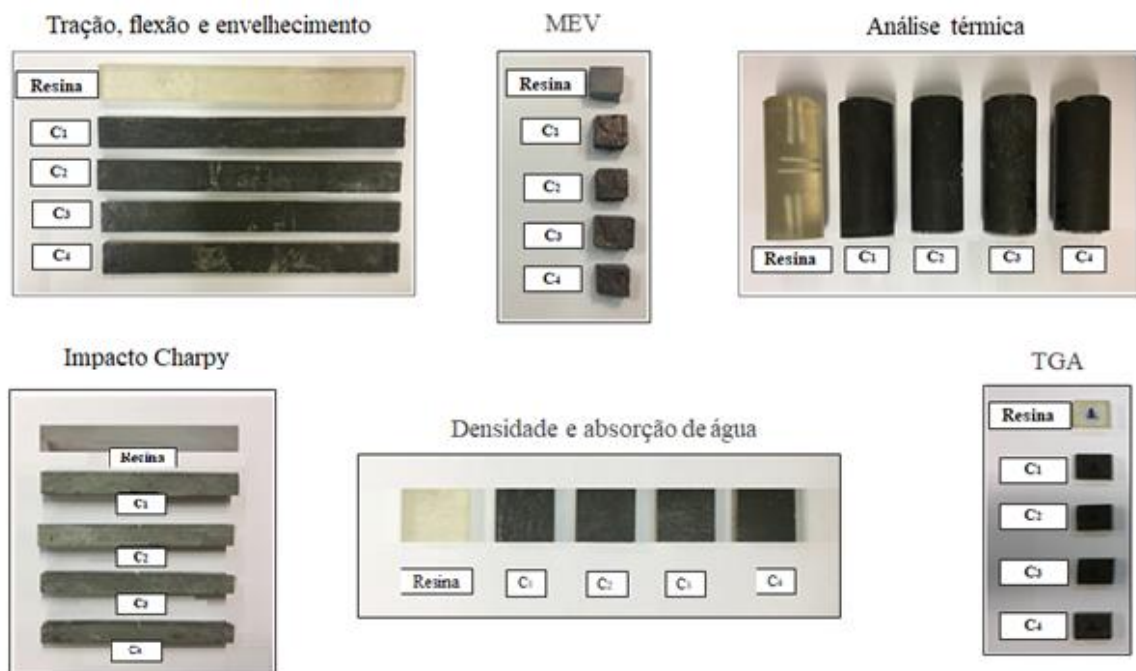
Figura 11 - Fluxograma dos ensaios de caracterização dos compósitos e da resina poliéster.



Fonte: Autor

Os corpos de prova para todos os ensaios de caracterização dos compósitos e da resina poliéster encontram-se mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Corpos de prova para todos os ensaios de caracterização dos compósitos e da resina poliéster.

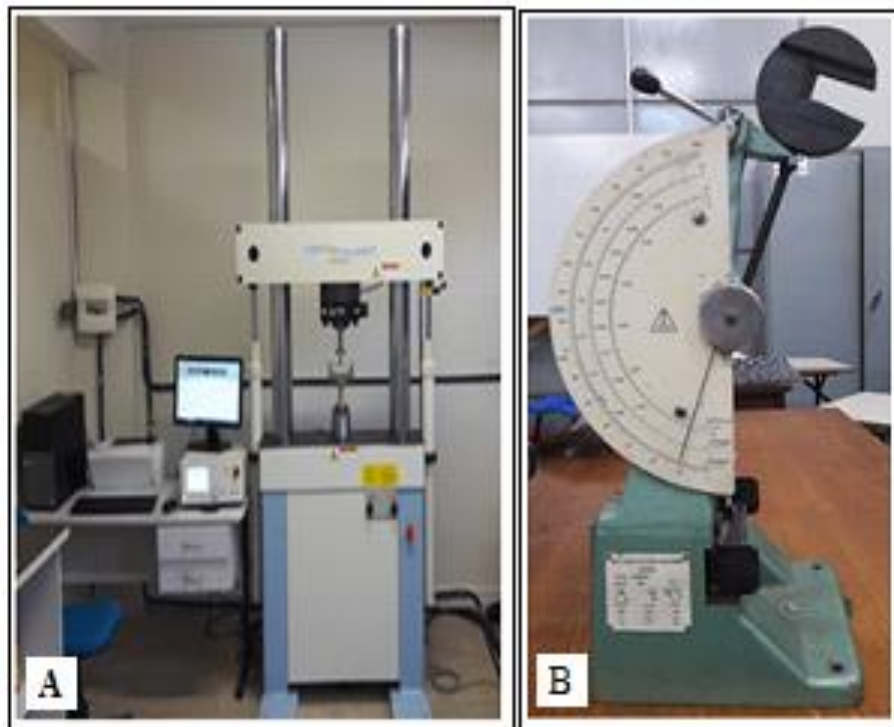


Fonte: Autor

3.2.2. Ensaio Mecânicos

Para o levantamento das características mecânicas do compósito foram realizados os ensaios de resistência à tração e à flexão, utilizando uma máquina universal de ensaio Shimadzu, modelo Servopulser - HF-200kN-40L pertencente ao Laboratório de Ensaio de Materiais do IFRN Campus Natal Central, mostrada na Figura 13 (a). No ensaio de resistência ao impacto Charpy foi utilizado um pêndulo analógico LEIPZIG pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, mostrado na Figura 13 (b).

Figura 13 - Máquina universal utilizada nos ensaios de tração e flexão (a) e pêndulo analógico para ensaio de impacto (b).



Fonte: Autor

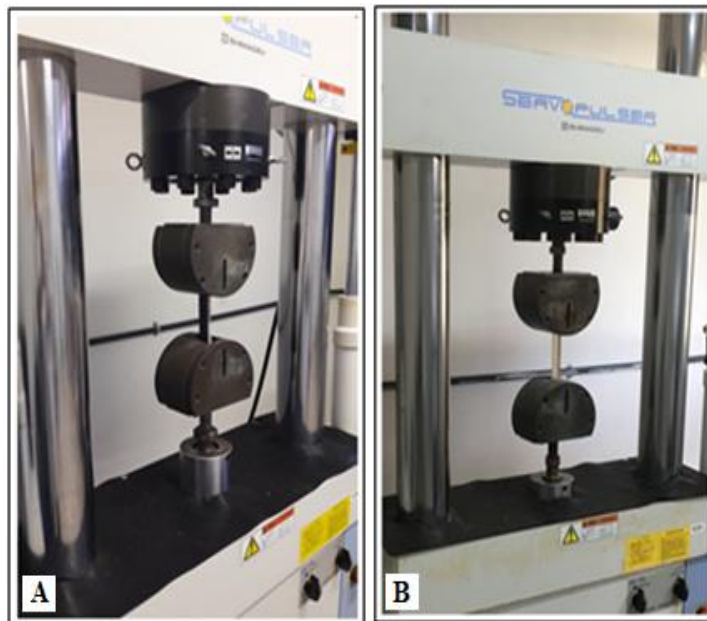
3.2.2.1. Ensaio de Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração é um dos mais importantes e consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova até sua ruptura. Trata-se de um ensaio amplo devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Os principais resultados

dos ensaios de tração são a resistência a tração, deformação total e módulo de elasticidade.

Nos ensaios de tração foram realizados em seis corpos de prova de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões de 8 mm x 25 mm x 200 mm, conforme norma ASTM D3039/D3039M-17 (2017). A Figura 14 mostra os corpos de prova do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de tração.

Figura 14 - CPs do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de tração.



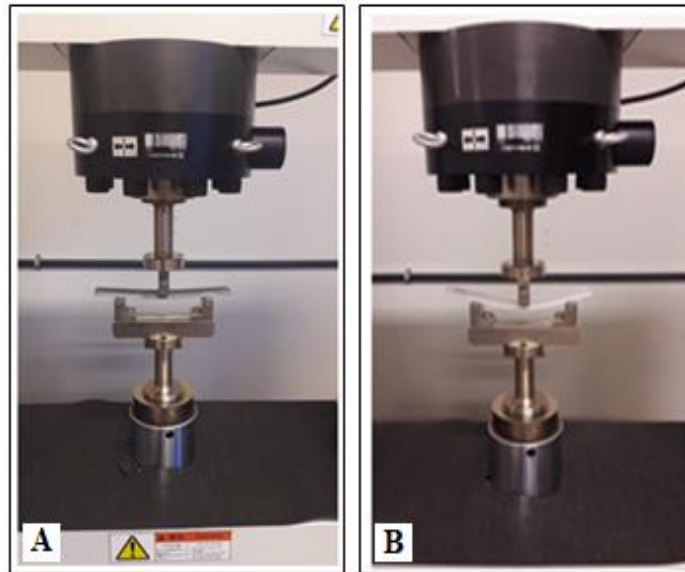
Fonte: Autor

3.2.2.2. Ensaio de Resistência à Flexão

O ensaio de resistência à flexão de três pontos é um dos mais utilizados para a caracterização dos compósitos poliméricos. Consiste na aplicação de uma carga no centro de um corpo de prova, apoiado em dois pontos até seu rompimento ou até a deformação atingir 5% do comprimento inicial. Os principais resultados dos ensaios de flexão são a resistência à flexão, flecha e módulo de elasticidade.

Nos ensaios de flexão foram realizados em seis corpos de prova de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões 8 mm x 25 mm x 200 mm, conforme norma ASTM D7264/D7264M-15 (2015). A Figura 15 mostra os corpos de prova do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de flexão.

Figura 15 – CPs do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de flexão.

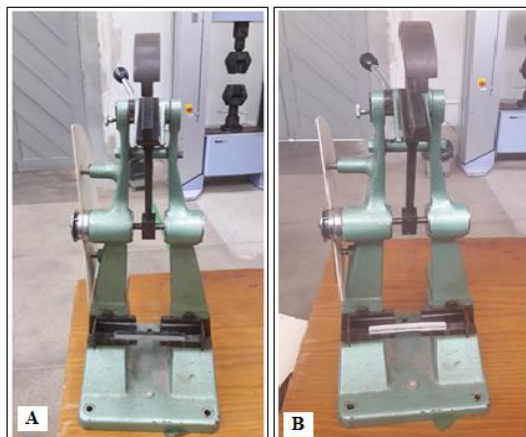


Fonte: Autor

3.2.2.3. Ensaio de Impacto Charpy

Para a realização desse ensaio foi utilizado um pêndulo analógico LEIPZIG, utilizando-se um martelo com massa de 0,937 kg e haste com comprimento da 220 mm. Nos ensaios de impacto foram realizados em seis corpos de prova de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões 10 mm x 10 mm x 100 mm, conforme norma ASTM D6110-18 (2018). A Figura 16 mostra os corpos de prova do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de impacto.

Figura 16 – CPs do compósito (a) e da resina (b) em ensaio de impacto.



Fonte: Autor

3.2.3. Ensaio de Densidade

Foi utilizado um densímetro digital da marca GEHAKA, modelo DSL 910, pertencente ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN. Nesse ensaio foram utilizados seis corpos de prova de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões 8 mm x 25 mm x 25 mm, conforme a norma ASTM D792-13 (2013). A Figura 17 mostra o densímetro (a), os corpos de prova do compósito (b) e da resina poliéster (c) em ensaio.

Figura 17 – O densímetro digital DSL 910 (a), os corpos de prova do compósito (b) e da resina (c) no ensaio de densidade.



Fonte: Autor

3.2.4. Ensaio de Absorção de Água Destilada e de Água do Mar

A exposição da matriz e dos compósitos poliméricos em meio aquoso leva à degradação prematura pela difusão de água no interior do material. Como consequência tem-se um aumento de volume e uma modificação da estrutura molecular por hidrólise, podendo ser de natureza química ou física, dependendo da forma como afeta ou não a identidade macromolecular (VIVAS, 2013).

