



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



Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço

Miguel Cabral de Macêdo Neto

Natal-RN, Brasil
Outubro, 2016

Miguel Cabral de Macêdo Neto

Obtenção e caracterização de um compósito de matriz
polimérica com carga de palha de aço

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador
Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Natal-RN, Brasil
Outubro, 2016

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

Neto, Miguel Cabral de Macedo.

Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço / Miguel Cabral de Macedo Neto. - 2016.

74 f.: il.

Doutorado (Tese) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2016.

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

1. Teste dos materiais - Tese. 2. Palha de aço - Tese. 3. Fibra Metálica - Tese. 4. Compósitos poliméricos - Tese. I. Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/Biblioteca Central Zila Mamede

CDU 620

Tese de Doutorado sob o título *Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço* apresentada por Miguel Cabral de Macêdo Neto e aceita pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza (UFRN)

Presidente

Prof. Dr. Moisés Vieira de Melo (UFRN)

Examinador

Prof. Dr. Marcos Silva de Aquino (UFRN)

Examinador

Prof. Dr. Íverton Rodrigo Barbosa Gomes (UNIFACEX)

Examinador

Prof.^a Dra. Maria Kalionara de Freitas Mota (MEC)

Examinadora

Natal-RN, Brasil, Outubro, 2016

Dedico este trabalho aos meus pais, Zenóbio Brandão de Macedo e Francisca de Oliveira Macêdo, e minha irmã.

Agradecimentos

Primeiramente ao senhor Jesus Cristo, por ter me dado saúde e inteligência para ultrapassar as barreiras diárias para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus pais e irmã, por todo apoio e carinho que me deram nesta vida

Ao meu Orientador Professor Dr. Luiz Guilherme, não só pelas suas orientações acadêmicas, mas também pelas orientações da vida, que escuto desde 2005. Ao professor por ser um exemplo de dedicação e profissionalismo, sempre trabalhando no laboratório, mostrando o que é fazer sua atividade profissional com amor e satisfação. Obrigado professor juntos com os alunos, por tornar um laboratório acadêmico um lugar agradável com muita alegria.

Ao mestre Aldo, pela sua contribuição e ajuda neste trabalho, sempre esteve a disposição para ajudar. Aos amigos que fazem parte do laboratório de máquinas hidráulicas e energia solar, pela colaboração incansável durante toda esta batalha.

Leonardo Coutinho pela contribuição e ajuda e Thiago MyMy pela super pequena contribuição.

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pela oportunidade de participar do curso de pós-graduação. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM/UFRN, pela realização deste Curso de Doutorado.

Ao Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, e aos demais laboratórios da UFRN, dos quais precisei para realização deste trabalho, Aos professores e colegas do curso de pós-graduação pela amizade e companheirismo.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a concretização deste trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone Beauvoir

RESUMO

O surgimento de materiais compósitos tem o objetivo de se encontrar propriedades específicas desejadas para determinadas aplicações, como melhor resistência mecânica, materiais mais leves, economicamente viável, materiais recicláveis e etc. Nessa perspectiva estudou-se a viabilidade do uso da palha de aço para a obtenção de um compósito de matriz polimérica. Foram testadas três formulações, com 10%, 15% e 20% de fibras do compósito. Para a caracterização do compósito foram determinadas propriedades térmicas (condutividade, capacidade térmica, difusividade e resistividade), mecânicas (tração e flexão) e físicoquímicas (MEV, DRX, densidade, absorção e degradação). O compósito, em suas três formulações, apresentou resistência mecânica superior a quase totalidade dos compósitos já estudados no laboratório LMHES. Essa maior capacidade de resistência mecânica esteve associada a utilização de uma fibra metálica. No que diz respeito as propriedades térmicas, o compósito estudado apresentou uma menor capacidade de isolamento térmico que os outros compósitos anteriormente estudados. O compósito apresentou maior viabilidade para a absorção de umidade e resistência mecânica. o pior resultado deu-se para aplicações térmica onde sua condutividade térmica está acima da maioria dos compósitos polimérico mostrados pela literatura, em função da utilização de uma fibra metálica. Foram realizados ensaios mecânicos, térmicos dentre outros, apresentando ótimos resultados devido as propriedades específicas do compósito proposto como resistência a flexão, e boa resistência à absorção de meios aquosos. As propriedades do compósito pode ser utilizado para a fabricação de estruturas que não requeiram significativa resistência mecânica na tração, como por exemplo, protótipos solares e eólicos, como fornos e fogões solares e pás de aerogeradores.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos, Palha de aço, Fibra Metálica.

ABSTRACT

Composite materials arise from the need of finding desired properties for certain applications, such as better mechanical resistance, lighter materials, cost-effectiveness, recyclable material, etc. The difficulties of disposal, recycling or reuse are now environmental concerns and therefore subject matter of much research. In this perspective we studied the feasibility of using steel wool for obtaining a polymeric matrix composite. Three formulations were tested, 10%, 15% and 20% of composite fibers. For the characterization of the composite were determined thermal properties (conductivity, heat capacity, diffusivity and resistivity), mechanical properties (traction and bending) and physiochemical properties (SEM, XRD, density, absorption and degradation). The composite in its three formulations had higher mechanical strength compared to almost all composites that have already been studied in the laboratory LMHES. This greater mechanical resilience was associated with the use of a metallic fiber. Regarding the thermal properties, the composite studied had a lower thermal insulation than other composites studied previously. The composite showed higher viability for humidity absorption and mechanical resilience. The worst result was in thermal applications where its thermal conductivity is above of most polymeric composites found in the literature, due to the use of a metallic fiber. Some tests were made, such as mechanical, thermal, among other tests, showing excellent results because of the specific properties of the composites proposed, namely flexural strength, and good resistance to absorption in aqueous environment. The properties of such composite can be used to make structures that do not require significant mechanical resilience in traction, for instance in solar and wind prototypes, such as ovens and solar powered cookers and wind generator blades.

Keywords: Polymeric composites, Steel wool, Metallic fiber.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Classificação dos materiais compósitos.	23
Figura 2 – Processo de prensagem a quente ou a frio.	27
Figura 3 – Principais tipos de curvas termogravimétricas.	35
Figura 4 – Comparação entre as curvas TG e DTG.	36
Figura 5 – Procedimentos utilizados para obtenção e caracterização do compósito.	37
Figura 6 – Fibra de aço(palha de aço) utilizada no compósito estudado.	38
Figura 7 – Desmoldante aplicado nas superfícies do molde.	38
Figura 8 – Molde para fabricação do compósito.	39
Figura 9 – Processo de Fabricação do Material Compósito. A) Palha de Aço b) Fibra impregnada com a resina ortoftálica (processo <i>hand lay up</i>), c) Compósito na prensa (processo de compressão a frio), d) Material compósito pronto.	40
Figura 10 – Máquina universal utilizada nos de ensaios a tração e flexão.	41
Figura 11 – A) Corpos de prova para ensaios de tração e B) máquina de serra utilizada.	42
Figura 12 – Corpos de prova para ensaio de flexão em três pontos.	43
Figura 13 – Densímetro digital DSL 910 utilizados no ensaio de densidade aparente.	43
Figura 14 – Corpos de provas para ensaio de absorção de umidade.	44
Figura 15 – Equipamento KD2 PRO utilizado para levantamento das propriedades térmicas dos compósitos.	45
Figura 16 – Análise das propriedades térmicas do compósito.	46
Figura 17 – Espectrômetro para análise química da palha de aço e do compósito obtido.	46
Figura 18 – Equipamentos de Análise de Microestrutura - MEV.	47
Figura 19 – Foto da máquina de ensaio de TG.	47
Figura 20 – Comportamento comparativo entre os elementos a matriz, fibras e configurações do compósito.	49
Figura 21 – Resultados obtidos para os três meios aquosos.	52
Figura 22 – Resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos e matriz polimérica utilizada.	54
Figura 23 – Resultados obtidos no ensaio de deformação para os compósitos e matriz polimérica utilizada.	55
Figura 24 – Resultados obtidos no ensaio de flexão para os compósitos e matriz polimérica utilizada.	56

Figura 25 – Comportamento assumido pela condutividade térmica para a matriz e as formulações do compósito.	58
Figura 26 – Comportamento assumido pela capacidade térmica para a matriz e as formulações do compósito.	59
Figura 27 – Comportamento assumido pela difusividade térmica para a matriz e as formulações do compósito.	59
Figura 28 – Comportamento assumido pela resistividade térmica para a matriz e as formulações do compósito.	60
Figura 29 – Interação entre a fibra da palha de Aço e a matriz polimérica (a). . .	61
Figura 30 – Interação entre a fibra da palha de Aço e a matriz polimérica (b) e (c). . .	61
Figura 31 – Micrografia das Fibras do compósito.	62
Figura 32 – EDS pontual das fibras dos compósitos.	63
Figura 33 – Termogravimetria dos Compósitos.	63
Figura 34 – Comportamento da densidade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	65
Figura 35 – Comportamento da condutividade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	66
Figura 36 – Comportamento da Difusividade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	67
Figura 37 – Comportamento da Resistividade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	67
Figura 38 – Comportamento da resistência mecânica à tração do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	68
Figura 39 – Comportamento da resistência mecânica à flexão do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	69
Figura 40 – Comportamento da absorção de água destilada do compósito proposto para os já estudados no LMHES/UFRN.	70
Figura 41 – Comportamento da absorção de água do mar do compósito proposto para os já estudados no LMHES/UFRN.	71
Figura 42 – Comportamento da absorção do óleo compósito proposto para os já estudados no LMHES/UFRN.	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Diferentes tipos de resinas poliéster.	24
Tabela 2 – Tabela com algumas propriedades da resina de poliéster.	24
Tabela 3 – Propriedades da resina Orftálica (cristal).	25
Tabela 4 – Compósitos formulados com palha de aço.	40
Tabela 5 – Densidades da resina, fibra e compósito.	49
Tabela 6 – Índice de absorção de Água do Mar pelos compósitos.	50
Tabela 7 – Índice de absorção de Água destilada pelos compósitos.	51
Tabela 8 – Índice de absorção de óleo queimado pelos compósitos.	51
Tabela 9 – Comportamento assumido pela matriz e formulações do compósito no ensaio de absorção de umidade.	52
Tabela 10 – Comportamento assumido pela matriz e formulações do compósito no ensaio de absorção de umidade.	53
Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos e matriz polimérica utilizada.	53
Tabela 12 – Resultados comparativos entre as medidas do ensaio e os parâmetros cedidos pelo fabricante das matrizes utilizadas	55
Tabela 13 – Resultado das médias do ensaio de RF.	56
Tabela 14 – Propriedades Térmicas da resina e compósitos.	57
Tabela 15 – Análise química	60
Tabela 16 – Valores médios de densidade do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	64
Tabela 17 – Valores médios das propriedades térmicas do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	66
Tabela 18 – Valores médios da resistência mecânica à tração do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	68
Tabela 19 – Valores médios da resistência mecânica à flexão do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	69
Tabela 20 – Valores médios da absorção de água do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.	70

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEPED	Centro de Pesquisa de Desenvolvimento
CP	Corpo de prova
CT	Centro de Tecnologia
EPS	Poliestireno Expandido
EVA	Etil Vinil Acetato
FRX	Fluorescência de Raios X
HDT	Temperatura de termo distorção
LMHES	Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar
MDF	Chapa de Fibra de Média Densidade
MEK	Canalizador da resina Poliéster
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MOEF	Módulo de Elasticidade na Flexão
MOET	Módulo de Elasticidade na Tração
PETS	Politereftalato de Etileno
PPGEM	Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
RF	Resistência à Flexão
RT	Resistência à Tração
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Materiais Compósitos	20
2.2	Matrizes poliméricas aplicadas na fabricação de compósitos poliméricos	23
2.2.1	Resina poliéster	23
2.2.2	Resinas ortoftálicas	25
2.2.3	Processos de fabricação dos materiais compósitos	25
2.2.4	Fibras de Aço (Metálica)	27
2.2.5	Estado da arte da utilização de Fibras de Aço em compósitos	29
2.2.6	Propriedades físicas	31
2.2.7	Propriedades Térmicas	32
2.2.8	Densidade Aparente	33
2.2.9	Absorção de umidade	33
2.2.10	Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	33
2.2.11	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)	34
2.2.12	Análise Termogravimétrica (TGA)	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Materiais	37
3.1.1	Fibra da Palha de Aço	37
3.1.2	Matriz Polimérica	37
3.1.3	Desmoldante	38
3.1.4	Provedor de cura (Catalisador)	39
3.2	Métodos	39
3.2.1	Processo de obtenção do compósito	39
3.3	Ensaio Mecânicos	41
3.3.1	Ensaio de Tração	41
3.3.2	Ensaio de Flexão	42
3.4	Ensaio de Densidade Aparente	43
3.5	Absorção de Umidade	44
3.6	Análise Térmica	44

3.7	Ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX)	45
3.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	46
3.9	Análise termogravimétrica (TGA)	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Densidade	49
4.2	Absorção de umidade	50
4.3	Ensaio de Tração	52
4.4	Ensaio de Flexão	54
4.5	Análise Térmica	57
4.6	Análise Química	60
4.7	Microscopia eletrônica de Varredura – MEV dos Compósitos . .	61
4.8	Análise Termogravimétrica (TGA)	63
4.9	Análise comparativa do compósito proposto e outros estudados no LMHES/UFRN	64
4.9.1	Densidade	64
4.9.2	Análise Térmica	65
4.9.3	Tração	67
4.9.4	Flexão	68
4.9.5	Absorção de água	69
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	72
5.1	Conclusões	72
5.2	Sugestões	73
	Referências	74

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma real necessidade da atualização e produção de novos materiais de custo mais acessível e propriedades condizentes para utilização nos diversos seguimentos fabris, com durabilidade e aproveitamento competitivos com os produtos convencionais.

A constante preocupação com a melhor qualidade do meio ambiente, praticidade funcional e economia, tem levado diversos seguimentos, ao estudo e desenvolvimento de novos materiais compósitos para várias aplicabilidades nos diversos seguimentos da indústria mundial, tais como, construção civil, automotiva, utensílios para decoração, movelaria, embalagens e paisagismo.

A grande vantagem do desenvolvimento dos novos materiais é que a maioria vem da obtenção (extração) de grandes recursos renováveis obtidos na própria natureza, evitando assim impactos agressivos ao meio ambiente preservando-o, renovável, que é utilizado como matéria-prima ou fonte energética na obtenção de materiais diversos, como é o exemplo da fibra de vidro (MARTINS, 2016).

Identificou-se a necessidade de desenvolver e comercializar materiais compósitos baseados em constituintes derivados de fontes renováveis, minimizando-se os impactos ambientais e econômicos e a dependência de materiais não renováveis. Existe uma grande aplicabilidade dos compósitos com fibras naturais, para a confecção de cordas, artesanatos, utensílios pessoais, etc.

Os diversos compósitos obtidos a partir de reforços com fibras naturais à base de celulose têm sido tema de um grande número de publicações em periódicos científicos, devido a vários fatores de interesse técnico, sócio-cultural e ambiental, (VASCONCELOS et al., 2009).

Tais estudos científicos destacam a natureza biodegradável e renovável das fibras naturais, tornando o novo modo de vida ambientalmente correta, buscando, desta maneira, com que tenhamos um relacionamento com o meio ambiente menos devastador onde o homem e a natureza convivam harmonicamente usufruindo das suas benesses.

As fibras naturais, em comparação com as fibras de vidro, são muito eficientes na absorção de som, têm baixo custo, são leves, não se fragmentam em casos de acidentes, são biodegradáveis e podem ser obtidas utilizando menos energia que fibras de vidro. No entanto, problemas de adesão fibra-matriz, também de propriedades mecânicas variáveis e limitadas vêm dificultando sua utilização em determinados am-

bientes e situações de carregamento que exijam um melhor desempenho mecânico (MOTA, 2016).

Além disso, as fibras naturais também têm uma propriedade desinteressante, normalmente, higroscopicidade por causa de seus constituintes químicos. A absorção de umidade dos compósitos contendo fibras naturais tem diversos efeitos nas propriedades afetando seu desempenho.

Por exemplo, o aumento de umidade decresce suas propriedades mecânicas propiciando a condição necessária para a biodegradabilidade e mudanças em suas dimensões.

Existem ainda outros diversos inconvenientes, pois estas fibras variam muito mais em propriedades do que as fibras sintéticas o que pode afetar a qualidade do compósito.

Muitos fatores contribuem para as variações nas propriedades das fibras naturais como a geometria, superfície, comprimento e conteúdo (LI et al., 2006).

Devido estas limitações das propriedades destas fibras foi feito o estudo do compósito com a fibra da palha de aço, pois foram encontrados estudos e pesquisas que este tipo de fibra é utilizado na indústria da construção civil, como por exemplo no concreto, que inibe e dificulta a propagação das fissuras devido ao seu alto módulo de deformação, resultando em uma grande capacidade de redistribuição de esforços e controle de fissuração do concreto, mesmo em dosagens baixas.

Através das propriedades das fibras de aço, o concreto perde sua característica de material marcadamente frágil. Isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas.

Com isto, ocorre uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, apresenta certa capacidade pós-fissuração, fora sua utilização na construção civil, existem as fibras, na forma de palhas de aço, que são biodegradáveis, não prejudicam o meio ambiente na sua decomposição depois de descartadas.

Diante do exposto este trabalho ampliou o conhecimento científico em materiais compósitos poliméricos com fibras de palha de aço e sua caracterização, para utilização do compósito em materiais diferentes do concreto, pois a fibra de aço na forma de palha é um produto para acabamento e polimento de objetos de alumínio e metal, pode ser usado também como limpeza doméstica. Ela é formada por um conjunto de linhas de aço muito finas e que estão entrelaçadas. Tem baixo teor de carbono e são produzidas a partir de arames de cobre. Sua venda comercial é feito na forma de esponjas de aço. Sua produção para o uso na construção civil é de limpeza e remoção

de tintas, rejuntas e acabamento em madeiras, são comercializadas em embalagens plásticas a vácuo.

As fibras foram extraídas da aço carbono, que é comercializado através da palha de aço e misturado à resina ortoftálica para a obtenção do compósito desejado.

Foram experimentadas três diferentes formulações de fibras em função das propriedades mecânicas e térmicas obtidas. Para comparações foram feitas placas dos compósitos com as fibras nas três formulações.

A caracterização do compósito foi feita obedecendo às normas pertinentes e foram avaliadas, dentre outras, a condutividade térmica, as resistências mecânicas a tração e flexão, absorção de umidade Fluorescência de Raio X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Densidade. Foram produzidos compósitos com matriz de resina poliéster ortoftálica tipo cristal e reforço/carga de fibra da palha de aço com 10%, 15% e 20% de fibra.

Foi determinada a formulação mais eficiente e que permitirá uma maior gama de possibilidade de utilização do compósito proposto e estudado.

Foi determinado através da análise das propriedades de caracterização do compósito se a palha de aço presente no compósito teve a função de carga ou de reforço.

