



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANDREZA KAREN BRIOSO DIAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA
ORTOFTÁLICA COM FIBRA DE SISAL E RESÍDUOS DE ESCÓRIA DE ALTO-
FORNO**

ANANINDEUA

2024

ANDREZA KAREN BRIOSO DIAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA
ORTOFTÁLICA COM FIBRA DE SISAL E RESÍDUOS DE ESCÓRIA DE ALTO-
FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial, para obtenção de Grau de Bacharela em Engenharia de Materiais, da Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.
Coorientador: Me. Eng. Luís Felipe Alencar Brandão

ANANINDEUA

2024

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

- D541a Dias, Andreza Karen Brioso.
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO COMPÓSITO
DE MATRIZ POLIMÉRICA ORTOFTÁLICA COM FIBRA DE
SISAL E RESÍDUOS DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO /
Andreza Karen Brioso Dias. — 2024.
83 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa da Costa
Coorientador(a): Prof. Me. Luis Felipe Alencar Brandão
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais,
Ananindeua, 2024.
1. Fibra Vegetal. 2. Resíduos Industriais. 3.
Fractografia. I. Título.

CDD 620.118

ANDREZA KAREN BRIOSO DIAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA
ORTOFTÁLICA COM FIBRA DE SISAL E RESÍDUOS DE ESCÓRIA DE ALTO-
FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial, para obtenção de Grau de Bacharela em Engenharia de Materiais, da Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará.

Data da Aprovação: 17 / 05 / 2024

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



DEIBSON SILVA DA COSTA

Data: 06/08/2024 14:07:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Orientador – FEMat/CAMPANIN/UFPA

Documento assinado digitalmente



LUIS FELIPE ALENCAR BRANDAO

Data: 06/08/2024 14:28:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Eng. Luis Felipe Alencar Brandão
Coorientador – PPGEC/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente



ALACID DO SOCORRO SIQUEIRA NEVES

Data: 08/08/2024 06:08:28-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
Examinador Interno – FEMat/CAMPANIN/UFPA

Documento assinado digitalmente



EMERSON CARDOSO RODRIGUES

Data: 09/08/2024 10:45:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues
Examinador Externo – FEQ/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente



DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO

Data: 09/08/2024 12:50:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Eng. Dilson Nazareno Pereira Cardoso
Examinador Externo – FEQ/ITEC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sua infinita misericórdia para comigo, por nunca me permitir desistir desta jornada mediante tantos obstáculos e por tantas oportunidades entregues a mim, por todas as pessoas as quais ele pôs em minha vida que me amam, cuidam de mim e me ajudaram.

Agradeço a minha mãe Andreia Brioso Da Silva (in memoriam), por todo amor e ajuda, principalmente aos meus estudos, que nunca mediu esforços para que eu pudesse seguir este caminho, ao meu pai Daniel Araujo Dias à minha vida inteira, e meus familiares por todo apoio e incentivo a em minha jornada.

Também agradeço meu companheiro João Gabriel, por sempre está comigo me dando apoio e me ajudando de todas as maneiras, com carinho, amor e paciência para que eu siga meus sonhos.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), por todo suporte ao longo da graduação e ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMat), especialmente ao professor Emerson Rodrigues pela confiança sobre os laboratórios e oportunidade de bolsa e ao professor Deibson Costa, meu orientador, por acreditar em mim e me propor a experiências incríveis de pesquisa, assim como toda a ajuda, que para mim foi além do meio acadêmico, agradeço de coração. Agradeço meu querido coorientador Luís Brandão, pela dedicação, orientação e paciência para comigo no desenvolvimento deste trabalho assim como pela amizade construída.

Agradeço aos amigos que fiz durante este curso, sem eles nada seria possível, eles tornaram tudo mais leve e feliz e só estou finalizando esta etapa por tê-los comigo, especialmente os que Deus me deu: Andrio, Luiz, Jeniffer, Michele, Rochelle, Olivia, Camila, Jamile, Felipe, Leonardo e Hulda.

Agradeço também as meninas do “cube da Luluzinha”, quantas memórias boas nós temos, praticamente uma vida resumida em um ano de congressos. Tudo ficou mais alegre com vocês por perto Deborah, Maria e Thamina.

Agradeço aos meus amigos do laboratório, eu não conseguiria escolher melhor: Alex, Leandro, Larissa, Hugo, Laiza, Hadassa, até o Rian, mas principalmente meu fiel escudeiro Antônio.

E todos que passaram em minha vida, torcendo e contribuindo um pouquinho para quem me tornei, meus mais sinceros muito obrigada!

“A natureza não faz nada em vão”.
(Aristóteles)

RESUMO

Este estudo promoveu a produção de compósitos poliméricos utilizando resíduos de escória de alto-forno, fibra de sisal e compósitos híbridos. O objetivo é avaliar as propriedades físicas, mecânicas, fractográficas e de flamabilidade desses materiais. A fabricação foi realizada manualmente em molde de silicone, sem compressão, com a inserção de 1% de iniciador na mistura com a matriz polimérica, com fibras naturais de sisal (1%, 2% e 3%) e resíduos de escória de alto-forno (10%, 20% e 30%). Os compósitos híbridos foram fabricados com as frações mássicas de 20% de resíduo e 2% de fibras de sisal. Foram feitos testes de massa específica aparente e caracterização morfológica tanto do resíduo quanto da fibra, também foi realizado caracterizações mineralógicas do resíduo. Após a fabricação dos corpos de prova, foram conduzidos ensaios físicos para determinar a absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, seguido pelo ensaio mecânico de resistência à tração, com análise de superfície de fratura realizada por microscopia eletrônica de varredura e a taxa de propagação de chama foi avaliada por meio do ensaio de flamabilidade horizontal. As análises revelaram que a fibra de sisal possui uma massa específica de 1,295 g/cm³, enquanto a escória de alto-forno registra 3,013 g/cm³, valores consistentes com a literatura. As análises morfológicas e mineralógicas dos resíduos destacaram características que podem influenciar nas propriedades dos compósitos, como o tamanho e a forma das partículas, bem como a presença do mineral quartzo. Nos ensaios físicos, observou-se uma redução na porosidade e absorção de água em comparação com a matriz plena. Por outro lado, os compósitos com fibra de sisal mostraram aumento na porosidade e absorção de água devido à porosidade natural da fibra. A massa específica dos compósitos aumentou com a introdução dos reforços na matriz. O teste de tração revelou que o compósito com 3% de fibra de sisal apresentou a maior resistência, atingindo 33,598 MPa. A análise da superfície de fratura dos compósitos revelou os mecanismos de falhas associadas a resistência mecânica. O teste de flamabilidade horizontal classificou os materiais como HB (*Horizontal Burning*), padrão de critérios de resistência a chama, da norma ASTM D 635. A composição com 30% de escória de alto-forno obteve resultados, com redução de 76,71%, em relação ao padrão CONTRAN 498.

Palavras-chave: Fibra Vegetal; Resíduos Industriais; Fractografia.

ABSTRACT

This study promoted the production of polymer composites using waste blast furnace slag, sisal fiber and hybrid composites. The objective is to evaluate the physical, mechanical, fractographic and flammability properties of these materials. The manufacturing was carried out manually in a silicone mold, without compression, with the insertion of 1% of initiator in the mixture with the polymeric matrix, with natural sisal fibers (1%, 2% and 3%) and high-quality slag residues. oven (10%, 20% and 30%). The hybrid composites were manufactured with mass fractions of 20% waste and 2% sisal fibers. Apparent specific mass tests and morphological characterization of both the residue and fiber were carried out, and mineralogical characterizations of the residue were also carried out. After manufacturing the specimens, physical tests were conducted to determine water absorption, apparent porosity and apparent specific mass, followed by the mechanical tensile strength test, with fracture surface analysis carried out by scanning electron microscopy and the rate flame propagation was evaluated using the horizontal flammability test. The analyzes revealed that sisal fiber has a specific mass of 1.295 g/cm³, while blast furnace slag registers 3.013 g/cm³, values consistent with the literature. Morphological and mineralogical analyzes of the waste highlighted characteristics that can influence the properties of the composites, such as the size and shape of the particles, as well as the presence of the mineral quartz. In physical tests, a reduction in porosity and water absorption was observed compared to the full matrix. On the other hand, composites with sisal fiber showed an increase in porosity and water absorption due to the natural porosity of the fiber. The specific mass of the composites increased with the introduction of reinforcements in the matrix. The tensile test revealed that the composite with 3% sisal fiber had the highest resistance, reaching 33.598 MPa. The analysis of the fracture surface of the composites revealed the failure mechanisms associated with mechanical resistance. The horizontal flammability test classified the materials as HB (Horizontal Burning), flame resistance criteria standard, of the ASTM D 635 standard. The composition with 30% blast furnace slag obtained results, with a reduction of 76.71%, in relation to the CONTRAN 498 standard.

Compósitos Keywords: Vegetable Fiber; Industrial Waste; Fractography.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma Do Esquema De Classificação De Diversos Tipos De Compósitos	23
Figura 2 - Processo De Cura Do Poliéster Insaturado.....	26
Figura 3 - Resina Poliéster Ortoftálica	26
Figura 4 - Esquema De Classificação Das Fibras	28
Figura 5 - Principais Disposições Das Fibras Em Um Material Compósito.....	30
Figura 6 - Extração Da Folha De Sisal	33
Figura 7 - Processos De Fusão Da Escória De Alto-Forno.	35
Figura 8 - Escória Bruta De Alto-Forno.	36
Figura 9 - Escória Granulada De Alto-Forno.	36
Figura 10 - Aquisição E Preparo Das Fibras De Sisal.	39
Figura 11 - Escória De Alto-Forno	39
Figura 12 - Fluxograma Geral Da Realização Do Trabalho.....	40
Figura 13 - Fluxograma Do Preparo Dos Corpos De Prova	42
Figura 14 - Dimensões Dos Corpos De Prova Para Os Ensaios De Flamabilidade .	42
Figura 15 - Dimensões Dos Corpos De Prova Fabricados Para Os Ensaios De Tração	42
Figura 16 - Moldes De Silicone Utilizados	43
Figura 17 - Corpos De Prova Para Ensaios De Flamabilidade.....	43
Figura 18 - Corpos De Prova Para Ensaio De Tração.....	44
Figura 19 - Ensaio De Massa Específica Com O Método Do Piquinometro	45
Figura 20 - Ensaio De Tração.....	48
Figura 21 - Corpos De Prova Para Ensaios Fractografia	48
Figura 22 - Esquema Utilizado Para O Ensaio De Flamabilidade	50
Figura 23 - As Imagens (A) E (B) Mostram A Morfologia Do Resíduo De Escória De Alto-Forno.....	52
Figura 24 - As Imagens (A) E (B) Mostram A Morfologia Da Fibra De Sisal.....	52
Figura 25 - Difratoograma Do Resíduo De Escória De Alto-Forno.	53
Figura 26 - Gráfico Dos Resultados Das Caracterizações Físicas Dos Compósitos.	56

Figura 27 - Gráfico Representativo De Tensão X Deformação Apresenta Os Compósitos Com Fibras De Sisal Em Relação A Matriz Plena.	59
Figura 28 - Gráfico Representativo Tensão X Deformação Apresenta Os Compósitos Reforçados Com Escória De Alto-Forno Em Relação A Matriz Plena.....	60
Figura 29 - Gráfico Do Limite De Resistência A Tração X Porosidade Aparente.	60
Figura 30 - (A) Análise Do Cp 10% Eaf, (B) Análise Do Cp 20% Eaf E (C) Análise Do Cp 30% Eaf	62
Figura 31 - (A) Analise Do Cp 10% Eaf, (B) Analise Do Cp 20% Eaf E (C) Analise Do Cp 30% Eaf	63
Figura 32 - (A) Fratura Do Cp Sf1% E (B) Análise Em Aumento De 300x	64
Figura 33 - (A) Fratura Do Cp Sf2%, (B) Análise Em Aumento De 300x E (C) Análise Em Aumento De 100x	65
Figura 34 - (A) Fratura Do Cp Sf3%, (B) Análise Em Aumento De 100x E (C) Fratura Em Aumento De 300x	65
Figura 35 - (A) Fratura Do Cp Híbrido 2% E 20%, (B) Análise Em Aumento De 100x, (C) Análise Em Aumento De 300x E (D) Análise Em Aumento De 500x.....	66
Figura 36 - (A) Fratura Do Cp 20% Eaf E (B) Fratura Do Cp Híbrido (2% Fs E 20% Eaf).....	67
Figura 37 - (A) Fratura Do Cp Matriz Plena E (B) Análise Em Aumento De 300x	68
Figura 38 - Gráfico De Taxa E Propagação Mm/Min Em Comparação Com Astm D 635 E Contran 498.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Matrizes Poliméricas (Continua)	24
Quadro 2 – Propriedades da Resina Poliéster Ortoftálica	38
Quadro 3 – Nomenclatura dos Compósitos Fabricados	44
Quadro 4 – Resultado da Análise de Fluorescência de Raios X	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Comparativos com os Resultados do Trabalho com da Literatura	51
Tabela 2 - Resultados das Caracterizações Físicas dos Compósitos	55
Tabela 3 - Resultados do Ensaio de Tração dos Compósitos	58
Tabela 4 - Comparativo dos Resultados de Tração Obtidos com a Literatura.....	61
Tabela 5 - Ensaio de Flamabilidade.....	68
Tabela 6 - Dados Comparativos do Resultado do Trabalho com a Literatura.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONAB	Conselho Nacional de Abastecimento
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CP	Corpo de Prova
DRX	Difratômetro de Raios X
EAF	Escória de Alto-Forno
EAF 10%	Compósito com 10% de Resíduo de Escória de Alto-Forno
EAF 20%	Compósito com 20% de Resíduo de Escória de Alto-Forno
EAF 30%	Compósito com 30% de Resíduo de Escória de Alto-Forno
FEG	<i>Field Emission Gun</i>
FS	Fibra de Sisal
FS 1%	Compósito com 1% de Fibra de Sisal
FS 2%	Compósito com 2% de Fibra de Sisal
FS 3%	Compósito com 3% de Fibra de Sisal
FRX	Fluorescência de Raios X
HB	<i>Horizontal Burning</i>
HÍBRIDOS 2% - 20%	Compósito com 2% de Fibra de Sisal e 20% de Resíduo de Escória de Alto-Forno.
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados
LRT	Limite de Resistência à Tração
MATCAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
MP	Matriz Plena
MEA	Massa Específica Aparente
M _s	Massa Seca
M _u	Massa Úmida
M _i	Massa Imersa
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ME	Módulo de Elasticidade
NBR	Norma Brasileira
PEI/PPS	<i>Polyetherimide / polyphenylene sulfide</i>
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PA	Porosidade Aparente
<i>pull out</i>	Descolamento da fibra da matriz
UFPA	Universidade Federal do Pará
USIMAT	Usina de Materiais

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére
a. c.	Antes de Cristo
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio, Alumina
C	Carbono
CaO	Óxido de cálcio
Cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
°C	Graus celcius
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cu	Cobre
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GPa	<i>Gigapascal</i>
l/d	Comprimento/Diâmetro
Fe ₂ O ₃	Oxido de ferros III
kg	Kilograma
kN	kiloNewton
L	Comprimento útil do corpo de prova em milímetros
l _c	<i>Critical length</i>
M% _(m/m)	Porcentagem mássica
m ₁	Massa do picnômetro vazio
m ₂	Massa do picnômetro + resíduo
m ₃	Massa do picnômetro picnômetro + resíduo + água destilada
m ₄	Massa do conjunto água destilada
MgO	Oxido de magnésio
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MnO ₂	Oxido de manganês
MPa	<i>Megapascal</i>
N	Newton
NaOH	Hidróxido de Sódio
nm	Nanômetro
O	Oxigênio
PK ₂ O	Oxido de potássio
Q	Quartzo
Sic	Carbeto de Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
t	Temperatura na qual foi efetuada a medição, em °C
UV	Ultravioleta
v/v	Porcentagem de volume/volume
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Justificativa	19
1.2.	Objetivos	20
1.2.1.	Objetivo Geral	20
1.2.2.	Objetivos Específicos	20
1.3.	Síntese do Trabalho	21
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1.	Compósitos	22
2.2.	Compósitos poliméricos	24
2.3.	Resina poliéster	25
2.4.	Fibras	27
2.5.	Fibras vegetais	30
2.6.	Fibra de sisal	31
2.7.	Resíduos industriais	33
2.8.	Escória de alto-forno	34
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1.	Materiais sintéticos	38
3.2.	Preparo e caracterização do material de partida	38
3.2.1.	Aquisição e preparo das fibras	38
3.2.2.	Aquisição da escória de alto-forno	39
3.3.	Métodos	40
3.4.	Preparo dos corpos de prova	40
3.5.	Massa específica	44
3.6.	Análise morfológica	45
3.7.	Difratometria de raios X	46
3.8.	Fluorescência de raios X	46
3.9.	Análise das propriedades físicas (MEA, PA e AA) dos compósitos	47
3.10.	Ensaio de tração	47
3.11.	Fractografia	48
3.12.	Ensaio de resistência à chama	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1.	Caracterização dos reforços	51

4.1.1.	Massa específica dos reforços	51
4.1.2.	Análise morfológica	51
4.1.3.	Difratometria de raios X	53
4.1.4.	Fluorescência de raios x	54
4.2.	Caracterizações dos compósitos	55
4.2.1.	Análise das propriedades físicas (MEA, PA E AA) dos compósitos	55
4.2.2.	Ensaio de tração	57
4.2.3.	Fractografia	62
4.2.4.	Ensaio de resistência à chama	68
5.	CONCLUSÃO	72
5.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	73
	REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

Atentando para os problemas ambientais ligados aos resíduos sólidos atualmente, considerando que não estão sendo resolvidos proficientemente como deveria, há a necessidade de encontrar alternativas que analisem o efeito dos resíduos de maneira estruturada e achem soluções produtivas, e umas dessas soluções de modelo produtivo é a economia circular. Este modelo se dispõe em geral a reinserir os materiais no ciclo produtivo, objetivando diminuir o despejo no ambiente e conseqüentemente evitando a geração de impactos ambientais negativos (Foster; Roberto; Igari, 2016).

Conforme discutido por Callister Júnior e Rethwisch (2020), os compósitos são uma mistura de materiais diferentes e com propriedades mais satisfatórias quando comparados com materiais individualmente, profissionais das áreas científica e de engenharia empregam a combinação de diversos materiais, como metais, cerâmicas e polímeros, no desenvolvimento de novos materiais. A formulação de materiais compostos tem como objetivo a melhoria de diversas propriedades mecânicas, incluindo rigidez, tenacidade e resistência tanto a condições ambientais adversas quanto a elevadas temperaturas.