O ensaio foi realizado em dois meios aquosos, água destilada e água do mar, no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN. Foram utilizados seis corpos de prova de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões 8 mm x 25 mm x 25 mm, conforme a

norma ASTM D570-98 (2010). Utilizou-se a equação 01 para determinação do grau de absorção de água (Ab_{H_2O}) do material.

$$Ab_{H_2O} = \left(\frac{m_f}{m_i} - 1 \right) * 100 \quad (01)$$

Onde:

Ab_{H_2O} = Absorção de água (%);

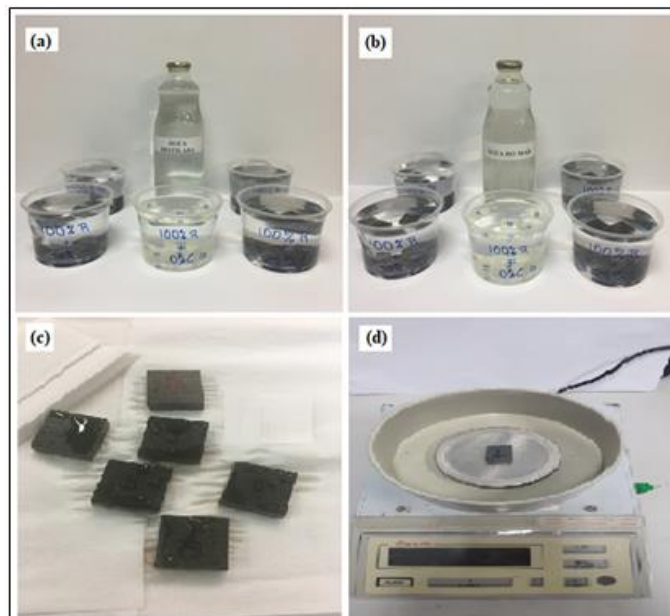
m_i = Massa inicial (g);

m_f = Massa final (g).

Para o cálculo de absorção de água foram utilizadas as massas iniciais e finais das amostras, medindo-se com balança de precisão Marte - AL500 com sensibilidade de 0,001g.

A Figura 18 apresenta algumas etapas do ensaio de absorção: (a) imersão na água destilada (b) imersão na água do mar, (c) retirada do excesso de água das amostras para pesagem, (d) amostra do compósito sendo pesada.

Figura 18 - Algumas etapas dos ensaios de absorção de água destilada e de água do mar.



Fonte: Autor

Os procedimentos de ensaio de absorção de água destilada e água do mar, dos compósitos e da resina poliéster, consistiam de: a) os corpos de provas eram pesados em uma balança de precisão, para a obtenção de sua massa seca; b) as

amostras eram imersas nos meios aquosos, águas destilada e do mar ; c) retirava-se o excesso da água com papel toalha da resina e dos compósitos; d) pesagem na balança de precisão após secagem e) este processo se repetia dentro do tempo estabelecido pela norma vigente.

3.2.5. Ensaio de Análise Térmica

Neste ensaio foi utilizado o analisador de propriedades térmicas KD2 Pro fabricado pela Decagon Devices, pertencente ao Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN. Nos ensaios de análise térmica foram utilizados seis corpos de prova de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões de 50 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura, conforme a norma ASTM D5930-17 (2017). Foram determinadas a condutividade térmica (K), a resistividade térmica (ρ), a capacidade térmica volumétrica (CTV) e a difusividade térmica (D) dos compósitos e da resina poliéster. A Figura 19 mostra o analisador KD2 PRO (a), e os corpos de prova do compósito (b) e da resina (c) em ensaio.

Figura 19 - Analisador KD2 PRO (a) utilizado para o levantamento das propriedades térmicas, dos corpos de prova do compósito (b) e da resina (c) no ensaio de análise térmica.



Fonte: Autor

Os procedimentos para a determinação das propriedades térmicas dos compósitos e da resina poliéster, consistiam de: a) escolher o sensor apropriado para o material a ser analisado; b) furar a amostra a ser analisada para inserção do sensor com auxílio de um gabarito; c) preencher o furo com pasta térmica; d) conectar o

sensor no aparelho; e) configurar o aparelho para o sensor escolhido; f) inserir o sensor na amostra; g) iniciar a medida.

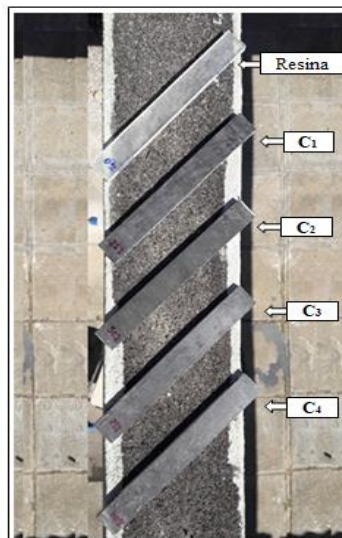
3.2.6. Ensaio de Envelhecimento Natural

Um dos objetivos do ensaio de envelhecimento foi analisar a influência nos compósitos e na resina, da exposição às intempéries e às condições ambientais variadas, que podem causar alterações nas suas propriedades, principalmente na resistência mecânica. Os compósitos e a resina foram expostos às condições de envelhecimento natural, por um período de 365 dias, em cima de uma laje do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN. O procedimento para o ensaio seguiu as diretrizes da norma ASTM D1435-13 (2013).

Antes da exposição e depois da retirada, os corpos de prova eram pesados e fotografados, para análise da degradação superficial sob condições ambientais próximas da real condição de uso do material. Para os ensaios de envelhecimento, utilizou-se uma amostra de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões 8 mm x 25 mm x 200 mm.

A Figura 20 mostra um CP de cada compósito e da resina poliéster no ensaio de envelhecimento natural.

Figura 20 - Corpos de prova dos compósitos e de resina poliéster submetidos ao ensaio de envelhecimento.



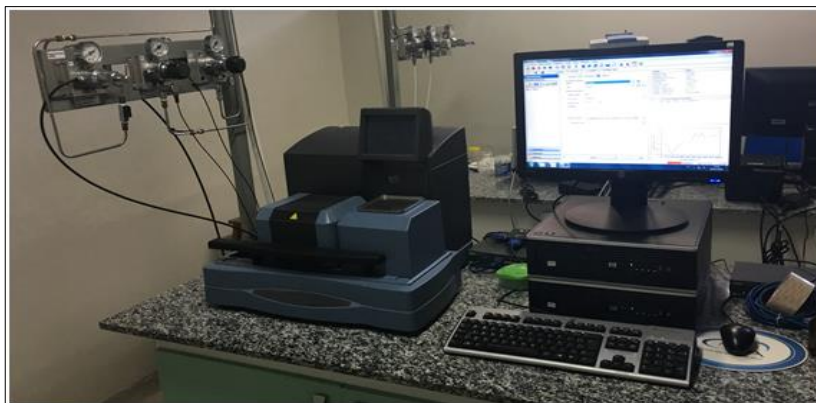
Fonte: Autor

As etapas do ensaio de envelhecimento dos compósitos e da resina poliéster, consistiam de: a) pesagem das amostras para obtenção de sua massa inicial; b) colocação dos corpos de prova em cima da laje; c) Pesagem das amostras após concluído o ensaio.

3.2.7. Ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA)

Neste ensaio foi utilizado um analisador termogravimétrico e calorímetro simultâneo fabricante TA Instruments, modelo SDTQ600 (Figura 21), pertencente ao Laboratório do Departamento de Química da UFRN. Para os ensaios de TGA, utilizou-se uma amostra de cada compósito e da resina poliéster, com dimensões 5 mm x 5 mm x 5 mm. O ensaio seguiu a norma ASTM E2550-17 (2017), com parâmetros: cadinho de Platina; Gás de purga, Ar sintético; Vazão do gás de purga de 50ml/min; Razão de aquecimento de 10°C/min; Temperatura final de 700°C e massa de amostra de ~10mg.

Figura 21 - Analisador térmico utilizado no ensaio de TGA.



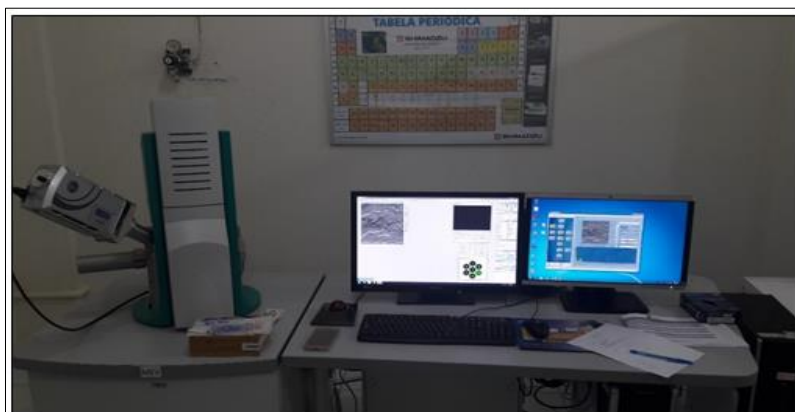
Fonte: Autor

3.2.8. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Buscou-se observar a influência do processo de fabricação de moldagem fechada por compressão úmida a frio na qualidade da interface entre a resina/cimento, a distribuição das partículas do pó de cimento após o processo de mistura com a resina poliéster, além de avaliar a formação e propagação dos danos na seção de ruptura.

Neste ensaio foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura modelo TESCAN (Figura 22), pertencente ao do Laboratório de Caracterização de Materiais do IFRN. Para isso, foi retirada uma amostra da superfície de fratura do ensaio de tração, de um dos seis corpos de prova de cada configuração do compósito e da resina poliéster, com dimensões 8 mm x 8 mm x 8 mm, submetidos a um processo de revestimento condutivo metalizado com ouro. Utilizou-se como parâmetros uma tensão de aceleração de 5,0 kV, uma corrente de emissão de 11.400 nA e uma corrente de filamento de 1650 mA.

Figura 22 - Equipamentos para análise de microestrutura - MEV.



Fonte: Autor

3.2.9. Aplicação do Compósito

Para se demonstrar a viabilidade de aplicação dos compósitos, fabricou-se uma mesa e um banco com o C₄, pois, como será mostrado mais à frente, é o que possuía maior viabilidade econômica. Estas estruturas foram escolhidas devido à facilidade de produção e por não exigirem elevadas resistências mecânicas. Tais protótipos já estão em uso na sala de aula do LMHES/UFRN há mais de dois anos.

3.2.9.1. Fabricação da Mesa

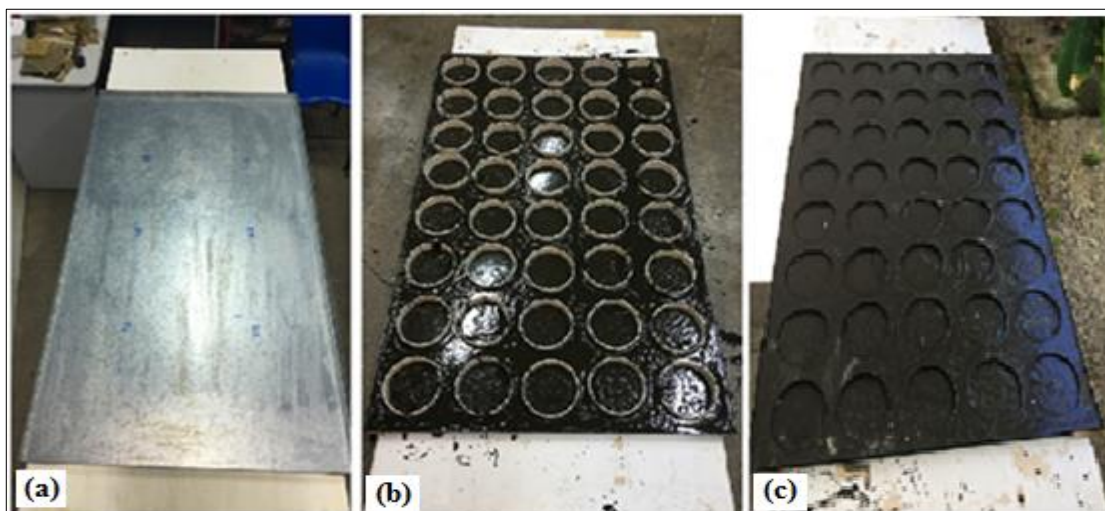
As etapas dos processos de fabricação e montagem da mesa estão descritas a seguir:

1. Fabricação de base metálica para servir como estrutura do tampo da mesa;

2. Fabricação do molde em chapa de aço galvanizado de número 20, medindo 25 mm x 1,00 m x 1,50 m;
3. Recobrimento do molde com desmoldante para facilitar a retirada da peça produzida, como mostra a figura 31 (a);
4. Mistura da resina poliéster com o cimento Portland CP V-ARI na proporção do compósito C₄;
5. Derramamento do compósito em estado líquido no molde, realizado em duas etapas. Colocação de uma camada inicial de 10 mm para preenchimento da superfície inferior do molde; posicionamento, inserção de anéis de canos de PVC de 150mm; derramamento final com 12 mm de compósito, preenchendo os espaços existentes entre os anéis. Tais anéis, mostrados na Fig. 31 (b), foram colocados para se diminuir a quantidade de compósito utilizada, diminuindo-se sua massa em torno de 25% e seu custo em R\$ 146,00.
6. Cura do compósito obtida em 24 horas;
7. Retirada do tampo do molde, como mostra a figura 31 (c);
8. Fixação do tampo da mesa em sua base;
9. Acabamento do tampo da mesa, utilizando lixas e verniz.