Entende-se que esse trabalho apresenta uma contribuição inédita, pois caracteriza o compósito mecânica e termicamente, o que não foi encontrado em qualquer trabalho apontado pela literatura especializada em materiais compósitos poliméricos que utilizam cargas/reforços de palha de aço.

A pesquisa bibliográfica efetuada encontra uma significativa utilização da fibra de aço em compósitos cerâmicos para diminuir a fragilidade da cerâmica, porém pouquíssimos trabalhos em compósitos poliméricos, e a utilização da palha de aço, industrializada e destinada a aplicações em limpeza, não é citada pela literatura em materiais compósitos.

A tese foi dividida em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Análise dos Resultados e Conclusões e Sugestões.

O capítulo 1 contém uma introdução ao tema da pesquisa, os objetivos do trabalho, a justificativa e a metodologia utilizada.

O capítulo 2 apresenta à revisão bibliográfica com informação necessária a respeito dos constituintes utilizados no compósito e sua importância, abordando também as pesquisas pertinentes ao tema no mundo científico e a questão ambiental.

O capítulo 3 detalha como foi realizado o trabalho experimental, caracterização dos procedimentos empregados.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados da caracterização do compósito em suas várias formulações.

O capítulo 5 é dedicado às conclusões decorrentes das discussões realizadas e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Obter e caracterizar um compósito de matriz polimérica de resina de poliéster tipo cristal e carga/reforço de camadas de palha de aço, para três formulações do compósito.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter o compósito
- Escolher as formulações do compósito
- Fabricar as placas para a obtenção dos corpos de prova de caracterização seguindo normas pertinentes;
- Caracterizar o compósito nas três configurações escolhidas (10% de fibra, 15% de fibra e 20%);
- Analisar a microestrutura do compósito;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta referências bibliográficas sobre os ensaios realizados, como: Tração, flexão, microscopia eletrônico de varredura (MEV), fluorescência de raios-X (FRX), resistência térmica, absorção de umidade e densidade), em suas formulações estudadas.

2.1 Materiais Compósitos

Materiais compósitos tem sua origem dada pela combinação macroscópica de dois ou mais matérias com propriedades distintas, cuja suas características se diferem aos dos materiais que o originou. Um dos elementos que constituem um compósito é denominado matriz e os demais são conhecidos como reforço. Os materiais compósitos são usualmente classificados pela natureza dos materiais que os compõem e estão divididos em duas grandes categorias: materiais compósitos naturais e sintéticos, Os compósitos naturais tem sua origem na natureza não havendo intervenção humana em sua produção. Já os materiais compósitos denominados de sintéticos são produzidos através da atividade humana industrial (GOMES, 2015).

A função básica do elemento denominado de matriz em materiais compósitos é agir como um meio de transferência ou distribuição de carga para os reforços através do cisalhamento. Outra função da matriz em um compósito é proteger o reforço da abrasão mútua, danos provocados por agentes externos evitando assim a degradação pré-matura do reforço (LION, 2013).

O surgimento de materiais compósitos é devido a necessidade de ser ter um melhor desempenho e melhores propriedades como maiores resistência mecânica, térmica, elétrica, menor redução do peso, maior absorção de energia, dentre outras propriedades. Compósitos que utilizam restos de material de construção, cinza de dendê, sabugo de milho, pó de aço, casca de arroz, EVA, pó de serra, pó de MDF, raspa de PVC, fibra de coco, piaçava, sisal, pó de café, resíduos da indústria têxtil, pó de vidro, restos de brita, chamotes de telha, resíduos da fabricação de botões, argilas, dentre outros, têm merecido a atenção dos pesquisadores na busca de um material com resistência mecânica adequada e que possa propiciar conforto térmico e acústico (SANTOS, 2015). Os materiais compósitos são aqueles formados a partir da combinação de dois ou mais constituintes individuais. Esta classe de materiais compósitos tem fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço ou modificador), contínua ou não, cujas propriedades são obtidas a partir da combinação das propriedades dos

constituintes individuais. A fase contínua ou matriz é classificada como:

Compósitos de matriz polimérica

Os materiais mais comuns para matrizes de compósitos são os polímeros. Normalmente, as propriedades dos polímeros são inadequadas para várias aplicações estruturais. A sua resistência e dureza são inferiores quando comparadas com metais e cerâmicas. Isto significa que há um ganho considerável nas propriedades quando se adiciona aos polímeros reforçadores que, a princípio, nem precisam ter propriedades excepcionais. Outra vantagem dos compósitos de matriz polimérica é que a sua fabricação envolve altas pressões e baixas temperaturas, evitando-se problemas associados com a degradação do reforçador durante a fabricação. Por essas razões o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica cresceu rapidamente assim como suas aplicações estruturais. Hoje em dia, compósitos reforçados com vidros são os materiais compósitos mais utilizados, em termos de volume, com exceção do concreto (ALMEIDA E MONTEIRO, 1998).

As principais desvantagens dos compósitos de matriz polimérica são: impossibilidade de trabalho a altas temperaturas, instabilidade dimensional (devido a altos coeficientes de expansão térmica), sensibilidade à radiação e, em alguns casos, absorção de umidade do meio ambiente (CALLISTER, 2012).

Existe uma considerável variedade de processos disponíveis para fabricação de compósitos de matriz polimérica. Esses processos variam de simples métodos manuais para métodos automatizados que permitem produzir uma grande quantidade de componentes de alta complexidade.

Hoje, os exemplos de aplicação incluem: estruturas de máquinas, bases de instrumento de medição, elementos decorativos para revestimentos de paredes e pisos, elementos de pia, postos de combustível, etc. (PANZERA, 2003).

Compósitos de matriz metálica

O desenvolvimento dos compósitos de matriz metálica iniciou-se em meados de 60 e início dos anos 70 com a produção de fibras de boro e carbetto de silício para reforçar metais leves e, particularmente, ligas de alumínio. Consideráveis pesquisas foram feitas nos Estados Unidos na década de 70 aplicando-se compósitos de matriz metálica em lançadores de foguetes e jatos militares (DENÍCULI, 1999).

Esses materiais podem ser utilizados a temperaturas de serviço mais elevadas do que seus metais-base análogos. Além do mais, o reforço pode melhorar a rigidez e a resistência efetiva, a resistência à abrasão, a resistência à fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional (HERAKOVICH, 1998).

As superligas, bem como as ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre, são

empregadas como materiais de matriz. O reforço pode ser na forma de particulados, de fibras tanto contínuas como descontínuas e de whiskers. Os materiais das fibras contínuas incluem o carbono, o carbetto de silício, o boro, a alumina e os metais refratários. Por outro lado, os reforços descontínuos consistem principalmente em whiskers de carbetto de silício, fibras picadas de alumina e de carbono, e particulados de carbetto de silício e alumina (JUNIOR E RETHWISCH, 2002).

Algumas combinações de reforço de matriz são altamente reativas a temperaturas elevadas. Conseqüentemente, a degradação do compósito pode ser causada pelo processamento a altas temperaturas ou ao se sujeitar o compósito de matriz metálica a temperaturas elevadas durante seu regime de serviço. Esse problema é resolvido comumente ou pela aplicação de um revestimento superficial de proteção ao reforço ou pela modificação da composição da liga (HERAKOVICH, 1998).

Normalmente, o processo de compósitos de matriz metálica envolve pelo menos duas etapas: consolidação ou síntese (introdução do reforço no interior da matriz) seguida por uma operação de modelagem. Uma gama de técnicas de consolidação está disponível, algumas das quais relativamente sofisticadas; os compósitos de matriz metálica com fibras descontínuas são suscetíveis à modelagem através de operações padrões de conformação de metais, por exemplo, forjamento, extrusão e laminação (JUNIOR E RETHWISCH, 2002).

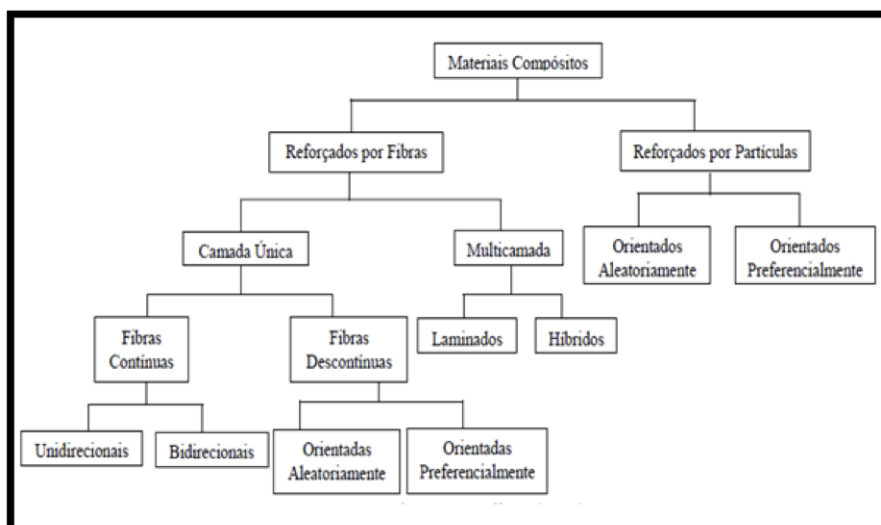
Compósitos de matriz Cerâmica

Os materiais cerâmicos são inerentemente resistentes à oxidação e à deterioração a temperaturas elevadas. Não fosse pela predisposição desses materiais à fratura frágil, alguns seriam candidatos ideais para uso em aplicações a altas temperaturas e sob severas condições de tensão, especialmente para componentes em motores de turbina a gás para automóveis e aeronaves (HERAKOVICH, 1998).

A tenacidade à fratura das cerâmicas tem sido melhorada significativamente pelo desenvolvimento de uma nova geração de compósitos com matriz cerâmica na forma de particulados, fibras ou whiskers de um material cerâmico que se encontram embutidos no interior de uma matriz de um outro material cerâmico. Essa melhoria nas propriedades de fratura resulta das interações entre as trincas que avançam e as partículas da fase dispersa (JUNIOR E RETHWISCH, 2002).

De acordo com Matthews e Rawlings (1994), os compósitos são classificados em função do tipo de matriz, da natureza e da geometria do elemento do reforço. Em relação ao componente matricial pode ser classificada como polimérica, cerâmica ou metálica. Em função do elemento de reforço/carga, os compósitos podem ser classificados como reforçados por partículas ou por fibras, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Matthews e Rawlings, 1994.

2.2 Matrizes poliméricas aplicadas na fabricação de compósitos poliméricos

Os compósitos poliméricos podem ser divididos em: termoplásticos, permitem ser moldados, conformados ou reciclados em alta temperatura controlada; e termofixos ou termorrígidos, não permitem modificação em sua forma ou reciclagem depois de curados ou solidificados.

As matrizes termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos. Isto se deve ao fato de serem fáceis de processar, promovendo uma boa molhabilidade dos reforços, e apresentarem um bom balanço de propriedades, além de estarem disponíveis em uma ampla variedade de grades a um custo relativamente baixo (MOTA, 2016).

Em Silva e Figueiredo (2010), afirma-se que as resinas termorrígidas são obtidas a partir de oligômeros de baixo peso molecular e normalmente se apresentam na forma de um líquido de baixa e média viscosidade. A reação de reticulação se dá através da adição de um agente de cura (*e.g.* iniciador ou endurecedor) ou pelo aumento da temperatura.

2.2.1 Resina poliéster

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis, que, quando

reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas podem ser produzidas. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada.

A Tabela 1 apresenta os diferentes tipos de resina poliéster.

Tabela 1 – Diferentes tipos de resinas poliéster.

Tipos	Comentários
Ortoftálica	Resina mais comum, de menor custo, para uso básico
Tereftálica	Possui resistência física um pouco superior à ortoftálica, porém baixa resistência à UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Isoftálica c/NPG	O NPG melhora a resistência à hidrólise.
Bisfenólica	Possui as melhores características químicas e térmicas.

Fonte: (Silva e Figueiredo 2010).

Galvão (2011) mencionou que a configuração e a composição química do poliéster endurecido determinam algumas características tais como a flexibilidade, dureza, resistência mecânica, resistência química e resistência térmica. A tabela 2 apresenta algumas propriedades da resina poliéster.

Tabela 2 – Tabela com algumas propriedades da resina de poliéster.

Propriedades	Valor
Densidade	1100 a 1400 kfg/m ³
Módulo de Elasticidade	2100 a 4400 Mpa
Resistência a tração	34 a 100 Mpa
Alongamento	2%

As resinas poliéster apresentam uma gama de vantagens, entre elas:

- Boa estabilidade dimensional;
- Ótima resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- Excelentes propriedades elétricas;
- Fácil pigmentação;

- Cura a frio;
- Utilização de moldes simples e baratos.

2.2.2 Resinas ortoftálicas

As resinas ortoftálicas são produzidas a partir do ácido ortoftálico. Esse tipo de resina não possui boa resistência química e térmica e sua temperatura de termo distorção (HDT) está em torno de 70°C, sendo distribuídas em categorias de acordo com a sua utilização (ELEKEIROZ, 2004).

Segundo o fabricante ARA Química S/A os valores apresentados na Tabela 3, são típicos e baseados em materiais testados em seus laboratórios, mas com variação entre as amostras. Sendo que esses valores típicos não podem ser garantidos ou servirem como especificação. A cura foi feita com adição de 1,0 g de MEK-P em 100g de resina, seguido de pós cura de 2 horas a 90°C.

Tabela 3 – Propriedades da resina Orftálica (cristal).

PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 1.0 - Padrão	
Gel Time (25° C/1,0 g MEK-P em 100g resina)	10 a 14 min
Pico Exotérmico	Max. 150°C
Aspecto	Cristal
Cor depois de curada	Incolor
Resistência à Tração	57,0 MPa ASTM D-638
Módulo de Tração	1970 MPa ASTM D-638
Alongamento %	3,2 ASTM D-638
Resistência a Flexão	84,4 MPa ASTM D-790
Módulo na Flexão	2814,3 ASTM D-790

2.2.3 Processos de fabricação dos materiais compósitos

De acordo com (LION, 2013), o desenvolvimento e a maneira com que os diferentes componentes dos compósitos são combinados estão intimamente relacionados com seus métodos e processos de fabricação. O processo de fabricação a ser utilizado na fabricação de um compósito depende do que se quer obter como produto final (formato da peça, dimensão, e acabamento) e a escala de produção necessária na fabricação. : Custo do processo, escala de produção, dimensão física do componente, volume relativo das fibras, repetibilidade de características de cada item, entre outros.

Kelly e Mileiko (1983) classificam os tipos de processos mais em uso nos plásticos reforçados em função do tipo de molde a ser utilizado: molde aberto ou fechado.

Processos em molde aberto utilizam, em geral, baixa tecnologia e baixa escala produção. São eles:

Laminação manual (*Hand Lay Up*): Feltros de fibras enrolados, mechas trançadas, mantas e outros tecidos de fibras são colocados sobre o molde e impregna-se com resina utilizando-se um pincel. Para melhorar o processo de impregnação, são usados rolos com o objetivo de eliminar bolhas. O processo continua com a colocação das camadas até a obtenção da espessura (ou configuração) desejada para a peça. O moldado é curado sem calor nem pressão.

Laminação à pistola (*Spray Up*): Fios cortados e resina são projetados simultaneamente em um molde preparado e um rolo é passado para melhorar o processo de impregnação (diminuindo a presença de bolhas) e antes que a resina endureça.

Centrifugação: Misturas de fibras e resina são introduzidas em um molde rotatório e curadas "*in situ*".

Enrolamento (*Filament Winding*): A modelagem é feita através de enrolamento das fibras contínuas (*roving*) sobre molde rotatório. Também podem ser utilizados mantas ou tecidos intercalados às etapas de enrolamento do roving. Este processo é bastante utilizado na fabricação de peças cilíndricas e tubulações.

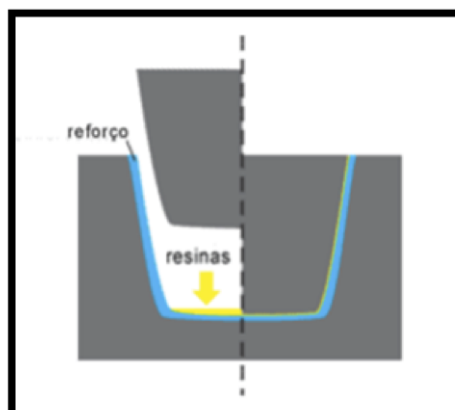
Os processos em molde fechado são caracterizados pela presença de molde e contramolde, bem como pelo uso de alta tecnologia e produção em média e alta escala. São eles:

Injeção: Processo utilizado para alta produção e na confecção de peças de formas variadas. A injeção da resina é feita por pressão em um molde fechado contendo em seu interior um reforço pré-formado. Os processos mais conhecidos são: RTM (*Resin Transfer Molding*), RIM (*Resin Injection Molding*) e R-RIM (*Reinforced RIM*).

Pultrusão: Neste processo fibras impregnadas com resinas são tracionadas através de moldes aquecidos, produzindo assim a polimerização da resina. É o processo utilizado na obtenção de perfis.

Moldagem por compressão: Processo utilizado neste trabalho que uma vez necessita de baixo investimento em equipamentos e seu processo é relativamente simples. Coloca-se o reforço em todo o contorno da cavidade do molde e sobre este a resina, em seguida aplica-se a força de pressão possibilitando assim a obtenção da peça, como mostra a figura 2. Esta compressão pode ser a frio ou a quente.

Figura 2 – Processo de prensagem a quente ou a frio.



Fonte: Jaigodind 2007, apud Saint-Gobain-Vetrotex 2007.

2.2.4 Fibras de Aço (Metálica)

Vale destacar que existem vários tipos de fibras, como as de base orgânica; sisal, casca de coco, celulose, palha, entre outras, e também as de base inorgânica; polipropileno, aço, amianto, etc. No caso das fibras de aço elas são bastante eficientes na contenção de fissuras evitando o seu desenvolvimento.

As fibras de Aço vem produzidas a partir de arames de cobre com baixo teor de carbono, é também vendida comercialmente sob a forma de esponjas de aço impregnadas em sabão. Quando queimada, a lã de aço aumenta de massa, devido ao ferro escaldante combinando com o oxigênio.

As fibras de aço apresentam uma grande vantagem sobre os outros tipos de fibras por sua alta resistência à tração e grande capacidade de aderência à matriz que a envolve. Tais fibras podem ser facilmente deformadas melhorando sua capacidade de aderência, o que contribui para o aumento da tenacidade do compósito.