Betelie *et al.* (2019) em seu trabalho, destacou a abundante disponibilidade de cargas e fibras naturais, que estão presentes em praticamente todas as plantas, oferecendo uma rica base para o desenvolvimento de compósitos de fibras naturais. Para Alrefai *et al.*, (2022) esses materiais destacam-se por sua flexibilidade durante o processamento, sendo moldáveis de acordo com diferentes necessidades e aplicações. Além disso, a notável biodegradabilidade dessas fibras representa um importante aspecto ambiental, contribuindo para práticas mais sustentáveis, também possuem baixa densidade relativa e a combinação de boa resistência e rigidez desses compósitos é particularmente vantajosa, conferindo-lhes propriedades mecânicas que podem ser aplicadas em diversas situações. O custo reduzido desses materiais, aliado ao seu alto desempenho mecânico, representa uma vantagem econômica considerável. Esta combinação de características torna os compósitos de fibras naturais uma escolha atraente em diversas indústrias, com benefícios que vão desde a construção até a fabricação de produtos de consumo.

Dentre as fibras naturais, é importante destacar as fibras de sisal (FS), cuja produção se concentra principalmente no estado da Bahia, representando cerca de 97%. Matos (2023) escreveu em seu trabalho, que essas fibras se destacam notavelmente em termos de qualidade devido à sua elevada resistência mecânica e a um dos maiores módulos de elasticidade observados. Essas características fazem com que as fibras de sisal se tornem uma opção atrativa como material de reforço em diversas aplicações.

No momento atual, o desenvolvimento sustentável se associa com a consciência ambiental, em virtude de muitos problemas decorrente de resíduos, isto tem aumentado o interesse em fontes renováveis e tecnologias “mais verdes”, levando em conta o impacto ambiental dos produtos desenvolvidos, processamento e reciclagem. Ultimamente as pesquisas utilizando fibras vegetais como reforço em matrizes poliméricas, se expandiu em virtude da procura de materiais com fontes renováveis, que possuam características compatíveis a fibras sintética (Merlini, 2021).

Os resíduos decorrentes da produção do aço aumentam de acordo com sua fabricação e tendem a estender, caso não haja um controle. De acordo com Guimarães (2022), os processos decorrentes da indústria siderúrgica produzem variados tipos de resíduos possíveis de serem reaproveitados, como pó de aciaria, carepas, areia de varrição, refratários e escórias, sejam de alto-forno ou aciaria.

Em 2018 foram gerados 628,5 kg de resíduos e coprodutos para cada tonelada de aço bruto produzido e, apesar de seu potencial de reaproveitamento de 85%, os outros 15% ainda não têm uma destinação adequada, ficando como estoque ou lançados em aterros industriais (Pagio *et al.*, 2022).

Este trabalho busca realizar a fabricação de um material compósito utilizando as fibras de sisal, que possuem boas características de resistência e resíduo de escória de alto-forno (EAF) que são bastante utilizados na indústria cimentícia. Tanto a fibra de sisal quanto a EAF serão avaliadas de forma conjunta e separada, com as fibras devidamente alinhadas nos corpos de prova e posteriormente realizar a caracterizações nos compósitos por meio dos ensaios físicos, mecânicos, fractográficos e de flamabilidade para entender melhor o comportamento estes materiais.

1.1. Justificativa

Baseado nas legislações pertinentes à gestão de resíduos sólidos e preservação ambiental, Lei 12.305/2010 e Lei 6.938/1981, respectivamente. Este estudo propõe a elaboração de um material, utilizando resíduos provenientes de escória de alto-forno, fibras de sisal e resina. Essa iniciativa visa não apenas proporcionar uma destinação final ambientalmente adequada para tais resíduos, visto a grande quantidade produzida, mas também explorar a possibilidade de produzir um material resistente, aproveitando as propriedades de reforço das fibras de sisal. Dessa forma, busca-se alternativas para a utilização desses coprodutos, visando tanto a viabilidade econômica quanto a redução dos impactos ambientais.

A escória de alto-forno, um subproduto da fabricação de ferro-gusa em altos-fornos, apresenta-se como uma alternativa econômica e ambientalmente viável para seu reaproveitamento como material de reforço em compósitos (Galuppo, 2020). Por sua vez, as fibras de sisal, são reconhecidas por sua resistência e durabilidade, destacando-se como candidatas ideais para reforçar materiais polimérico (Alrefai *et al.*, 2022). Essa abordagem visa explorar materiais sustentáveis, aproveitando resíduos industriais e fibras naturais, com o intuito de desenvolver produtos que apresentem produtos com propriedades mecânicas e ambientais melhoradas.

As análises dos resultados destes testes são essenciais para avaliar o desempenho dos compósitos e otimizar os processos de fabricação, visando desenvolver materiais com propriedades mecânicas superiores e menor impacto ambiental. Além disso, os ensaios de inflamabilidade são realizados para avaliar a resistência ao fogo dos compósitos, garantindo sua segurança e conformidade com regulamentações de segurança, conforme o trabalho de Marques (2015) e Foster (2016). Essa abordagem contribui para a promoção da sustentabilidade na indústria, ao mesmo tempo em que oferece soluções inovadoras para a utilização de resíduos industriais e recursos naturais.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Produzir compósitos poliméricos com resíduos de escória de alto-forno, fibra de sisal e compósitos híbridos, para avaliar as propriedades físicas, mecânica, fractográfica e flamabilidade.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar as caracterizações química e mineralógica do resíduo, e morfológica do resíduo e da fibra.
- Fabricar compósitos de matriz polimérica com fibras nas proporções de 0%, 1%, 2% e 3%, com resíduos 10%, 20% e 30% e compósitos híbridos nas proporções em massa pré determinadas de 2% e 20%.
 - Avaliar os resultados dos ensaios:
 - Físicos (massa específica aparente (MEA), porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA))
 - Mecânico (Resistencia a tração). Bem como estudar, por fractografia, os mecanismos de falhas dominantes para cada série de compósitos produzidos.
 - Flamabilidade horizontal dos compósitos fabricados.

1.3. Síntese do Trabalho

A seção 1 compreende a introdução e os objetivos do estudo, fornecendo uma visão geral do tema de pesquisa, bem como destacando a importância e o potencial de aplicação do resíduo e da fibra utilizados nos compósitos fabricados.

A seção 2, a revisão bibliográfica engloba conceitos fundamentais para o desenvolvimento deste estudo, iniciando com uma explicação sobre materiais compósitos de forma geral, fibras e resíduos industriais. É dada ênfase especial às matrizes poliméricas e à utilização de particulados e fibras naturais como reforço nesses compósitos.

A seção 3, são descritos os materiais e métodos empregados no estudo, onde a resina poliéster é listada e os detalhes sobre a aquisição e preparo de cada reforço utilizado é descrito. A metodologia experimental é delineada, abrangendo os procedimentos adotados e a determinação das propriedades físicas, de tração, fractográficas e de flamabilidade do material em questão.

A seção 4, são apresentados os resultados e discussão. São exibidas as análises mineralógicas e químicas (FRX e DRX) do resíduo morfológica do resíduo e d fibra, assim como as características físicas, de tração, fractográficas e de flamabilidade dos compósitos. Gráficos, tabelas são utilizados para ilustrar as conclusões obtidas.

A seção 5, são apresentadas as conclusões, enfatizando os resultados alcançados e destacando as contribuições do estudo. São feitas conclusões sobre o potencial dos compósitos de escória de alto-forno e fibra de sisal como alternativas sustentáveis na indústria de materiais. Além disso, são sugeridos tópicos para pesquisas futuras visando aprimorar ainda mais as propriedades e ampliar as aplicações desses compostos.

As referências bibliográficas estão listadas ao final do trabalho para atribuir crédito às fontes consultadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compósitos

Os primeiros registros do uso de compósitos remontam a 1500 a.C., quando os primeiros colonizadores egípcios e mesopotâmicos empregaram uma mistura de lama e palha na construção de edificações robustas e duradouras. A palha, nessa época, desempenhou um papel crucial como reforço em diversos produtos compostos, incluindo cerâmica e embarcações (Santos, 2019).

Para Mira (2021), no século XX, com o advento da revolução industrial, surgiram as primeiras resinas sintéticas, impulsionando o desenvolvimento de materiais plásticos devido ao avanço do conhecimento em produtos químicos. A ampla utilização desses materiais por diversas indústrias foi motivada por características como baixa condutividade elétrica e térmica. A fibra de vidro se fez presente na década de 1930, seguida pela patente da primeira fibra de carbono em 1961. A partir dos anos 1990, os materiais compósitos ganharam destaque devido à evolução tecnológica, que aumentou a demanda por materiais com propriedades intrínsecas aprimoradas e custos mais competitivos.

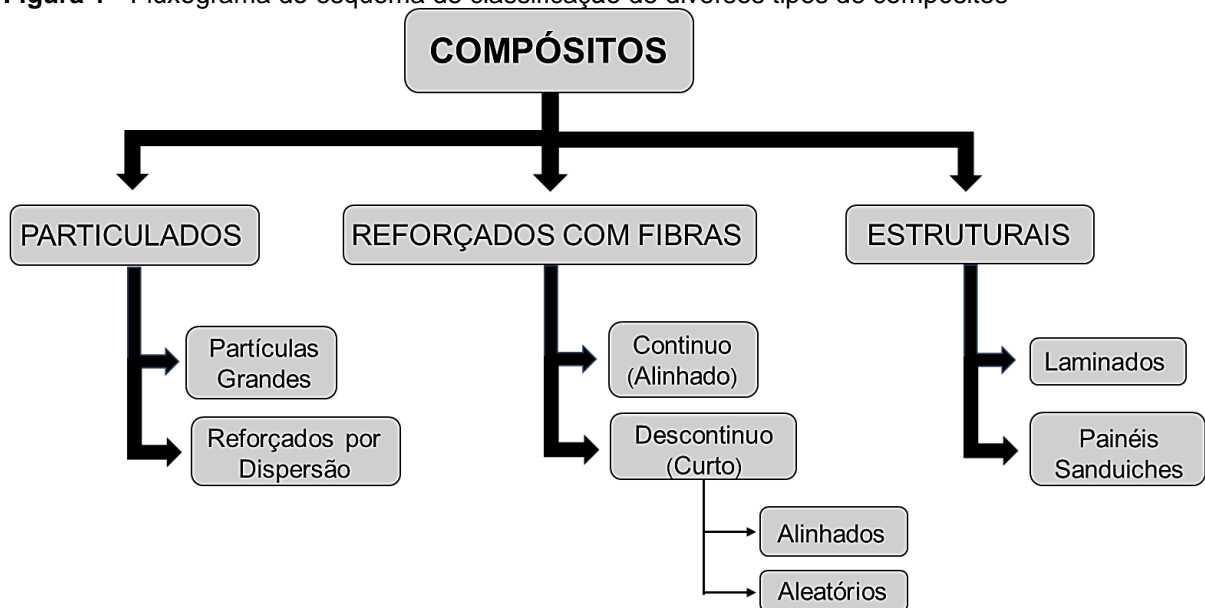
Os compósitos são materiais formados a partir da junção de dois ou mais materiais distintos e insolúveis entre si, formando um novo produto, o qual possui propriedades químicas, mecânicas e termoelétricas, diferentes das encontradas nos constituintes separadamente. Para a composição de um compósito é necessário que haja uma matriz e um reforço, que está sujeito às suas quantidades adicionadas e da morfologia do reforço (Amaro, 2018).

De acordo com Rocha (2020), a fase de reforço em um compósito desempenha um papel fundamental ao proporcionar uma resistência elevada aos esforços mecânicos. Geralmente, esses compósitos são compostos por materiais fibrosos, particulados ou estruturais. Os reforços particulados, predominantemente constituídos por partículas de grande porte, assemelham-se ao concreto, enquanto os estruturais se dividem em laminados e sanduíches. No contexto dos compósitos, a introdução de partículas muitas vezes resulta em uma resistência inferior em comparação com os reforços por fibras. Contudo, essa abordagem é compensatória devido ao custo mais acessível. O limite para a adição de material de enchimento é aproximadamente 70%

em volume. Essa restrição se deve à necessidade de uma quantidade adequada de matriz para suportar o material de forma precisa, evitando comprometer suas propriedades.

Os tipos de reforços que geralmente são aplicados nos compósitos são em forma de particulados ou em fibra. Estes reforços estão classificados de acordo com o fluxograma na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do esquema de classificação de diversos tipos de compósitos



Fonte: Adaptada de Callister Júnior; Rethwisch, 2020.

De acordo com Gomes (2023), a fase contínua, também chamada de matriz plena, pode ser configurada e categorizada com base na classe do material empregado, podendo ser de natureza polimérica, cerâmica ou metálica. Quando se trata de aplicações estruturais, uma das classes mais comuns é a dos polímeros termofixos e termoplásticos, principalmente devido à sua maior facilidade de moldagem e leveza em comparação com outras opções. Geralmente, esses materiais são fortificados por meio de fibras ou partículas.

A matriz em materiais compósitos tem como objetivo conferir uma forma adequada ao produto final e desempenha uma função essencial ao atuar como meio de transferência de carga para os reforços. Isso ocorre através da área de contato entre o material utilizado e a matriz, proporcionando proteção ao reforço contra abrasão, danos e agentes de degradação (Alencar, 2022).

2.2. Compósitos poliméricos

Os compósitos com matriz polimérica são os mais comuns, tem sua fase matriz constituída com resina polimérica, que é usada em diversidade em materiais compósitos, devido as suas propriedades à temperatura ambiente, facilidade e custo. Frequentemente a fase matriz que determina a temperatura máxima de serviço, pois em temperaturas mais baixas que o reforço ela pode modificar o material, podendo degradar. As resinas poliméricas mais utilizadas são as de poliésteres e de esteres-vinilicos, que são usadas em materiais com reforço de fibra de vidro (Callister Júnior; Rethwish, 2020).

Matrizes poliméricas desempenham um papel crucial na união de fibras em compósitos. Esses materiais são predominantemente categorizados em dois tipos: termoplásticos e termorrígidos. As matrizes termoplásticas consistem em longos fios lineares ou ramificados, oferecendo maleabilidade e facilidade de reciclagem. Entretanto, sua sensibilidade ao calor as torna menos robustas em altas temperaturas. Por outro lado, as matrizes termorrígidas são empregadas em aplicações de compósitos que demandam elevada resistência mecânica, rigidez e estabilidade dimensional. Com ligações cruzadas entre os fios de polímeros, essas matrizes se destacam pela rigidez e durabilidade. Contudo, sua incapacidade de reciclagem e menor maleabilidade são considerações importantes (Gomes, 2020; Gonçalves, 2021).

Existem vários tipos de matrizes poliméricas, cada uma com suas próprias propriedades e aplicações. Algumas das matrizes poliméricas mais comuns se encontram no Quadro 1.

Quadro 1 – Matrizes poliméricas (Continua)

TIPOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES
Resina epóxi:	É uma matriz polimérica termofixa que é amplamente utilizada em aplicações de compósitos, A resina epóxi é conhecida por sua alta resistência mecânica, rigidez e durabilidade.	Usada na fabricação de peças aeroespaciais, automotivas e de construção civil.

Quadro 1 – Matrizes poliméricas (Continuação)

TIPOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES
Resina de poliéster:	É uma matriz polimérica termofixa, A resina de poliéster é conhecida por sua alta resistência química e à corrosão.	usada em aplicações de compósitos, como na fabricação de barcos, tanques de armazenamento e peças de construção civil.
Resina vinil éster	É uma matriz polimérica termofixa, A resina vinil éster é conhecida por sua alta resistência química e à corrosão.	usada em aplicações de compósitos, como na fabricação de tubos, tanques de armazenamento e peças de construção civil.
Poliamida:	É uma matriz polimérica termoplástica, A poliamida é conhecida por sua alta resistência mecânica, rigidez e estabilidade dimensional.	usada em aplicações de compósitos, como na fabricação de peças automotivas, aeroespaciais e de construção civil.
PEI/PPS:	É uma matriz polimérica termoplástica, O PEI/PPS é conhecido por sua alta resistência mecânica, rigidez e estabilidade dimensional.	usada em aplicações de compósitos, como na fabricação de peças automotivas, aeroespaciais e de construção civil.

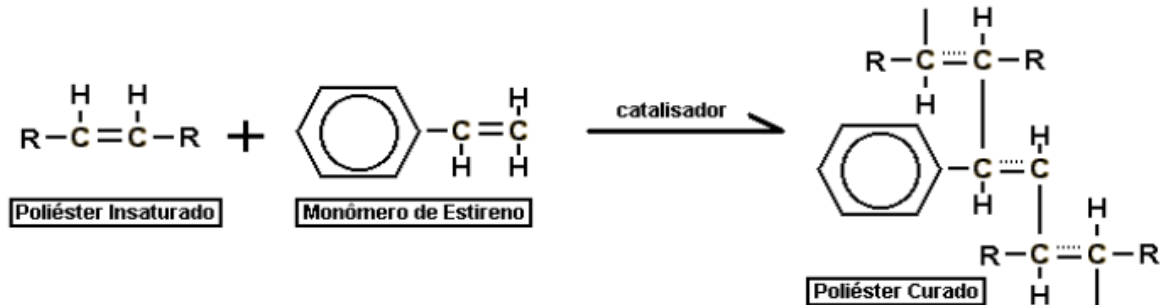
Fonte: Adaptado de Polyexcel, 2021.

2.3. Resina poliéster

A obtenção da resina poliéster ocorre por meio da reação de condensação com um dialcool, utilizando um diácido como reagente inicial. Essa categoria de resina é classificada em três tipos: poliéster saturado, poliéster de ácidos insaturados e poliéster de álcoois insaturados (Vieira, 2022). A natureza do ácido exerce influência nas propriedades finais dessas resinas. Apresentando-se como um líquido viscoso, a resina poliéster está disponível em três tipos principais: ortoftálica, isoftálica e tereftálica. Os componentes responsáveis pela formação dessas resinas são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla entre os átomos de carbono, conferindo à resina resultante uma característica insaturada. As resinas poliésteres são uma opção mais econômica, apresentando boas propriedades, como resistência à corrosão, embora sua temperatura de serviço seja inferior à da resina epóxi. Apesar de serem vantajosas devido ao baixo custo e à possibilidade de confecção transparente, a resina poliéster possui limitações, incluindo temperaturas de operação abaixo de 77 °C, fragilidade e um encolhimento de até 8% durante o processo de cura

(Souza, 2020; Teixeira, 2021). A Figura 2 apresenta a reação química do processo de cura do poliéster insaturado.

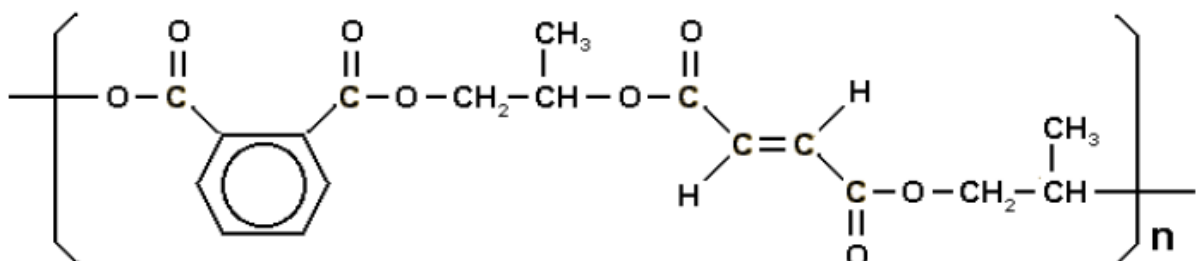
Figura 2 - Processo de cura do poliéster insaturado



Fonte: Sakamoto, 2018.