A Figura 23 mostra algumas etapas dos processos de fabricação do tampo da mesa com o material compósito C₄.

Figura 23 - Etapas do processo de fabricação do tampo de mesa.



Fonte: Autor

3.2.9.2. Fabricação do Tampo de Banco

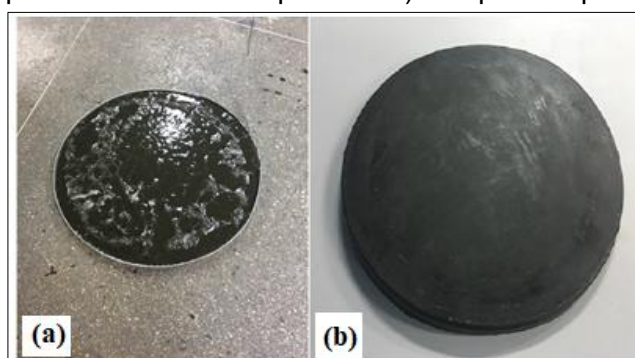
Como aplicação do compósito também foi fabricado um tampo de banco para a montagem em um suporte metálico, obtendo-se um banco para assento de boa estética e adequada resistência mecânica. Foi utilizado um molde de uma forma de pizza de alumínio de 30 centímetro de diâmetro.

As etapas dos processos de fabricação e montagem do tampo do banco, estão descritas a seguir.

1. Aplicação de desmoldante na forma;
2. Mistura da resina poliéster com o cimento Portland CP V-ARI na proporção do compósito C₄;
3. Derramamento do compósito no molde, como mostra a figura 32 (a);
4. Cura do compósito obtida em 24 horas;
5. Desmoldagem do compósito, como mostra a figura 32 (b);
6. Fixação do tampo ao banco;
7. Acabamento do tampo da mesa, utilizando lixas e verniz.

A Figura 24 mostra etapas de fabricação do tampo do banco com o material compósito C₄.

Figura 24 - Etapas do processo de fabricação do tampo do banco: a) molde preenchido com compósito e b) compósito após a cura.



Fonte: Autor

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões decorrentes da caracterização dos compósitos propostos e analisados.

4.1. Ensaio Mecânicos

São analisados os resultados dos parâmetros mecânicos da resistência à tração (RT), resistência à flexão (RF) e resistência ao impacto (RI) da resina poliéster e dos compósitos.

4.1.1. Ensaio de Resistência à Tração

A Tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de resistência à tração dos compósitos e resina poliéster.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros do ensaio de resistência à tração dos compósitos e da resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Resistência à Tração (MPa) | Deformação Total (%) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|--------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| Resina | 22,252 ± 0,625 | 4,709 ± 0,016 | 0,473 ± 0,072 |
| C ₁ | 14,872 ± 0,455 | 2,817 ± 0,020 | 0,528 ± 0,045 |
| C ₂ | 14,115 ± 0,435 | 2,514 ± 0,019 | 0,561 ± 0,035 |
| C ₃ | 12,372 ± 0,373 | 2,183 ± 0,020 | 0,567 ± 0,048 |
| C ₄ | 11,768 ± 0,340 | 1,952 ± 0,015 | 0,603 ± 0,068 |

A resistência à tração média da resina foi 56,83% inferior à apresentada pelo fabricante, em torno de 51,55 MPa. Tal diferença pode estar relacionada aos processos de manuseio e armazenamento da resina por revendedores locais.

À medida que se aumentava a quantidade de pó de cimento diminuía-se a resistência à tração, obtendo-se o pior resultado para C₄, com perda de 47,1% em relação à resina poliéster. Esses resultados não inviabilizaram a utilização dos compósitos, principalmente para aplicações com baixas solicitações de carga.

Essa redução já era esperada, uma vez que os particulados, como demonstra a literatura de materiais compósitos, diminuem a resistência mecânica dos novos materiais gerados, quando comparados a matriz (COSTA, 2017).

O compósito de melhor desempenho foi o C₁, que apresentou um decréscimo de 33,2% em relação a resina poliéster. Isso é explicado pela prevalência do maior percentual de resina no compósito.

Na análise comparativa entre os compósitos percebeu-se que a maior perda de resistência à tração, que aconteceu entre a formulação com menor percentual de cimento C₁ em relação à de maior percentual C₄, correspondeu a cerca de 20,9%. Portanto, houve uma perda pouco significativa na resistência à tração, levando-se em conta que o aumento do percentual de cimento foi de 75%.

Considerando-se que o preço do cimento em relação ao da resina é insignificante, correspondente a 2,4%, o aumento da carga de cimento, de 25% para 100%, trouxe uma maior viabilidade econômica para o compósito.

A queda na resistência mecânica dos compósitos esteve atrelada à deficiência na adesão partículas-matriz e defeitos no processo de fabricação adotado, que não foi capaz de evitar a presença de vazios, bolhas e aglomerados, que produziam perda de homogeneidade entre os componentes dos novos materiais produzidos.

A aplicação buscada para esse compósito, similar à de outros já estudados, pó de mármore/granito, areia e gesso, não tinha como prioridade a obtenção de reforço estrutural, com a carga utilizada. Pretendia-se colocar a maior quantidade possível de carga na resina, para a obtenção de um material economicamente mais viável e com propriedades mecânicas adaptáveis às aplicações pretendidas.

Já se esperava essa queda na resistência à tração, em função, principalmente, do tipo particulado de carga, do processo manual (artesanal) de processamento e da elevada razão volumétrica entre carga e resina, C₁(23,4%), C₂ (46,8%), C₃ (70,2%) e C₄ (93,6%). Ressalte-se que a grande viabilidade econômica do compósito está justamente na possibilidade de uma carga volumétrica significativa, sem inviabilizar o seu processamento.

O alongamento, deformação sofrida pelos corpos de prova quando solicitados longitudinalmente, apresentou o mesmo comportamento da resistência à tração, com diminuição proporcional ao aumento da carga de cimento. Houve uma diminuição na deformação entre a resina e C₄ de 58,5% e de C₁ para C₄ de 30,7%.

O módulo de elasticidade dos compósitos foi maior que o da resina, com aumento proporcional ao aumento de carga de cimento na resina. Houve um aumento de módulo de C₄ em relação a resina de 27,5% e de C₄ em relação a C₁ de 14,2%, demonstrando-se a maior rigidez dos compósitos em relação à matriz.

4.1.2. Ensaio de Resistência à Flexão

A Tabela 8 apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de resistência à flexão dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 8 - Resultados dos parâmetros do ensaio da resistência à flexão dos compósitos e da resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Resistência à Flexão (MPa) | Flecha (mm) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|--------------------------------|---|------------------------|---|
| Resina | 78,885 ± 0,783 | 16,823 ± 0,312 | 1,578 ± 0,011 |
| C ₁ | 34,823 ± 2,973 | 2,637 ± 0,239 | 4,975 ± 0,054 |
| C ₂ | 29,673 ± 2,529 | 2,521 ± 0,214 | 5,935 ± 0,085 |
| C ₃ | 29,225 ± 2,251 | 2,457 ± 0,204 | 6,556 ± 0,094 |
| C ₄ | 22,336 ± 2,089 | 2,358 ± 0,155 | 7,445 ± 0,110 |

A resistência à flexão medida na resina foi apenas 7,53% inferior à apresentada pelo fabricante, em torno de 85,31MPa. Não se verificou o mesmo comportamento em relação resistência à tração, com significativa diminuição na resistência entre os valores fornecidos pelo fabricante e os medidos nos ensaios.

O compósito com maior percentual de carga de cimento, teve uma perda de 71,68%, em função da elevadíssima carga volumétrica do pó de cimento. Em relação às configurações, a que apresentou maior resistência à flexão foi a de menor percentual de carga de cimento C₁, superior em 56% em relação a de maior percentual de carga C₄, pela prevalência do percentual de resina em relação à carga de pó de cimento.

Em relação às flechas o mesmo comportamento da resistência à flexão foi verificado, com diminuição da propriedade à medida em que se aumentava o percentual de carga de cimento nos compósitos, produzindo aumento da rigidez e consequente perda de elasticidade.

Todos os compósitos apresentaram deformações menores que a da resina. Entre os compósitos a diferença de flecha foi pouco significativa, inferior a 0,3 mm para a maior variação, entre C₁ e C₄, em função da grande rigidez de todos os compósitos.

O módulo de elasticidade dos compósitos foi maior que o da resina, demonstrando-se o aumento do grau de rigidez dos compósitos. Isso pode ser comprovado pela significativa diminuição na flecha, em torno de 86%, da resina em relação ao compósito com maior percentual de cimento.

Apesar dos baixos valores de resistência à flexão todos compósitos podem ser utilizados em aplicações que não requeiram significativas solicitações de tensões de flexão, com múltiplas possibilidades.

4.1.3. Ensaio de Impacto Charpy

A Tabela 9 apresenta os resultados da energia de absorção obtidos através do ensaio de impacto Charpy realizado nos compósitos e na resina poliéster.

Tabela 9 - Resultados da energia de absorção de impacto dos compósitos e da resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Energia de Impacto (J) |
|----------------------------|-------------------------------|
| Resina | 0,251 ± 0,003 |
| C ₁ | 0,236 ± 0,002 |
| C ₂ | 0,229 ± 0,002 |
| C ₃ | 0,225 ± 0,004 |
| C ₄ | 0,222 ± 0,001 |

Com relação ao impacto todos compósitos apresentaram resultados muito próximos aos da resina poliéster, ficando mais uma vez comprovada a função de carga de enchimento do cimento nos compósitos.

A capacidade de absorção da energia no impacto diminuiu com o aumento da quantidade de cimento nos compósitos. A melhor formulação foi a C₁, com perda de 6,0 % em relação à resina e a pior foi com perda de 11,6%, comparado a C₄. Essa diminuição foi causada pela grande carga de pó de cimento no compósito, que

aumentou significativamente a rigidez, diminuindo sua capacidade de absorção de energia de impacto.

A perda de capacidade de energia de impacto em relação à resina foi pouco significativa, porém haveria poucas possibilidades de uso dos compósitos capazes de oferecer resistência a esse esforço mecânico. Ressalte-se que a resina poliéster apresenta uma capacidade de absorção de impacto pouco significativa em relação ao acrílico, polietileno e polipropileno (GORNÍ, 2020).

Poder-se-ia hibridizar o compósito com um material plástico elastomérico ou se utilizar uma matriz termoplástica para sua obtenção, para aumentar sua capacidade de absorção de energia de impacto.