Soroushian et al. (1994) investigaram a influência das fibras de aço na aderência entre o concreto e as barras da armadura longitudinal nas ligações viga-pilar, para carregamento dinâmico. As fibras retardam a propagação das fissuras e diminuem o escorregamento, pois a resistência de aderência aumenta. Com isso, melhoram a resistência, a ductilidade e a rigidez, permitindo diminuição da armadura de confinamento, sem alterar a qualidade da ancoragem da barra no nó. Segundo os autores, a relação de aspecto e o tipo de fibra tem influência desprezível na resistência de aderência, ao contrário do escorregamento correspondente à tensão máxima. Segundo Benhur e Mindess (1990), as fibras de aço influenciam algumas propriedades mecânicas do concreto da seguinte forma:

- As fibras têm pouco efeito na resistência à compressão, mas aumentam consideravelmente a ductilidade no estado pós-fissuração;
- A resistência à tração aumenta cerca de 133% no caso de fibras alinhadas na direção da tensão de tração. No caso de fibras aleatórias, o aumento pode chegar a 60%;
- A influência das fibras de aço é muito mais efetiva na resistência à flexão do que sobre as resistências à compressão e à tração. O aumento pode ser maior que 100%, e depende não apenas do volume de fibras, mas também da relação de aspecto. Tem-se que o aumento da relação de aspecto resulta no aumento da resistência à flexão;
- A tenacidade à flexão aumenta consideravelmente, conforme se aumenta o volume de fibras e a relação de aspecto, como também o uso de fibras com melhores características de aderência. Um dos principais motivos para a adição de fibras ao concreto é proporcionar o aumento da tenacidade.

A norma brasileira NBR 15530:2007 – Fibras de Aço para Concreto classifica as fibras em três tipos básicos em função de sua conformação geométrica:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragem nas extremidades
- Tipo C: fibra de aço corrugada
- Tipo R: fibra de aço reta

O formato da seção transversal depende do tipo de aço utilizado na produção da fibra. Logo, além dos tipos de fibras, a norma brasileira especifica três classes de fibras segundo o aço que deu origem às mesmas:

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
- Classe III: oriunda de arame trefilado e escarificado

Existem vários processos de fabricação das fibras de aço, sendo o mais comum o corte de arame trefilado, de aço de baixo teor de carbono. Em sua maioria as fibras de aço são produzidas com aço-carbono ordinário, porém, as feitas de ligas metálicas são mais resistentes à corrosão, além disso, são as mais adequadas para aplicações em concretos refratários e em estruturas marítimas.

Quanto à geometria as fibras de aço são as que têm maior diversidade. As fibras de seção transversal circular têm diâmetros variando entre 0,25 mm a 1,0 mm e comprimentos da ordem de 6,4 mm a 76 mm. Já a fibra de aço achatada tem dimensões variando entre 0,15 mm e 0,64 mm (espessura) e entre 0,25 mm e 2,0 mm (largura). O fator de forma, ou esbeltez, que consiste na razão entre comprimento e diâmetro equivalente, geralmente tem valores na faixa de 20 a 100 (ACI 544.1R-96, 2006). As fibras de aço onduladas estão disponíveis tanto onduladas em todo o comprimento quanto somente nas extremidades. As fibras de aço podem ainda ser coladas umas nas outras com colas solúveis em água, formando feixes de 10 a 30 fibras, para facilitar seu manuseio e mistura no concreto (BENTUR e MINDESS, 2007).

Quanto às tensões máximas, de modo geral, as fibras de aço resistem a tensões entre 400 MPa a 1200 MPa, enquanto que as deformações específicas últimas variam de 3% a 4% (KOOIMAN, 2000).

A norma brasileira NBR 15530 (2007) classifica as fibras de aço de acordo com o processo de produção e forma. Essa norma considera três classes de fibras de aço, em função de serem feitas de aramet refilado a frio, de chapa laminada cortada a frio ou de arame trefilado e escarificado: classes I, II e III, respectivamente. Em relação à conformação geométrica, essa norma considera três tipos de fibras de aço: A (com ancoragens nas extremidades), C (corrugada) e R (reta).

2.2.5 Estado da arte da utilização de Fibras de Aço em compósitos

Recentemente, as fibras de aço têm obtido notória aceitação no mercado mundial em função de diversos fatores, como, por exemplo, o processo de obtenção relativamente barato, a grande disponibilidade de fabricantes, a boa aderência da fibra com a matriz, o elevado módulo de elasticidade, a facilidade de manuseio, a utilização inofensiva à saúde humana e, por fim, mas não menos importante, os consideráveis ganhos de desempenho estrutural. Esses ganhos podem ser traduzidos, em linhas gerais, na melhoria das propriedades da matriz, como o controle eficiente da fissuração, a capacidade de absorção de energia, a resistência a impactos e outras (GROSSI, 2006).

As fibras de aço são as mais utilizadas em elementos estruturais de concreto, pois devido ao seu alto módulo de elasticidade melhoram características como tenacidade, controle de fissuras, resistência à flexão, resistência ao impacto e à fadiga (ACI 544.1R-96, 2006).

De acordo com Serna (2007), as fibras podem ser usadas com mais vantagem em elementos onde a distribuição de tensões é muito variável (pavimentos e revestimento de túneis, por exemplo), e/ou nas três dimensões; elementos muito armados

em que as distâncias entre armaduras dificultam a concretagem; elementos de pouca espessura onde o posicionamento errado da armadura convencional pode modificar substancialmente a altura útil; em elementos pouco armados.

Mehta e Monteiro (2008) relatam que o primeiro concreto com fibras utilizado com fim estrutural foi feito em 1971, para a produção de painéis desmontáveis de 3250mm² e 65mm de espessura. Esse concreto continha 3% em massa de fibras de aço estiradas a frio, com 0,25mm de diâmetro e 25mm de comprimento. Os painéis foram utilizados na garagem do estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres.

Segundo Lopes (2005) os concretos reforçados com fibras de aço constituem-se em um dos materiais mais promissores para utilização estrutural, pois a presença das fibras possibilita que o concreto sustente grandes deformações na carga de pico ou próximo a ela e, além disso, aumentam a resistência à tração, flexão e compressão, devido à capacidade de transferir cargas através das fissuras, além de aumentar a sua capacidade de absorver energia e de controlar o mecanismo de abertura de fissuras.

Assim, é de grande interesse para a engenharia civil que o concreto fibroso seja utilizado em projetos estruturais. Até o momento, depois de cerca de 30 anos de pesquisa, o reforço com fibras de aço tem sido mais frequentemente utilizado em vigas e lajes de concreto para melhorar sua performance no estado limite de serviço, uma vez que as fibras limitam a abertura das fissuras assegurando uma melhor distribuição das mesmas.

Um dos maiores obstáculos para o uso do concreto reforçado com fibras de aço em aplicações estruturais (estado limite último) é a ausência de normas nacionais e internacionais aceitas para esse tipo de material. É importante, portanto, que sejam estabelecidas as bases teóricas para o projeto otimizado no estado limite de servicibilidade e estado limite último, de estruturas utilizando concretos fibrosos.

A presença de fibras de aço afeta, principalmente, o comportamento pós-pico (pós-fissuração e tenacidade) do material compósito, e os métodos de projeto usados na engenharia estrutural não consideram, de forma geral, para concreto armado, o comportamento do material à tração. Um requisito fundamental para o projeto estrutural do concreto fibroso é que se proceda à medição dos seus parâmetros de tenacidade e que se introduzam os mesmos nos métodos de projeto.

Desde então, concretos com fibras de aço têm tido aplicações diversas: pisos industriais, pavimentos, revestimento de túneis, blocos de ancoragens de cabos de protensão e outras regiões de concentração de tensões, tubos de água pluvial, esgoto e bueiros, cascas, telhas, elementos de contenção, estacas-prancha, elementos de estruturas submetidas a sismos, elementos submetidos a impacto, dormentes, ele-

mentos estruturais pré-fabricados em geral, reforço de elementos estruturais, dentre outras.

A fragilidade e baixa resistência à deformação é uma característica peculiar dos materiais compostos por matrizes cimentícias como é o caso do concreto. Para solucionar essa limitação desenvolveu-se a possibilidade de adicionar fibras de aço como reforço, alterando as características iniciais das matrizes de concreto.

Por possuir um alto módulo de elasticidade, elevada resistência à tração e ductilidade, as fibras de aço proporcionam um aumento na tenacidade nas estruturas de concreto, melhorando sua resistência ao impacto e à fadiga, contribuindo para o aumento da durabilidade dessas estruturas (FIGUEIREDO, 2000).

Figueiredo (2000) estudou as melhorias nas características dos concretos através da adição das fibras, com intuito de avaliar o desempenho dessas estruturas. Deste modo, para identificar esses ganhos foram realizados experimentos normatizados a partir da moldagem de corpos de prova cilindros e prismáticos, constituídos de concreto com adição de fibras de aço, que posteriormente foram submetidos aos ensaios de resistência de compressão axial, compressão diametral e resistência à tração na flexão, com o intuito de avaliar a resistência desse concreto reforçado e comparar os resultados encontrados com um concreto de referencia, sem fibras de aço, submetido aos mesmos esforços.

As fibras de aço são elementos descontínuos fabricados com variadas geometrias e tipo de aço, e preparadas para ser adicionadas de modo aleatório ao betão fresco, Figueiredo (BARROS, J.A.O., 1995).

Os variados tipos de fibras existentes no mercado procuram melhorar a ductilidade do compósito. Nas investigações realizadas, está subjacente o aumento da área de contacto da fibra com a matriz, que aumenta o atrito em fase de arrancamento. O aumento da área de contacto pode ser realizado através de vários processos (ULRIX E FERREIRA, 2011).

2.2.6 Propriedades físicas

Uma propriedade física tem a característica de poder ser medida ou observada sem que a composição ou integridade da substância respectiva seja afetada. São propriedades físicas: as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas (CALLISTER, 2012). Porém no estudo proposto serão avaliadas apenas as características mecânicas, térmicas, densidade aparente, absorção de umidade e análise microscópica, além da análise química de FRX.

Para levantamento das características mecânicas do compósito em estudo foram realizados os ensaios de tração e flexão. Através dos ensaios de tração e flexão

foi possível levantar características como resistência a tração (RT) e flexão (RF), módulo de elasticidade na tração (MOET) e flexão (MOEF), bem como o alongamento total das amostras analisadas.

2.2.7 Propriedades Térmicas

A análise do desempenho térmico de sistemas construtivos está vinculada ao conhecimento das propriedades térmicas de seus elementos, os quais podem ser definidos pela condutividade térmica, densidade de massa aparente e pelo calor específico (GIGLIO, 2005). A condutibilidades térmicas para a maioria dos polímeros está na ordem de $0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Para os materiais poliméricos a transferência de energia é realizada através da vibração e da rotação das moléculas da cadeia polimérica. A resistência térmica e condutividade térmica dos poliméricos estão relacionadas com o grau de cristalinidade deste material. Quanto mais cristalino o material se apresentar, maior será sua condutividade térmica tendo em vista que, a vibração das moléculas ocorrerá de forma coordenada e mais efetiva entre as cadeias moleculares (CALLISTER, 2012).

Condutividade térmica é uma característica específica de cada material e caracteriza se pela capacidade de um material em transferir calor de um ponto onde sua temperatura é maior, para outro ponto onde sua temperatura é menor.

Quanto maior a condutividade térmica de um material maior será sua capacidade de transferir calor entre suas moléculas, então esse material terá uma característica de condutor térmico. Já os materiais com baixa condutividade, ou baixa capacidade de transferência de calor entre suas moléculas, possuem características de material isolante térmico. Exemplo de material bom condutor térmico são os metais de maneira geral, e de mau condutor térmico o isopor e a madeira.

A vantagem de se trabalhar com a resistência térmica ao invés da condutividade térmica é que, no caso do fluxo de energia por condução por um sistema composto por diferentes camadas em série, as resistências das camadas podem ser somadas para se encontrar a resistência total.

Calor específico é a capacidade de um material em armazenar o calor e é determinado pela quantidade de energia fornecida com a variação de temperatura.

Difusividade térmica é a propriedade que depende, por um lado, da condutividade (K) ou da velocidade de condução da energia térmica no interior do material e, por outro lado, do calor específico volumétrico ou da quantidade de energia térmica necessária para aumentar a temperatura de determinado volume do material.

A difusividade é uma variável mais importante para o controle térmico das

construções do que a condutividade, porque expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. Materiais de baixa difusividade retardam a transferência de variações externas de temperatura para o interior das construções, por exemplo. (SILVA, 2015)

2.2.8 Densidade Aparente

A relação entre a massa da amostra de um material ou substância e o volume por ela ocupado chama-se densidade.

A importância da verificação da densidade visa indicar ao projetista quanto ao peso da peça fabricada nas dimensões reais para a aplicação no projeto. Em alguns casos a densidade pode indicar o grau de cristalinidade do material. (SILVA, 2015)

2.2.9 Absorção de umidade

A absorção de umidade pela exposição de matrizes orgânicas de materiais compósitos em atmosfera úmida ou meio aquoso leva à degradação prematura pela penetração de água ou outro líquido no interior do material compósito. Como consequência temos o aumento de volume, degradação da estrutura molecular por hidrólise, aparecimento de trincas e perda de adesão fibra/matriz, causando gradual perda nas propriedades mecânicas (SANTOS ET AL., 2010).

O grau de absorção de umidade em termos relativos pode ser obtido pelo quociente entre a massa final do material após a imersão e a massa inicial antes da imersão subtraído de uma unidade. Para obtenção deste valor em porcentagem basta multiplicar o resultado por cem (SILVA, 2015).

2.2.10 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é a técnica de caracterização microestrutural mais versátil hoje disponível, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgica e de minas, geociências e ciências biológicas, dentre outros.

A interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o microvoluma a ser analisado gera uma série de sinais que podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície topográfica, cristalografia, etc.

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse referem-se usualmente às imagens de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados, ao passo que na microsonda eletrônica o sinal de maior interesse corresponde aos raios

X característico, resultante do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes em um microvolumen.

Historicamente, estas duas técnicas referiam-se a instrumentos algo similares, porém com aplicações e características construtivas bem distintas. Com o passar dos anos estes instrumentais foram convergindo de forma a incorporar as principais vantagens de cada um deles, inclusive com o surgimento de equipamentos híbridos, aliando recursos de imagem com os de microanálise química.

Atualmente, toda a configuração de um microscópio eletrônico de varredura destinada a aplicações em materiais, metalurgia, mineração e geociências conta com pelo menos um detetor para microanálises químicas. Comparativamente à microsonda eletrônica, a microscopia eletrônica de varredura é hoje uma técnica mais versátil e operacionalmente mais simples, hoje integralmente operada via computador em ambientes Windows ou Unix, apresentando relação custo/benefício significativamente inferior.

Ressalta-se que a microsonda eletrônica, no entanto, continua sendo o instrumental mais indicado para rotinas de microanálises químicas quantitativas, particularmente no caso da determinação de elementos menores ou em situações que requeiram maior resolução espectral (KAHN, 2004).

2.2.11 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra. Na espectrometria de fluorescência de raios-X uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X) provoca a excitação dos átomos da substância que pretendemos analisar.

Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia (*e.g.* raios-X), ele absorve esta energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos. Neste estado o átomo estará numa situação instável, chamada "Estado Excitado".

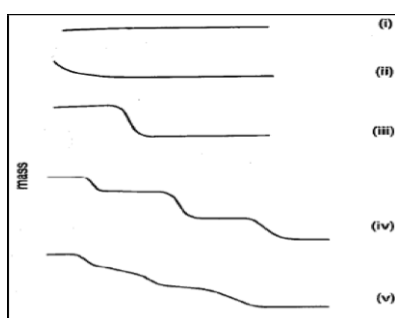
Na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade, desta forma o átomo excitado tende naturalmente a retornar ao seu estado fundamental, ocorrendo uma emissão de energia. Esta energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação. (BECKHOFF, 2006) .

2.2.12 Análise Termogravimétrica (TGA)

O Ensaio TGA consiste em uma análise térmica onde as propriedades físicas e químicas de um material são analisadas em função da variação de temperatura pré-programada. Essa variação ocorre numa faixa de crescimento constante. Para não causar confusão entre a temperatura de transição vítrea (T_g) e análise termogravimétrica (TGA), é comum para materiais poliméricos utilizar a sigla TGA.

A Figura 3 apresenta as principais formas das curvas termogravimétricas geradas por uma amostra analisada em ensaio de TGA.

Figura 3 – Principais tipos de curvas termogravimétricas.



Fonte: Callister 2009.

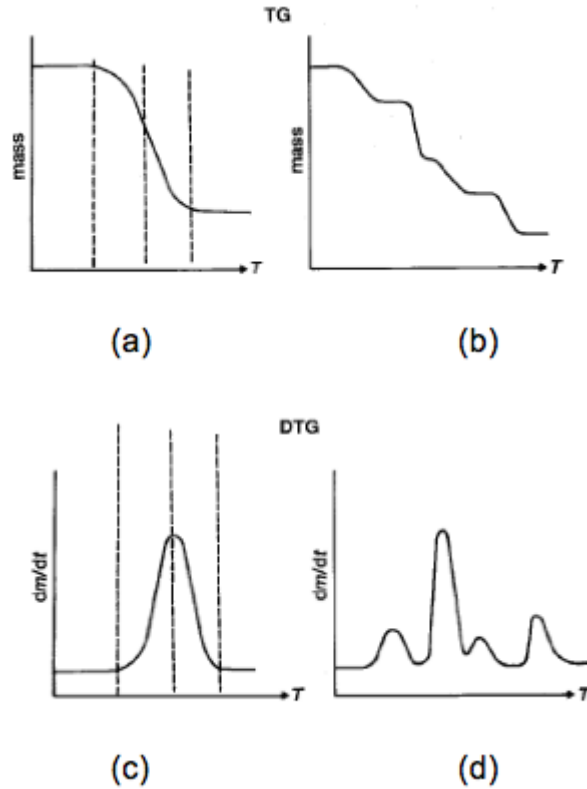
As curvas termogravimétricas apresentadas na Figura 3 apresentam as seguintes características:

- (i) Caracteriza um composto ou substância que não apresenta variação de massa para a faixa de temperatura analisada;
- (ii) Representa o comportamento de uma amostra que geralmente ou apresentou evaporação de compostos voláteis ou houve evaporação de água constatada pela rápida perda inicial de massa;
- (iii) A rápida perda de massa caracteriza a decomposição da amostra analisada em apenas um estágio;
- (iv) Semelhante à descrição acima, porém em vários estágios;
- (v) Assemelha-se a curva anterior caso se diminua a velocidade de aumento na temperatura do ensaio.

No gráfico da Figura 4 as perdas de massa serão apresentadas em forma de picos, e estes terão amplitudes correspondentes ao grau de variação da massa

da amostra analisada, ou seja, o pico corresponde ao ponto máximo de variação de massa.

Figura 4 – Comparação entre as curvas TG e DTG.