A resina poliéster ortoftálica destaca-se como um termorrígido amplamente empregado, especialmente no campo da engenharia. Sua relevância é notável devido à combinação de características como leveza, versatilidade de design, facilidade de limpeza e manutenção, elevada resistência à água e produtos químicos, capacidade de resistir aos raios ultravioletas (quando enriquecida com absorvedores UV), cura rápida, longo ciclo de vida, custo acessível, baixa viscosidade e propriedades mecânicas moderadas. Esta resina é composta por ácidos modificadores, sendo o ftálico ou seu anidrido os exemplos notáveis. Suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores devido à complexidade em obter polímeros de alto-peso molecular. O anidrido ftálico tem uma forte propensão a regenerar-se a partir dos ésteres do ácido ftálico (reação reversível), resultando na presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque químico. A aplicação da resina poliéster ortoftálica abrange a fabricação de bijuterias, artesanato, laminação de reforço em fibras, telhas, entre outros produtos (Sakamoto, 2018; Guimaraes 2021). A Figura 3 apresenta a cadeia molecular da resina poliéster ortoftálica.

Figura 3 - Resina poliéster ortoftálica



Fonte: Sakamoto, 2018.

A resina poliéster destaca-se como uma das escolhas predominantes na fabricação de compósitos poliméricos, devido à sua capacidade de conferir ao material um desempenho mecânico sólido, aliado a um custo mais acessível em comparação com as resinas epóxi ou éster-vinílica. Com propriedades distintas, a resina poliéster se destaca como a opção mais versátil entre todas as resinas termofixas e mais polivalente dentre todas as resinas termofixas (Oliveira; Machado, 2022).

As principais propriedades da resina poliéster são:

- Excelente estabilidade dimensional;
- Excelente resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- Ótimas propriedades elétricas e isolante;
- Fácil pigmentação;
- Não liberação de materiais voláteis durante a cura (sem estireno);
- Cura a frio;
- Permite a utilização de moldes simples e barato.

2.4. Fibras

As fibras são categorizadas com base em sua origem, podendo ser adquiridas a partir de sementes, frutos, folhas, caules, cascas, gramíneas e madeira. Aquelas provenientes do caule ou das folhas são referidas como "fibras duras" e são amplamente utilizadas como reforço em compósitos poliméricos (Palmeira *et al*, 2021; Litaiff, 2023).

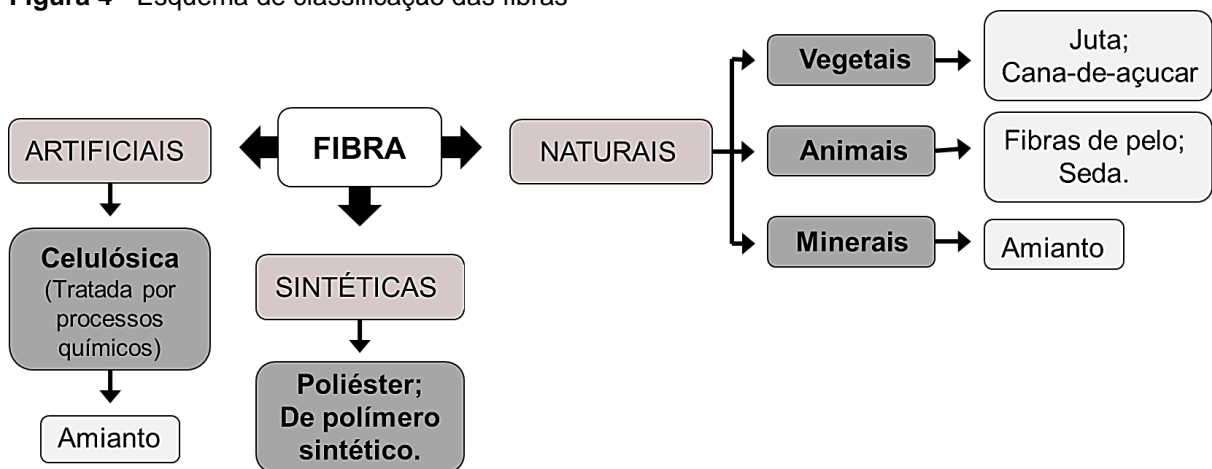
Variados tipos de fibras orgânicas e inorgânicas com diferentes composições, propriedades mecânicas e térmicas, densidade e resistência a temperatura, estão acessíveis comercialmente para fabricação de materiais compósitos

As fibras de reforço exercem um papel crucial nos compósitos reforçados por fibras, conferindo notável resistência e rigidez à matriz, além de contribuir para outras propriedades desejáveis, como resistência a altas temperaturas e ao fogo (Pereira, 2018). Nos materiais compósitos, vários elementos relacionados ao reforço exercem impacto nas propriedades, incluindo a geometria, tamanho, distribuição, orientação e fração volumétrica, nos reforçados com fibras, é crucial assegurar que o comprimento das fibras seja igual ou superior a um valor crítico conhecido como comprimento crítico (l_c - *Critical length*) da fibra, para atingir níveis máximos de tensão. Outro aspecto

relevante é a razão de aspecto (l/d - comprimento/diâmetro). Fibras longas, com uma relação ($l/d > 100$), conseguem suportar a maior parte das cargas mecânicas na interface (Callister Júnior; Rethwisch 2020).

As fibras naturais desempenham um papel relevante na fabricação de materiais compósitos, sendo classificadas como vegetais, animais ou minerais. No contexto de compósitos, as fibras de origem animal, que contêm proteínas, e as fibras de origem vegetal, compostas principalmente de celulose (polissacarídeo) e conhecidas como fibras lignocelulósicas, são especialmente estudadas. As fibras lignocelulósicas, em particular, são frequentemente utilizadas como reforço em compósitos poliméricos devido à sua alta disponibilidade no meio ambiente e ao crescimento rápido em comparação com outras fontes (Lotfi *et al.*, 2019). Essas fibras adicionam resistência, rigidez e outras propriedades desejáveis ao compósito, tornando-os uma opção atraente em diversas aplicações industriais. A Figura 4 apresenta a classificação das fibras em naturais, sintéticas e artificiais.

Figura 4 - Esquema de classificação das fibras



Fonte: Adaptado de Gomes; Costa; Mohallem, 2016.

Callister Júnior; Rethwisch (2020) propuseram uma classificação dos compósitos baseada na orientação e no comprimento das fibras dentro da matriz, fatores cruciais que influenciam as propriedades mecânicas e no comportamento do material. Para Lazarini (2020), a orientação das fibras na matriz também desempenha um papel significativo em processos de fluxo, como injeção e extrusão, onde as fibras tendem a se alinhar, resultando em propriedades mecânicas amplificadas na direção da orientação das fibras. Isso resulta na formação de um material anisotrópico. Assim, é esperado que os compósitos com fibras contínuas unidirecionais demonstrem

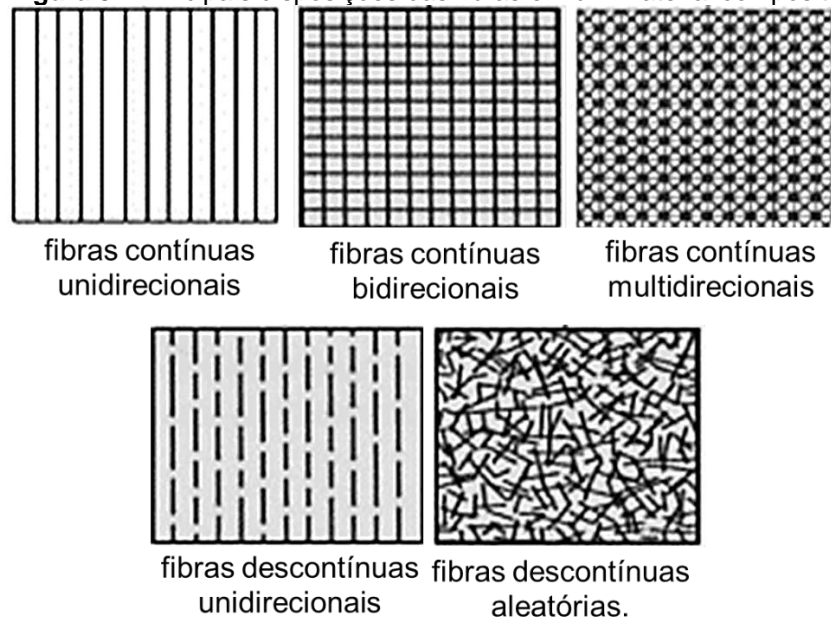
propriedades mecânicas superiores na direção paralela às fibras, em comparação com os compósitos que possuem fibras curtas dispostas aleatoriamente, os quais são considerados materiais isotrópicos. Um material é caracterizado como isotrópico quando, em qualquer ponto, suas propriedades mecânicas não sofrem alterações com a direção, o que implica que não há diferenças nos módulos elásticos do material em relação à orientação (Melo, 2002).

As fibras podem ser orientadas das seguintes formas:

- As fibras contínuas unidirecionais no compósito são alinhadas longitudinalmente, gerando propriedades mecânicas altamente anisotrópicas, maximizando o reforço e a resistência na direção do alinhamento.
- As fibras contínuas bidirecionais distribuem a carga em duas direções (longitudinal e transversal), resultando em maior resistência e rigidez ao compósito, melhorando sua resistência à tração em ambas as direções.
- As fibras contínuas multidirecionais oferecem uma combinação equilibrada de resistência e rigidez em todas as direções, sendo ideais para aplicações que demandam propriedades mecânicas uniformes em todas as direções.
- As fibras descontínuas unidirecionais, quando posicionadas longitudinalmente nos compósitos, conferem notável resistência e rigidez.
- As fibras descontínuas aleatórias, quando inseridas de maneira aleatória na matriz, resultam em propriedades isotrópicas. Entretanto, essa disposição também apresenta algumas limitações em relação à eficácia do reforço.

A Figura 5 Apresenta as principais disposições das fibras em um material compósito.

Figura 5 - Principais disposições das fibras em um material compósito



Fonte: Nicolau, 2018.

2.5. Fibras vegetais

As fibras vegetais são provenientes de uma fonte abundante e de rápida renovação, considerada praticamente ilimitada. Isso a torna uma opção viável para a produção de compósitos poliméricos, apresentando vantagens sobre as fibras sintéticas, como atoxidade e baixa emissão de CO₂ durante o cultivo. Além disso, requer aproximadamente 80% menos energias para o seu processamento em comparação com fibras sintéticas. Essas fibras destacam-se por custos e densidades menores, bem como propriedades mecânicas específicas, e não causam abrasão aos equipamentos (Merlini, 2021).

Conforme com os trabalhos de Tan *et al.* (2019), Michelin *et al.* (2020) e Zwawi (2021), a estrutura hierárquica da celulose em plantas é organizada em quatro níveis: moléculas, fibrilas elementares (formadas por cadeias de celulose), microfibrilas e macrofibrilas. A parede celular secundária das fibras vegetais é composta por um elaborado de macrofibrilas de celulose, lignina e hemicelulose. As fibrilas elementares contêm domínios cristalinos e amorfos, sendo os últimos mais susceptíveis à quebra em comparação aos domínios cristalinos, que apresentam ligações de hidrogênio mais fortes entre grupos hidroxila. A proporção de parte amorfa e de nanocristais varia de acordo com a espécie e as condições de crescimento da planta. Além disso, a celulose é o principal componente das fibras vegetais lignocelulósicas,

desempenhando um papel de reforço na estrutura das plantas. A hemicelulose, embora menos abundante que a celulose, desempenha um papel crucial na matriz da parede celular, enquanto a lignina fornece suporte e rigidez à estrutura. Pequenas proporções de pectina, gorduras e componentes inorgânicos também podem estar presentes, conferindo características específicas às diferentes fibras vegetais, de acordo com Low *et al.* (2021) e Zwawi, (2021). Essa complexa estrutura torna as fibras vegetais um material de grande interesse em diversas aplicações industriais, como na produção de papel, materiais compósitos, têxteis e bioenergia, devido às suas propriedades mecânicas, biodegradáveis e renováveis.

2.6. Fibra de sisal

A fibra de sisal (*Agave Sisalana Pierre, família Agavaceae*) é a mais produzida no mundo, correspondendo a 70% da produção comercial de fibras de mesma linhagem. A planta produz folhas que se assemelham a espadas com dentes, das quais são extraídas as fibras naturais, essas folhas possuem de 8 a 10 cm de largura e 150 a 200 cm de comprimento. Da folha se obtém de 3% a 5% do seu peso em fibra. Os 95% a 97% restantes constituem os chamados resíduos do beneficiamento, que são utilizados como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica. A fibra tem acetilação que aumenta a resistência à tração e o módulo na fabricação de compósitos, em sua maioria. Quando a fibra acetilada é misturada com poliolefinas, ocorrem interações com poliolefina e fibra. Essas interações aumentam a estabilidade dos compósitos (Martin *et al.*, 2009).

Durante sua vida, a planta de sisal produz aproximadamente de 100 a 200 folhas, cada uma contendo fibras longas e retas que podem ser extraídas por meio de técnicas específicas de processamento. As fibras de sisal, assim como outras fibras lignocelulósicas, são compostas por diversos elementos, incluindo celulose, hemicelulose, lignina, pectina, cera e substâncias solúveis em água. Dos componentes mencionados, a celulose, hemicelulose e lignina são especialmente importantes para determinar as propriedades físicas dessas fibras. A estrutura organizada e direcionada das cadeias de celulose confere ao sisal um alto grau de cristalinidade, resultando em uma resistência notável a agentes químicos e físicos, como discutido por Betelie *et al.* (2019). O sisal, um vegetal de notável versatilidade,

é reconhecido por produzir uma das fibras vegetais mais longas e robustas encontradas na natureza. Originário do México, essa espécie xerófila demonstra uma excepcional resistência às secas prolongadas e às altas temperaturas. Sua introdução no Brasil ocorreu por volta de 1903, encontrando no Nordeste condições edafoclimáticas propícias para um desenvolvimento vigoroso. Desde 1953, aproximadamente dez anos após a primeira safra nacional, o Brasil se estabeleceu como o principal produtor e exportador mundial de sisal. O auge econômico dessa cultura ocorreu na década de 1970, quando, em 1975, atingiu-se uma produção recorde de pouco mais de 300 mil toneladas (Cardoso; Santos, 2021).

Durante o processo de desfibramento, a parte verde das folhas é removida, deixando apenas a fibra em um estado úmido. Uma vez desfibradas, as fibras úmidas são estendidas em varais e expostas à luz solar por um período de 72 horas, garantindo uma secagem uniforme. Após essa etapa, a fibra deve atingir uma umidade entre 10% e 13%, um dos critérios avaliados na compra do sisal. Posteriormente, as fibras são enfardadas e transportadas pelos agricultores até a unidade de beneficiamento, onde as fibras são classificadas com base no tamanho e na qualidade, e então passam por um processo de beneficiamento utilizando uma máquina conhecida como "batedeira". Esse procedimento remove as impurezas aderidas às fibras, conferindo-lhes um aspecto brilhante. Após a etapa de beneficiamento, as fibras são organizadas em fardos de aproximadamente 250 kg, seguindo as normas estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA), e são comercializadas para indústrias localizadas na Bahia, em outros estados ou até mesmo para o mercado internacional. Uma parcela menor das fibras é destinada às cooperativas ou associações de artesanato de sisal (Santos; Brandão 2021). A Figura 6 mostra como é feita a extração da folha de sisal, manualmente.

Figura 6 - Extração da Folha de Sisal



Fonte: ebanataw, 2017

De acordo com dados do Conselho Nacional de Abastecimento (CONAB), órgão ligado ao Ministério da Agricultura e Abastecimento, a produção brasileira de fibras de sisal atingiu 40,0 mil toneladas no primeiro semestre de 2023. Destaca-se que a Bahia é o principal estado produtor desse recurso, sendo responsável por cerca de 94,5% da produção nacional em 2021. Em seguida, a Paraíba aparece como o segundo maior produtor, contribuindo com 5,4%. Já os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, juntos, representam uma parcela mínima, totalizando apenas 0,1% da produção nacional (CONAB, 2023).

2.7. Resíduos industriais

Segundo o decreto de Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional De Resíduos Sólidos (PNRS), Art 3º parágrafo XVI, define resíduos sólidos como: “todo material substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;” dessa forma, o

descarte ou a reutilização, dos diversos resíduos gerados pelas indústrias como, carepa de laminação, escória de alto-forno, entre outros, precisam ser tratados de maneira ambientalmente correta (Decreto de Lei 12.305, 2010).

Com a constante crescentes das metrópoles, o uso de materiais provenientes das indústrias siderúrgicas tornou-se cada vez mais maior, em 2019, o Brasil ocupou a sexta colocação no ranking mundial de produção de ferro gusa (*World Steel Association*, 2020). Dados estes importantes para a economia, porém, essa maior produção vem acompanhada de maior geração de resíduos.

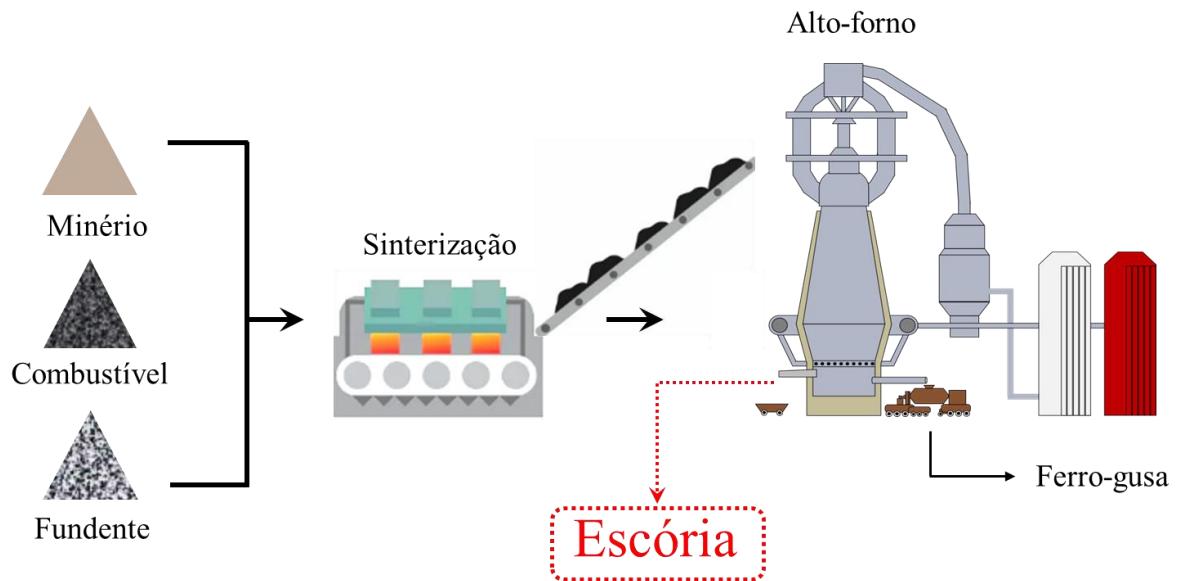
As indústrias siderúrgicas com seus processos de produção de ferro gusa, aço e outros tipos de ligas metálicas acabam gerando subprodutos como gases e escória, que anteriormente eram descartadas, porém com os avanços das ciências e tecnologia buscam-se alternativas para que esses coprodutos sejam utilizados, proporcionando maior valia económica para as indústrias e menores impactos ambientais (Pecca, 2018).