4.2. Ensaio de Densidade Aparente

A Tabela 10 apresenta os resultados da densidade aparente dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 10 - Resultados da densidade dos compósitos e da resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Densidade Aparente (g/cm³) |
|----------------------------|--|
| Resina | 1,309 ± 0,005 |
| C ₁ | 1,508 ± 0,007 |
| C ₂ | 1,647 ± 0,009 |
| C ₃ | 1,715 ± 0,008 |
| C ₄ | 1,817 ± 0,009 |

A densidade aparente dos compósitos foi sempre superior à da resina poliéster. Ocorreu uma elevação de densidade à medida em que se aumentava a proporção de cimento na resina.

A maior densidade do cimento em relação a da resina, podendo variar de 1,2 a 1,6 g/cm³, influenciou na elevação da densidade do compósito (VOTORANTIM, 2020). Deveu-se também à retração de volume quando da mistura entre cimento e resina, devido ao processo de difusão, com maior impacto para o compósito com maior percentual de cimento, C₄.

A boa difusão do pó de cimento na resina produzia uma mistura de boa miscibilidade, bastante homogênea, principalmente pela baixíssima granulometria do cimento, em torno de 75 μm (NBR 11579, 2012).

O compósito com menor quantidade de pó de cimento, C₁, apresentou densidade 15,2% maior em relação à resina poliéster e de maior quantidade, C₄, de 38,8%. O aumento de densidade do compósito com maior percentual de cimento, justificou a diminuição das propriedades mecânicas, associada ao significativo volume de carga de pó de cimento presente no compósito.

4.3. Ensaio de Absorção de Água Destilada e Água do Mar

O ensaio de absorção de água foi realizado para dois meios aquosos, água destilada e água do mar. A Tabela 11 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água destilada e água do mar dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de absorção de água destilada e água do mar nos compósitos e na resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Absorção de Água Destilada (%) | Absorção de Água do Mar (%) |
|----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Resina | 1,01 \pm 0,001 | 1,05 \pm 0,000 |
| C ₁ | 2,87 \pm 0,002 | 3,14 \pm 0,003 |
| C ₂ | 3,10 \pm 0,002 | 3,28 \pm 0,001 |
| C ₃ | 3,24 \pm 0,002 | 3,84 \pm 0,004 |
| C ₄ | 3,63 \pm 0,002 | 4,07 \pm 0,001 |

A resina poliéster apresentou baixo índice de absorção de água, em torno de 1%, para os dois meios aquosos testados, em conformidade com Gomes (2017), em função de sua característica hidrofóbica.

Todos os compósitos apresentaram índices de absorção superior ao da resina poliéster. Esse comportamento já era esperado, porém os índices de absorção de água para os dois meios aquosos estudados foram baixos, alcançando no máximo 3,63% para a água destilada e 4,07% para a água do mar.

Esse comportamento de absorção deu-se em função do cimento ser um material com boas propriedades hidrofílicas. Um outro ponto a ser destacado é que os corpos de prova não foram isolados com resina nas faces cortadas pela serra, para

se evitar que essas superfícies porosas ficassem expostas, com contato direto com o meio aquoso.

Outro ponto relevante, que justifica o quantitativo de absorção de água, está mostrado na micrografia do MEV dos compósitos, principalmente para o C₄, com maior percentual de cimento, onde foram detectados aglomerados, bolhas e vazios, espaços com susceptibilidade ao acúmulo de água. Ressalta-se, ainda, a porosidade dos compósitos produzidos.

A absorção na água do mar foi maior para os compósitos e resina poliéster em relação a da água destilada, em função de sua maior densidade, variando de 1,017 a 1,030 g/L. Segundo ABRAQUA (2020), a água do mar possui um maior número de elementos químicos, em torno de 35%, dentre os quais os principais são o sódio, magnésio, cálcio, cloro, sulfato e carbono, deixando a água mais ionizada que a água destilada.

Outro ponto de relevância, está na análise das características interfaciais dos materiais compósitos, que dependem dos aspectos estruturais das vizinhanças e das propriedades física e química dos seus constituintes (LEÃO, 2013).

4.4. Ensaio de Análise Térmica

A Tabela 12 apresenta os resultados médios das propriedades térmicas, condutividade, resistividade, capacidade volumétrica e difusividade, dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 12 - Resultados das propriedades térmicas dos compósitos e da resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Condutividade Térmica (K) (W/m.K) | Resistividade Térmica (ρ) (°C.cm/W) | Capacidade Térmica Volumétrica (CTV) (MJ/m³.k) | Difusividade Térmica (D) (mm²/s) |
|--------------------------------|--|--|--|--|
| Resina | 0,155 | 645,90 | 1,272 | 0,109 |
| C ₁ | 0,191 | 530,40 | 1,316 | 0,128 |
| C ₂ | 0,224 | 455,30 | 1,468 | 0,154 |
| C ₃ | 0,233 | 435,20 | 1,576 | 0,164 |
| C ₄ | 0,291 | 350,00 | 1,735 | 0,172 |

O comportamento térmico de todos compósitos testados para a função de isolante térmico foi inferior ao da resina poliéster, em função da condutividade térmica do pó do cimento ser superior ao da resina, 0,9 W/m.K (PROTOLAB, 2020).

Houve uma piora nas propriedades térmicas analisadas, K, C e D, à medida em que se aumentava a quantidade de cimento na resina. O compósito de menor condutividade térmica foi C₁, superior em 23,2% em relação à resina poliéster. O de maior condutividade térmica foi C₄, com aumento em relação à resina de 87,8%.

O pó do cimento adicionado à resina, na formação dos compósitos, produziu um aumento gradativo nas propriedades térmicas, porém a condutividade térmica dos compósitos testadas esteve muito abaixo da relativa à pedra de mármore, 2,5 W/mK (PROTOLAB, 2020).

O comportamento da resistividade, resistência à passagem da onda térmica, foi inversamente proporcional ao da condutividade térmica, diminuindo a medida em que se aumentava a quantidade de carga de cimento no compósito.

A capacidade térmica volumétrica (CTV) foi crescendo à medida em que se aumentava a quantidade de cimento nos compósitos, uma vez que a capacidade térmica do cimento é significativamente maior que a da resina, em torno de 2,5 MJ/m³.K (ALVES, 2014).

O compósito de maior CTV foi a C₄ com aumento de 37% em relação à resina e de 31,8% em relação a de menor CTV, C₁. Mais uma vez a quantidade de cimento influenciou bastante nas propriedades térmicas dos compósitos obtidos. Com relação a esse parâmetro seria necessária uma quantidade maior de energia para um aumento de temperatura dos compósitos por unidade de volume.

O mesmo comportamento pode ser verificado na difusividade térmica, com aumento à medida em que crescia a quantidade de cimento nos compósitos. A onda térmica passava com maior velocidade pelos compósitos do que em relação à resina, apresentando, portanto, menor poder de isolamento térmico, em coerência com a maior condutividade térmica.

4.5. Ensaio de Envelhecimento Natural

A Tabela 13 apresenta os resultados da variação da massa nos corpos de prova submetidos ao ensaio de envelhecimento natural. A Figura 48 mostra as macrografias antes e após o ensaio de envelhecimento dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 13 - Resultados da variação da perda de massa no ensaio de envelhecimento dos compósitos e resina poliéster.

| Matriz / Compósitos | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | Perda de Massa (%) |
|----------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| Resina | 50,038 | 50,021 | 0,040 |
| C ₁ | 52,151 | 51,969 | 0,350 |
| C ₂ | 58,655 | 58,436 | 0,374 |
| C ₃ | 58,660 | 58,432 | 0,390 |
| C ₄ | 60,530 | 60,280 | 0,410 |

Todos compósitos apresentaram perda de massa muito superior à da resina poliéster, porém pouco significativa, com valor máximo correspondente a 0,41%. A ausência de recobrimento de resina nas faces laterais dos corpos de prova expostos pode ter contribuído para esse aumento na deterioração dos compósitos em relação à resina.

Os agentes degradativos mais atuantes no ensaio de envelhecimento natural foram variação de temperatura, chuvas, umidade e radiação ultravioleta (UV). Os polímeros são suscetíveis a sofrerem deterioração devido à desintegração estrutural da cadeia principal. Segundo Callister (2016), é importante ressaltar que o processo de degradação envolve fenômenos físicos e químicos; e a partir desses, ocorre uma perda de integridade estrutural do material.

A perda de massa causada pela degradação relativa à exposição às intempéries apresentou comportamento crescente com o aumento do percentual de resíduo de cimento no compósito. Os compósitos de menor e maior perdas foram C₁ e C₄, respectivamente.

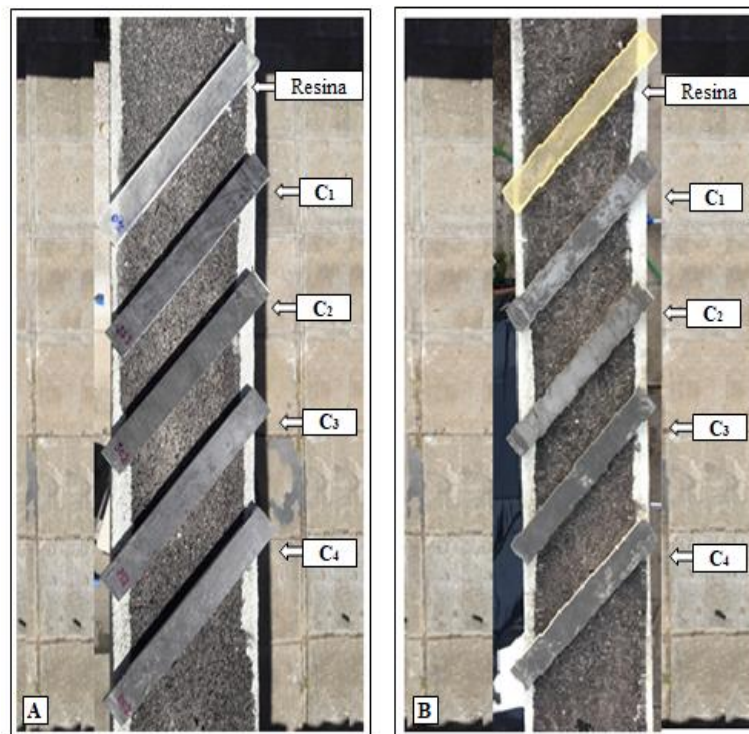
O compósito mais viável para a exposição às intempéries e variações climáticas, em todas as estações, foi C₁, porém de maior custo uma vez que tem uma menor quantidade de pó de cimento do que a da resina poliéster. Combinando-se condições técnicas e econômicas o compósito mais viável foi o C₄.

A principal mudança entre as amostras antes e após exposição, no período de um ano, ocorreu na coloração, em consonância com Shokrieh e Bayat (2007), que citaram o amarelamento, a perda de brilho com mudança de cor, a perda de translucidez, o fissuramento, o afloramento de fibras devido ao desgaste da matriz

polimérica, o empolamento e perda das propriedades mecânicas como principais características da degradação por envelhecimento natural.

A Figura 25 mostra as macrografias dos corpos de prova dos compósitos e da resina poliéster submetidos ao ensaio de envelhecimento.

Figura 25 - Amostras do teste de envelhecimento. a) Antes do ensaio de envelhecimento b) após um ano expostas às variações das condições climáticas.