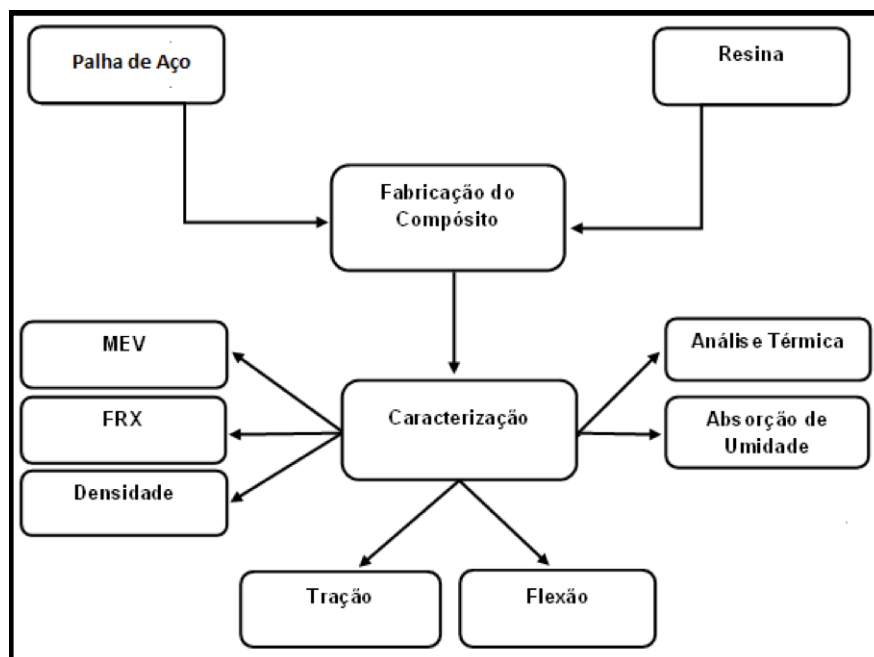
Fonte: Callister, 2009.

Outra vantagem da curva DTG é a visualização de reações sobrepostas. Como se observa na Figura 4 (b) as variações de massa podem ser visualizadas de maneira clara e os pontos de temperatura podem ser observados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos materiais e métodos descrevem-se os procedimentos experimentais usados na fabricação dos compósitos, bem como os ensaios para caracterização (tração, flexão, microscopia eletrônico de varredura (MEV), fluorescência de raios-X (FRX), resistência térmica, absorção de umidade e densidade). O fluxograma da Figura 5 sintetiza os procedimentos utilizados para obtenção e caracterização do compósito.

Figura 5 – Procedimentos utilizados para obtenção e caracterização do compósito.



3.1 Materiais

3.1.1 Fibra da Palha de Aço

A fibra de aço utilizada foi a palha de aço extraída através da usinagem do aço carbono. O material vem em embalagem comercial como sendo um conjunto de linhas de aço bem finas e entrelaçadas, usado no trabalho de acabamento, na limpeza doméstica e polimento de objetos metálicos.

3.1.2 Matriz Polímerica

Como matriz foi utilizada uma resina poliéster insaturada do tipo ortoftálica (cristal), da ARA Química S/A adquirida no comércio local em loja especializada em

Figura 6 – Fibra de aço(palha de aço) utilizada no compósito estudado.



produtos para fibras de vidro e manutenção de piscinas, construção de barcos e artesanato.

O principal motivo para a escolha da resina ortoftálica deve-se ao menor valor na aquisição e ao fato de ser um material fácil de trabalhar. A fabricação de compósitos com resina poliéster não exige grandes equipamentos para fabricação do compósito proposto. A mesma trabalha em baixas temperaturas e possui baixo risco de manuseio e prejuízo à fibra (GOMES, 2015). Segundo o fabricante a concentração de monômero de estireno na solução da resina poliéster varia entre 40 e 44%.

3.1.3 Desmoldante

O desmoldante utilizado nos experimentos foi a base de PVA (álcool polivinílico), Figura 7, empregado para se obter uma melhor superfície de acabamento bem como facilitar a retirada das placas do molde de fabricação dos corpos de prova.

Para aplicação do desmoldante foi necessário atenção para o completo preenchimento dos cantos, laterais e partes postas em contato direto com a resina. Esses procedimentos garantem excelente acabamento superficial.

Figura 7 – Desmoldante aplicado nas superfícies do molde.

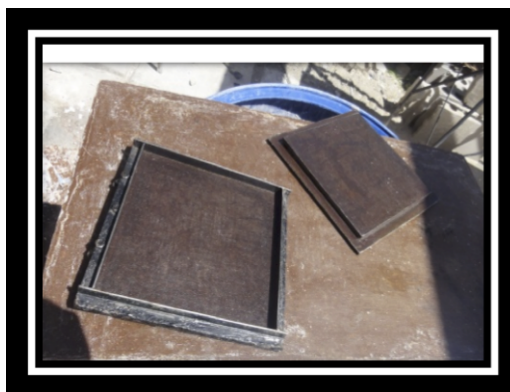


3.1.4 Provedor de cura (Catalisador)

Muitas vezes chamados de catalisador, na verdade consiste em um peróxido de metil-etil-cetona em dimetilftalato provedor ou iniciador de cura para resina poliéster insaturada e éster vinílico. Nos experimentos utilizou-se o Brasnox DM 50, fabricado pela polinox do Brasil, cujo aspecto é incolor, líquido e límpido.

Para fabricação dos corpos de prova foi utilizado um molde em ferro fundido cujas dimensões são 200mm x 200mm x 8mm. O mesmo foi fabricado em ferro fundido para que o compósito fosse prensado, pois desse modo acreditava-se que a quantidade de bolhas em seu interior seria minimizada. A Figura 8 mostra o molde metálico utilizado para a fabricação das placas de compósito que apresenta 200mm de comprimento, 200mm de largura e 12mm de profundidade.

Figura 8 – Molde para fabricação do compósito.



3.2 Métodos

3.2.1 Processo de obtenção do compósito

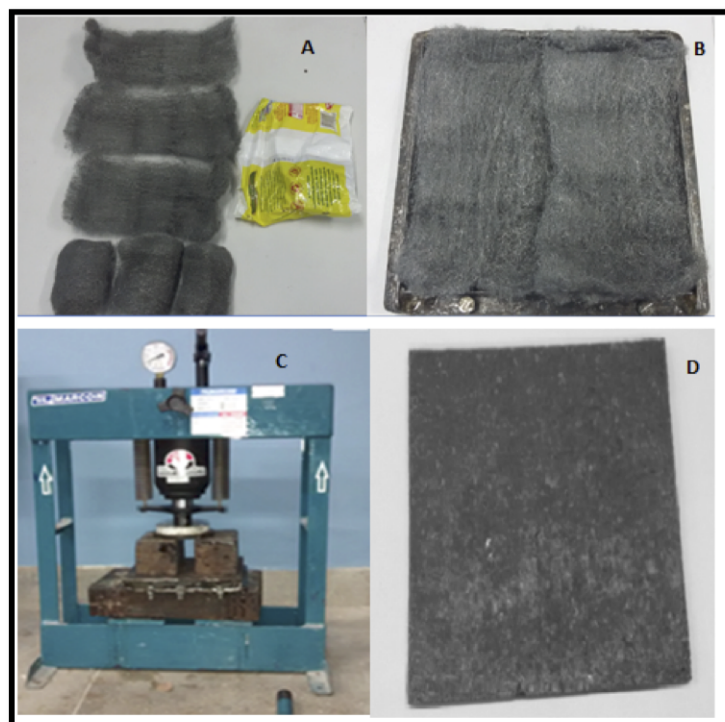
Inicialmente as camadas da palha de aço foram retiradas de sua embalagem comercial, em seguida houve o estiramento manual das palhas procedeu-se a pesagem das mesmas, com as três formulações a serem estudadas, 10%, 15% e 20%.

O processo de fabricação utilizado neste trabalho foi o de moldagem por compressão a frio, realizado em molde fechado metálico com dimensões 200mm x 200mm x 12mm. Aplicava-se a cera desmoldante no molde e derramava-se uma pequena quantidade de resina no seu interior.

Em seguida a primeira camada da palha de aço era colocada acima da resina. Na sequência intercalava-se uma camada de resina com uma da palha de aço, até chegar ao peso da formulação desejada. O molde era fechado e levado a uma prensa, onde se aplicava carga de 2,0 toneladas, por um período de 24 horas, e, em seguida desenformava-se o material composto.

Utilizou-se uma prensa hidráulica MARCON MPH10 com capacidade de até 10 toneladas Neste processo o molde encontra-se em temperatura ambiente e ambas as faces das peças tinham bom acabamento. A Figura 9 mostra o processo de obtenção e fabricação de placas do compósito.

Figura 9 – Processo de Fabricação do Material Compósito. A) Palha de Aço b) Fibra impregnada com a resina ortoftálica (processo *hand lay up*), c) Compósito na prensa (processo de compressão a frio), d) Material compósito pronto.



Utilizou-se a fibra de aço como carga e a resina poliéster ortoftálica como matriz. Foi obtido um material compósito para três formulações, com 10%, 15% e 20% em massa de palha de aço em relação à matriz de resina poliéster, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Compósitos formulados com palha de aço.

Matriz Ortoftálica	Compósito Formulado	Quantidade de fibras (g)	Quantidade de Resina (g)	Massa total do Molde (%)
	10%	40	400	100
Palha de Aço	15%	60	400	100
	20%	80	400	100

Os ensaios para caracterização dos compósitos idealizados foram realizados nos Laboratórios de Engenharia dos Materiais da UFRN, Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRN e Laboratório de Maquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN.

3.3 Ensaaios Mecânicos

Para levantamento das características mecânicas do compósito foi realizado os ensaios de tração e flexão. Através destes foi possível levantar características como Resistência a Tração (RT) e Flexão (RF) e o Alongamento Total das amostras analisadas.

Para os ensaios de tração e flexão utilizou-se a máquina universal SHIMADZU, modelo AGX 300 com capacidade máxima de 30 toneladas conforme a Figura 10. Tais ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN conforme a Figura 10. Tais ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

Figura 10 – Máquina universal utilizada nos de ensaios a tração e flexão.



3.3.1 Ensaio de Tração

O ensaio mecânico de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais.

Pode-se afirmar que, praticamente, neste tipo de ensaio, as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima, ponto de ruptura, do final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste. O ensaio de tração permite obter um gráfico tensão-deformação, no qual é possível analisar satisfatoriamente o comportamento do material.

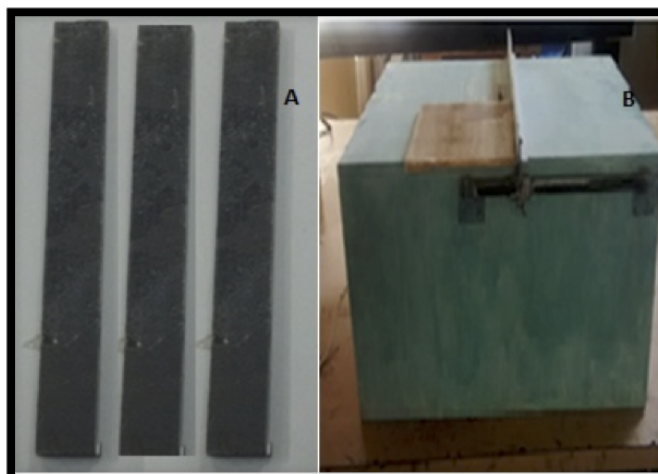
Para o ensaio de tração, cinco CP's, nas mesmas condições de ensaios, 10%, 15% e 20% respectivamente, foram selecionados para ensaios válidos.

Os corpos de prova se romperam dentro do comprimento útil do mesmo, ou seja, com comportamento final de acordo com a norma ASTM D638-10.

Com este objetivo foram cortados cinco corpos de prova para cada compósito analisado a partir de uma placa com dimensão 200mm x 200mm x 8mm. Onde as medidas das amostras para fazer o ensaio de tração são as seguintes 200mm x 25mm x 8mm.

Para o corte das amostras foi utilizada uma máquina de serra construída no LMHES com o objetivo de fazer cortes em materiais compósitos, como mostrado na mesma Figura 11.

Figura 11 – A) Corpos de prova para ensaios de tração e B) máquina de serra utilizada.

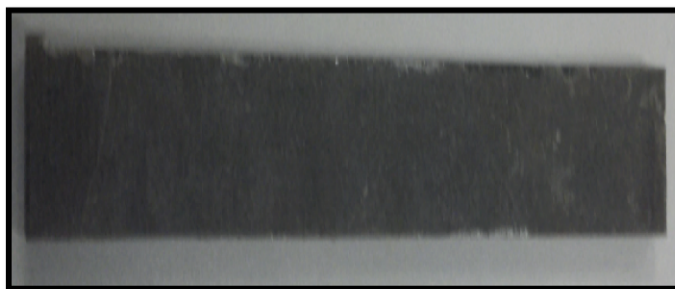


3.3.2 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão em três pontos foi usado para a caracterização do compósito. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga no centro de um corpo de prova específico, padronizado e apoiado em dois pontos. A carga aplicada aumentava gradativamente até a ruptura do corpo de prova.

O valor da carga aplicada versus o deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio. Os principais resultados do ensaio de flexão são: módulo de elasticidade, tensão à flexão, deformação e flecha. O ensaio de flexão em três pontos foi realizado de acordo com a norma ASTM D790-10, onde foram cortados cinco corpos de prova para cada compósito com dimensões 200 mm x 25 mm x 8mm, mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Corpos de prova para ensaio de flexão em três pontos.

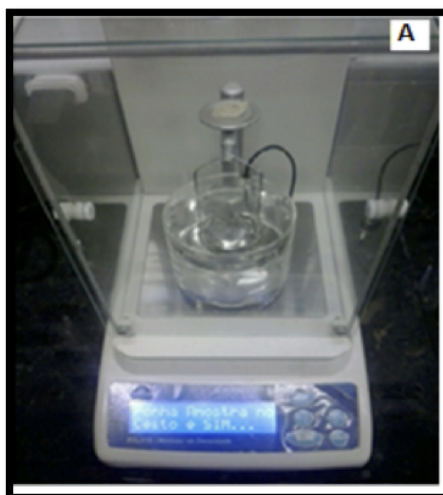


3.4 Ensaio de Densidade Aparente

A densidade aparente considera o volume do material levando em conta os poros abertos presentes, sendo inferior ao volume determinado pela medição indireta das dimensões do corpo de prova no cálculo da densidade volumétrica.

Os ensaios de densidade aparente foram realizados no laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica localizado no NTI/UFRN. A determinação da densidade aparente foi através do equipamento medidor de densidade DSL 910, mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Densímetro digital DSL 910 utilizados no ensaio de densidade aparente.



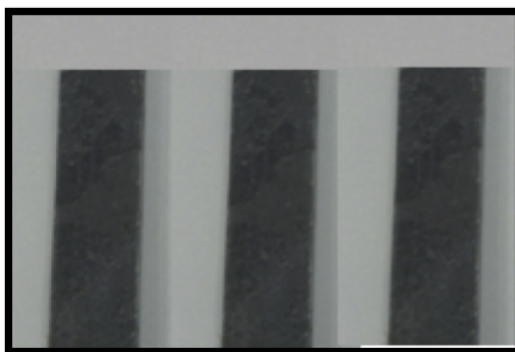
3.5 Absorção de Umidade

Para realizar o ensaio de absorção de água foram confeccionado cinco corpos de prova dos compósitos de cada formulação, para serem submergido em líquidos distintos, água destilada, água salgada e óleo usado. Em cada meio aquoso foram testados os cinco corpos de prova das formulações 10%, 15% e 20%.

Depois de secos os corpos de prova foram pesados numa balança de modelo BL3200H 2012 do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica localizado no NTI/UFRN. Após a pesagem dos corpos de prova secos.

Em seguida estes lotes fora submersos em água mineral, água salgada e óleo usado, durante 50 dias o período de saturação na absorção como mostra a Figura 14. A cada tempo de imersão previsto pela norma as amostras eram retiradas, secas e pesadas. Os corpos de provas foram recortados na forma retangular com as dimensões de 25mm de largura, 85mm de comprimento e 3mm de espessura

Figura 14 – Corpos de provas para ensaio de absorção de umidade.



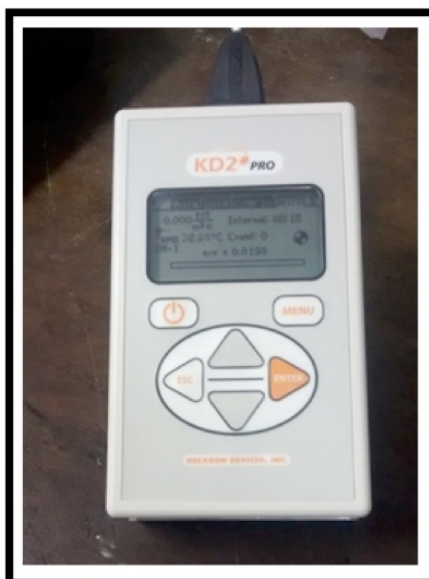
3.6 Análise Térmica

Neste ensaio verificou-se o comportamento das propriedades térmicas do compósito em análise. Foram realizados ensaios térmicos para determinar a Condutividade térmica, Capacidade térmica, Difusividade térmica e Resistência térmica do compósito em análise.

As propriedades térmicas foram determinadas através do equipamento KD2 Pro, mostrado na Figura 15, que também apresenta o equipamento de medição ligado ao corpo de prova através de um sensor.

Esse equipamento pertence ao Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica, localizado no NIT/UFRN.

Figura 15 – Equipamento KD2 PRO utilizado para levantamento das propriedades térmicas dos compósitos.



O KD2 Pro possui três sensores distintos o KS-1, TR-1 e SH-1. O KS-1 e TR-1 são utilizados para leituras de condutividade e resistividade térmica em líquidos e sólidos respectivamente e, apresentam um único sensor.

Já o SH-1, apresenta dois sensores para medidas de calor específico volumétrico, difusividade térmica, condutividade e resistividade térmica. Este mesmo sensor, SH-1 é compatível com muitos sólidos e materiais granulados.

Tendo em vista as propriedades resistência e condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica a serem analisadas, se escolheu o sensor SH-1 apropriados para tais propriedades.

Os corpos de prova foram confeccionados em formato cilíndrico com 5,0 cm de diâmetro e 5,0cm de altura, utilizando o molde da Figura 16.

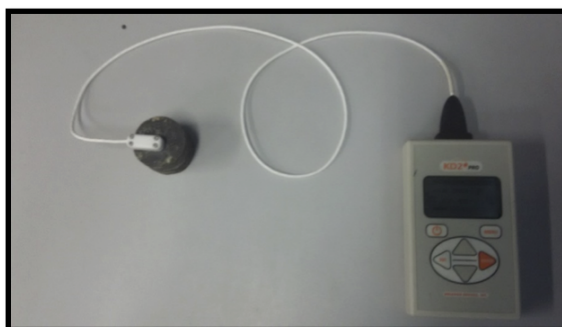
A Figura 16 apresenta o procedimento experimental recomendado à leitura do manual técnico do KD2 Pro realizado no material compósito para as propriedades de condutividade térmica, calor específico, resistência térmica e difusividade.

3.7 Ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX)

É parte fundamental o conhecimento da composição química das matérias-primas de qualquer material compósito, (SANTOS, 2015).

O material compósito e a fibra da palha de aço foram analisados quimicamente através de um Espectrômetro por Fluorescência de Raio X, marca EDX- 720 Shimadzu, do Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais, do Departamento

Figura 16 – Análise das propriedades térmicas do compósito.



de Engenharia de Materiais na UFRN. A Figura 17 mostra o equipamento utilizado para a análise de fluorescência dos materiais.