2.8. Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é considerada um subproduto não metálico das indústrias siderúrgicas, podendo ser conhecida também como agregado siderúrgico, apresentando sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio, em sua composição, que variam de acordo com as matérias primas (minério, combustível e fundente) que são utilizadas no alto-forno (Costa; Choque Fernandez; Sousa, 2019). São formadas através da fusão das impurezas presentes na carga metálica junto com as demais matérias-primas (MP'S) (Daniel, 2018).

A escória é resultante da fusão das impurezas presentes no minério de ferro, combinadas com a introdução de fundentes, como calcário e dolomita, e as cinzas provenientes do coque (carvão mineral). Quando fundida forma uma massa que, devido à sua insolubilidade e menor densidade, se separa do ferro gusa e é direcionada por canais até o local de resfriamento. No processo de produção de ferro gusa em alto-forno, é gerada escória na proporção de 200 a 300 kg por tonelada de ferro gusa (Thomas, 2012; Pimentel *et al.*, 2017). A Figura 7 ilustra os processos de fusão da escória de alto-forno.

Figura 7 - Processos de fusão da escória de alto-forno.



Fonte: Adaptado de Saqlain, 2018.

Após a fusão no alto-forno, a escória resultante deve ser resfriada. Isso pode ser feito de duas maneiras: a primeira é um processo lento, onde a escória é despejada em uma área para resfriar naturalmente ao ar livre, formando a escória bruta de alto-forno. Esse processo é demorado e requer muito espaço. A segunda opção é resfriar a escória bruscamente com jatos de água pressurizados, produzindo a escória granulada de alto-forno, essa opção é mais rápida e eficiente (Churocof, 2022). A produção de resíduos e coprodutos siderúrgicos no Brasil atingem atualmente cerca de 20 milhões de toneladas por ano, sendo que 40% desse volume é representado pela escória de alto-forno (Galuppo, 2020). A Figura 8 mostra a escória de alto-forno já fundida, sendo despejada para o resfriamento, formando a escória bruta de alto-forno.

Figura 8 - Escória bruta de alto-forno.



Fonte: Andretti, 2019.

A Figura 9 mostra a escória de alto-forno sendo resfriada com jatos de água pressurizados, produzindo a escória granulada de alto-forno.

Figura 9 - Escória granulada de alto-forno.



Fonte: Pacheco, 2017.

Em geral há dois tipos de classificação de escória, as básicas que são aquelas que utilizam coque como combustível principal e as ácidas que são aquelas que utilizam o carvão vegetal, essa classificação é obtida através da relação matemática existente entre CaO e SiO_2 , em que valores superiores a 1 são consideradas escórias básicas e inferiores a 1 escórias ácidas (Nehring *et al.*, 2021).

Devido ao seu significativo potencial hidráulico, que consiste na capacidade de endurecer quando moído e em contato com a água, essa escória possui uma ampla aplicação, especialmente em indústrias cimenteiras e de concreto. Pode ser moída e incorporada no processo de fabricação de cimento e concreto (Almeida, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais sintéticos

A matriz polimérica utilizada para este estudo foi a resina poliéster ortoftálica insaturada, cuja densidade varia de 1,10 a 1,12 g/cm³, conforme especificações do fabricante. O sistema adotado incluiu o uso do iniciador BUTANOX M-50, um peróxido de metil etil cetona (MEK-P), na proporção de 1% (v/v). O Quadro 2 destaca as principais propriedades da resina poliéster ortoftálica utilizada, com base nas informações fornecidas pelo fabricante.

Quadro 2 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica

Propriedade da Resina Líquida				Propriedade da Resina Curada*			
	Unidades	Valores	Métodos Análises		Unidades	Valores	Métodos Análises
Aspecto	25°C	Líquido Incolor	Visual	Aspecto	25°C	Cristal Incolor	Visual
Viscosidade (sp3/12RPM)	cP	1100 - 1600	ITL-04	Resistência Máxima	MPa	55	ASTM D 638
Densidade	g/cm ³	1,10 - 1,12	ITL-08	Módulo De Elasticidade	GPa	1.9	ASTM D 638
Tempo de Gel	Minutos	09'00" - 14'00"	ITL-135	Elongação	%	3,1	ASTM D 638
Intervalo de Pico	Minutos	15'00" - 25'00"	ITL-135				
Pico Exotermico	°C	130 - 180	ITL-135				

Fonte: Adaptado de Oswaldo Cruz Química, 2024.

3.2. Preparo e caracterização do material de partida

3.2.1. Aquisição e preparo das fibras

As fibras de Sisal vieram do Estado de São Paulo já extraídas da folha, e não passaram por nenhum tratamento químico. Sendo assim, as fibras foram separadas e limpas manualmente, posteriormente dispostas em feixes e cortadas no comprimento de 15 mm. A Figura 10 mostra o passo a passo do preparo das fibras.

Figura 10 - Aquisição e preparo das fibras de sisal.



Fonte: Autora, 2024.

3.2.2. Aquisição da escória de alto-forno

A EAF é oriunda do município de Marabá-PA, coletada de acordo com a norma NBR 10007 (ABNT, 2004). O resíduo passou por um beneficiamento prévio antes da sua utilização, foi submetido a um processo de secagem em estufa a 105 °C, por 24 horas.

Após a retirada da umidade, o resíduo foi para moagem em moinho de bolas com volume útil de 21 litros e esferas de aço inoxidável de 15, 20 e 30 mm de diâmetro, por um período de trinta minutos, utilizando 1 kg de EAF, equipamento presente na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará (UFPA) *Campus* Belém (USIMAT/LEQ/UFPA). O peneiramento deste material ocorreu de forma manual a seco, foram utilizadas as peneiras de *meshs* 150 e 200 (com aberturas de 105 μm e 75 μm , respectivamente) da série *Tyler*. A Figura 11 a escória de alto-forno após o beneficiamento.

Figura 11 - Escória de alto-forno

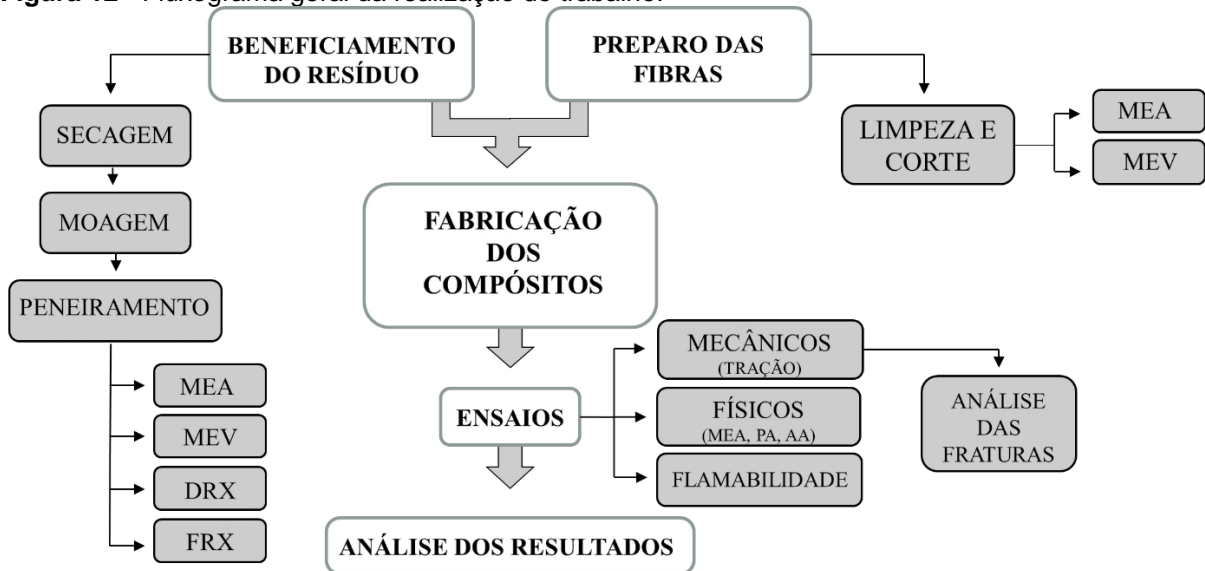


Fonte: Autora 2024.

3.3. Métodos

O fluxograma da Figura 12, apresenta os procedimentos do trabalho.

Figura 12 - Fluxograma geral da realização do trabalho.



Fonte: Autora, 2024.

3.4. Preparo dos corpos de prova

Após o beneficiamento da escória e corte das fibras, iniciou-se o processo fabricação dos compósitos. Para cada teste e porcentagem de material, foram feitos 8 corpos de prova.

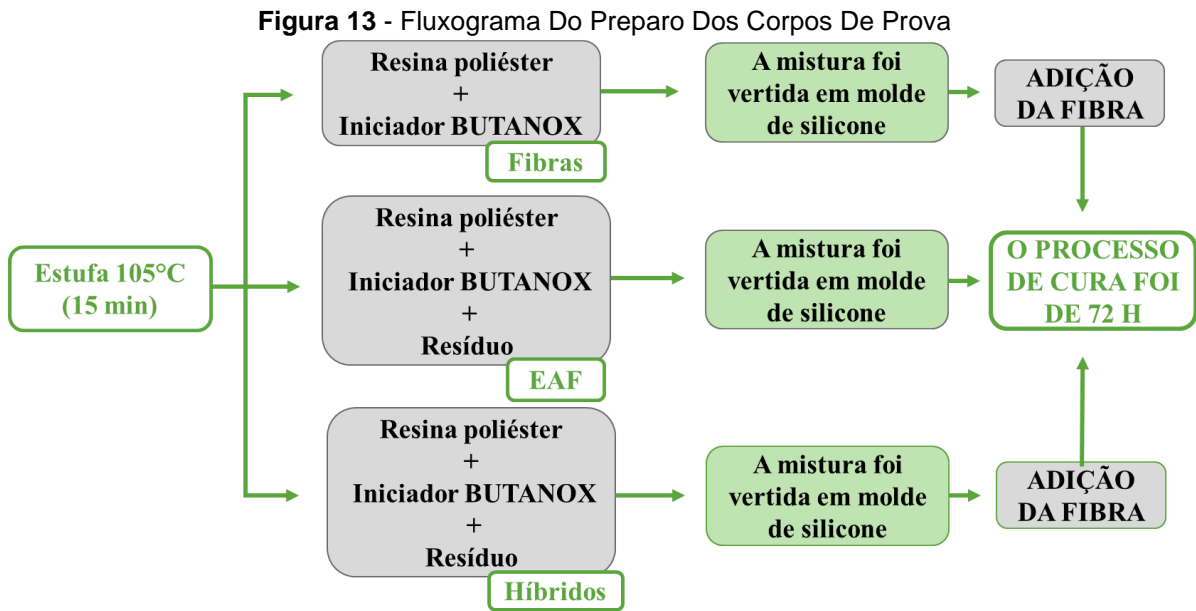
Para a fabricação dos corpos de prova utilizados, realizaram-se testes preliminares para identificar a melhor forma de fabricação e adequar os materiais para as confecções. Os primeiros testes ocorreram para verificar a viabilidade de fabricação sem cobalto e para que houvesse um aumento do tempo do ponto de gel e fosse possível a inserção da fibra alinhada dentro do molde de silicone. Foi proposto também a utilização de fibras com 30 mm, além das utilizadas com 15 mm de comprimento, no entanto, estas não se alinhavam dentro do molde de forma satisfatória e foram descartadas do trabalho.

Para a fabricação com os particulados de escória de alto-forno, a mesma forma de fabricação sem cobalto foi utilizada para se igualasse aos com a adição de fibra, e identificou-se que assim as possíveis bolhas poderiam ser retiradas antes do ponto de gel, melhorando assim os resultados.

Para o preparo dos corpos de prova, com fibra de sisal, o material utilizado foi resina poliéster ortoftálica, iniciador de Metil-Etil-Cetona e fibra de sisal (com 15 mm de comprimento) onde estabeleceram-se composições variando em proporções de 0%, 1%, 2% e 3% de fibra. A mistura dos dois reagentes foi realizada conforme as recomendações do fabricante; em seguida foi vertida no molde de silicone, a fibra foi adicionada posteriormente, de maneira manual, com auxílio de uma pinça por todo comprimento do molde, deixado para curar durante 72 horas.

Para o preparo dos corpos de prova com o resíduo de escória de alto-forno, o material utilizado foi resina poliéster ortoftálica, iniciador de Metil-Etil-Cetona e o resíduo com composições variando em proporções de 10%, 20% e 30% em massa, inicialmente a mistura foi feita conforme as recomendações do fabricante, misturando a resina e o catalisador e então foi adicionado o resíduo, a mistura dos três se deu até a homogeneização e despejada nos moldes deixando assim para a cura durante 72 horas.

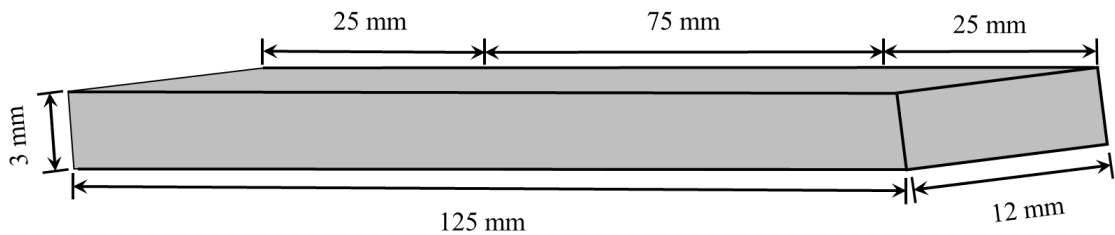
Já para os corpos de prova híbridos, foi utilizado resina poliéster ortoftálica, iniciador de Metil-Etil-Cetona, resíduo de escória de alto-forno e fibra de sisal (com 15 mm de comprimento), onde as proporções foram de 2% de fibra sisal e 20% de resíduo, estabelecidas de acordo com os melhores resultados do ensaio de resistência a tração dos corpos de prova somente com fibra e resíduo. A mistura dos dois reagentes foi realizada de acordo com os outros compósitos. Em seguida, adicionado o resíduo e misturado manualmente até a homogeneização, e despejado no molde de silicone. A fibra foi adicionada posteriormente com auxílio de uma pinça por todo comprimento do molde e deixado para a cura total durante 72 horas. A Figura 13 mostra um Fluxograma de como foi feito o Preparo dos Corpos de Prova.



Fonte: Autora, 2024.

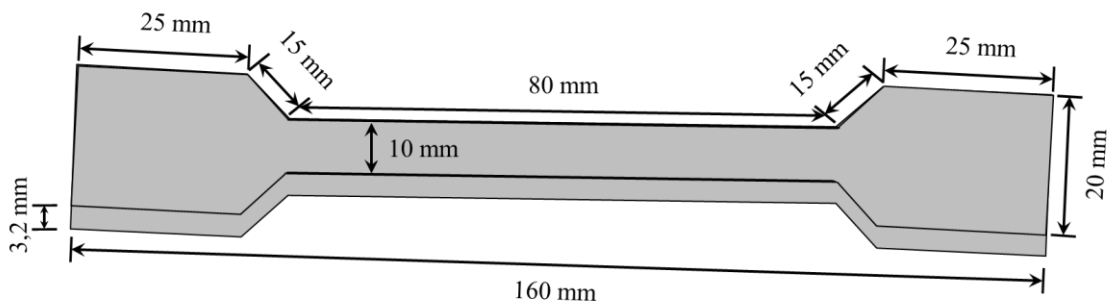
Os corpos de prova fabricados, para os testes de flamabilidade e tração, seguiram as dimensões recomendadas pela norma ASTM D 635 e ASTM D 638, respectivamente. A Figura 14 e a Figura 15 ilustram as dimensões dos corpos de prova fabricados para os ensaios de flamabilidade e de tração respectivamente e a Figura 16 mostra os moldes utilizados.

Figura 14 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de flamabilidade



Fonte: Autora, 2024.

Figura 15 - Dimensões dos corpos de prova fabricados para os ensaios de tração



Fonte: Autora, 2024.

Figura 16 - Moldes de silicone utilizados



Fonte: Autora 2024

Após a finalização da fabricação os corpos de prova passaram por lixamento superficialmente para retirada de quaisquer rebarba, assim como identificados de acordo com suas características e numerações.

A Figura 17 mostra os Corpos de Prova para Ensaios de Flamabilidade fabricados no molde de silicone

Figura 17 - Corpos de Prova para Ensaios de Flamabilidade



Fonte: Autora, 2024.

A Figura 18 mostra os Corpos de Prova para Ensaios de tração, fabricados no molde de silicone

Figura 18 - Corpos de Prova para Ensaio de Tração



Fonte: Autora, 2024.

O Quadro 3 mostra a nomenclatura dos compósitos fabricados.

Quadro 3 – Nomenclatura dos compósitos fabricados

NOMENCLATURA	DESCRIÇÃO
MP	Matriz Plena
FS 1%	Compósito com 1% de Fibra de Sisal.
FS 2%	Compósito com 2% de Fibra de Sisal.
FS 3%	Compósito com 3% de Fibra de Sisal.
EAF 10%	Compósito com 10% de Resíduo de Escória de Alto-Forno.
EAF 20%	Compósito com 20% de Resíduo de Escória de Alto-Forno.
EAF 30%	Compósito com 30% de Resíduo de Escória de Alto-Forno.
HÍBRIDOS 2% - 20%	Compósito com 2% de Fibra de Sisal e 20% de Resíduo de Escória de Alto-Forno.

Fonte: Autora, 2024.

3.5. Massa específica

A massa específica aparente dos resíduos e das fibras foram realizadas no laboratório de materiais porosos e sintéticos (LAMPS) pelo método do picnômetro. Esse método consiste em medir a massa do picnômetro vazio (m_1), massa do picnômetro + resíduo (m_2), massa do picnômetro picnômetro + resíduo + água destilada (m_3) e a massa do conjunto água destilada (m_4). Com isso, foi possível

calcular a massa específica aparente por meio da Equação 1, para então calcular a massa dos constituintes da mistura para produção dos compósitos.

$$MEA = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} * \rho_{H_2O}(g/cm^3) \quad (1)$$

Onde ρ_{H_2O} é tabelado de acordo com a temperatura da água destilada utilizada.

A Figura 19 mostra o Método do Piquinometro para os Ensaio de Massa Específica

Figura 19 - Ensaio de Massa Específica com o Método do Piquinometro



Fonte: Autora, 2024.

3.6. Análise morfológica

A análise morfológica do resíduo foi realizada por meio da utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo *Tescan Mira3*, com canhão de elétrons tipo FEG (*Field Emission Gun*) no laboratório de microscopia eletrônica de varredura (LME) - do Museu Paraense Emílio Goeldi. Para essa análise, o resíduo de escória de alto-forno foi previamente pulverizado, permitindo a obtenção de informações detalhadas sobre a estrutura e a morfologia de suas partículas, contribuindo para a compreensão de sua composição e características físicas.