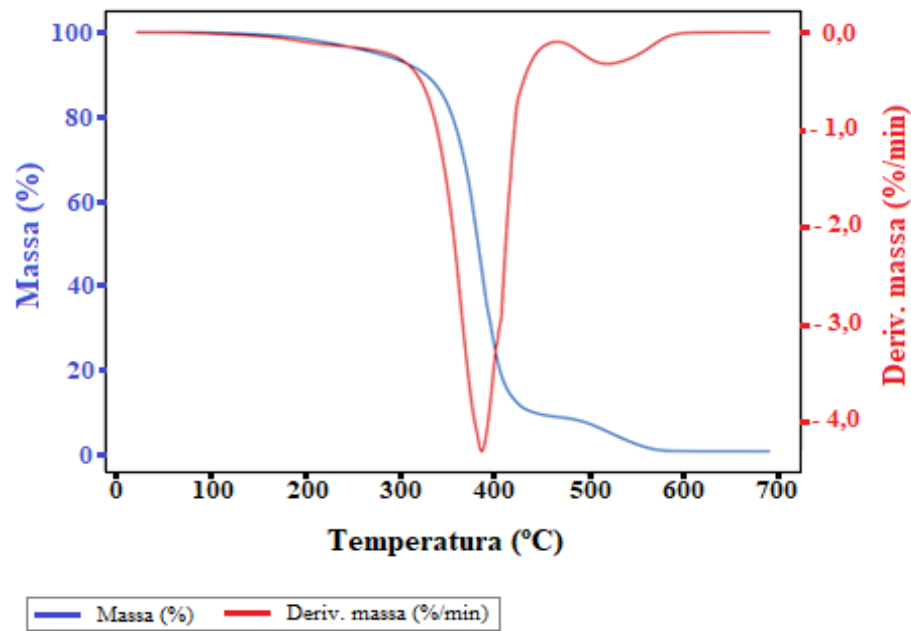
Fonte: Autor

4.6. Ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA)

Os gráficos das Figs. 26, 27, 28, 29 e 30 mostram as curvas de massa das amostras em função da temperatura (curva de TGA - termogravimetria) e a derivada dessa curva (curva de DTG – termogravimetria derivada), que fornecem informações da variação da massa em função da temperatura e permite identificar as etapas da degradação térmica, dos compósitos e da resina poliéster.

A Figura 26 mostra o comportamento da TGA e da DTG no ensaio de termogravimetria realizado numa amostra da resina poliéster.

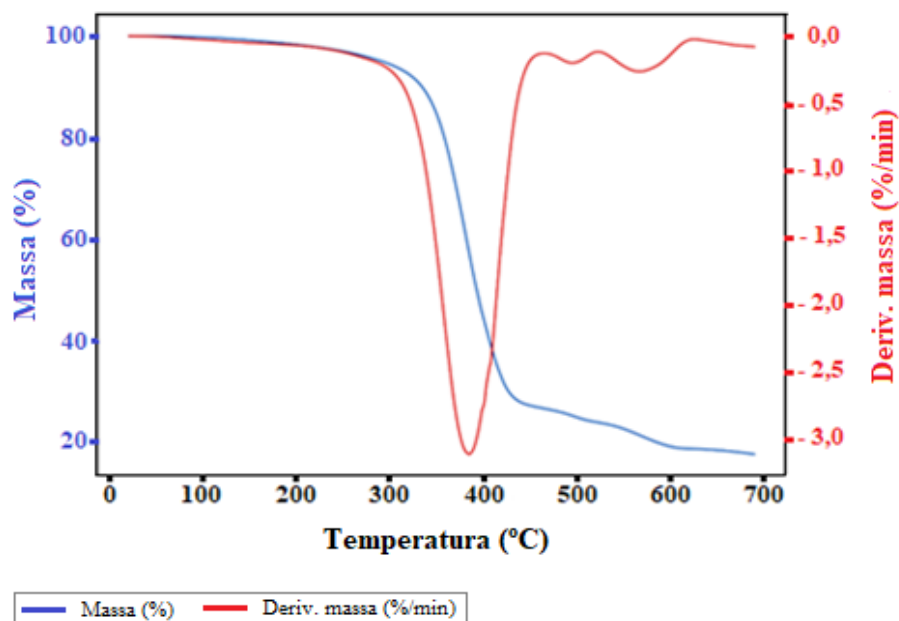
Figura 26 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado numa amostra da resina poliéster.



Fonte: Autor

A Figura 27 mostra o comportamento da TGA e DTG no ensaio de termogravimetria realizado numa amostra do compósito C₁.

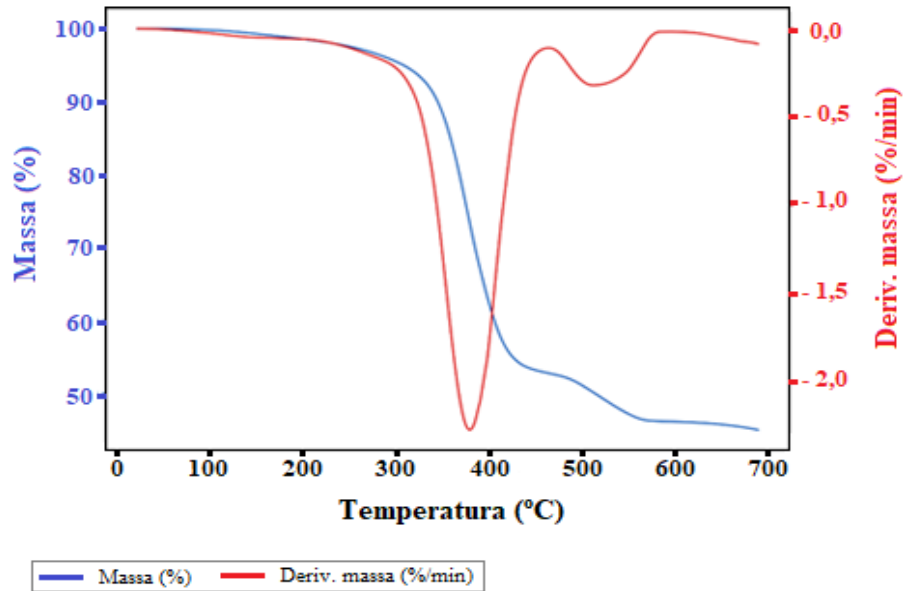
Figura 27 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C₁.



Fonte: Autor

A Figura 28 mostra o comportamento da TGA e DTG no ensaio de termogravimetria realizado numa amostra do compósito C₂.

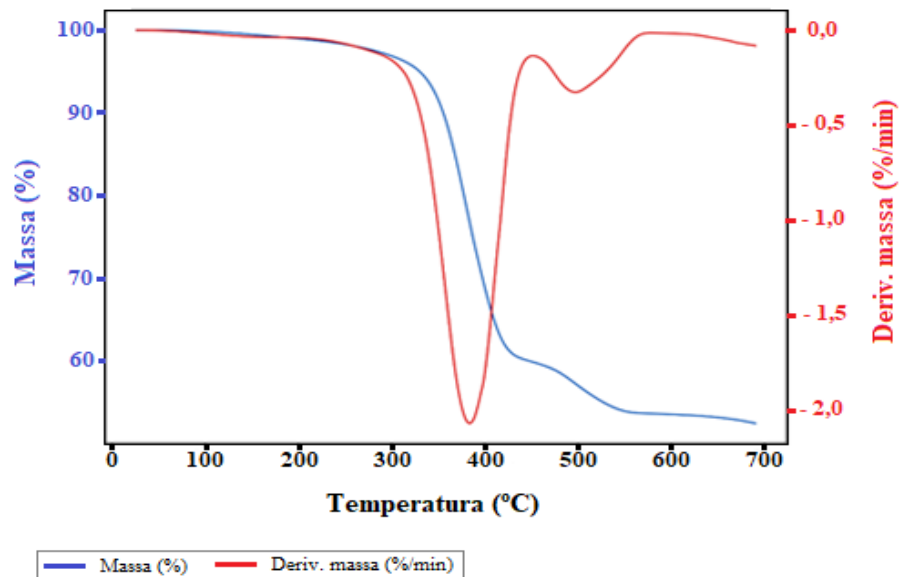
Figura 28 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C₂.



Fonte: Autor

A Figura 29 mostra o comportamento da TGA e DTG no ensaio de termogravimetria realizado numa amostra do compósito C₃.

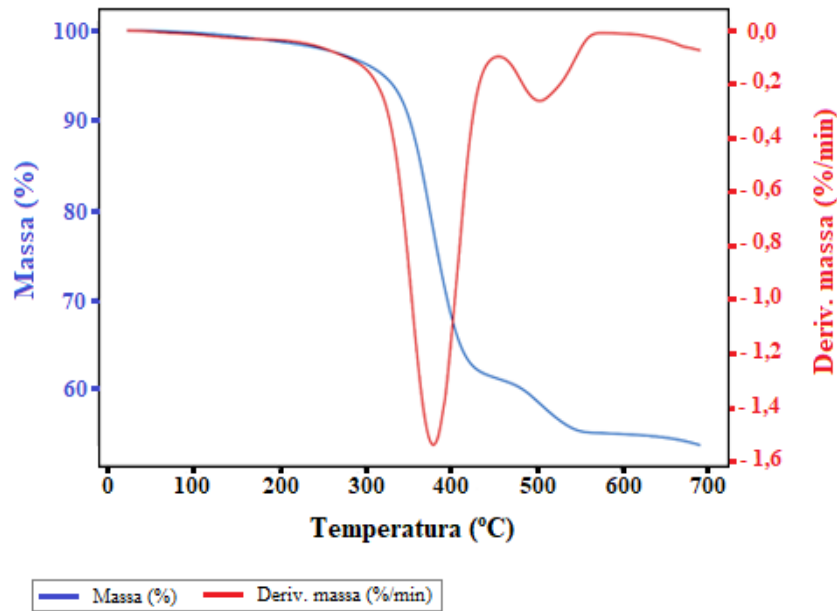
Figura 29 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C₃.



Fonte: Autor

A Figura 30 mostra o comportamento da TGA e DTG no ensaio de termogravimetria realizado numa amostra do compósito C₄.

Figura 30 - Curvas de TGA (azul) e de DTG (vermelha) do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito C₄.



Fonte: Autor

Geralmente as curvas de TGA indicam perdas de massa, conforme ocorreu com as amostras submetidas a esse ensaio. Essas perdas de massa são causadas tipicamente por reações químicas, tais como degradação térmica, perda de água, cristalização, e combustão, e por transformações físicas, tais como vaporização, evaporação, sublimação, secagem e dessorção (WINDMANN, 2001 e SOUZA, 2019).

De acordo com a norma ASTM E2550-17 (2017) é necessário determinar a variação de massa e a temperatura onset (temperatura de início de perda de massa) de cada reação observada no ensaio. Esse cálculo se deu através de uma análise matemática e geométrica dos dados que compõem as curvas de TGA e de DTG. Os valores exigidos pela norma, bem como a temperatura de pico, a qual corresponde à temperatura de máxima degradação, estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de temperatura onset, temperatura de pico e perda de massa dos compósitos e da resina.

| Matriz / Compósitos | Temperatura Onset (°C) | Temperatura de Pico (°C) | Varição de Massa (%) |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Resina | 344,07 | 386,88 | 99,28 |
| C ₁ | 340,60 | 385,99 | 82,46 |
| C ₂ | 337,20 | 380,06 | 54,96 |
| C ₃ | 335,10 | 380,05 | 47,51 |
| C ₄ | 334,01 | 383,10 | 46,28 |

Percebeu-se que a perda de massa foi diminuindo conforme se aumentava a quantidade de carga de pó de cimento na resina. Isso se explica pelo fato de que a perda de massa sofrida pela carga foi menor que a perda de massa sofrida pela resina, em função da maior capacidade de suportar altas temperaturas pelo pó de cimento, uma vez que no seu processo de fabricação são utilizadas faixas de temperaturas no forno de 1450°C.

Com relação à temperatura de início de perda de massa, identificou-se que a resina e os compósitos apresentaram temperaturas de início do processo de degradação térmica praticamente iguais, em torno de 340°C, apresentando, portanto, mesmos níveis de estabilidade térmica.

Foi possível se observar que os compósitos apresentaram maior resistência à degradação térmica, evidenciada pela menor perda de massa. Os compósitos C₂, C₃ e C₄, apresentaram uma massa final, após o ensaio, próximos de 50%, enquanto a resina apresentou uma massa final em torno de 0,7%.

Os compósitos nos ensaios de análise termogravimétrica apresentaram resultados superiores aos da resina poliéster, sendo mais resistentes ao processo de degradação térmica pela elevação de temperatura. Essa maior resistência não significa muito, em função de que o agente agregador do compósito é a resina, e a perda desse elemento significa a própria inviabilidade do compósito, pois restarão apenas resíduos de cimento após a temperatura de 700°C.

A Tabela 15 exibe de forma resumida os níveis de temperatura onde ocorreram os principais eventos térmicos durante o ensaio TGA realizados com os compósitos e a resina poliéster. Os dados da tabela foram extraídos dos gráficos das Figs. 26, 27, 28, 29 e 30.