Figura 17 – Espectrômetro para análise química da palha de aço e do compósito obtido.



3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para verificação anatômica do compósito da palha de aço, foram obtidas micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV, Modelo TESCAN a 20kV de aceleração) dos corpos de prova anteriormente submetidos ao ensaio de tração e flexão. Os experimentos ocorreram a uma temperatura ambiente de 25°C e umidade relativa de 80%.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta profundidade, ampliação e resolução com o objetivo de comparar o grau de adesão das fibras às diferentes matrizes, analisou-se para as proporções de 10%, 15% e 20% a face fraturada nos testes de tração e flexão.

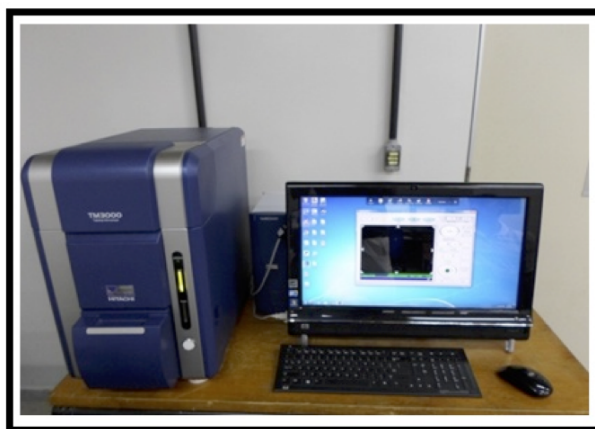
As imagens fornecidas pelo MEV são tridimensionais e possuem um caráter virtual. Este dispositivo gera imagens de alta resolução e ótima qualidade de foco.

O local de ensaio foi o Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN. As amostras não passaram por qualquer revestimento condutivo.

Foram realizados ensaios de MEV nas superfícies de fratura das amostras do compósito e mapeamento de elementos existentes, verificando-se as fases formadas e sua homogeneidade. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca

Hitachi, modelo TM 3000 mostrado na Figura 18. Utilizou-se uma tensão de 15kV, sendo o material disposto no porta amostra, com o auxílio de uma fita metálica condutora a base de carbono.

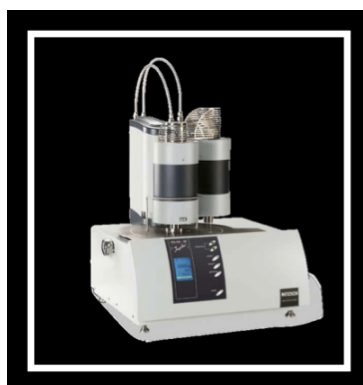
Figura 18 – Equipamentos de Análise de Microestrutura - MEV.



3.9 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é uma técnica de análise instrumental que mede a variação de massa da amostra em relação a temperatura e/ou tempo enquanto é submetido a uma programação controlada, utilizando equipamento mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Foto da máquina de ensaio de TG.



Esta técnica possibilita conhecer a faixa de temperatura em que a amostra adquire uma composição química fixa, a temperatura em que se decompõe e o andamento das reações de desidratação, oxidação, combustão, decomposição etc.

O Tg/DSC simultâneo é aplicado ao mesmo tempo sobre a amostra, obtendo-se informações sobre a variação de massa e entalpia e/ou calor específico da amostra num único experimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e debatidos os resultados da caracterização do compósito em suas formulações/configurações, obtidos dos ensaios de FRX, Densidade, Tração, Flexão, Absorção de Umidade, MEV e Análise Térmica.

4.1 Densidade

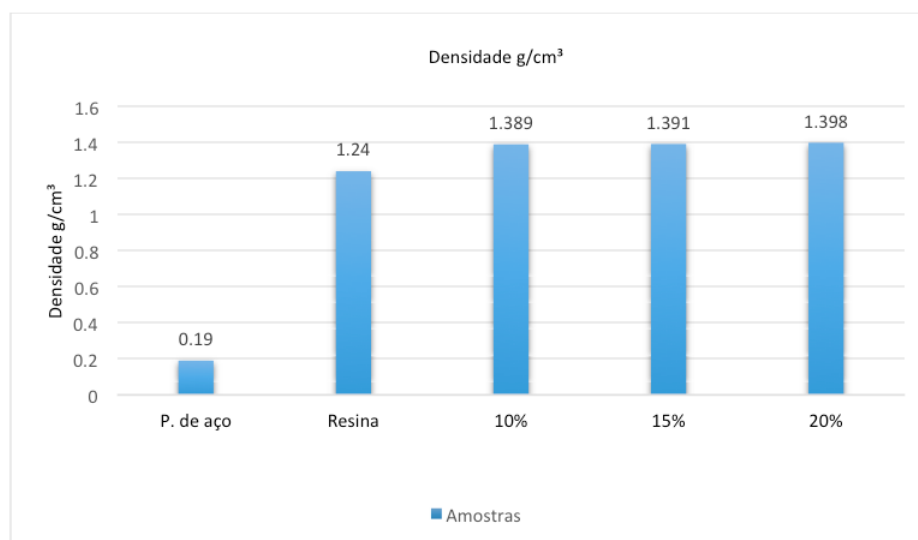
A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de densidade aparente obtidos na resina, na fibra da palha de aço e nas formulações estudadas do material compósito.

Tabela 5 – Densidades da resina, fibra e compósito.

Composto - Líquido Água Destilada à 25,5°C	d(g/cm ³)
Palha de aço	0,190
Resina Cristal	1,24
10%	1,389
15%	1,391
20%	1,398
DENSIDADE MÉDIA	1,395

O gráfico da Figura 20 mostra o comportamento comparativo entre os elementos da matriz, das fibras e das configurações do compósito.

Figura 20 – Comportamento comparativo entre os elementos a matriz, fibras e configurações do compósito.



A densidade da Palha de aço corresponde a 15,32% da matriz, trazendo ao material uma leveza significativa, quando comparado com a resina.

Segundo os fabricantes a densidade da resina cristal pode variar entre 1,05 e 1,20 g/cm³. Os valores médios do teste de densidade estiveram acima do que preconizam os fabricantes. O valor encontrado esteve 3,3% acima do limite superior do intervalo apresentado pelos fabricantes. Entende-se que essa alteração pode encontrar explicação na forma como o produto é entregue pelo fabricante, e como é repassado para o consumidor final.

Com relação às configurações de compósitos estudadas, todas tiveram densidade um pouco maior que a da matriz, porém com valores apresentados ainda baixos para densidade, o que representa um potencial de boa aplicabilidade quando se levado em consideração sua leveza.

A densidade foi crescente na medida em que aumentava a quantidade de palha de aço. A formulação com menor densidade foi a de 10%, com densidade maior em 10,72% em relação a matriz.

A densidade média do compósito para as três formulações/configurações foi aproximadamente 8,14% maior que a da matriz, resina ortoftálica tipo cristal. Pode-se, portanto, utilizar a carga da palha de aço no compósito. Isso representa uma boa vantagem do compósito em relação a matriz em custo e densidade similar.

Essa propriedade é a que dá maior potencial de utilização do compósito proposto aliado ao comportamento térmico e resistência Mecânica.

4.2 Absorção de umidade

O tempo de imersão para os compósitos foi de 50 dias para as amostras imersas em água do mar, água destilada e óleo queimado. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para absorção de água do mar.

Tabela 6 – Índice de absorção de Água do Mar pelos compósitos.

Absorção de Água do mar	
Material	Abs%
Cristal	0,467
10%	0,567
15%	0,650
20%	0,800

A configuração 10% foi a que apresentou melhor resultado para o meio testado. Com o aumento do percentual de fibras de aço percebeu-se um pequeno aumento

da absorção de água pelo compósito, alcançando para 20% um nível de absorção maior que as três configurações estudadas, sendo ainda maior que a matriz de resina poliéster. O compósito proposto e estudado teve uma menor absorção de água do mar que a maioria dos já testados e estudados no grupo de materiais e energia do LMHES.

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de absorção de umidade para o meio água destilada.

Tabela 7 – Índice de absorção de Água destilada pelos compósitos.

Absorção de Água Destilada	
Material	Abs%
Resina	0,450
10%	0,467
15%	0,700
20%	0,905

O compósito para suas três formulações teve um índice médio de absorção de água destilada semelhante com a observada na água do mar. A formulação 20% mostrou um aumento maior de absorção para esse meio aquoso.

Mais uma vez um maior percentual de fibras de aço na formulação conduz a uma maior absorção, desta vez de água do mar.

Ficou evidenciada a competitividade do compósito em relação a absorção de água do mar quando comparado a outros compósitos já estudados e citados pela literatura. A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de absorção de umidade para o meio óleo queimado.

Tabela 8 – Índice de absorção de óleo queimado pelos compósitos.

Absorção de Óleo Queimado	
Material	Abs%
Resina	0,125
10%	0,130
15%	0,291
20%	0,340

O mesmo comportamento dos outros meios pode ser verificado. O aumento das fibras de aço aumentou o valor em % de absorção do compósito.

Todas as formulações apresentaram maior nível de absorção que o da matriz de resina poliéster. Foi o meio aquoso de menor índice de absorção de umidade.

A formulação com melhor resultado foi a 10%, se comparando com 20%, esta última com absorção de 61,7% no peso mais que a composição de 10%, para este

meio aquoso, o que demonstra a grande variação entre as formulações para o parâmetro avaliado, para os três percentuais de fibras testados.

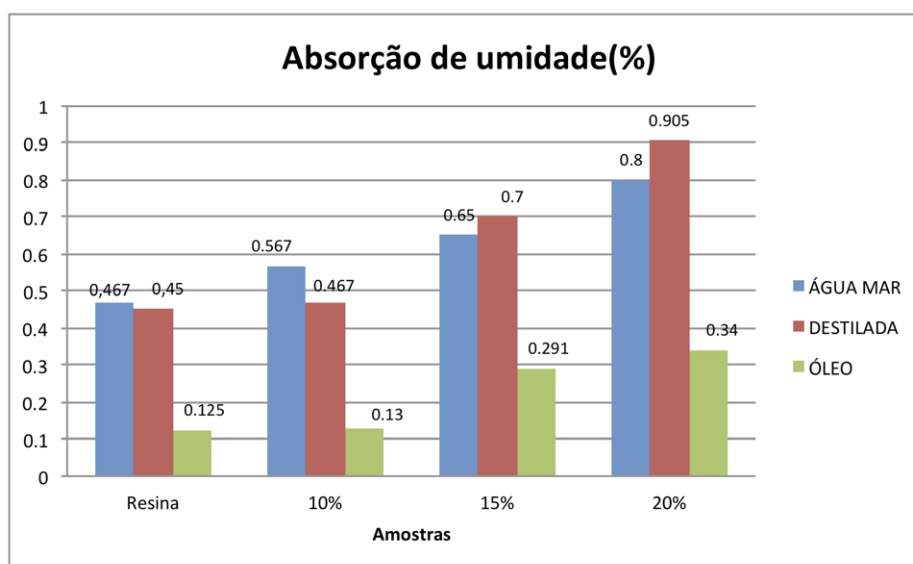
O baixo índice de absorção de umidade constatado traz uma viabilidade de aplicação para o compósito exposto a esse meio aquoso. O percentual de umidade é menor que o alcançado para os dois outros meios testados.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para os três meios aquosos e o gráfico da Figura 21 o comportamento assumido pelas formulações do compósito escolhidas e testadas.

Tabela 9 – Comportamento assumido pela matriz e formulações do compósito no ensaio de absorção de umidade.

AMOSTRAS	ABS. ÁGUA DO MAR (%)	ABS. ÁGUA DESTILADA (%)	ABS. ÓLEO (%)
RESINA	0,467	0,450	0,125
10%	0,567	0,467	0,130
15%	0,650	0,700	0,291
20%	0,800	0,905	0,340
MÉDIA	0,621	0,630	0,221

Figura 21 – Resultados obtidos para os três meios aquosos.



4.3 Ensaio de Tração

A Tabela 10 apresenta os resultados da matriz/resina ortoftálica, entre as medidas do ensaio e os parâmetros cedidos pelo fabricante da matriz utilizada para a obtenção do compósito.

Tabela 10 – Comportamento assumido pela matriz e formulações do compósito no ensaio de absorção de umidade.

	Resistência a Tração (Mpa)	Alongamento Total (%)
Medida	32,0	5,0
Fabricante	57,0	3,2

A RT medida foi bem inferior à apresentada pelo fabricante, A resina apresentou um decréscimo de 43,85%. No Alongamento o valor medido foi superior ao apresentado pelo fabricante.

Tal diferença pode ser sugestiva de uma adulteração na revenda das resinas, uma vez que para todos os ensaios de propriedades mecânicas em todos os compósitos já estudados pelo grupo do LMHES apresentaram valores bem abaixo dos apresentados pelos fabricantes, o mesmo acontecendo para o a matriz do compósito estudado.

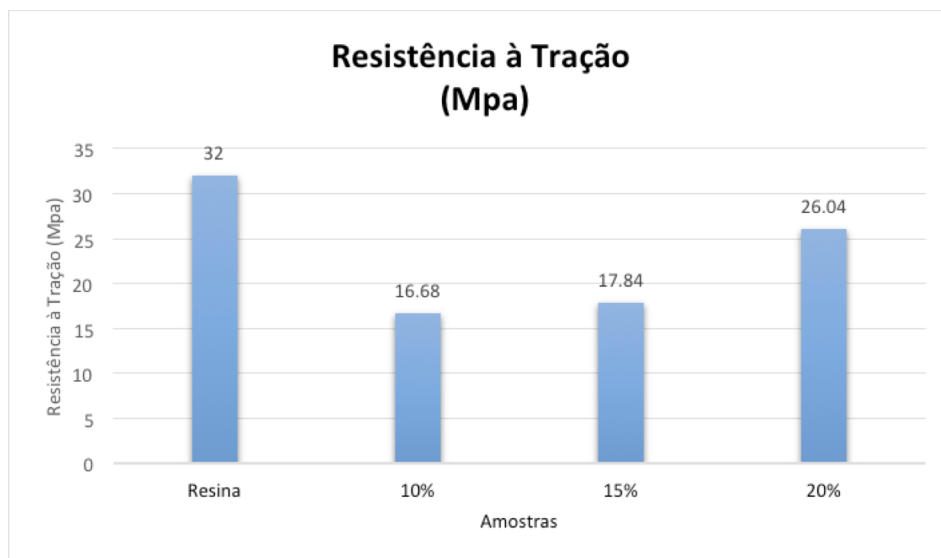
A Tabela 11 apresenta os resultados e o comportamento dos parâmetros obtidos no ensaio de tração para a matriz polimérica utilizada e o compósito em suas várias configurações/formulações.

Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos e matriz polimérica utilizada.

Adição (%)	Resistência à Tração (Mpa)	Deformação Total (%)
Resina	2,00±1,73	5,00±0,01
10%	16,68±0,73	3,30±0,73
15%	17,84±1,45	2,48±1,40
20%	26,04±0,92	3,26±0,92

Na Figura 22, percebe-se através dos histogramas que à medida que se aumentou a percentagem de fibras de palha de Aço na matriz polimérica, ocasionou-se um aumento nas propriedades mecânicas de resistência à tração dos compósitos em estudo, obtendo-se o maior valor para o compósito com 20% em fibras de Lã de Aço.

Figura 22 – Resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos e matriz polimérica utilizada.



Para todas as formulações aconteceu uma diminuição dessa propriedade, que pode ter sido causada pela deficiência na aderência entre a fibra e a matriz, já que a boa aderência é uma característica da fibra de aço, pode ser verificada nas imagens de MEV que serão apresentadas mais adiante. Também das fibras estarem preferencialmente alinhadas no sentido não preferencial do esforço de tração, as fibras ficaram em posições aleatórias, o que ocasionou essa diminuição na resistência Mecânica.

A medida que se aumentava o percentual de fibras esse alinhamento pode ter sido alcançado por um percentual de fibras favorecendo a obtenção de uma a maior resistência à tração.

Todas as formulações apresentaram diminuição significativa da resistência à tração em relação à resina, sendo para a formulação 10% de 47,87%, para a formulação 15% de 44,25% e para a formulação 20% de 18,62%.

Para o alongamento a formulação com resultado mais expressivo foi a 10% com uma diminuição de 34% em relação a matriz e todas as formulações tiveram resultados piores que o da matriz. Apesar dos valores de RT serem menores do que os obtidos pela matriz, todas as formulações do compósito podem ser utilizadas em aplicações que requeiram baixas solicitações de tensões de tração, com múltiplas possibilidades.

4.4 Ensaio de Flexão

Foram fletidos 5 corpos de prova para se conseguir minimizar o erro introduzido pela diferença de propriedades entre os vários pontos dessa placa devido à anisotropia que é característica dos compósitos.

Figura 23 – Resultados obtidos no ensaio de deformação para os compósitos e matriz polimérica utilizada.

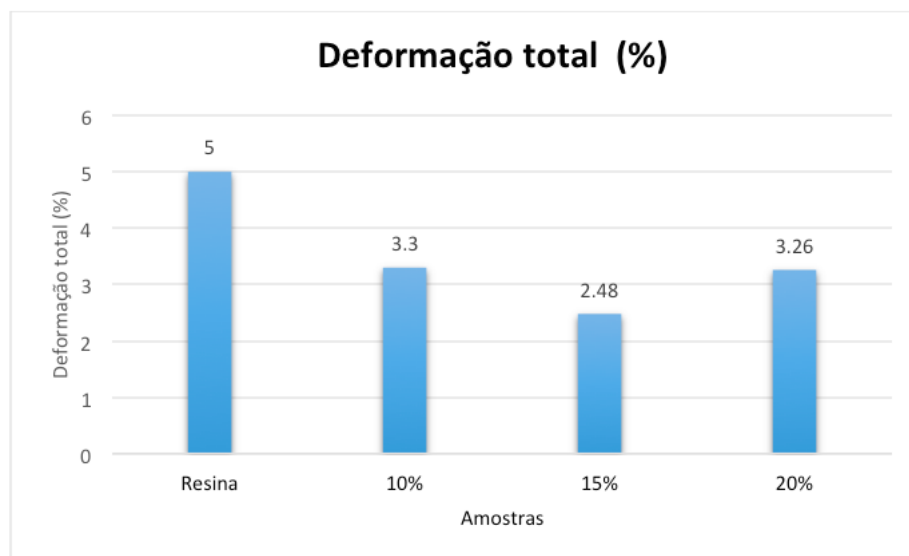


Tabela 12 – Resultados comparativos entre as medidas do ensaio e os parâmetros cedidos pelo fabricante das matrizes utilizadas

Resistência à Flexão (MPa)	
Medida	56,30±2,58
Fabricante	84,4

As dimensões dos CP's e as especificações de execução dos ensaios seguiram as normas ASTM D3039/D695 e ASTM D790 para os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos, respectivamente.

Os mesmos resultados dos ensaios de flexão para os compósitos com as adições em fibras de palha de aço estão apresentados graficamente através histogramas na Figura 24 e na Tabela 13.