A análise morfológica das fibras foi conduzida com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada, do modelo TM3000 da marca *HITACHI*, no laboratório LabMie do MATCAM UFPA. O propósito foi investigar o impacto da morfologia nas propriedades dos compósitos. As amostras foram ampliadas em 25 e

200 vezes para uma avaliação detalhada. Essa análise foi realizada no Laboratório de Microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará

3.7. Difratometria de raios X

A caracterização mineralógica da escória de alto-forno (EAF) foi realizada por meio de Difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes no material.

A análise foi conduzida no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA/Marabá), utilizando um Difratometro de raios X, modelo *MINIFLEX 600*, fabricado pela *Rigaku Corporation*. O equipamento estava equipado com um Goniômetro (*Theta/Theta*) e tubos de raios X cerâmicos com ânodo de Cu ($K\alpha=1,54060 \text{ \AA}$). A faixa angular de varredura foi definida entre $5,00^\circ$ e $90,00^\circ$ (2^θ), com um tamanho de passo de $0,0200^\circ$ (2^θ) e um tempo de aquisição de 1 segundo por passo. Além disso, foram utilizadas uma fenda divergente de 1° e uma máscara de 10 mm.

3.8. Fluorescência de raios X

A análise quantitativa por fluorescência de raios X forneceu as porcentagens em massa dos óxidos presentes nas amostras do material.

A determinação da composição química da amostra requerida foi realizada por Espectrometria de Fluorescência de raios X, utilizando espectrômetro WDS sequencial, modelo *AXIOS MINERALS* da marca *PANalytical*, com tubo de raios X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. No Laboratório de Caracterização Mineral (setor de raios x) localizado no Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará.

A amostra foi analisada por preparação: Pastilha Prensada: 0,5 g de amostra + 0,15 g de aglomerante (cera de parafina) + 3 g de substrato, mistura prensada com uma carga de 25 toneladas.

As aquisições e tratamento dos dados foram realizados através do software *SuperQ Manager* versão 5.3 da *PANalytical*.

3.9. Análise das propriedades físicas (MEA, PA e AA) dos compósitos

O estudo avaliou a massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água dos compósitos feitos a partir de 0%, 10% 20% e 30% de resíduo de escória de alto-forno, de 1%, 2% e 3% de fibra de sisal, e híbridos com 20% de EAF e 2% de fibra sisal. As normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792 foram seguidas, e o trabalho foi conduzido no Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) da Faculdade de Engenharia Química da UFPA. Os corpos de prova passaram por medições de massa seca (M_s), massa úmida (M_u) e massa imersa (M_i). O procedimento envolveu a exposição dos corpos de prova a uma estufa a 100 °C por 24 horas para medição da M_s e a imersão em água destilada por 24 horas para a medição da M_i . Os cálculos de massa específica aparente (MEA), Equação (4), porosidade aparente (PA), Equação (3) e absorção de água (AA), Equação (2), foram realizados com base em equações específicas.

$$AA = \frac{M_U - M_S}{M_S} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

$$PA = \frac{M_U - M_S}{M_U - M_I} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

$$MEA = \frac{M_S}{M_U - M_I} \cdot \rho_{H_2O} (g/cm^3) \quad (4)$$

Onde M_u é a massa úmida, M_s é a massa seca e M_i é a massa imersa, todos em gramas (g) e ρ é a massa específica da água em g/cm³.

3.10. Ensaio de tração

Para o ensaio de tração, empregou-se o uso de uma máquina modelo KE 2000 MP, da marca KRATOS, conduzido nas instalações do Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. A máquina foi ajustada com uma célula de carga de 5 kN e operou a uma velocidade de 5 mm/min, em estrita conformidade com os parâmetros estipulados pela norma ASTM D 638. A Figura 20 mostra como é feito o ensaio de resistência a atração.

Figura 20 - Ensaio de Tração



Fonte: Autora, 2024.

3.11. Fractografia

A análise de fratura foi realizada por meio da utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo *Tescan Mira3*, com canhão de elétrons tipo FEG (*Field Emission Gun*) no laboratório de microscopia eletrônica de varredura (LME) - do Museu Paraense Emílio Goeldi. Para analisar as fraturas dos compósitos, observar as possíveis causas de falhas nos materiais e componentes, assim como classificar o tipo de falha. A Figura 21 mostra como é feito o preparo dos corpos de prova para o ensaio de fractografia.

Figura 21 - Corpos de Prova para Ensaio Fractografia



Fonte: Autora, 2024.

3.12. Ensaio de resistência à chama

O teste de inflamabilidade horizontal foi conduzido nas instalações da Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará, conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D 635. Para a realização do teste, foram fabricados cinco corpos de prova para cada proporção dos resíduos.

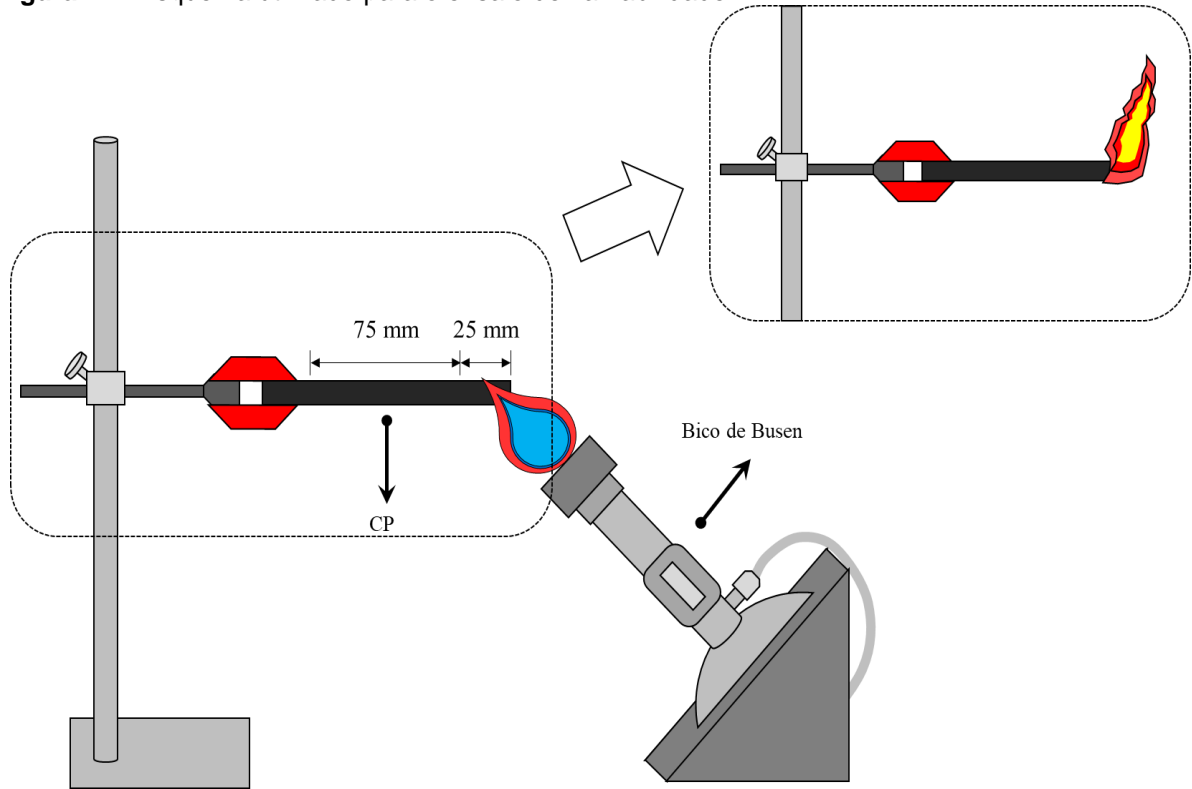
No experimento, empregou-se um dispositivo de estrutura metálica para acoplar e sustentar o corpo de prova, conforme representado na Figura 22. A condução da chama através do corpo de prova foi realizada por meio de um bico de Bunsen posicionado a 45°.

A taxa de propagação de chama é calculada através da Equação 5. Onde L é o comprimento útil do corpo de prova em milímetros e t é o tempo em segundos, no qual a chama leva para percorrer o comprimento útil. Para este ensaio, foram utilizados 5 corpos de prova para cada composição.

$$TAXA \left(\frac{mm}{min} \right) = \frac{L}{T} \quad (5)$$

O propósito é classificar o material polimérico com base na velocidade de queima, onde a chama é gerada a partir do bico de Bunsen a um ângulo de 45°, e o tempo de queima é medido em milímetros por minuto (Coelho, 2022). A Figura 22 representa o esquema utilizado para o ensaio.

Figura 22 - Esquema utilizado para o ensaio de flamabilidade



Fonte: Autora, 2024.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos reforços

4.1.1. Massa específica dos reforços

Por meio da Equação 1, foi possível calcular a massa específica do resíduo de escória de alto-forno (EAF) e fibra de sisal (FS). O valor calculado para o resíduo de escória foi de 3,013 g/cm³ onde o mesmo está de acordo com as literaturas pesquisadas por Pagio *et al.* (2022) e Pimentel *et al.* (2017). Já a fibra de sisal, teve o valor calculado de 1,295 g/cm³, valor próximo ao encontrado por Peres; Silva; Fujiyama (2022). A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os resultados de massa específica do resíduo de escória de alto-forno e de fibra de sisal, com resultados encontrados nas literaturas.

Tabela 1 - Dados comparativos com os resultados do trabalho com da literatura

MATERIAIS	RESULTADOS	FONTE
EAF	3,013 g/cm³	Este trabalho
Escória de alto-forno	2,980 g/cm ³	Pagio <i>et al</i> 2022
Escória de alto-forno	3,042 g/cm ³	Anjos, 2021
FS	1,295 g/cm³	Este trabalho
Fibra de sisal	1,259 g/ cm ³	Peres <i>et al</i> ,2022
Fibra de sisal	1,420 g/cm ³	Alencar, 2022

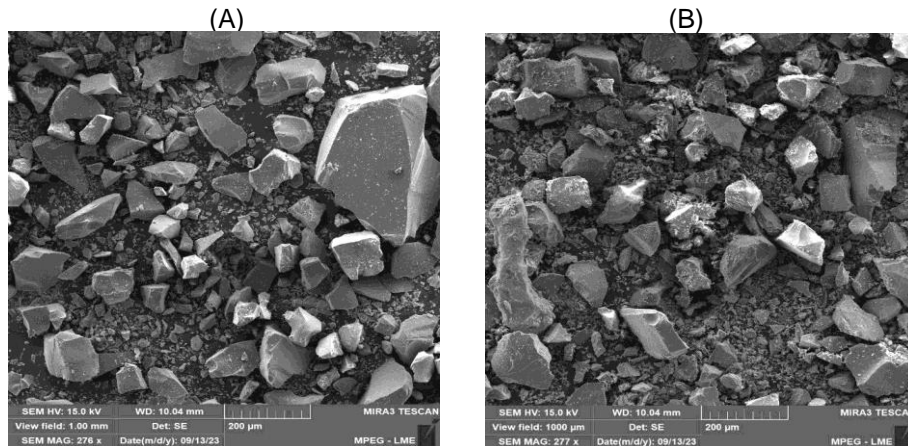
Fonte: Autora, 2024.

Essa congruência entre os valores confirma a precisão da massa específica da escória de alto-forno e da fibra de sisal, os quais desempenham um papel fundamental na compreensão e análise das propriedades dos materiais. No caso específico dos compósitos que combinam matriz polimérica com resíduos ou fibras, podem exercer uma influência direta nas características mecânicas desses materiais (Santos *et al.*, 2020).

4.1.2. Análise morfológica

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostra a característica morfológica do resíduo da escória de alto-forno, representado pela Figura 23.

Figura 23 - As imagens (A) e (B) mostram a morfologia do resíduo de escória de alto-forno



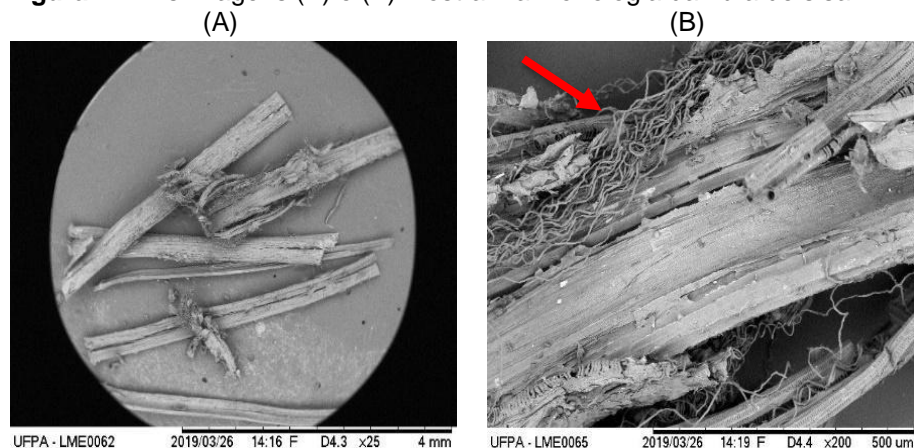
Fonte: Autora, 2024.

Através de uma análise morfológica da escória de alto-forno, conforme ilustrado na Figura 23, é possível discernir uma ampla gama de partículas com formatos irregulares e dimensões diversas, corroborando com o trabalho de Silva *et al.* (2017).

Moraes (2022) observou em seu estudo que, após o processo de moagem das partículas de escória, a superfície fragmentada não exibe uma geometria previsível, sendo caracterizada principalmente por uma morfologia anômala, com bordas e ângulos distintos, possivelmente evidenciado nas micrografias. Chen *et al.*, (2022); Radwan *et al.*, (2021) e Verma; Dev, (2020) em seus trabalhos, documentaram a irregularidade na forma das partículas de EAF está em consonância com outras caracterizações morfológicas.

Observa-se a fibra de sisal e suas características morfológicas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), representado pela Figura 24.

Figura 24 - As imagens (A) e (B) mostram a morfologia da fibra de sisal



Fonte: Autora, 2024.

A Figura 24 mostra a morfologia das fibras analisadas, estas não foram submetidas a nenhum tratamento químico. As fibras de sisal exibem uma morfologia com uma textura superficial escamosa e não uniforme. De acordo com Evaldt (2023), quando agrupadas, elas se organizam em tramas entrelaçadas, criando uma disposição emaranhada que favorece a formação de espaços intersticiais, contribuindo para o aumento do volume do material.

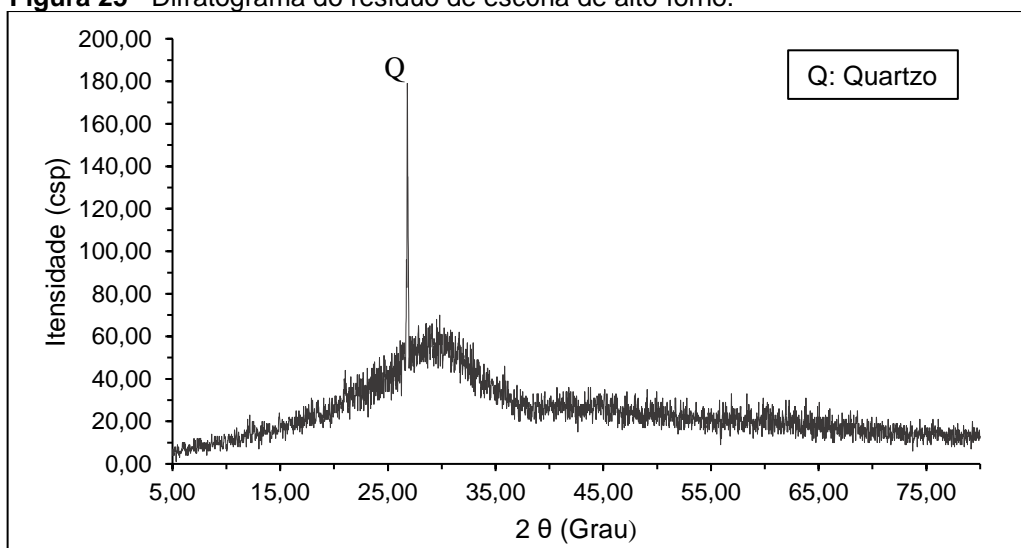
É possível observar na Figura 24 (B), que as fibras são constituídas por um agrupamento de células individuais conhecidas como fibras elementares ou microfibrilas (seta vermelha). Estas células estão ligadas entre si pela lignina e polioses, formando filamentos contínuos ao longo do comprimento da fibra. Essa estrutura confere uma certa rigidez à fibra (Martins; Kiyohara; Joekes, 2004).

Para Li; Mai; Ye, (2000), ao considerar as diversas fibras descritas na literatura, é importante observar que a microestrutura da fibra de sisal é bastante complexa. Cada fibra é composta por múltiplas células de fibras individuais, que são alongadas e possuem um diâmetro variando entre 6 a 30 μm .

4.1.3. Difratoimetria de raios X

As composições mineralógicas do resíduo de escória de alto-forno foram verificadas por meio da análise de DRX. A Figura 25, apresenta o Difratograma do resíduo.

Figura 25 - Difratograma do resíduo de escória de alto-forno.



Fonte: Autora, 2024.

Na Figura 25 são mostrados os principais componentes mineralógicos da EAF, onde pode-se verificar que a análise por difração de raios x identificou que o mesmo é constituído por quartzo (Q), conforme a ficha PDF 00-051-2075. O resultado desse mineral pode ser confirmado nas análises dos estudos conduzidos por Morais (2022). A análise do difratograma também sugere uma predominância amorfa do material, o que pode ser associado ao seu processo de resfriamento rápido através de jatos de água sob alta pressão após a retirada do resíduo dos altos-fornos, não havendo tempo suficiente para formação de cristais, esse fenômeno é favorável para aumentar sua reatividade, como destacado por Pimentel *et al.* (2019) e Almeida (2022).

4.1.4. Fluorescência de raios x

O Quadro 4 mostra os resultados da amostra da escória de alto-forno obtidos a partir da análise de fluorescência de raios x.

Quadro 4 – Resultado da análise de fluorescência de raios X

COMPOSIÇÃO (WT%)	EAF
Fe₂O₃	4,80
SiO₂	36,70
Al₂O₃	11,90
K₂O	1,30
CaO	38,40
P₂O₃	-
SO₃	0,33
MnO	2,40
MgO	3,20
CuO	-
TiO₂	0,97
PF	-

Fonte: Autora, 2024.

EAF = Escória de Alto-Forno.

(-) = Abaixo do limite de detecção (0,1%).

P.F. = Perda ao fogo determinada com a queima de 1 g de amostra seca a 1000 °C por 1 h.

A análise da composição química da escória é de suma importância, especialmente para a avaliação de sua reatividade. Os resultados obtidos por meio da técnica de análise por fluorescência de raios x (FRX), apresentados no Quadro 4, revelam que a escória é predominantemente constituída por óxido de cálcio (CaO), com uma concentração aproximada de 38,4%. Além disso, são detectados outros óxidos, tais como Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , MnO , que podem ser considerados como materiais amorfos devido à ausência de picos característicos. A composição química da escória é fortemente influenciada pela carga inerida no alto-forno, principalmente sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio. Esses aspectos indicam que esses materiais são adequados para aplicações que requerem propriedades como absorção de ondas sonoras, estabilidade térmica, inércia química e aprimoramento da estabilidade dimensional (Pereira; Ramos; Silva, 2020).