Tabela 15 - Perda de massa para vários níveis de temperatura dos compósitos e da resina poliéster.

| Temperatura (°C) | Resina (%) | C ₁ (%) | C ₂ (%) | C ₃ (%) | C ₄ (%) |
|------------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 100 | 0,1 | 0,24 | 0,20 | 0,16 | 0,25 |
| 200 | 1,54 | 1,67 | 1,44 | 1,04 | 1,25 |
| 300 | 6,74 | 5,49 | 4,48 | 3,13 | 3,70 |
| 350 | 16,72 | 14,86 | 11,38 | 8,41 | 9,33 |
| 400 | 74,01 | 54,77 | 37,29 | 31,13 | 31,50 |
| 450 | 90,57 | 72,80 | 46,74 | 40,04 | 38,69 |
| 500 | 92,71 | 75,10 | 48,80 | 42,94 | 41,26 |
| 550 | 97,56 | 77,36 | 52,71 | 46,02 | 44,68 |
| 600 | 99,25 | 80,87 | 53,83 | 46,41 | 45,04 |

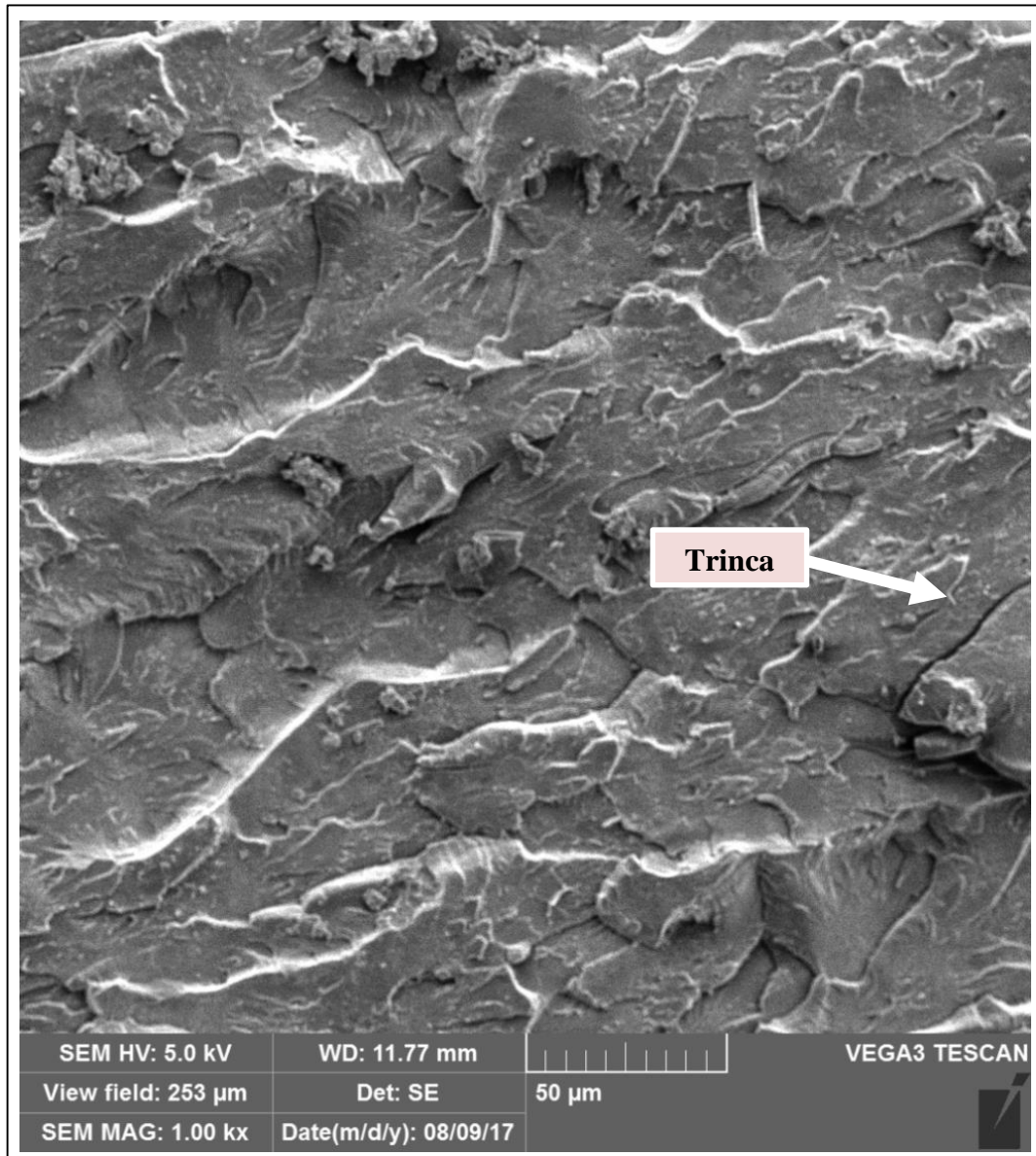
Na Tabela 12, a perda de massa média dos compósitos foi insignificante para níveis de temperatura abaixo de 300°C, em torno de 4,0%. Para as aplicações que foram colocadas em prática, a fabricação de uma mesa de 1,5 m² e de um banco de 0,02m², as temperaturas de operação foram inferiores a 100°C, com perda de massa insignificante, inferior a 0,25%, não trazendo quaisquer prejuízos aos processos de obtenção do compósito e fabricação das estruturas projetadas e pretendidas.

4.7. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figuras 31, 32, 33, 34 e 35 mostram as micrografias do ensaio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas superfícies das fraturas das amostras submetidas ao ensaio de tração dos compósitos e da resina poliéster.

A Figura 31 mostra a micrografia obtida da região de fratura da amostra de resina poliéster.

Figura 31 - Micrografia da resina poliéster ampliada em 1000 vezes.

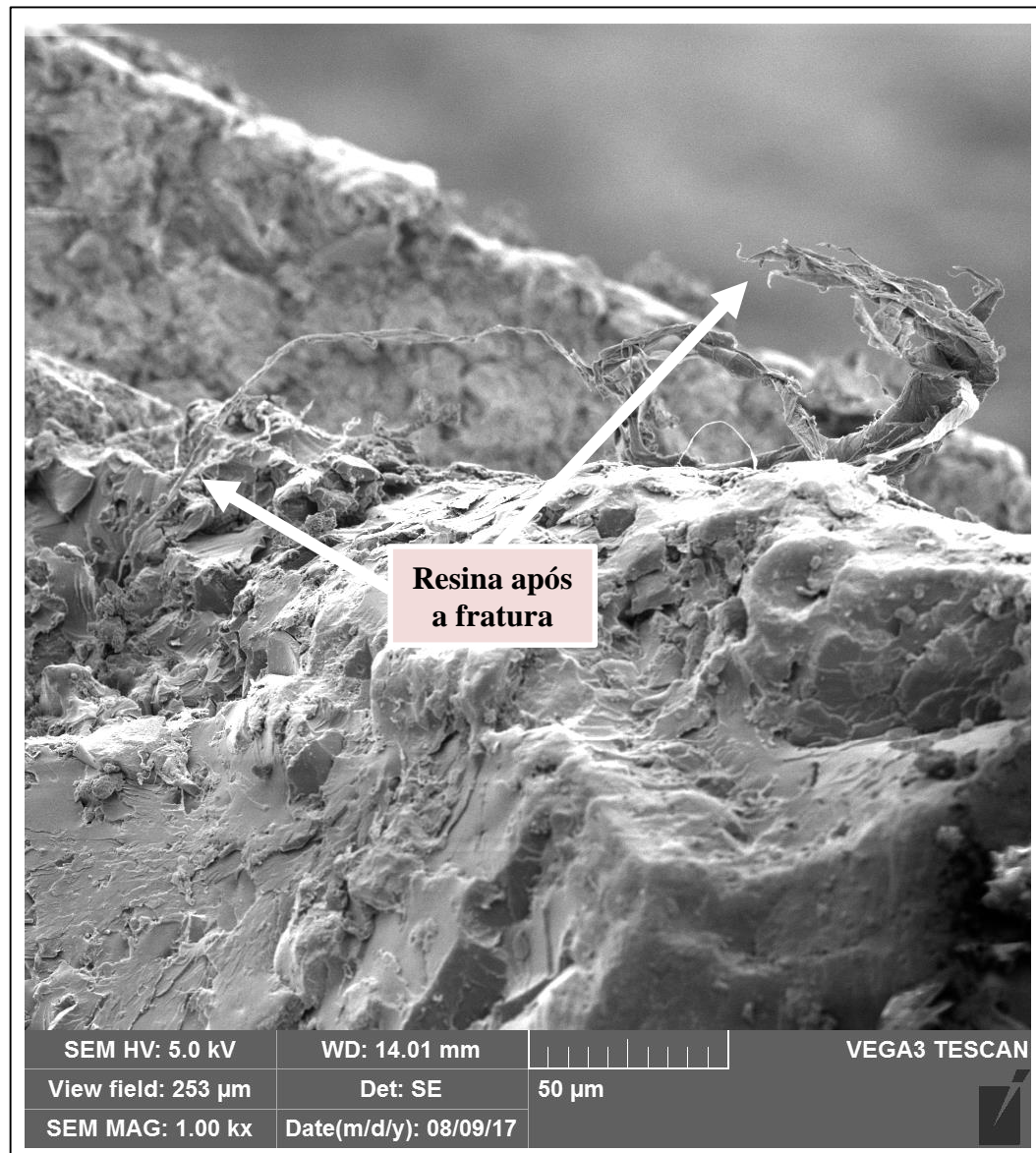


Fonte: Autor

Ficou evidenciada a formação de trincas, defeito que provavelmente foi gerado por um movimento de inclinação no momento de acomodação das garras, resultando em uma maior energia de fratura ou pelo processo de fabricação, trazendo uma maior fragilização nessa amostra.

A Figura 32 mostra a micrografia obtida da região de fratura da amostra do compósito C₁.

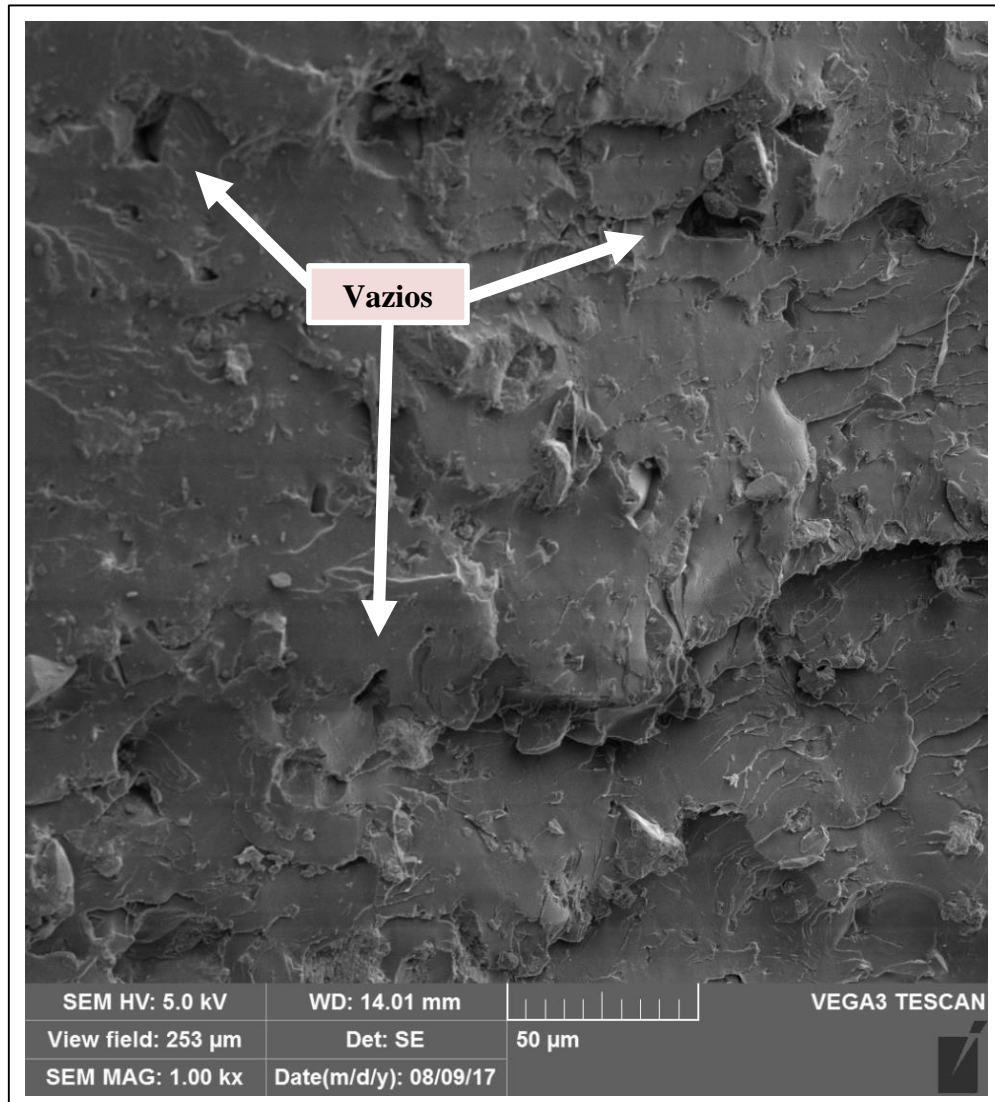
Figura 32 - Micrografia no compósito C₁ ampliada em 1000 vezes.