Figura 24 – Resultados obtidos no ensaio de flexão para os compósitos e matriz polimérica utilizada.

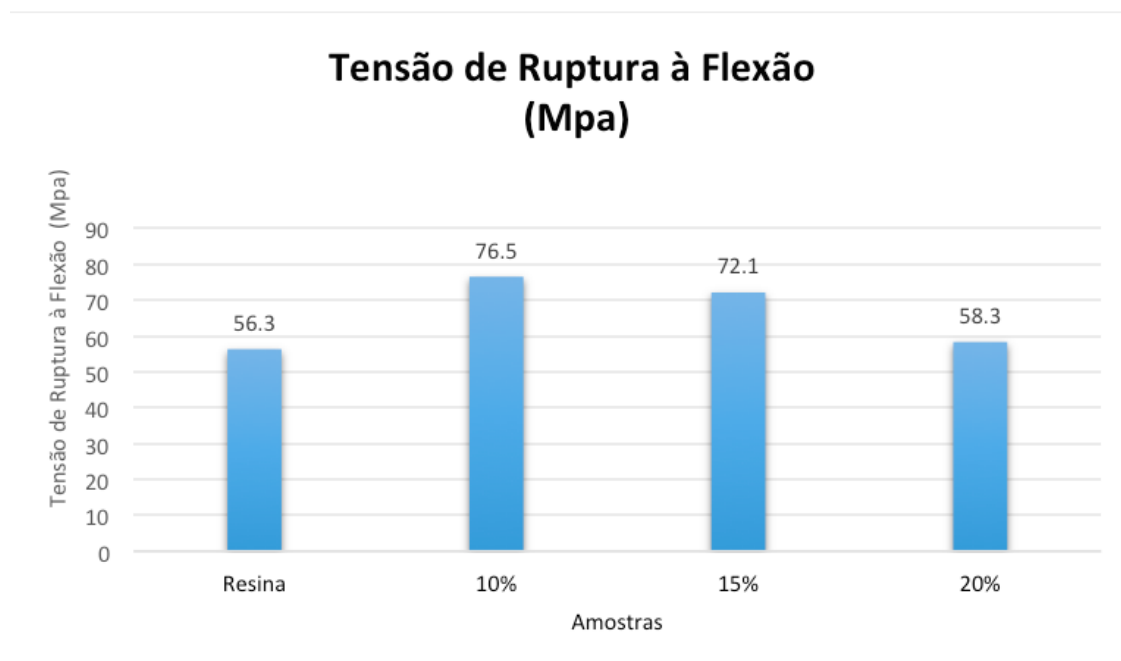


Tabela 13 – Resultado das médias do ensaio de RF.

Adição (%)	Resistência à Flexão (Mpa)	Alongamento total (%)	Max. deslocamento (mm)
Resina	56,30±2,58	0,033±0,003	7,71±1,22
10%	76,5±8,9	2,04±0,34	6,72±0,55
15%	72,1±5,22	2,66±0,53	7,31±1,46
20%	58,3±3,11	2,31±0,37	7,63±0,5

Todas as formulações testadas apresentaram superioridade em relação a resina matriz, demonstrando um resultado das formulações testadas superior ao obtido em relação à tração. A baixa adesão entre fibra e matriz, ocasionada de deficiência na resistência mecânica, foi compensada pelo melhor alinhamento das fibras no sentido de uma maior resistência a flexão.

A formulação de maior resistência a flexão foi a formulação 10%, e a de menor resistência foi a formulação 20%, mesmo assim superior a da resina. A formulação 10% apresentou um crescimento significativo, correspondente a 35,3% em relação a resina matriz, a formulação 15% seguiu o mesmo comportamento com aumento de 33,03% e a formulação 20% foi superior a resina em 2,1%.

A flecha seguiu o mesmo comportamento da resistência à flexão, sendo menor para as formulações de maior resistência mecânica.

Os valores de resistência à flexão foram bem superiores aos alcançados na tração, mostrando uma maior capacidade do compósito para resistir a cargas de flexão, comportamento geralmente apresentado por todos os compósitos.

Provou-se a maior viabilidade do compósito para a flexão do que na tração, com menor perda de resistência em relação a matriz de resina poliéster ortoftálica utilizada, apesar da direção orientação aleatória das fibras, o resultado foi satisfatório, pois as características das fibras de aço, tenacidade e boa absorção de energia, influenciaram neste resultado de resistência à flexão.

Os valores de resistência à flexão foram bem superiores aos alcançados na tração, mostrando uma maior capacidade do compósito para resistir a cargas de flexão, comportamento geralmente apresentado por todos os compósitos.

Para a deformação as três formulações apresentaram resultados maiores que o da resina matriz.

4.5 Análise Térmica

A Tabela 14 apresenta os resultados médios medidos das propriedades termo-físicas estudadas, da condutividade térmica, a capacidade térmica (calor Específico), da difusividade térmica, e da resistência térmica (resistividade). As análises foram realizadas na resina e no material compósito através do analisador térmico KD2 PRO.

O comportamento do compósito para as três formulações escolhidas e testadas foi superior ao da resina poliéster matriz na condutividade, capacidade térmica, Difusividade. Já o comportamento da Resistividade foi menor. Houve um crescimento na condutividade térmica à medida que aumentava a quantidade das fibras de palha de aço.

Tabela 14 – Propriedades Térmicas da resina e compósitos.

Material	K Condutividade (W/mK)	C Capacidade térmica (MJ/m ³ K)	D Difusividade (mm ² /s)	R Resistividade (°C.cm/W)
Resina	0,234	2,306	0,101	427,30
10%	0,330	2,208	0,151	303,17
15%	0,413	2,133	0,211	231,37
20%	0,435	1,780	0,240	233,67

A condutividade térmica de todas as configurações testadas do compósito foi superior a da resina matriz, com a melhor configuração para a amostra de 20% tendo um aumento de 46,20%. A de pior resultado, 10% , ainda bem superior a da resina em 29,09%.

A medida que se aumentava a quantidade de palha de aço nas formulações do compósito ocorria um aumento na condutividade térmica, pois as fibras possuíam uma menor resistividade térmica que a resina, fazendo com que o compósito possuía uma boa habilidade de condução de calor.

A capacidade térmica dos compósitos estudados apresentam valores abaixo do valor da resina. O aumento da quantidade de palha de aço agregado a resina faz com que haja diminuição da capacidade térmica.

Como os compósitos possuem mais baixa capacidade térmica que a Resina, eles demoram mais para serem aquecidos e quando estão à alta temperatura demoram resfriar-se em relação a Resina.

A difusividade térmica em todas as três formulações foi superior a de resina e em consequência do aumento da quantidade de palha de aço, tendo a formulação de 20% do compósito, uma diferença de 57,91% a mais em relação a resina, o que indica que os compósitos tenham uma melhor capacidade térmica de se difundirem através de um material.

Resistividade térmica dos compósitos estudados apresentam valores abaixo da Resina, tendo o compósito de 10% o melhor resistividade com 29,04% de valor abaixo da resina.

O aumento da quantidade de palha de aço no compósito diminui sua resistividade, fazendo com que o material perca sua propriedade de bom isolamento térmico, pelo fato também de aumentar sua condutividade térmica. Os gráficos das Figuras 25, 26, 27 e 28 mostram o comportamento assumido pelos parâmetros da análise térmica.

Figura 25 – Comportamento assumido pela condutividade térmica para a matriz e as formulações do compósito.

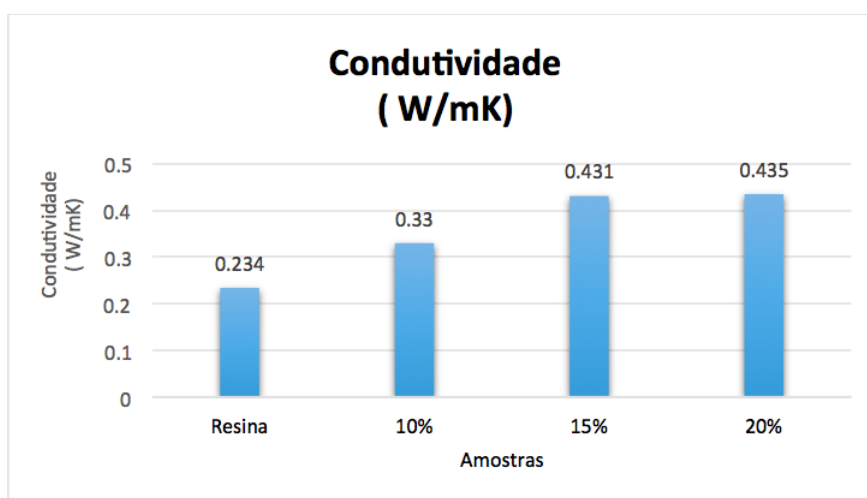


Figura 26 – Comportamento assumido pela capacidade térmica para a matriz e as formulações do compósito.

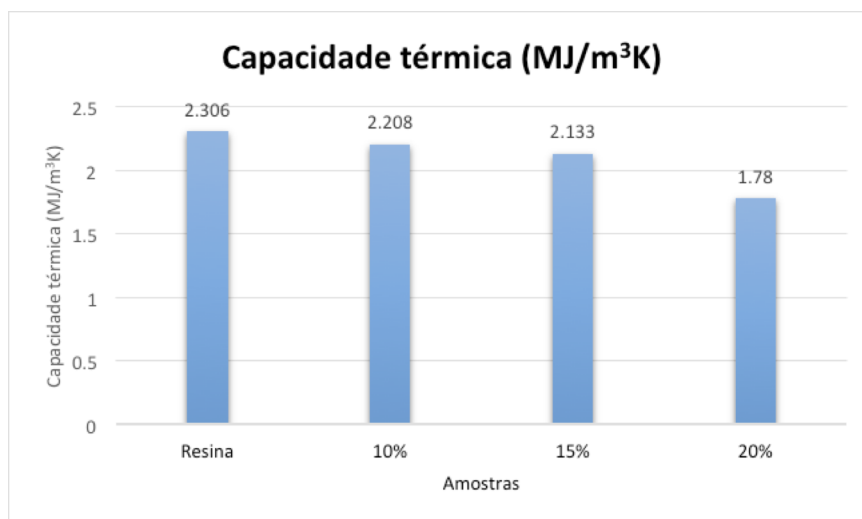


Figura 27 – Comportamento assumido pela difusividade térmica para a matriz e as formulações do compósito.

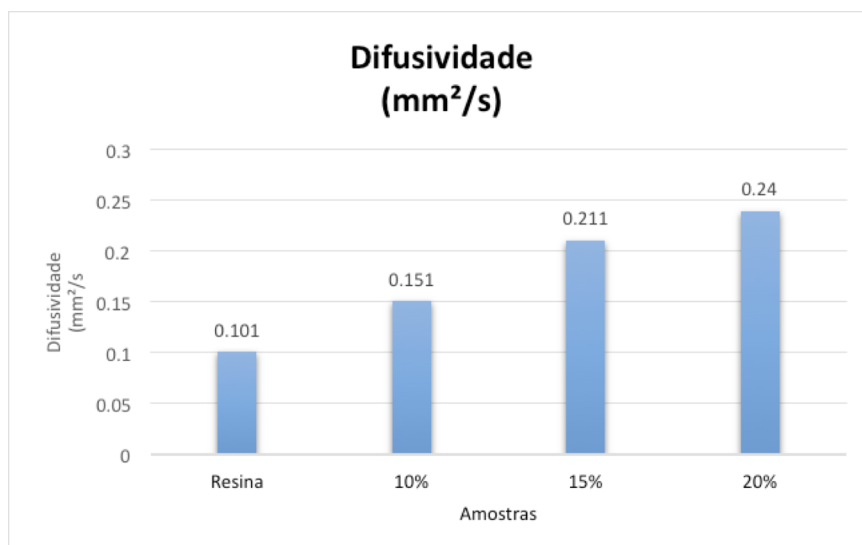
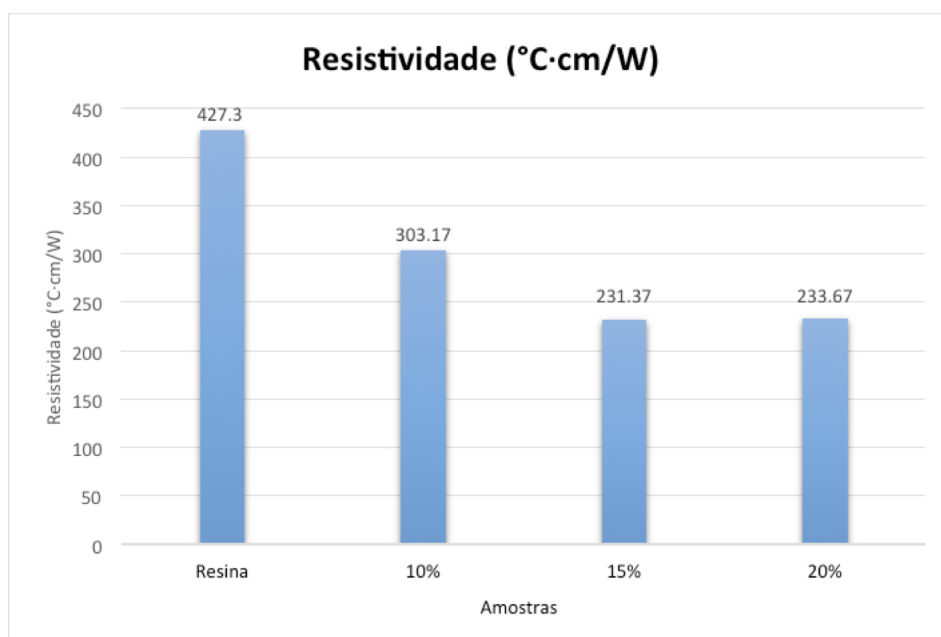


Figura 28 – Comportamento assumido pela resistividade térmica para a matriz e as formulações do compósito.



4.6 Análise Química

A Tabela 15 apresenta os resultados da análise química das formulações do compósito estudadas.

Tabela 15 – Análise química

Determinações (%)	Compósito 10% em fibras*	Compósito 15% em fibras*	Compósito 20% em fibras*
Fe ₂ O ₃	96.879	97.491	97.824
MnO	0.799	0.703	0.758
SiO ₂	0.793	0.426	0.316
Al ₂ O ₃	0.635	0.376	0.238
CaO	0.421	0.310	0.377
SO ₃	0.347	0.403	0.189
K ₂ O	0.126	0.291	0.298

*Palha de aço

Análise químicas das Matérias-Primas.

Verificou-se que a caracterização química dos compósitos são essencialmente constituída pelos óxidos Fe₂O₃, MnO, SiO₂ e Al₂O₃. O compósito com 20% em fibras de lã de aço apresentou um maior percentual de óxidos de ferro (97,824%), devido a quantidade de fibras existentes na matriz polimérica, justificando o aumento da resistência mecânica à tração, conforme já discutido.

4.7 Microscopia eletrônica de Varredura – MEV dos Compósitos

A análise por MEV tornou-se elementar para se avaliar a microestrutura dos compósitos, geralmente para avaliar a adesão das fibras a matriz polimérica.

Nas Figuras 29 e 30, percebe-se, claramente, através do aumento de regiões específicas delimitadas pelo pontilhado amarelo e deslocadas conforme indicam as setas nas micrografias de (a) e (b) até finalizar no detalhe da micrografia (c), uma interface bem definida entre a fibra e a matriz polimérica, sugerindo pouca afinidade entre as fases.

Figura 29 – Interação entre a fibra da palha de Aço e a matriz polimérica (a).

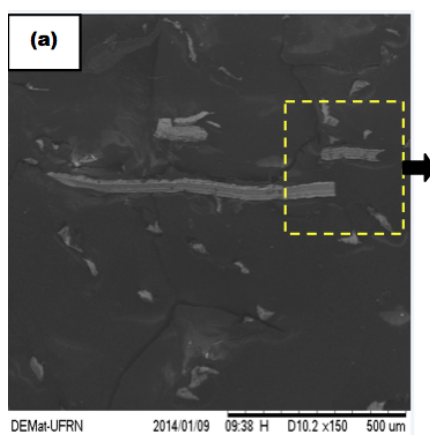
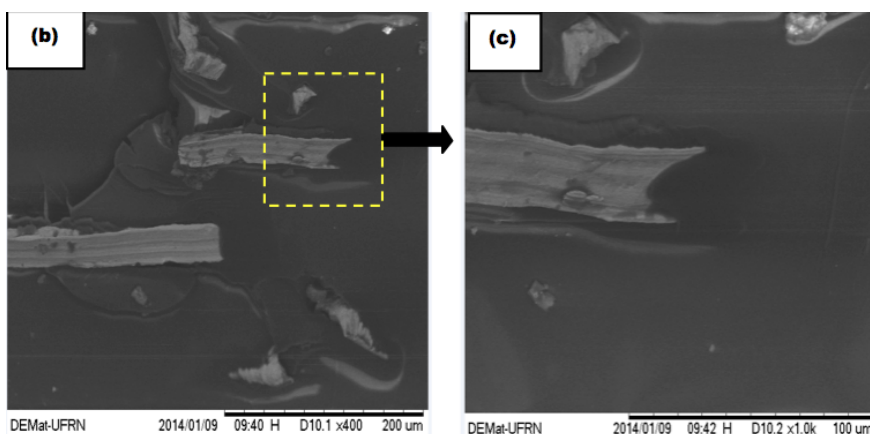


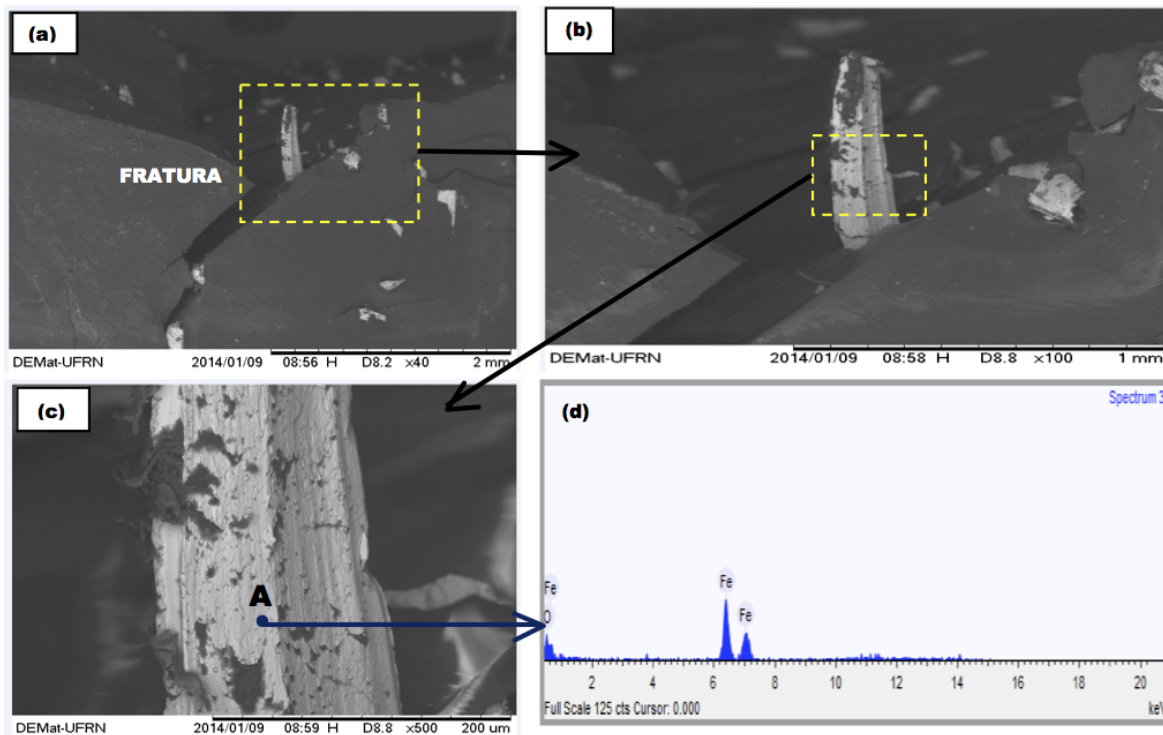
Figura 30 – Interação entre a fibra da palha de Aço e a matriz polimérica (b) e (c).