4.2. Caracterizações dos compósitos

4.2.1. Análise das propriedades físicas (MEA, PA E AA) dos compósitos

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA), dos compósitos.

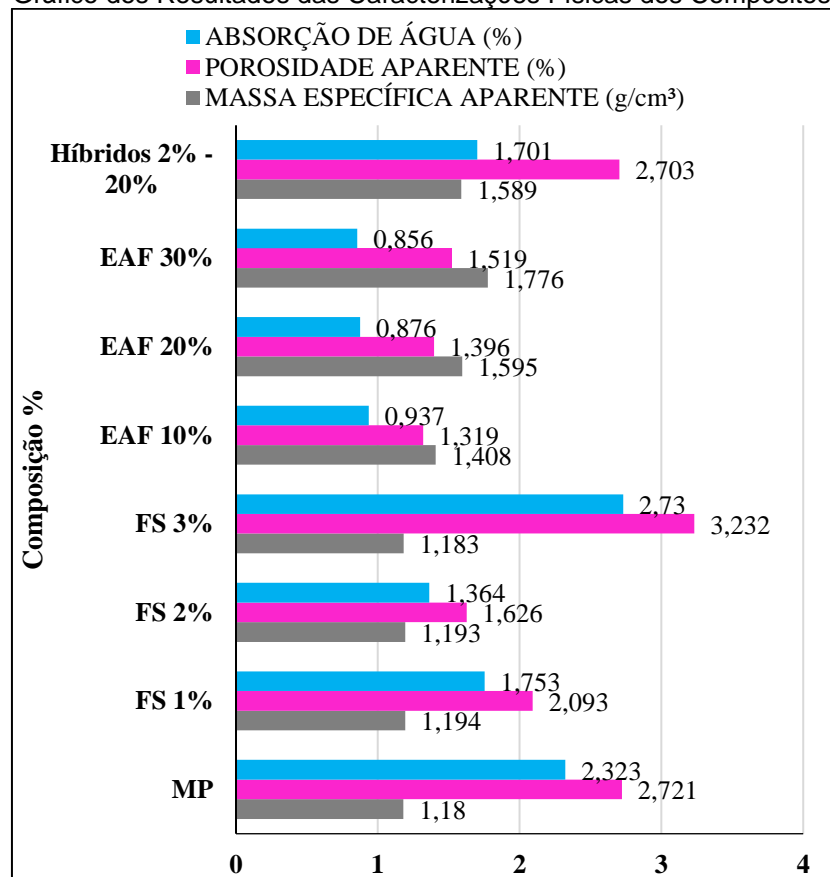
Tabela 2 - Resultados das caracterizações físicas dos compósitos

MATERIAIS /PROPORÇÕES	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm³)	POROSIDADE APARENTE (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
MP	1,180 ± 0,024	2,721 ± 1,199	2,323 ± 1,079
FS 1%	1,194 ± 0,058	2,093 ± 0,260	1,753 ± 0,202
FS 2%	1,193 ± 0,007	1,626 ± 0,508	1,364 ± 0,433
FS 3%	1,183 ± 0,017	3,232 ± 0,546	2,730 ± 0,440
EAF 10%	1,408 ± 0,007	1,319 ± 0,397	0,937 ± 0,285
EAF 20%	1,595 ± 0,026	1,396 ± 0,179	0,876 ± 0,115
EAF 30%	1,776 ± 0,014	1,519 ± 0,316	0,856 ± 0,184
Híbridos 2% - 20%	1,589 ± 0,006	2,703 ± 0,774	1,701 ± 0,487

Fonte: Autora, 2024.

Observa-se um aumento nas massas específicas aparentes nos compósitos conforme as porcentagens de EAF e de fibra de sisal aumentam, apresentado na Tabela 2, em comparação com a matriz plena. Esse fenômeno pode ser atribuído às diferentes propriedades físicas entre a matriz e os reforços, corroborando a regra da mistura, para Callister Júnior e Rethwisch (2021), nessa regra, cada fase contribui para aprimorar as propriedades efetivas do material final de acordo com suas propriedades efetivas e isto pode ser melhor observado na Figura 26 do gráfico com os resultados das caracterizações físicas dos compósitos.

Figura 26 - Gráfico dos Resultados das Caracterizações Físicas dos Compósitos.



Fonte: Autora, 2024.

Observa-se também uma redução nos valores de porosidade aparente e absorção de água em comparação com a matriz plena. É evidente que quanto maior a incorporação de EAF, menores são os valores de PA e AA. Segundo Tavares (2021), os resíduos em geral apresentam características hidrofílicas, o que tende a aumentar a absorção de água com a incorporação de resíduos.

No entanto, tal fenômeno hidrofílico não foi observado no ensaio conduzido, o que pode ser atribuído à eficiência na homogeneização entre o resíduo e a matriz, além das características hidrofóbicas apresentadas pela matriz, também pode ser atribuída aos efeitos da presença da escória no material, tais como o preenchimento de espaços vazios, o aprimoramento da impermeabilidade ou interações químicas. Para Keles (2011) e Pimentel *et al.* (2019) a escória de alto-forno pode estabelecer interações químicas com a matriz ou as resinas utilizadas no compósito, melhorando a aderência entre os componentes e, conseqüentemente, reduzindo a porosidade e a absorção de água.

Por outro lado, há um aumento do valor de porosidade aparente e absorção de água do compósito com fibra de sisal (FS 3%), pode-se constatar que quanto maior a quantidade de fibra maior são os valores de PA e AA. Isto pode ser atribuído devido a porosidade da fibra, assim como a propensão que elas tem à absorção de umidade, uma vez que são compostas por materiais lignocelulósicos, predominantemente constituídos por celulose, lignina e hemicelulose, características encontradas no trabalhos de Reis (2019) e Alencar (2022). Observa-se também que os valores para o CP híbrido são menores que os da matriz plena em relação a absorção de água e porosidade aparente, no entanto são superiores aos descritos para os CP's de EAF, possivelmente devido a quantidade de fibra de sisal presente no mesmo.

4.2.2. Ensaio de tração

A realização do ensaio de tração nos materiais compósitos produzidos seguiu as diretrizes da norma ASTM D 638. Na Tabela 3, são mostrados os resultados do ensaio de tração para todas as composições. É possível analisar os resultados referentes ao Limite de Resistência à Tração (LRT), alongamento e Módulo de Elasticidade (ME) dos compósitos produzidos.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração dos compósitos

MATERIAIS /PROPORÇÕES	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)
MP	50,779 ± 2,180	0,101 ± 0,016	0,496 ± 0,087
FS 1%	27,145 ± 3,627	0,062 ± 0,002	0,421 ± 0,058
FS 2%	31,087 ± 1,273	0,055 ± 0,007	0,549 ± 0,071
FS 3%	33,598 ± 2,142	0,063 ± 0,009	0,518 ± 0,081
EAF 10%	21,653 ± 3,183	0,049 ± 0,008	0,362 ± 0,082
EAF 20%	24,791 ± 0,297	0,065 ± 0,004	0,345 ± 0,039
EAF 30%	27,400 ± 2,889	0,054 ± 0,006	0,412 ± 0,118
Híbridos 2% - 20%	21,318 ± 0,531	0,043 ± 0,004	0,483 ± 0,031

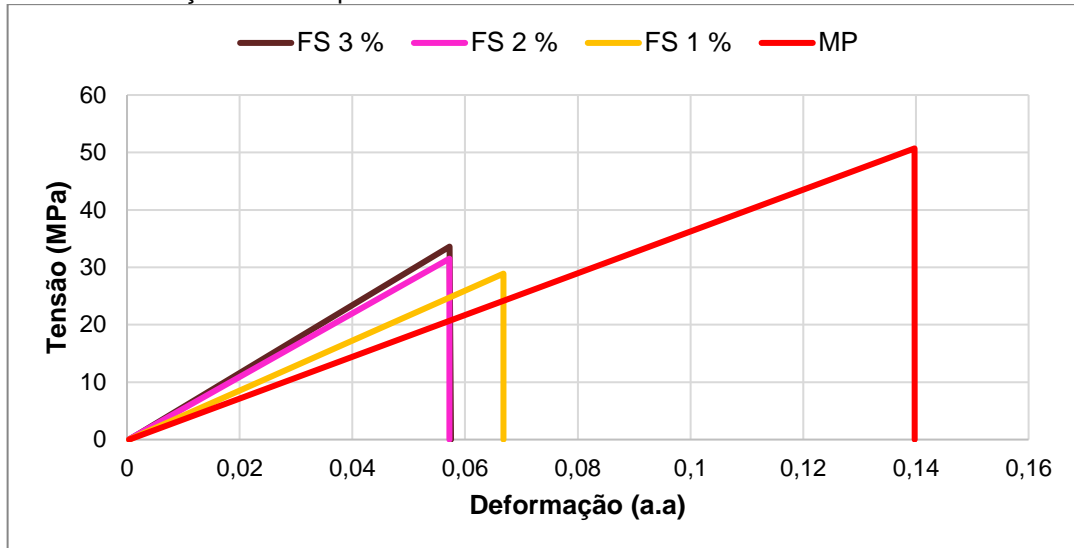
Fonte: Autora, 2024.

Os resultados observados na Tabela 3 apontam que o limite de resistência dos corpos de prova produzidos com o reforço de escória, foram inferiores a matriz plena. O CP com 3% de fibra de sisal (FS 3%) foi o que apresentou a maior resistência à tração em relação as outras porcentagens, cerca de 19% maior que o CP “FS 1%” de menor porcentagem do mesmo material. Também apontou um aumento no alongamento e no módulo de elasticidade do material, conforme a quantidade de fibra aumenta, isso destaca claramente a influência direta da quantidade de fibras no compósito. Martin *et al.* (2009), trabalhou com estudos que demonstram a influência da composição química nas propriedades mecânicas e na estrutura física das fibras lignocelulósicas, para ele o teor de lignina e hemicelulose, especialmente em fibras como as de sisal, desempenha um papel significativo na resistência à tração dessas fibras. Além disso, a resistência e a rigidez das fibras estão intimamente relacionadas ao conteúdo de celulose e ao ângulo espiral formado pelas microfibrilas na parede celular secundária interna, em relação ao eixo da fibra.

Para o compósito com 30% de escória de alto-forno (EAF 30%), o limite de resistência à tração é de 27,400 MPa e o módulo de elasticidade é de 0,423 GPa, mostrando uma redução tanto no limite de resistência à tração quanto no módulo de elasticidade em relação à matriz pura, indicando que, embora a resistência à tração diminua, a rigidez do material ainda se mantém relativamente alta. A composição híbrida (20% EAF + 20% FS) apresenta um limite de resistência à tração de 21,318 MPa e um módulo de elasticidade de 0,483 GPa, demonstrando um bom equilíbrio entre resistência à tração e rigidez, fazendo dela uma alternativa interessante para aplicações que requerem ambos os atributos.

A Figura 27, apresenta o gráfico representativo de Tensão x Deformação dos compósitos com fibras em relação a matriz plena.

Figura 27 - Gráfico representativo de tensão x deformação apresenta os compósitos com fibras de sisal em relação a matriz plena.

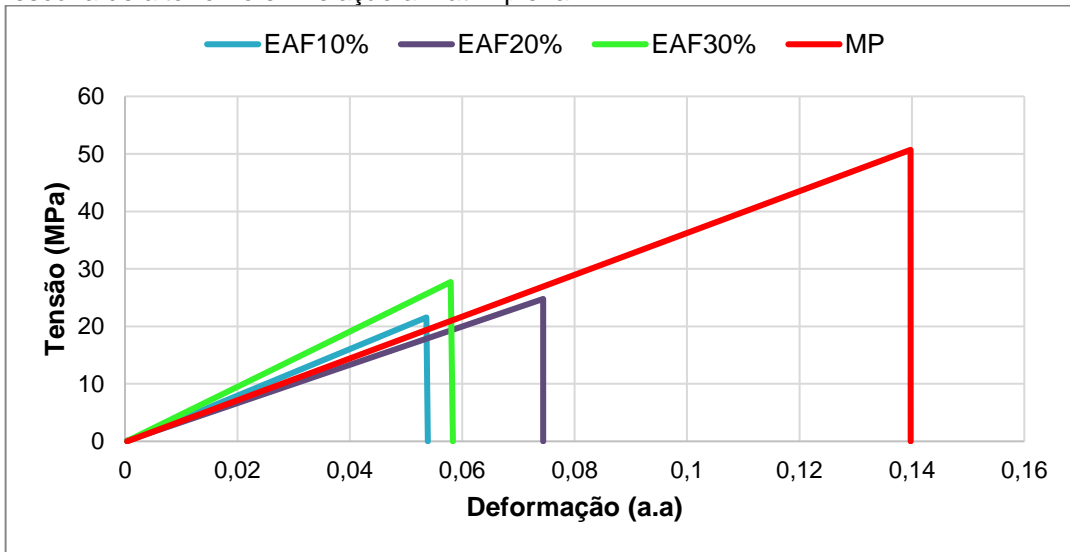


Fonte: Autora, 2024.

Os corpos de prova com uma maior proporção de resíduos (30% de EAF) demonstraram a mais alta resistência à tração entre os CP's com escória, registrando uma média de 27,4 MPa, no entretanto cerca de 44% menor que a matriz plena. Já aqueles com menor teor de resíduos, representados por EAF 10%, exibiram os menores resultados, com uma média de 21,7 MPa.

Os resultados obtidos evidenciam a influência direta da quantidade de resíduos na resistência à tração do compósito. Para Queiroz (2019) e Coelho (2022), isto pode ter ocorrido devido ao fato de o resíduo ter sido bem incorporado ao compósito e diminuído imperfeições como poros e vazios deixados por eventuais bolhas. Callister Júnior e Rethwisch, (2021), explicam que essa situação pode estar associada à granulometria das partículas, devido ao seu tamanho reduzido, as partículas de reforço tendem a restringir o movimento das moléculas na matriz próxima de cada partícula de reforço. Conseqüentemente, a matriz redistribui parte da tensão aplicada para as partículas, o que possibilita suportar cargas mais substanciais antes do rompimento das cadeias. A Figura 28, apresenta o gráfico representativo de Tensão x Deformação dos compósitos reforçados com escória de alto-forno em relação a matriz plena.

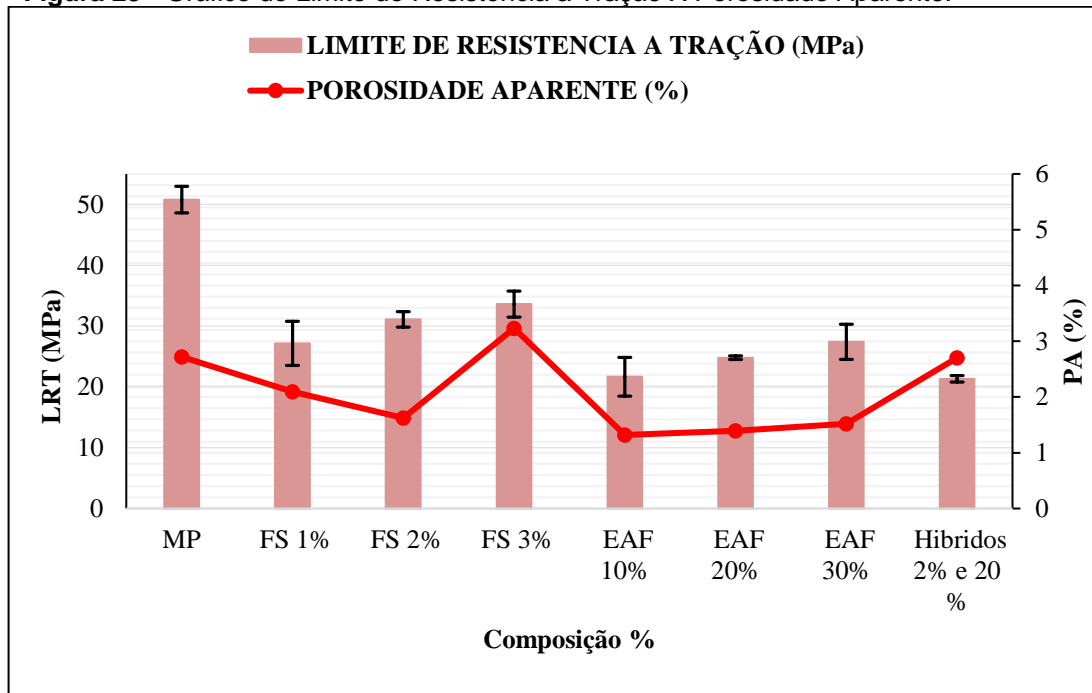
Figura 28 - Gráfico representativo tensão x deformação apresenta os compósitos reforçados com escória de alto-forno em relação a matriz plena



Fonte: Autora, 2024.

A Figura 29, apresenta o gráfico da relação dos resultados mecânicos de tração e a porosidade aparente, para todos os compósitos.

Figura 29 - Gráfico do Limite de Resistência a Tração X Porosidade Aparente.



Fonte: Autora, 2024.

Os corpos de prova híbridos apresentaram um limite de resistência a tração inferior em relação a matriz plena, o menor alongamento e o módulo de elasticidade mais próximo da matriz. Além disso observa-se, na imagem 28, que a absorção de

água da maioria dos compósitos aumenta à medida que a proporção de fibras do compósito aumenta, assim como a inserção de particulados, fato esse pode ser atribuído à potencial sedimentação do resíduo e das fibras dentro da matriz de poliéster. Além disso, a incorporação das fibras pode ter criado vazios no interior do corpo de prova, resultando em pontos de concentração de tensão, o que leva à diminuição das propriedades mecânicas. Para Reis (2019), as características mecânicas dos materiais são notavelmente afetadas pela quantidade de carga presente nos compósitos, sendo que o aumento dessa proporção tende a resultar na redução da resistência à tração.

A Tabela 4, apresenta um comparativo entre os resultados de ensaio de tração dos compósitos produzidos com resultados encontrados nas literaturas.