Fonte: Autor

Na micrografia da Figura 32 pode-se notar o arranchamento da resina poliéster. Pode-se concluir que isso ocorreu devido a quantidade de resina contida no compósito C₁, em proporção muito maior que a de pó de cimento, melhorando o desempenho mecânico que está associado ao aumento da adesão matriz-carga.

A Figura 33 mostra a micrografia obtida da região de fratura da amostra do compósito C₂.

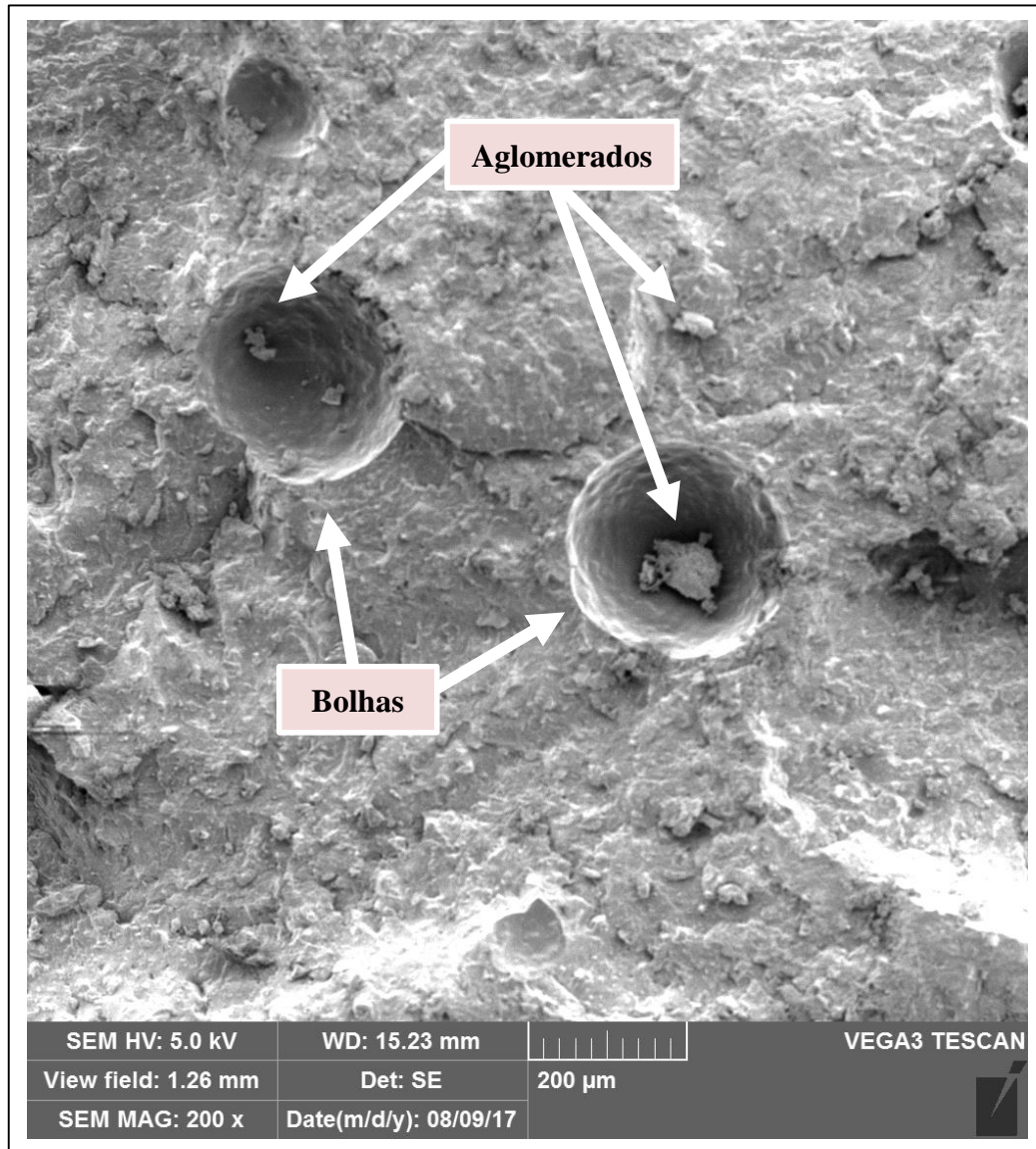
Figura 33 - Micrografia no compósito C₂ ampliada em 1000 vezes.

Fonte: Autor

Percebeu-se a presença de vazios, que podem facilitar a formação e propagação de trincas, produzindo diminuição na resistência mecânica. Esse defeito provavelmente foi decorrente dos processos manual de mistura e de prensagem do compósito para a fabricação das placas para obtenção dos corpos de prova para os ensaios de caracterização.

A Figura 34 mostra a micrografia obtida da região de fratura da amostra do compósito C₃.

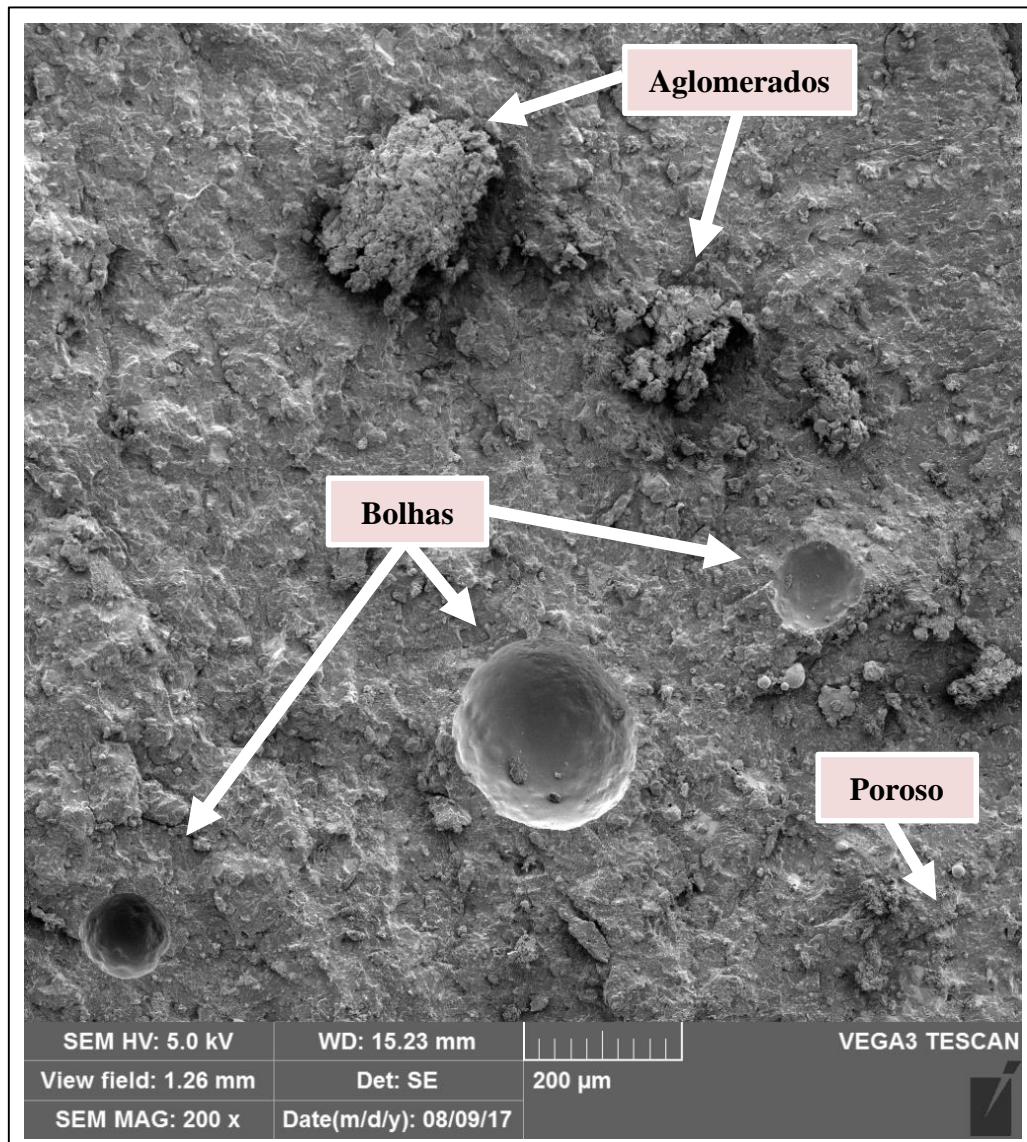
Figura 34 - Micrografia no compósito C₃ ampliada em 200 vezes.



Fonte: Autor

Houve a presença de bolhas, oriundas dos processos manual de mistura e de prensagem, que pode favorecer a formação de trincas, prejudicando a tenacidade do compósito e tornando-o frágil. Observou-se também a presença de aglomerados, defeito que também produziu prejuízos à resistência mecânica de C₃. A presença de aglomerados também está associada ao processo manual de mistura entre os elementos do compósito.

A Figura 35 mostra a micrografia obtida da região de fratura da amostra do compósito C₄.

Figura 35 - Micrografia no compósito C₄ ampliada em 200 vezes.

Fonte: Autor

Notou-se uma maior porosidade na interface matriz-carga, indicando que a medida em que se aumentava a quantidade de cimento se diminuía a compatibilidade entre matriz e carga, trazendo prejuízos à adesão interfacial e às propriedades mecânicas. Essa porosidade detectada, com maior número de bolhas, contribuiu para o aumento da absorção de água do compósito C₄. A presença de aglomerados também ficou evidenciada, principalmente pela maior presença de pó de cimento.

Os defeitos observados evidenciaram possíveis falhas nos processos de mistura manual entre matriz e carga, para obtenção do compósito, e de prensagem dos compósitos para a fabricação das placas para a retirada dos corpos de prova para

os ensaios de caracterização, trouxeram prejuízo às propriedades mecânicas do compósito.

Recomenda-se, portanto, uma otimização do processo de fabricação das placas de compósitos, devendo-se adotar um processo de mistura mecânica entre os elementos formadores do compósito, para a obtenção de uma mistura mais homogênea entre a resina-cimento, buscando-se minimizar a ocorrência de defeitos como bolhas, vazios e aglomerados.

Esses defeitos, contudo, não inviabilizam a fabricação de estruturas que não necessitem de significativos níveis de resistência mecânica, como os protótipos produzidos, que se constituem na aplicabilidade do compósito.