Observou-se nas Figs. 29 e 30 um aumento de regiões específicas delimitadas pelo pontilhado amarelo e deslocadas conforme indica a seta nas micrografias (a) e (b) a vista lateral da superfície de fratura e as fibras livres após o rompimento do corpo de prova. Ainda na mesma figura, verificou-se uma fratura que pode ter sido provocada por um desfibramento ou desaderência da fibra de Lã de Aço com a matriz polimérica no momento do rompimento do corpo de prova.

A Figura 31 (c), mostra no detalhe a micrografia da fibra, ampliação (x 500) onde foi constatado no ponto A por microanálise, EDS, Figura 31 (d), elementos químicos Ferro (Fe) e Oxigênio (O), componentes que comprovam a natureza ferrítica da fibra da palha de Aço.

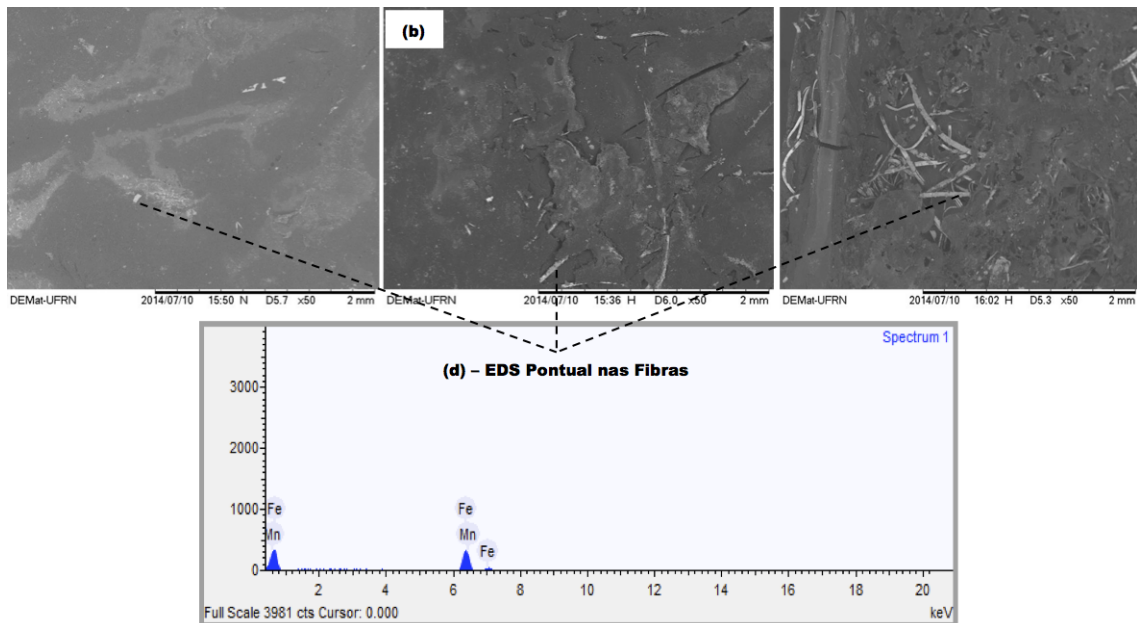
Figura 31 – Micrografia das Fibras do compósito.



Ainda na Figura 31 (a), (b) e (c) é mostrada a análise microscópica da superfície de fratura, respectivamente, dos compósitos com 10%, 15% e 20% em fibras da palha de Aço e a distribuição quantitativa das fibras, de maneira aleatória, na matriz polimérica. A maior porcentagem de fibras na matriz polimérica influenciou o aumento tanto na resistência à tração como na tensão de ruptura à flexão do compósito

A Figura 32 (d), mostra no detalhe o EDS pontual das fibras dos compósitos, onde foi constatada a natureza ferrítica das fibras através da presença dos elementos químicos Ferro (Fe) e Manganês (Mn), elementos que corroboraram com os elementos majoritários da análise química de fluorescência de raios X feita anteriormente na caracterização dos compósitos.

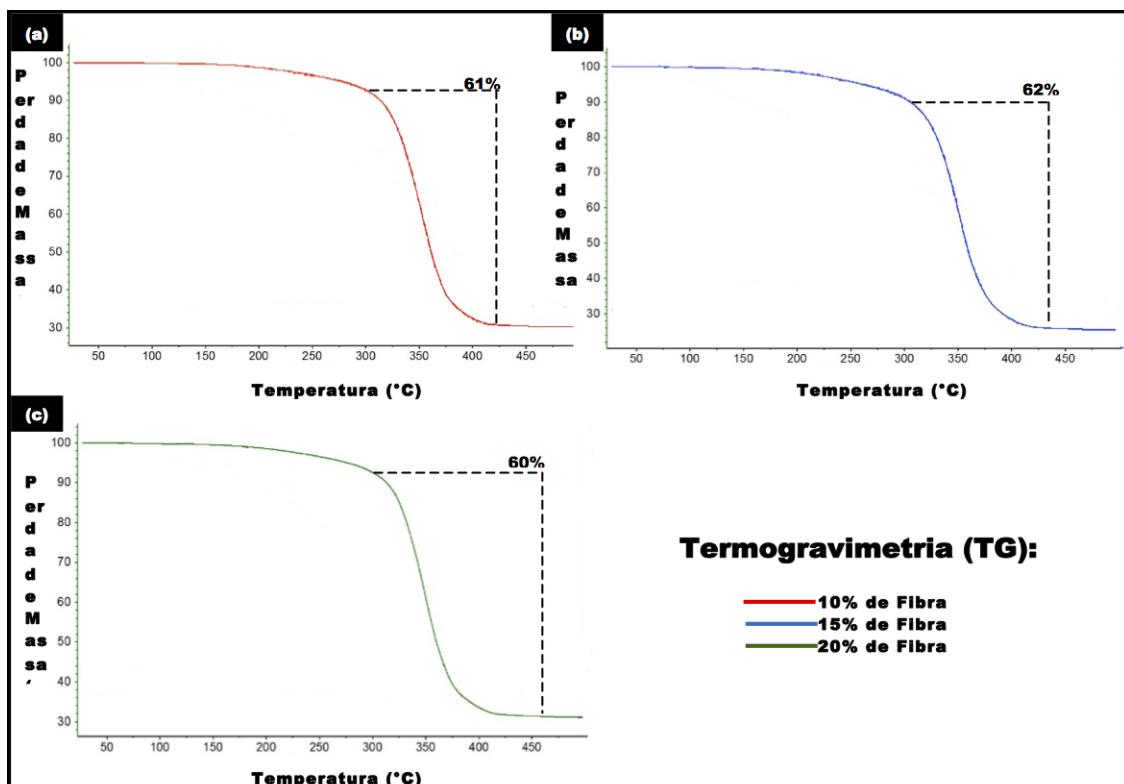
Figura 32 – EDS pontual das fibras dos compósitos.



4.8 Análise Termogravimétrica (TGA)

Os gráficos da Figura 33 exibem os níveis de temperatura onde ocorreram os principais eventos térmicos durante o ensaio TGA realizados com as formulações do compósito.

Figura 33 – Termogravimetria dos Compósitos.



A Figura 33 de (a) a (c) apresenta as curvas termogravimétricas dos compósitos com fibra de lã de aço, nos teores de 10, 15 e 20% em massa. Pode-se observar que um simples aumento na introdução da fibra de lã de aço na matriz polimérica, em ambas as porcentagens, não houve consideráveis mudanças na temperatura de degradação térmica (Perda de massa), ou seja, comportamentos bastante semelhantes.

Em virtude dessa similaridade comportamental e analisando as curvas de Termogravimetria (TG) dos compósitos, verifica-se de uma forma global para as três curvas da figura 35 (a), (b) e (c), uma perda de massa inicial de 5% a 8% até 280°C, que possivelmente corresponde à volatilização de moléculas pequenas, como a água, presente devido à umidade contida nos polímeros.

Na faixa de temperatura entre 300°C à 400°C, ocorre perda de massa mais acentuada, com pequena variação de porcentagens de 61%, 62% e 60% respectivamente nas curvas da Figura 33 (a), (b) e (c), o que, para os compósitos, pode estar relacionado ao início da degradação da cadeia polimérica.

4.9 Análise comparativa do compósito proposto e outros estudados no LMHES/UFRN

Já foram obtidos e estudados vários compósitos poliméricos no âmbito do laboratório LMHES/UFRN, cujos resultados estão apresentados por tabelas e gráficos que dão uma ideia comparativa dos seus resultados e comportamentos relativos ao compósito proposto.

4.9.1 Densidade

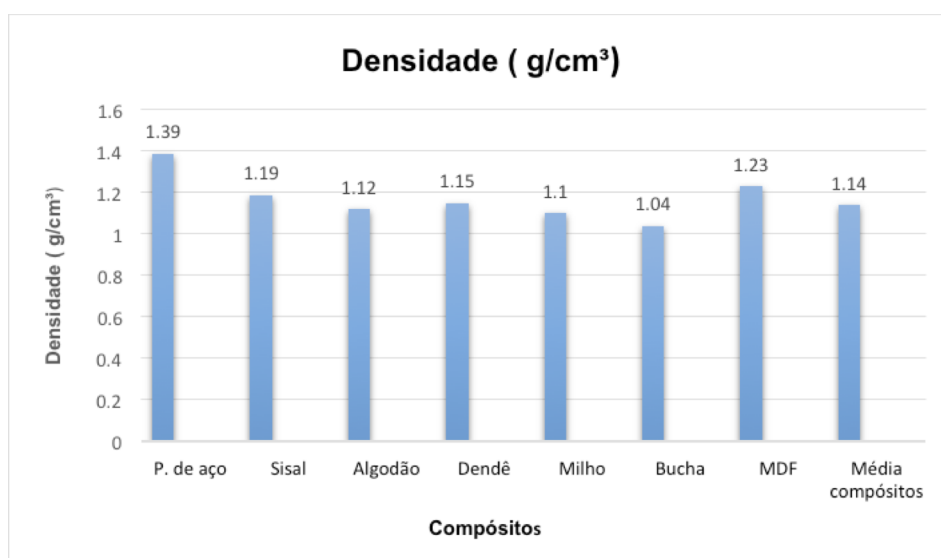
A Tabela 16 apresenta os valores médios de densidade do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

Tabela 16 – Valores médios de densidade do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

Tipo de Compósito	d (g/cm ³)
Média da Palha de aço	1,392
Fibra de sisal	1,193
Algodão	1,123
Dendê	1,151
Milho	1,106
Bucha	1,04
MDF	1,23
Média dos outros compósitos	1,1405

A densidade média do compósito para as três formulações estudadas foi bem superior a dos outros vários compósitos já estudados, em torno de 18,1%, em função da fibra utilizada. Em todos os outros compósitos foram utilizadas fibras vegetais e particulados de baixa densidade.

Figura 34 – Comportamento da densidade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.



4.9.2 Análise Térmica

O compósito proposto em suas três formulações apresentou propriedades térmicas inferiores a de outros compósitos já estudados, em relação a sua capacidade de isolante térmico. As maiores condutividades e difusividades estão associadas a presença de fibras metálicas no compósito.

Tabela 17 – Valores médios das propriedades térmicas do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

Material	K Condutividade (W/mK)	C Capacidade térmica (MJ/m ³ K)	D Difusividade (mm ² /s)	R Resistividade (°C.cm/W)
Resina	0,234	2,306	0,101	427,30
Média Compósito de Palha de aço	0,392	2,040	0,200	256,07
Sisal	0,224	1,896	0,114	446,4
Algodão	0,2704	1,928	0,125	370,82
Dendê	0,164	1,855	0,101	545,05
Milho	0,186	2,073	0,090	537,6
MDF	0,190	1,669	0,115	529,2
Média de outros compósitos	0,206	1,55	0,109	485,81

Os gráficos das Figuras 35, 36 e 37 mostram o comportamento térmico relativo do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

Figura 35 – Comportamento da condutividade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

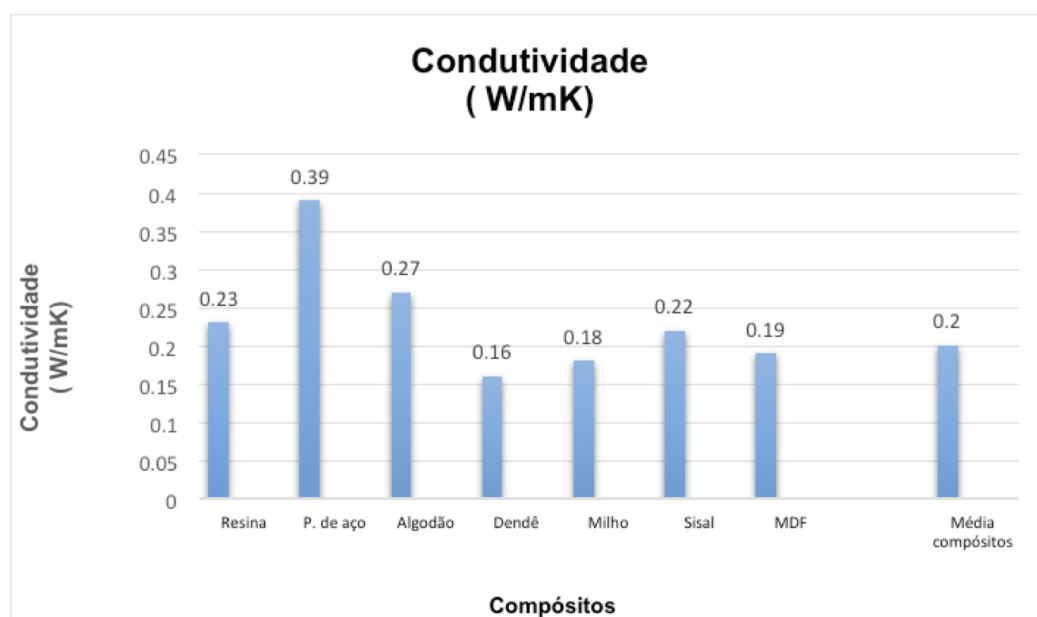


Figura 36 – Comportamento da Difusividade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

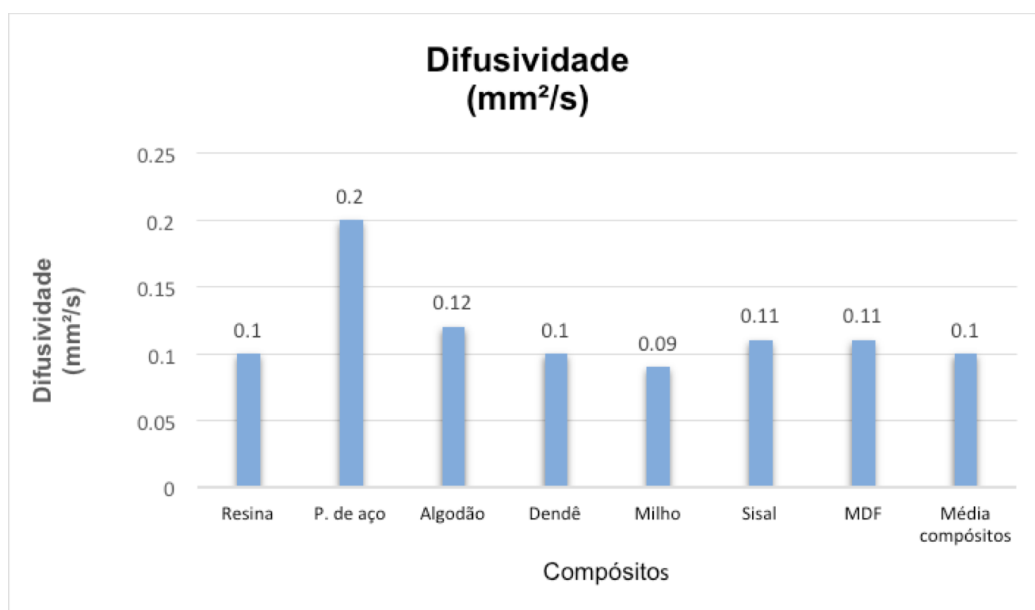
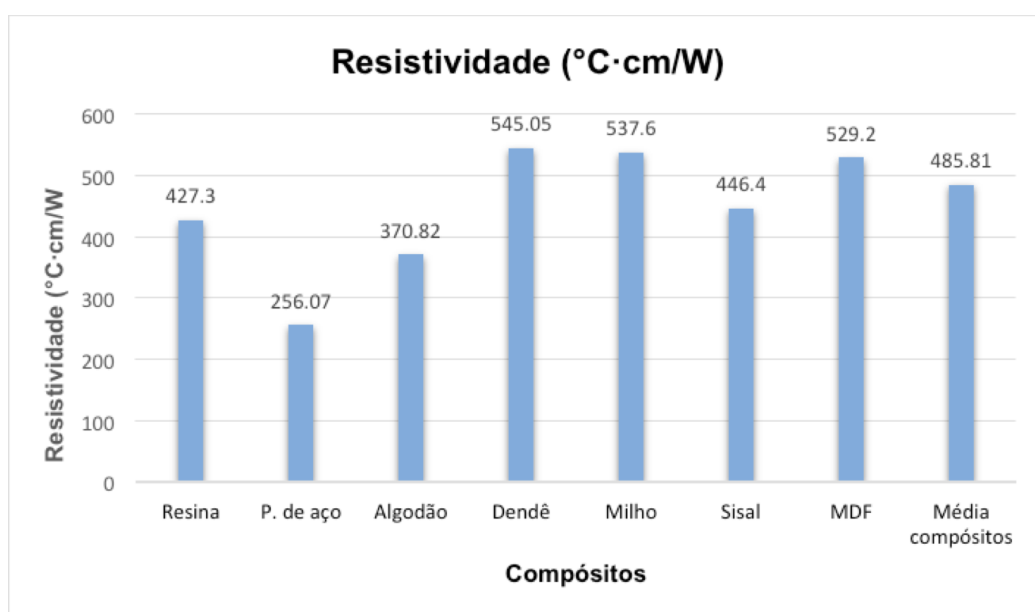


Figura 37 – Comportamento da Resistividade do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.