Tabela 4 - Comparativo dos resultados de tração obtidos com a literatura

MATERIAIS	RESULTADOS	FONTE
FS 3%	33,598 (MPa)	Este Trabalho
EAF 30%	27,400 (MPa)	Este Trabalho
Híbrido 2% E 20%	21,318 (MPa)	Este Trabalho
Cana de Açúcar 3%	18,771 (MPa)	Dos Santos (2023)
Fibras de Bambu 3%	32,570 (MPa)	Barbosa (2018)
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	6,00 a 12,00 (MPa)	DREGER (2017)
Madeira Duratex (MDF)	0,68 a 0,84 (MPa)	BALLARIN (2010)
Policloreto de Vinila (PVC)	10,00 a 25,00 (MPa)	BRASKEN (2023)
Resíduos de Minério de Cobre 30%	16,910 (MPa)	Gomes (2023)
Resíduo de Minério de Ferro 30%	22,040 (MPa)	Almeida (2020)
20% Resíduos da Construção e Demolição com 3% de Fibra de Sisal	16,920 (MPa)	Alencar (2022)
20% Resíduo de Mármore e Granito com 3% de fibras de Sisal	16,060 (MPa)	Reis <i>et al</i> (2020)

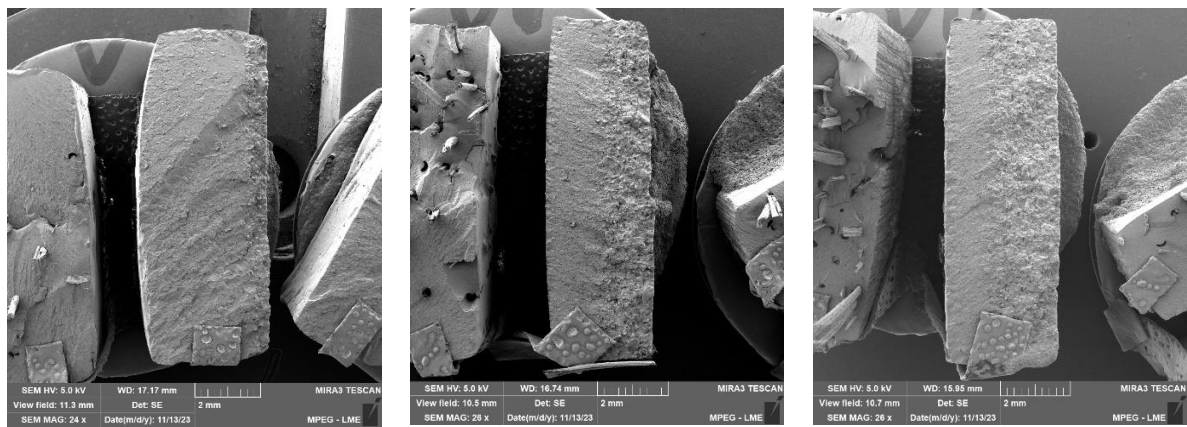
Fonte: Autora, 2024.

A comparação com a literatura revelou que a fibra de sisal e a escória de alto-forno podem ser considerados materiais de reforço eficazes devido às suas propriedades mecânicas, apresentando resultados promissores em estudos similares. Esses compósitos são versáteis e podem ser aplicados em diversas áreas, como construção civil (estruturas de concreto reforçado e materiais de isolamento), indústria automotiva (componentes internos e externos de veículos), aeronáutica (partes estruturais de aeronaves leves), materiais de embalagem (embalagens reforçadas) e móveis e decoração (móveis sustentáveis e elementos decorativos), demonstrando seu potencial como materiais inovadores e sustentáveis para várias indústrias.

4.2.3. Fractografia

Por meio da análise da superfície de fratura utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura, torna-se viável a observação, estudo e correlação dos mecanismos, causas e modos de falha do material em análise. A Figura 30 mostra a fractografia da superfície dos compósitos de escória de alto-forno, com as porcentagens de 10% 20% e 30%.

Figura 30 - (A) Análise do CP 10% EAF, (B) análise do CP 20% EAF e (C) análise do CP 30% EAF
(A) (B) (C)

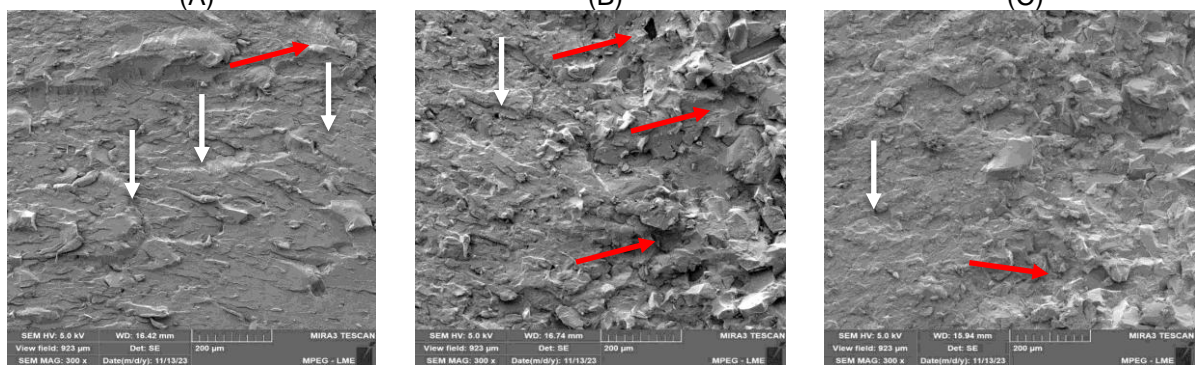


Fonte: Autora, 2024.

A Figura 30 mostra a fractografia das superfícies dos compósitos com composições de 10%, 20% e 30%, imagens (A), (B) e (C) respectivamente. É possível notar uma sedimentação do resíduo na matriz que indica o início da propagação da fratura, nos CP's, e conforme a porcentagem de particulados aumenta nota-se a sobreposição maior nos compósitos, com o CP de 30% EAF mais evidente. E de acordo com a Tabela 3, a resistência a tração aumentou conforme a proporção de particulado, possivelmente pela boa homogeneização com a matriz, que em concordância com os trabalhos de El Banna (2017) e Farias (2019), a dispersão eficaz é um fator primordial que aumenta significativamente a resistência mecânica do material. Isso ocorre porque uma homogeneização adequada da fase particulada resulta em uma transferência mais eficiente de tensão da matriz para a partícula.

A Figura 31 mostra a fractografia da superfície dos compósitos de escória de alto-forno, sob o aumento de 300x, das porcentagens de 10% 20% e 30%.

Figura 31 - (A) Análise do CP 10% EAF, (B) análise do CP 20% EAF e (C) análise do CP 30% EAF



Fonte: Autora, 2024.

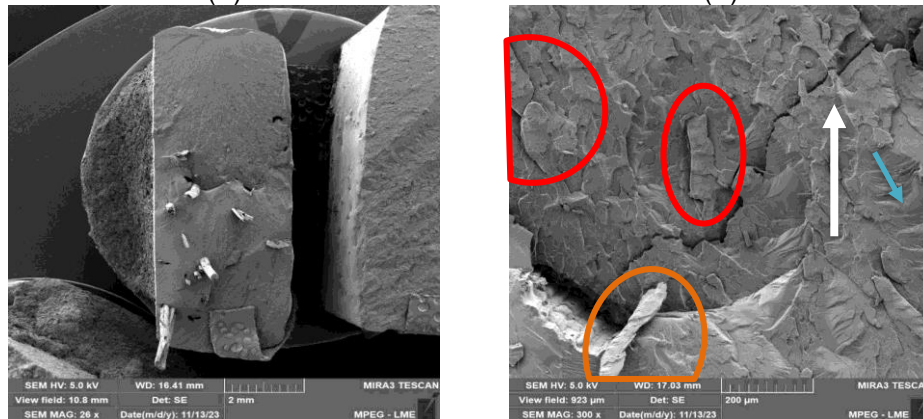
Através da análise micrográficas da superfície de fratura dos corpos de prova de matriz polimérica e suas frações de resíduo de escória de alto-forno (10%, 20% e 30%), Figura 31, pode-se notar as “marcas de rio” (setas brancas), como observados predominantemente na imagem A (CP EAF 10%), indicando fratura frágil, estas são evidências da direção de propagação do dano (setas vermelhas), resultado do desenvolvimento de trincas em dois ou mais interfaces paralelos, os quais, ao se unirem, formam os conhecidos degraus. A presença dessas marcas indica uma concentração de tensão mais intensa durante a aplicação da carga mecânica nessas regiões (Fortes, 2013). As mesmas também acontecem nas superfícies dos compósitos de 20% e 30%, imagens B e C, respectivamente.

Observa-se na superfície inúmeras imperfeições, devido a sedimentação, de acordo com o trabalho de Costa (2012) os resultados apontam para uma diminuição na resistência à tração do compósito.

Na análise da superfície de fratura dos compósitos com particulados apresentou boa dispersão na matriz. Para Moraes (2019), uma dispersão eficiente contribui significativamente para o incremento da resistência mecânica. Isso ocorre porque à uma distribuição mais uniforme da fase dispersa do material particulado facilita a transmissão adequada da tensão da matriz para o resíduo.

A Figura 32 apresenta a microscopia da superfície da fratura dos corpos de prova com 1% de fibra de sisal 15 mm.

Figura 32 - (A) Fratura do CP SF1% e (B) análise em aumento de 300x
(A) (B)



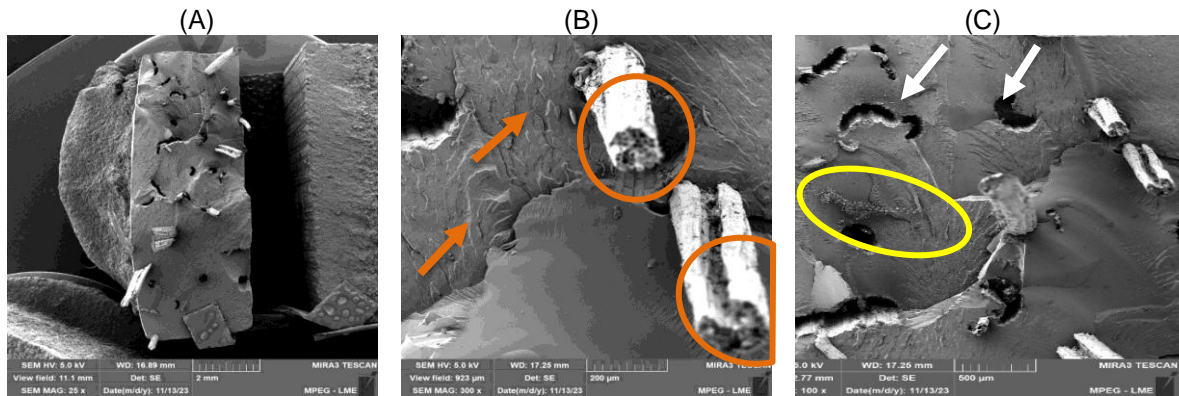
Fonte: Autora, 2024.

As análises fractográficas, na Figura 32, dos corpos de prova com 1% de fibra de sisal 15 mm, apresentaram pouco descolamento de fibra, “*pull out*”, relacionado aos outros com maior porcentagem, provavelmente devido a quantidade de fibras, pode-se observar também algumas facetas de clivagem (circuladas de vermelho) e estrias radiais, setas azuis de acordo com Wang *et al.* (2021), o espaçamento entre as estrias fornece informações importantes sobre a taxa de propagação da trinca, indicando fratura frágil (seta branca), que podem resultar em uma concentração de tensão dentro do compósito, o que contribui para uma redução na resistência mecânica.

A imagem com aumento de 300x Figura 32 (B) também mostra uma superfície bastante irregular com fibras aparentes (círculo laranja) que de acordo com Santos (2023), ocorre por uma boa adesão entre os componentes, que pode significativamente contribuir para melhorias substanciais na resistência dos compósitos.

A Figura 33 apresenta a microscopia da superfície da fratura dos corpos de prova com 2% de fibra de sisal 15 mm.

Figura 33 - (A) Fratura do CP SF2%, (B) análise em aumento de 300x e (C) análise em aumento de 100x

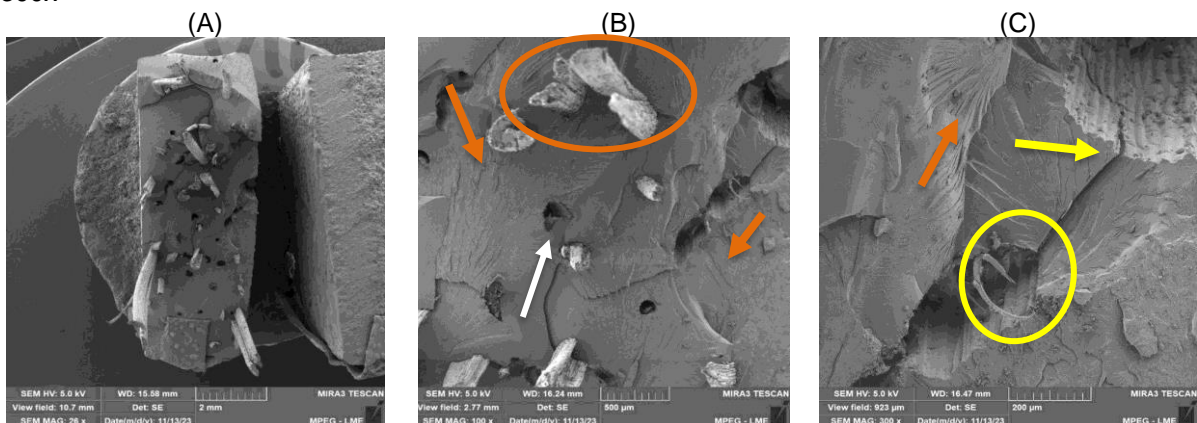


Fonte: Autora, 2024.

Observa-se a análise micrográfica, Figura 33, da fratura do corpo de prova com 2% de FS, 15 mm (Figura A), é possível observar diversas imperfeições e interstícios (setas brancas) ocasionados pelo descolamento da fibra “pull out”, novamente observado nesta fratura, pode-se identificar várias pontas de fibras de sisal (circuladas de laranja) novamente nesta porcentagem, o que favorece os resultados dos ensaios mecânicos, assim como “marcas de rio” e “estrias radiais” (setas laranjas) nota-se na imagem (C) uma fibrila (circulada de amarelo) ocasionado possivelmente pelo desfiamento da fibra.

A Figura 34 apresenta a microscopia da superfície da fratura dos corpos de prova com 3% de fibra de sisal 15 mm.

Figura 34 - (A) Fratura do CP SF3%, (B) análise em aumento de 100x e (C) fratura em aumento de 300x



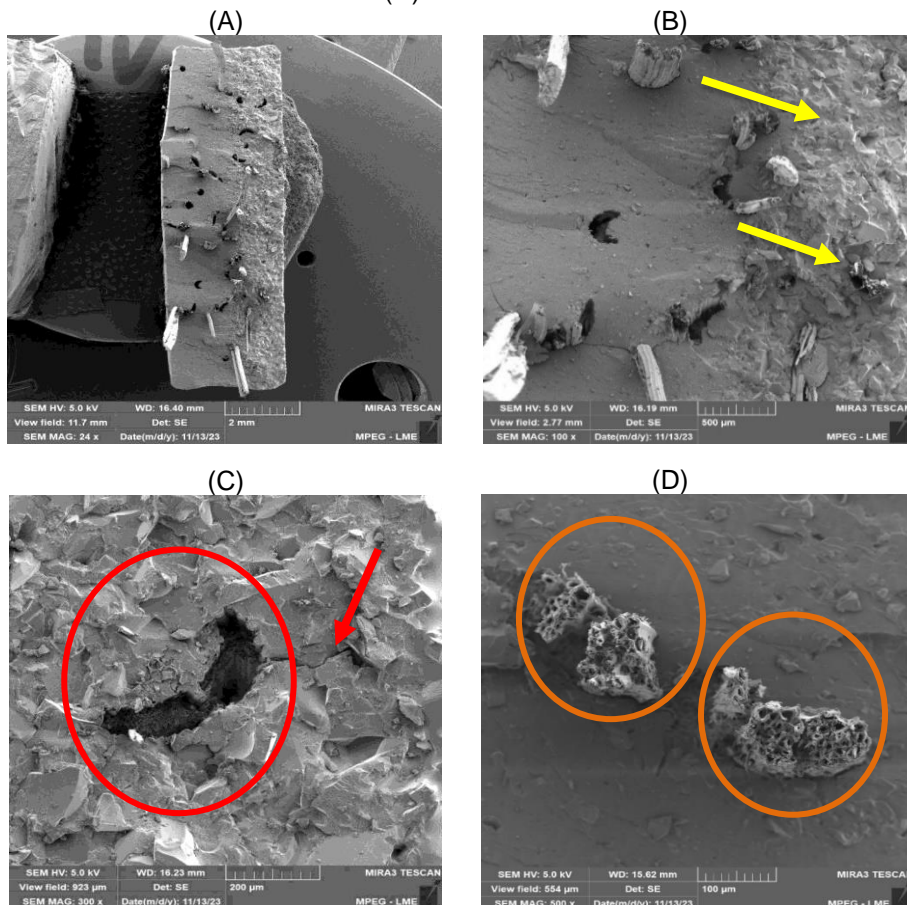
Fonte: Autora, 2024.

Observa-se a análise da fractografia, Figura 34, do corpo de prova com 3% de FS 15 mm (Figura A), pode-se notar várias imperfeições e fraturas (seta amarela) que

pode ser resultante do descolamento da fibra em relação à matriz, “pull out”, (circulados de branco) como mostra o aumento de 100 x (Figura B), o que é caracterizado por uma baixa adesão na interface fibra/matriz, indicando uma fragilidade adquirida pelo compósito como encontrado no trabalho de Barbosa (2018). Entretanto, é novamente notado a predominância de fibras de sisal (setas vermelhas), que sugere uma boa resistência mecânica à tração do material compósito. Pode-se identificar fibrilas (circuladas de amarelo) e a presença de marcas de rio e estrias radiais (setas laranja), o que pode ter ocasionado princípio de trincas no material.

A Figura 35 apresenta a microscopia da superfície da fratura dos corpos de prova híbrido com as porcentagens de 2% de fibra de sisal (15 mm) e 20% de particulado de escória de alto-forno.

Figura 35 - (A) Fratura do CP híbrido 2% e 20%, (B) análise em aumento de 100x, (C) análise em aumento de 300x e (D) análise em aumento de 500x



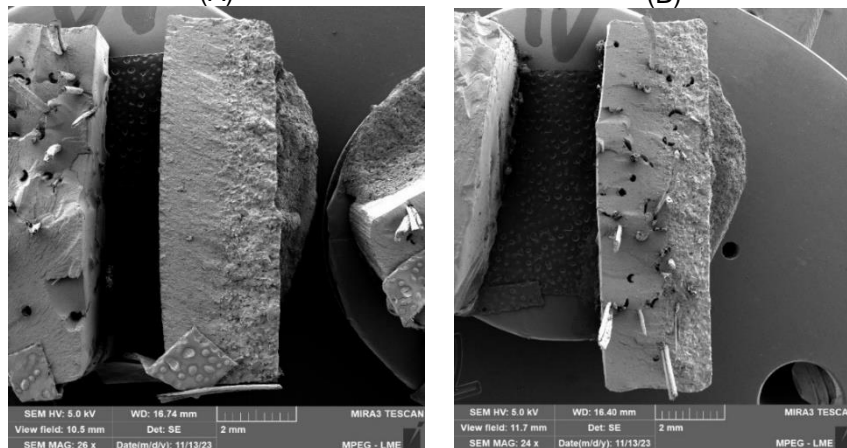
Fonte: Autora, 2024.

A Figura 35 mostra a superfície das fraturas do compósito híbrido com 2% de fibra de sisal e 20% de escória de alto-forno. A análise revela uma superfície de fratura

com numerosas fibras rompidas (indicadas pelos círculos laranja), que indica boa aderência da fibra na matriz, em relação a força dos ensaios mecânicos, e novamente fenômenos de descolamento das fibras da matriz, “*pull out*”, (indicados pelo círculo vermelho), o que pode comprometer a resistência dos compósitos.