4.8. Fabricação da Mesa e do Banco

Para demonstrar a viabilidade de aplicação do compósito produzido foram fabricados uma mesa e um banco utilizando o compósito de melhor relação custo-benefício, o C₄. Esses produtos foram escolhidos devido à sua facilidade de fabricação e ao fato de não ser necessária uma resistência mecânica significativa em suas estruturas.

A Tabela 16 apresenta a comparação de massa e custo da pedra da mesa fabricada com o C₄, com pedras de mármore e granito e com um tampo de vidro, todos com mesmas dimensões de comprimento e largura.

Tabela 16 - Comparativo entre tampos de mesa de compósito, mármore, granito e vidro.

| Tampo da Mesa | | | |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Material | Dimensões C x L x E (m) | Preço Médio* (R\$) | Massa Final (Kg) |
| Compósito C ₄ | 1,50 x 1,00 x 0,022 | 440,00 | 44,56 |
| Mármore Travertino | 1,50 x 1,00 x 0,020 | 670,00 | 76,92 |
| Granito Verde Ubatuba | 1,50 x 1,00 x 0,020 | 670,00 | 95,25 |
| Vidro Comum | 1,50 x 1,00 x 0,015 | 994,00 | 56,25 |

* Pesquisa de preço realizada no comércio local da cidade do Nata/RN em três lojas especializadas, em 20/11/2020.

O tampo de mesa fabricado em compósito C₄ ficou 42% mais leve que o de mármore, 53% que o de granito e 21,8% que o de vidro. Em relação ao custo foi 35% mais barato que os de mármore e granito e 55% que o de vidro, o que demonstrou a viabilidade econômica da mesa fabricada com o compósito C₄, além de ser mais leve, outra característica importante em um móvel para residências.

Ressalte-se que a mesa e o banco produzidos já estão em operação há mais de dois anos nas condições normais de uso, na sala de aula do LMHES/UFRN, demonstrando-se, portanto, ser viável para aplicação na fabricação de móveis e bancadas, mercado de grande possibilidade para o compósito proposto e estudado. A Figura 36 mostra o conjunto de mesa e banco fabricado com o compósito C₄.

Figura 36 - Conjunto de mesa e banco fabricado no LMHES com compósito C₄.



Fonte: Autor

5. Conclusões e Sugestões

Em consonância com os objetivos delineados para o presente trabalho apresentam-se as conclusões e sugestões pertinentes, decorrentes da análise dos resultados da caracterização dos compósitos.

5.1. Conclusões

Foi demonstrada a viabilidade de obtenção dos compósitos, com o pó de cimento desempenhando função de carga de enchimento, uma vez que os compósitos apresentaram resistência mecânica inferior à resina.

Os compósitos apresentaram baixa resistência mecânica, devendo ser utilizados apenas para aplicações com pequenas solicitações de carga.

Os compósitos tiveram densidade, capacidade de absorção de água e perda de massa por envelhecimento maiores que a matriz, com aumento proporcional ao crescimento do percentual de cimento e com melhores resultados comparativos para a perda de massa por exposição às intempéries.

O comportamento térmico dos compósitos foi inferior ao da resina, demonstrando-se inviáveis em aplicações como isolantes térmicos.

A TGA demonstrou a inexistência de perda de massa para o nível de temperatura alcançado no processamento do compósito.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou a ocorrência de trincas, vazios, bolhas e aglomerados que trouxeram prejuízos à resistência mecânica dos compósitos, demonstrando-se que o processo de fabricação das placas de compósitos precisa ser otimizado, devendo ser adotada a mistura mecanizada dos elementos do compósito.

Foi demonstrada a viabilidade prática dos compósitos, sendo o C₄ o que apresentou a melhor relação custo-benefício. Uma pedra artificial fabricada com esse compósito foi 42% e 53% mais leve e 35% mais barata que pedras de mármore/granito nas mesmas dimensões, viabilizando sua utilização em substituição às pedras ornamentais largamente utilizadas em ambientes decorativos.

5.2. Sugestões

1. Testar a obtenção do compósito com carga de pó de cimento utilizando outras matrizes poliméricas;
2. Estudar o comportamento acústico do compósito proposto;
3. Fabricar bancadas de cozinha e de banheiro, e comparar com produtos fabricados com pedras convencionais de mármore/granito;
4. Estudar a resistência do compósito ao riscamento e ao manchamento.

6. Referências Bibliográficas

ALVES, Robinson Antônio Aparecido. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos cerâmicos e cerâmico-poliméricos destinados a restauração de monumentos históricos fabricados em esteatito (pedra-sabão)**. São João Del Rei, MG: 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João del-Rei. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ALVES, L. A. **Análise acoplada de temperatura e umidade em concreto em altas temperaturas**. Rio de Janeiro, RJ: 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

ABCP - **Associação Brasileira de Cimento Portland**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/?politica=sim>>. Acesso em: 20 set. 2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT **NBR 11579/2012** – Cimento Portland – determinação do índice de finura pó meio da peneira 75 µm (nº 200).

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT **NBR 16697/2018** - Cimento Portland – Requisitos. p. 3.

ABRAQUA - Associação Brasileira de Aquarofilia. Disponível em: <<http://www.abraqua.org.br/densidade/>> Acesso em: 10 nov. 2020.

AHMETLI, G.; DAG, M.; KURBANLI, R. Recycling studies of marble processing waste: Composites based on commercial epoxy resin. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 24–30, 2012.

ASOKAN, P.; Firdoous, M.; Sonal, W. Properties and Potential of Bio Fibres, Bio Binders, and Bio Composites. **CSIR – Advanced Materials and Processes Research Institute, Habibganj Naka, India received: January 30**, v. 30, p. 254-261. 2012.

ASTM D3039/D3039M-17, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D570-98 (2010), **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D5930-17, **Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D6110-18, **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D7264/D7264M-15, **Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D1435-13, **Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D792-13, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM E2550-17, **Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Uma breve história do cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>>. Acesso em: 18 set. 2018.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. Itajubá, MG:

2013. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá. Instituto de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. Ed. 9ª. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CASTRO, A. L.; Liborio, J. B. L. e Pandolfelli V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método computacional de dosagem, **Revista Cerâmica**, v. 57, p. 341, Jan/Mar 2011.

COSTA, Larissa Caroline Fernandes. **Obtenção e estudo de um compósito de matriz de poliéster e carga de resíduos de mármore**. Natal, RN: 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

EMBRAPOL® - **Industria de Polímeros Ltda**. Disponível em <<http://embrapol.com.br>>, acessado em: 10 de junho de 2018.

GOMES, Jailton Weber. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica e resíduos gerados pela manufatura do mdf (medium density fiberboard)**. Natal, RN: 2015. 161 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

GOMES, Jailton Weber. GODOI, Glauber Silva. SOUZA, Luiz Guilherme Meira. SOUZA, Luiz Guilherme Vieira Meira. **Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de MDF**. Polímeros, vol. 27, no. spe São Carlos, p.48-55, Epub 16 mar. 2017. Disponível em:<https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282017000700048&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 10 dez. 2018.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução aos plásticos**. Editor Técnico, Revista Plástico industrial em <<http://www.gorni.eng.br/intropol.html>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

IZQUIERDO, Indara Soto. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. São Carlos, SP: 2011. 146 f. Dissertação

(Mestrado) p. 21. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de estruturas.

LEÃO, M. C. **Compósitos poliméricos a base de fibras de licuri: efeitos da hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado**. Natal, RN: 2013. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais.

LIMA, Tatiana Macedo Nogueira. **Competição na Indústria do Cimento no Brasil**. São Paulo, SP: 2011. 141 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Departamento de Economia. Programa de Pós-Graduação em Economia.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A. D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. Editora: Pini Ltda. São Paulo /SP. 2008.

MENDONÇA. P. T. R. **Materiais compostos & estruturas - sanduíche: projeto e análise**. São Paulo: Maggiore, 2005.

KUMAR, S.; SINGH, J.; JUMAR, M.; MOHAPATRA, S. K. Properties of glass-fiber hybrid composites: a review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 56, n. 5, p. 455-469, 2016.

ORAL, I. Ultrasonic properties of epoxy resin/marble waste powder composites. **Article, Polymer Composites**, v.36, p. 584 -590, 2015.

PANZERA, A. L. R.; SABARIZ, K.; STRECKER, P. H. R.; BORGES, D. C. L.; VASCONCELOS, W. L.; WASCONCELOS. Propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de cimento Portland e resina epóxi. **Cerâmica** 56, 77-82 p. 2010

PAULO, Marcos Antônio de Lemos. **Projetos e simulações de protótipos virtuais para máquinas recolhadora de caju**. Fortaleza, CE: 2014. 67 f. Dissertação

(Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

PROTOLAB – **Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação**. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>>. Acesso em: 10 set. 2020.

RIBEIRO, C. E. G. **Produção de rocha artificial utilizando resíduos do processamento de mármore**, CBECIMAT, 2012.

RIBEIRO, C. E. G. **Resistência ao manchamento de rochas artificiais produzidas com resíduo de mármore calcítico e poliéster insaturado**. CBECIMAT, 2012.

RIBEIRO C.E.G.; Rodriguez R. J. S. and Vieira C.M.F. **Production of ornamental compound marble with marble waste and unsaturated polyester**. In: Yurko J, Zhang L, Allanore A, Wang C, Spangenberg JS, Kirchain RE. editors. EPD Congress 2014. Hoboken: John Wiley & Sons; 2014.

RIBEIRO C.E.G.; Rodriguez R. J. S. and Vieira C.M.F. **Determination of apparent dry density for ternary mixture of crushed marble waste**. In: Yurko J, Zhang L, Allanore A, Wang C, Spangenberg JS, Kirchain RE, et al., editors. EPD Congress 2014. Hoboken: John Wiley & Sons; 2014.

RIBEIRO, C. E. G. e RODRIGUEZ, R. J. S. Influência da pressão de compactação e do conteúdo de partículas no comportamento térmico e mecânico de mármore artificiais com resíduos de mármore e poliéster não saturado. **Pesquisa de Materiais**, v. 18, 2015.

RUBERT, Sílvia. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação**. Pato Branco, PR: 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de pós-graduação em tecnologia químicos e bioquímicos.

SHOKRIEH, M M; Bayat, A. **Effects of Ultraviolet Radiation on Mechanical Properties of Glass/Polyester Composites**. Journal of Composite Materials Vol. 41, No. 20: 2443- 2455, 2007.

SILAEX – **Industria Química LTDA.** São Paulo/SP. Disponível em: <<https://silaex.ind.br/resina-poliester>>. Acesso em: 20 set. 2020.

SILVA, F. S.; Ribeiro, C. E. V.; Rodrigues, R. J. S.; Avaliação física e mecânica de rocha artificial produzido com resíduo de mármore calcita. **Primeiro encontro de engenharia ciências e materiais e inovação.** Rio de Janeiro /RJ. 2015.

SILVA, Humberto Sartori Pompeo. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de Curauá e híbridos com fibras de vidro.** Porto Alegre, RS: 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgicas e de Materiais.

SOUZA, Luiz Guilherme Vieira Meira. **Efeitos da Adição de tecido de fibra de vidro tipo E a um compósito de resina poliéster e tecido de fibra de algodão.** Natal, RN: 2019. 130 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SNIC - **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento.** Disponível em: <http://snic.org.br/assets/doc/historia_do_cimento_no_brasil.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2018.

VIVAS, Viviane. **Influência da Degradação Ambiental no Comportamento Mecânico e Balístico de Compósitos Produzidos com Fibra de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular.** Rio de Janeiro, RJ: 2013. 216 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia.

VOTORANTIM S.A. – **Votorantim Cimento.** Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/densidade-concreto/>>. Acesso em: 28 set. 2020.

WANG, J. G., L. Wu, J. X. Zhou, X. Y. Qi, D. L. Yi, Preparation and Characterization of Marble/Unsaturated Polyester Resin Composite Materials, **Advanced Materials Research**, Vols. 152-153, pp. 825-828, 2010

WINDMANN, G. Interpreting TGA curves. Schwerzenbach: **Mettler Toledo GmbH**, 2001.