4.9.3 Tração

A Tabela 18 apresenta os valores médios da resistência mecânica à tração do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

O compósito proposto apresentou resistência mecânica superior a quase totalidade dos compósitos já estudados e quase igual a do compósito com MDF. Essa maior capacidade de resistência mecânica está associada a utilização de uma fibra metálica.

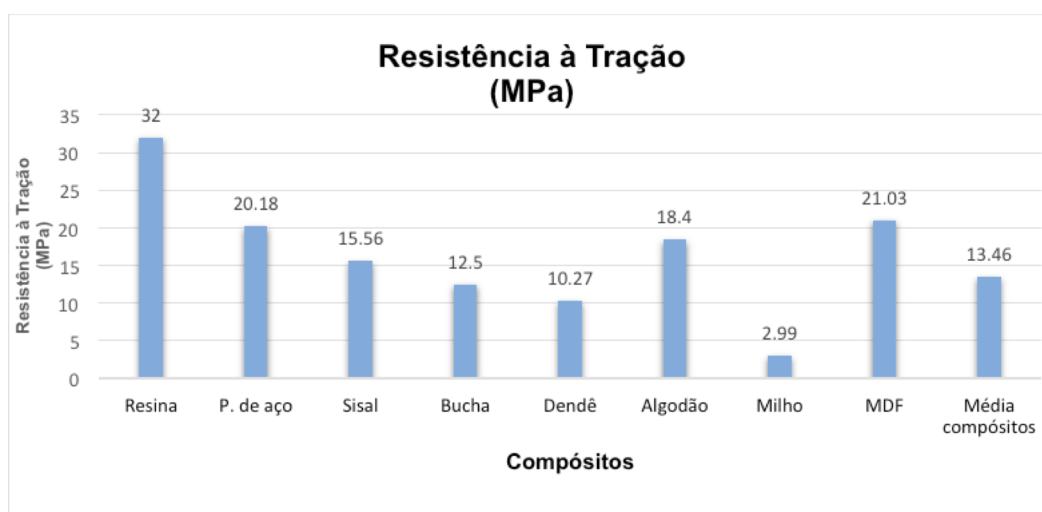
Tabela 18 – Valores médios da resistência mecânica à tração do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

Tipo de Compósito	Resistência à Tração (MPa)
Resina	32,00
Palha de aço	20,18
Sisal	15,56
Bucha	12,50
Dendê	10,27
Algodão	18,40
Milho	2,99
MDF	21,03
Média de outros compósitos	13,46

Esses corpos de prova fossem fabricados buscando-se um alinhamento preferencial para as fibras no sentido do reforço longitudinal, teria-se um aumento significativo dessa propriedade mecânica, devido sua capacidade de redistribuição de esforço.

Esses corpos de prova fossem fabricados buscando-se um alinhamento preferencial para as fibras no sentido do reforço longitudinal, poder-se-ia ter um aumento significativo dessa propriedade mecânica. O gráfico da Figura 38 mostra o comportamento da resistência mecânica à tração para o compósito proposto e para os já estudados no LMHES/UFRN.

Figura 38 – Comportamento da resistência mecânica à tração do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.



4.9.4 Flexão

O compósito proposto apresentou resistência mecânica à flexão superior à totalidade dos compósitos já estudados, demonstrando seu bom desempenho em relação

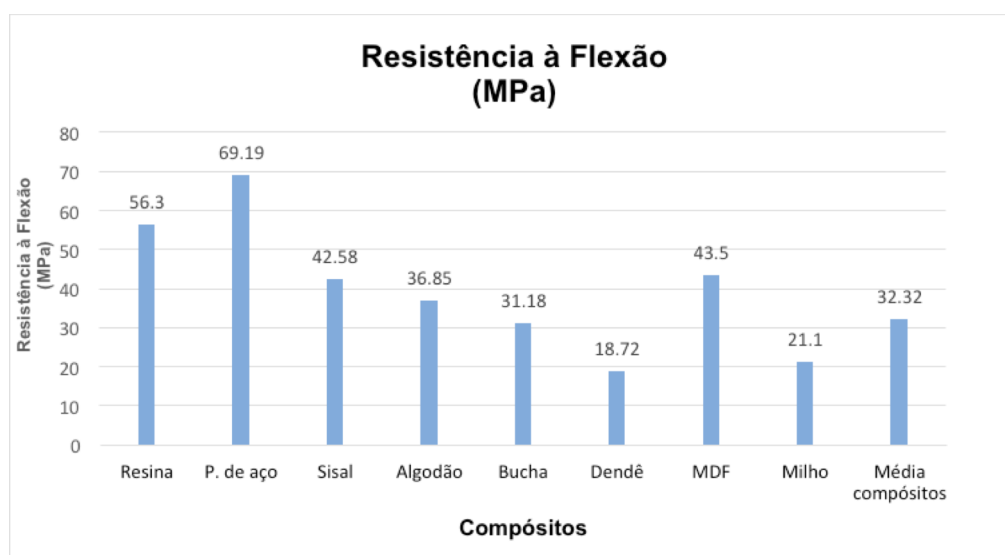
a essa importante propriedade mecânica, além de também superior da resina matriz, trazendo amplas possibilidades de utilização para aplicações, resultado em função das propriedades existentes nas fibras de aço, devido material possuir boa tenacidade e deformação.

Tabela 19 – Valores médios da resistência mecânica à flexão do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

Adição (%)	Resistência à Flexão (MPa)
Resina	56,30
Média dos compósitos da palha de aço	69,19
Sisal	42,58
Algodão	36,85
Bucha	31,18
Dendê	18,72
MDF	43,5
Milho	21,10
Médias de outros compósitos	32,32

O gráfico da Figura 39 mostra o comportamento da resistência mecânica à Flexão para o compósito proposto e para os já estudados no LMHES/UFRN.

Figura 39 – Comportamento da resistência mecânica à flexão do compósito de palha de aço e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.



4.9.5 Absorção de água

O compósito proposto também demonstrou-se superior aos demais já estudados em relação à propriedade analisada, para todos os meios aquosos testados. Esse resultado concede-lhe grande viabilidade de aplicação em ambientes molhados ou de

grande umidade. Esse resultado deveu-se a boa combinação de efeitos positivos em relação a capacidade de absorção da resina matriz e da fibra de palha de aço.

Tabela 20 – Valores médios da absorção de água do compósito proposto e de outros compósitos já estudados no LMHES/UFRN.

AMOSTRAS	ABS. ÁGUA DESTILADA (%)	ABS. ÁGUA DO MAR (%)	ABS. DO ÓLEO (%)
Resina	0,950	0,870	0,125
Média do compósito da palha de aço	0,755	0,621	0,221
Sisal	2,021	2,496	0,204
Bucha	7,47	6,255	9,985
Dendê	3,55	-	-
Milho	8,677	8,544	-
MDF	2,856	2,328	-
Algodão	2,802	-	-
Média de outros compósitos	4,562	4,905	5,195

Figura 40 – Comportamento da absorção de água destilada do compósito proposto para os já estudados no LMHES/UFRN.

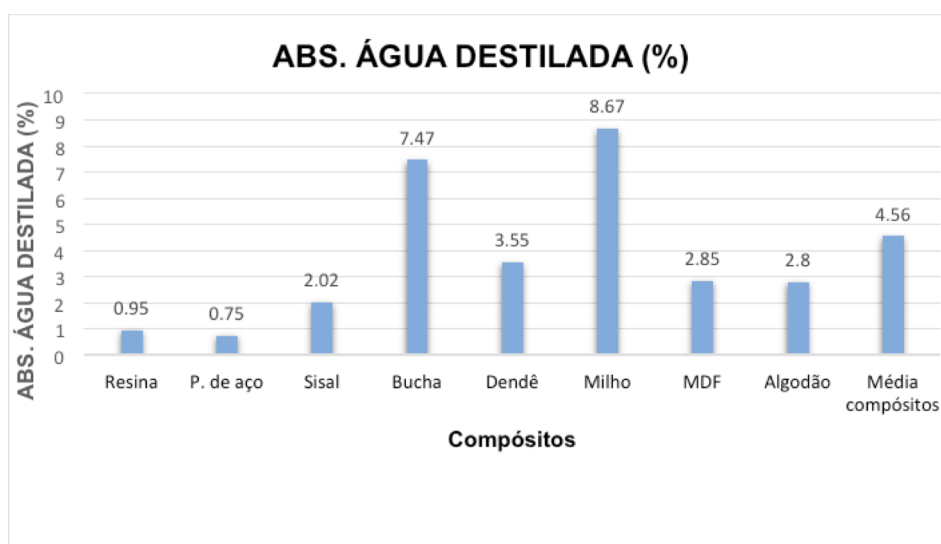


Figura 41 – Comportamento da absorção de água do mar do compósito proposto para os já estudados no LMHES/UFRN.

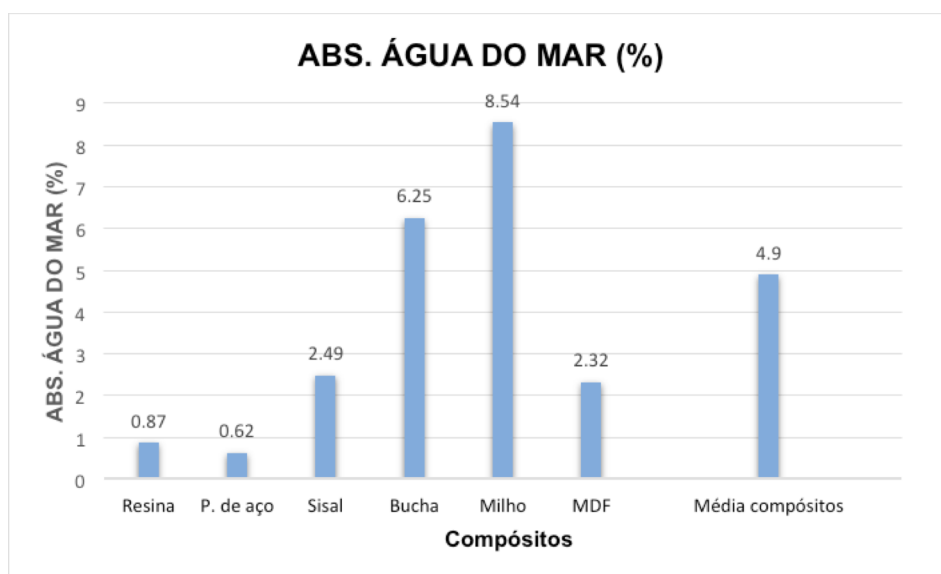
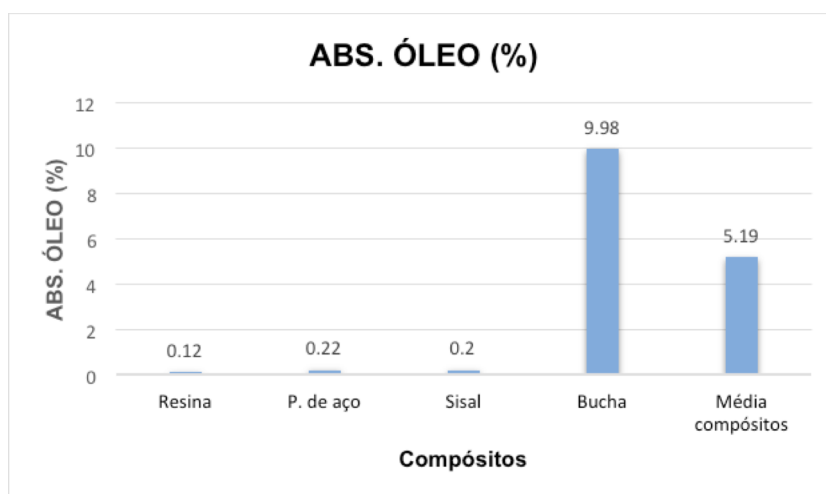


Figura 42 – Comportamento da absorção do óleo compósito proposto para os já estudados no LMHES/UFRN.



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 do compósito em suas várias formulações.

5.1 Conclusões

1. Demonstrou-se a viabilidade de obtenção do compósito proposto utilizando palha de aço e resina ortoftálica cristal;
2. A palha de aço esteve presente no compósito como carga com relação a resistência mecânica a tração e como reforço em relação a resistência à flexão, com aumento em relação a matriz de resina poliéster de 35%;
3. A absorção de água destilada foi maior que a absorção de água do mar, podendo trazer possibilidades de aplicabilidade do compósito em ambiente marinho. O material mostrou resistência à absorção de umidade nos meios aquosos estudados, principalmente em relação ao óleo;
4. A formulação mais eficiente para a absorção de umidade foi a formulação com 10% de fibra de palha de aço;
5. O comportamento mecânico mais deficiente do compósito aconteceu para a resistência à tração (Compósito 10%), evidenciada pela baixa adesão entre fibras e matriz constatada pelas micrografias de MEV e alinhamento da fibras;
6. A densidade das três formulações estudadas foi superior a da matriz de resina poliéster, com o aumento das fibras de aço provocando aumento na densidade do material;
7. Houve para todas as formulações uma baixa aderência entre fibras e matriz, com fissuras presentes contornando a fibra e mostrando fragilidade em função da baixa impregnação da fibra pela matriz;
8. O compósito testado apresentou propriedades térmicas mais elevadas em função da fibra de palha de aço ser um material metálico, de baixa resistividade térmica;
9. A formulação com maior viabilidade mecânica foi a formulação, com 20% de fibra de palha de aço;

10. Todas as formulações estudadas apresentaram elevada resistência a perda de massa proporcionada pela exposição à elevadas temperaturas, com baixíssima perda para temperaturas até 300°C;
11. A análise comparativa do compósito proposto com outros materiais compósitos já estudados demonstrou que o compósito utilizando palha de aço apresentou menor resistência térmica, maior resistência mecânica, maior densidade e absorção de umidade inferior, trazendo competitividade e viabilidade do material proposto estudado para várias aplicações.

5.2 Sugestões

1. Testar a obtenção do compósito com palha de aço utilizando outras matrizes poliméricas;
2. Testar o compósito obtido para as propriedades de impacto e dureza;
3. Realizar ensaios mecânicos com as fibras na mesma direção dos esforço;
4. Expor amostras do compósito ao envelhecimento em condições ambientais distintas;
5. Estudar o comportamento acústico do compósito proposto.

Referências

- ALMEIDA, J. R. M.; MONTEIRO, S. N. The resin/hardener ratio as a processing parameter for modifying the mechanical behavior of epoxy-matrix/glass microsphere composites. *Composites Science and Technology*, v. 58, n. 10, p. 1593–1598, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 1553007. *Fibras de aço para concreto à Especificação*. Rio de Janeiro, 2007.
- BARROS, J. *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Eng. da Universidade do Porto, Portugal, 1995.
- BECKHOFF, B. et al. *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. 1. ed. Berlin-London: Springer, 2006.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. Essex Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTDA, 1990.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. *Microscopia Eletrônica de Varredura. Aplicações e preparação de amostras*. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- DENÍCULI, F. D. *Determinação de propriedades termoelásticas de compósitos particulados de matriz de metal utilizando um modelo micromecânico*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia da UFMG – Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte - MG, 1999.
- FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com fibras de aço*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Boletim Técnico B T/PCC/260.
- GALVÃO, A. O. *Desenvolvimento e Análise de Material Compósito a Base de Penas de Frango (Fibras de Queratina – KF) e Matriz de Poliéster Insaturado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2011.
- GIGLIO, T. G. F. *Avaliação do desempenho térmico de painéis de vedação em madeira para o clima de Londrina – PR*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, 2005.
- GOMES, J. W. *Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de resíduos gerados pela manufatura do MDF (medium density fiberboard) para a fabricação de um forno solar*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2015.
- GROSSI, B. F. *Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2006.

HERAKOVICH, C. T. *Mechanics of fibrous composites*. New York: John Wiley & Sons, 1998.

JUNIOR, W.; RETHWISCH, D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8. ed. USA: John Wiley & Sons, 2002.

KELLY, A.; MILEIKO, S. *Fabrication of Composites – Handbook of Composites*. 4. ed. Holland: Nort Holland, 1983.

KOOIMAN, A. *Modelling Steel fibre reinforced concrete for structural design*. Tese (Doctorate in Civil Engineering and Geosciences) — Delft University of Technology, Holland, 2000.

LION, C. A. P. *Desenvolvimento e caracterização de um compósito a partir da borra da piaçava para construção da parábola de um fogão solar a concentração*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2013.

LOPES, M. M. *Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto*. Dissertação (Mestrado e Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2005.

MARINUCCI, G. *Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia*. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2011.

MARTINS, J. A. *Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2016.

MATTANA, A. J. *Estudos de cales hidratadas de mercado – caracterização química, física e comportamento reológico da pasta*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2013.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. *Composite Materials: Engineering And Science*. 1. ed. London - UK: Chapman and Hall, 1994.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. *CONCRETO: estrutura, propriedades, materiais*. São Paulo: Pini, 2008.

MENDONÇA, P. d. T. R. *Materiais Compostos & Estruturas – Sanduíche: projeto e análise*. Barueri - SP: Manole, 2005.

MOTA, M. *Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal (*luffa cylindrica*)*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2016.

PANZERA, T. H. *Desenvolvimento de um compósito particulado de matriz polimérica para ser aplicado na engenharia de precisão*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia da UFMG – Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte - MG, 2003.

SALLES, M. C. F. d. *Fabricação de Compósitos com matriz de Alumina reforçadas com whiskers de mulita*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2008.

SANTOS, N. *Análise Experimental e Teórica do Comportamento Mecânico sob Carregamentos Quase-estáticos de Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2010.

SANTOS, N. *Caracterização mecânica, térmica e acústica de um compósito que utiliza rejeitos de mármore, granito e EPS para a fabricação de blocos para a construção civil*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2010.

SILVA, A. F.; FIGUEIREDO, C. F. Reaproveitamento de resíduos de MDF da indústria moveleira. *Revista Design & Tecnologia*, Rio Grande do Sul, v. 2, p. 77 – 87, 2010.

SILVA, C. *Obtenção, caracterização e viabilidade de utilização de um compósito polimérico a partir dos resíduos do mesocarpo da extração do dendê*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2015.

SOROUSHIAN, P.; MIRZA, F.; ALHOZAIMY, A. Bonding of confined steel fiber reinforced concrete to deformed bars. *ACI Materials Journal*, v. 91, n. 2, p. 141 – 149, 1994.

ULRIX, E.; FERREIRA, N. State of the arte-betões com fibras em aplicações subterâneas. *1as jornadas de materiais da construção*, p. 15–43, 2011.

VASCONCELOS, R. F. et al. Cinética de deslignificação do caroá por processo organossolve. *Revista Educação Agrícola Superior*, v. 24, n. 2, 2009.