As análises fractográficas evidenciam uma superfície profundamente irregular (seta amarela). Essa complexa irregularidade é resultado provável da sedimentação que ocorre devido às flutuações na porcentagem de escória de alto-forno (EAF) presente no material em estudo. Este fenômeno sutil revela a intrincada interação entre os elementos constituintes e as condições de fabricação. Esta sedimentação também foi possível identificar na Figura 30, com porcentagens de resíduo de escória. A Figura 36 mostra a comparação de sedimentações dos compósitos 20% EAF e híbrido, com as mesmas porcentagens de resíduo.

Figura 36 - (A) Fratura do CP 20% EAF e (B) fratura do CP híbrido (2% FS e 20% EAF)

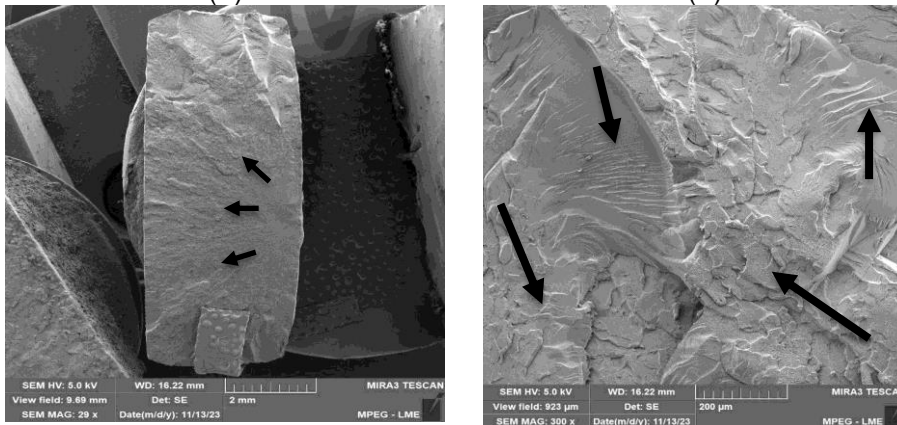


Fonte: Autora, 2024.

É possível observar na Figura 36 os compósitos com a mesma porcentagem de resíduo obtiveram uma sedimentação igualada, também é possível observar que no CP híbrido, houve uma predominância de fibras no lado oposto da sedimentação.

A Figura 37 apresenta a microscopia da superfície da fratura dos corpos de prova com a matriz plena.

Figura 37 - (A) Fratura do CP matriz plena e (B) análise em aumento de 300x



Fonte: Autora, 2024.

Na análise microestrutural, Figura 37, verificou-se que o corpo de prova com matriz plena exibe uma boa homogeneidade, além de apresentar uma coesão sólida entre seus constituintes. Durante o processo morfológico, observou-se uma ocorrência mínima de pontos críticos de enfraquecimento, como bolhas de ar e fraturas internas no material. Na imagem (A) pode-se observar a propagação da fratura da matriz, de acordo com as imperfeições na superfície, assim como marcas de rio e estrias radiais (setas pretas).

4.2.4. Ensaio de resistência à chama

Os resultados dos ensaios de inflamabilidade horizontal dos compósitos poliméricos estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de Flamabilidade

RESÍDUO	TAXA DE PROPAGAÇÃO (mm/min)
MP	36,837 ± (0,269)
EAF 10%	32,272 ± (0,130)
EAF 20%	32,328 ± (0,137)
EAF 30%	23,292 ± (0,257)
HÍBRIDOS 2% - 20%	30,000 ± (0,312)

Fonte: Autora, 2024.

Conforme mostra a Tabela 5, é possível observar que houve uma redução da taxa de queima (mm/min) dos compósitos à medida que aumentou a quantidade de resíduos na matriz polimérica. A matriz de poliéster empregada na fabricação dos

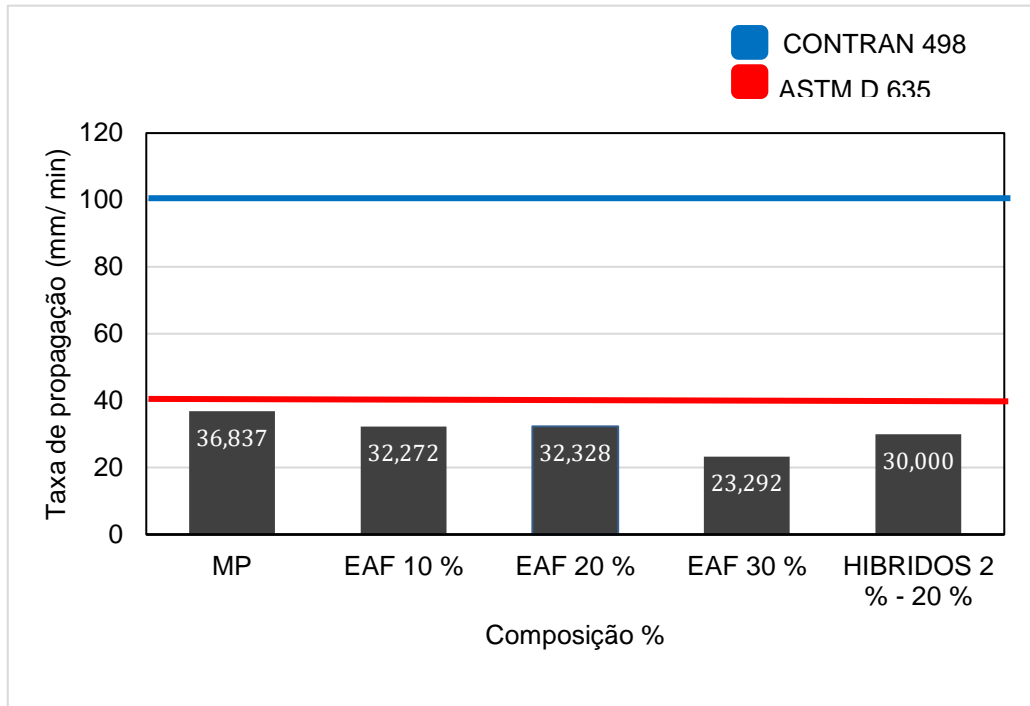
compósitos demonstrou ser apropriada, pois exibiu uma taxa de propagação de apenas 36,837 mm/min, inferior cerca de 8% à norma ASTM D 635, que estabelece um limite de 40 mm/min.

Os CP's com 30% de EAF, foram os que tiveram a menor taxa de queima, em comparação a regulamentação CONTRAN 498, que estabelece especificações para a taxa de propagação no setor automotivo de 100 mm/min, houve uma redução de aproximadamente 77%. Já os compósitos híbridos apresentaram uma redução satisfatória em relação a matriz, com uma redução de aproximadamente 18% e de 70% em relação as normas do CONTRAN 498, provavelmente devido a presença de matéria inorgânica como o mineral Quartzo presente no resíduo, como Morais (2019) diz em seu trabalho, são menos suscetíveis a chama, auxiliam na retardação da propagação das mesmas e contribuem para a criação de compósitos com maior resistência quando submetidos ao fogo. Como no trabalho de Alencar (2022), a presença de óxidos como Fe_2O_3 , $CaCO_3$ e SiO_2 no material facilita a decomposição térmica dos carbonatos, estes óxidos hidratados liberam água estrutural quando atingem a temperatura de desidratação, promovendo assim a retardação da propagação de chamas.

Outro fator determinante para essa redução reside no aumento da quantidade de reforço inserido, o que conseqüentemente resulta em uma diminuição proporcional da quantidade de resina poliéster utilizada. Essa redução na composição do material contribui de forma significativa para a redução do tempo de propagação de chama.

A menor presença de resina poliéster não apenas diminui a inflamabilidade do composto, mas também influencia positivamente outras propriedades, como estabilidade térmica. Essa otimização na formulação do material evidencia a importância da relação entre os componentes na obtenção de características desejadas, como a resistência ao fogo, em aplicações específicas. De acordo com Alencar (2022), a adição de partículas inorgânicas de baixa inflamabilidade pode reduzir a quantidade de material combustível disponível para a propagação, explicando a diminuição progressiva na taxa de queima à medida que o teor de partículas aumenta. A Figura 38 mostra um gráfico comparativo das taxas de propagação dos corpos de prova com as normas ASTM D 635 e CONTRAN 498.

Figura 38 - Gráfico de taxa e propagação mm/min em comparação com ASTM D 635 e CONTRAN 498.



Fonte: Autora, 2024.

Observa-se que todos estabeleceram uma propagação menor, dentro do recomendado. O CP híbrido teve uma redução no tempo de propagação de chama em comparação a MP, porém o valor do tempo de propagação é superior ao CP de EAF30% (com o melhor tempo), isto pode ser associado a fibra de sisal presente neste compósito, onde os compostos orgânicos presentes na fibra auxiliam na propagação da chama.

A Tabela 6 apresenta um comparativo entre a taxa de propagação de chamas com compósitos, por meio de ensaio de flamabilidade horizontal, encontrados nas literaturas.

Tabela 6 - Dados comparativos do resultado do trabalho com a literatura.

MATERIAIS	TAXA DE PROPAGAÇÃO (mm/mim)	FONTE
EAF 30%	23,292	Este trabalho
Híbridos 2% - 20%	30,000	Este trabalho
Polietileno (PE)	15,200	ASTM D 635
Polietileno Tereftalato (PET)	192,000	ASTM D 636
-	100,000	CONTRAN 498
Resíduo de Minério de Cobre 30%	21,248	Gomes 2023
Resíduo de cobre 30%	14,810	De Sousa 2022
Resíduo de caulim 30%	14,810	De Sousa 2022
Resíduo de minério de ferro 30%	0,610	Almeida 2020
Resíduo de lama vermelha 30%	17,880	Oliveira <i>et al</i> 2020
Híbridos lama vermelha 30% - sisal	14,310	Oliveira <i>et al</i> 2020
Híbridos lama vermelha 20% - sisal	14,730	Oliveira <i>et al</i> 2020

Fonte: Autora, 2024.

Com base nos dados apresentados, constata-se que tanto os materiais produzidos neste estudo quanto os encontrados na literatura exibem resultados satisfatórios. A taxa de queima revelou-se inferior ao limite máximo exigido pelas normas, ASTM D 635 e CONTRAN 498, classificando-os como HB para a ASTM D 635 e apontando para um impacto positivo da incorporação dos resíduos na matriz de poliéster. Contudo, é importante considerar outros aspectos, tais como a quantidade de resíduos utilizados, o método de fabricação e as propriedades físicas e químicas tanto dos resíduos quanto da resina empregada (Almeida, 2020).

Assim é possível concluir que as maiores incorporações de reforço de materiais inorgânicos ajudam no processo de retardo de chamas, enquanto os materiais orgânicos podem disseminar a propagação.

5. CONCLUSÃO

Os compósitos fabricados com fibra de sisal e escória de alto-forno, utilizando moldes de silicone sem compressão, demonstraram uma homogeneidade satisfatória, com mínimas imperfeições, como bolhas e vazios.

As análises morfológicas e mineralógicas dos resíduos revelaram características que possivelmente influenciaram no desempenho das propriedades físicas, mecânicas e de inflamabilidade dos compósitos fabricados, tais como o tamanho e formato das partículas e a presença de minerais como quartzo.

O ensaio de massa específica conduzido por picnometria revela que a fibra de sisal apresenta uma massa específica de $1,295 \text{ g/cm}^3$, enquanto o resíduo de escória de alto-forno registra $3,013 \text{ g/cm}^3$. Ambos os valores estão em conformidade com os dados disponíveis na literatura, indicando a eficácia do ensaio realizado.

Os ensaios físicos revelaram que os compósitos contendo escória de alto-forno demonstraram uma significativa diminuição nos valores de porosidade aparente e absorção de água em comparação com a matriz plena. Por outro lado, os compósitos com fibra de sisal apresentaram valores maiores de porosidade aparente e absorção de água. Os CP híbrido apresentam resultados menores que os da matriz plena em relação a absorção de água e porosidade aparente. A massa específica aparente dos materiais aumentou com a introdução dos reforços na matriz plena.

Os ensaios de tração realizados nos compósitos de fibra de sisal e escória de alto-forno revelaram que nenhum dos corpos de prova alcançou um Limite de Resistência à Tração (LRT) superior ao da Matriz Plena (MP). O corpo de prova contendo 3% de fibra de sisal demonstrou a maior resistência à tração entre os compósitos, atingindo $33,598 \text{ MPa}$. Vale ressaltar que, mesmo não agindo como um reforço efetivo, este compósito desempenhou o papel de carga de enchimento.

A análise da superfície de fratura dos compósitos revelou características associadas ao processo de fratura, destacando-se o descolamento das fibras ("*pull-out*"), formação de trincas e sedimentação dos resíduos. Esses aspectos impactam a resistência mecânica dos compósitos.

O teste de flamabilidade horizontal conduzido conforme a norma ASTM D 635 classificou os materiais fabricados como HB (padrão de critérios de resistência a chama, da norma ASTM D 635). A composição com 30% de EAF obteve resultados

satisfatórios, atribuídos às fases mineralógicas da EAF. As taxas de propagação foram inferiores ao limite máximo estabelecido pelo CONTRAN, registrando uma redução de 76,71% em relação ao padrão exigido.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões para o trabalho são:

- Investigar o impacto do aumento das proporções do resíduo de EAF nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos fabricados;
- Realizar tratamentos químicos nas fibras de sisal visando avaliar suas propriedades;
- Utilizar fibras de sisal contínuas no compósito, sob as mesmas proporções 1%, 2% e 3%;
- Avaliar outros ensaios mecânicos nos compósitos fabricados, como impacto e flexão, com a finalidade de obter mais respostas das propriedades dos materiais compósitos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 570**: standard test method for water absorption of plastics. Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 635**: standard test method for rate of burnin or extent and time of burning of plastics in a horizontal position. Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638**: standard test method for tensile properties of plastics, astm international, west conshohocken, pa, Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790**: flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 792**: standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2734**: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.

ALENCAR, Krishana Carvalho de. **Compósitos de matriz polimérica com resíduos da construção e demolição (RCD) e fibras de sisal**. 2022. 74 f. Trabalho de Conclusão De Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2022.

ALMEIDA, Bianca Mendes. **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de materiais cimentícios geopoliméricos produzidos a partir de metacaulim e escória de alto-forno**. 2022. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2022.

ALMEIDA, Gisele Marciel de. **Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

ALMEIDA, Lucas Rezende. **Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro em compósitos de matriz polimérica**. 2020. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2020.

ALREFAI, R. *et al.* **A review on the production of thermo-plastic starch from the wastes of starchy fruits and vegetables**. Elsevier, 2022. p. 89–104.

AMARO, Daniel Ricardo Araújo. **Compósito de matriz metálica de alumínio com incorporação de pó de aciaria elétrica fabricado via metalurgia do pó**. 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ANJOS, Janne Caroline Silva dos. **Reaproveitamento de resíduos do processo siderúrgico do ferro gusa (escória de alto-forno) na elaboração de argamassas não estruturais**. 2021. 88 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos (PPGEP/ITEC), Universidade Federal do Pará, 2021.

ANDRETTI, Moacir. **Características de escórias siderúrgicas**. LinkedIn. 2019. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/caracter%C3%ADsticas-de-esc%C3%B3rias-sider%C3%BArgicas-moacir-andretti/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BARBOSA, Karla Suellen Lino. **Incorporação de fibras curtas de bambu (bambusa vulgaris) e resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica: resistência à tração e fractografia**. 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências e Tecnologia com ênfase em Mecânica) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2018.

BRASL. Decreto-lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa Do Brasil**, Brasília, DF: Presidência da República, 2010.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981.

BETELIE, A. Abera *et al.* Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio. **AIMS Materials Science**, v. 6, n. 6, p. 985–996, 2019.

CALLISTER JÚNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 944 p.

CALLISTER JÚNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e tecnologia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 944 p.

CARDOSO, Milena Soares; SANTOS, Adailson Feitoza de Jesus. Prospecção tecnológica de patentes depositadas para máquinas de desfibrar sisal (*Agave sisalana*). **Bahia Análise & Dados**, v. 31, n. 2, p. 214-237, 2021.

CHEN, Yi-Chen *et al.* The study on the properties and TCLP of GGBFS-based heavy-metal-contaminated soil geopolymer. **Crystals**, v. 12, n. 7, p. 900, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst12070900>. Acesso em: 12 fev. 2024.

CHUROCOF, João Paulo Anselmo. Substituição de agregado graúdo natural por escória de alto-forno como agregado graúdo para fabricação de concreto. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 8, p. 356-367, 2022.

COELHO, Hellem Cristina Mendonça. **Compósitos poliéster com particulados argilosos: caracterizações mecânicas e flamabilidade**. 2022. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Mercado do sisal**. Brasília, jun. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-sisal/item/21122-sisal-analise-mensal-junho-2023>. Acesso em: 07 fev. 2024.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução nº 498, de 29 de julho de 2014**. Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos nacionais ou importados. Brasília, DF, 2014.

COSTA, D. S. **Caracterização de matérias compósitos de matriz poliéster e fibra de bambu, sisal e vidro e híbridos bambu/sisal, bambu/vidro e sisal/vidro**. 2012. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

COSTA, W. F. S.; CHOQUE FERNANDEZ, O. J.; SOUSA, M. S. C. Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro Carajás para aplicação industrial. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 28., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2019.

DANIEL, Brenda Thayssa Figueira. **Avaliação da altura do leito de sinterização de finos de minério de ferro em um reator vertical de leito fixo para a produção de sínter**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mineral) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2018.

EL BANNA, Wassim Raja. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (*musa sapientum, musacae*)**. 2017. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2017.

ENTENDA o que são compostos polimérico. Barueri, SP: Polyexcel, 2021. Disponível em: <https://polyexcel.com.br/noticias-produtos/entenda-o-que-sao-compostos-polimericos/>. Acesso em: 21 de fev. 2024.

ESTRUTURA e propriedades dos materiais poliméricos. São Paulo: USP, 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4348273/mod_resource/content/1/PMT3100_2017-Un12-Polimeros-v3.0.pdf. Acesso em: 12 fev. 2024.

VALDT, Felipe de Hollanda *et al.* Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo bbsg com a incorporação de fibra de sisal. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA*, 25.; *REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*, 48., 2023, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, PR: UFSC, 2023.

FARIAS, Dorivani Cohen. **Compósitos híbridos com fibras de bambu (bambusa vulgaris) e lama vermelha**: efeito do tratamento químico na resistência à tração dos compósitos. 2019. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mineral) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2019.

FOSTER, Alan; ROBERTO, Samanta Souza; IGARI, Alexandre Toshuro. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE*, 2016, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2016.

FORTIS, Mariana De Souza. 2013. 79 f. Conteúdo Digital Para Ensino De Análise E Interpretação De Falhas Mecânicas. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Programa de Mestrado Profissional em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013.

GALUPPO, Mariana Vilela. **Estudo do emprego da escória granulada de alto-forno na massa cerâmica de revestimento**. 2020. 113 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Sustentáveis) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2020.

GOMES, Anne Velloso Sarmento; COSTA, Ney Róblis Versiani; MOHALLEM, Nelcy della Santana. Os Tecidos e a Nanotecnologia. *Química Nova na Escola*, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 288-296, 2016. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38_4/03-QS-43-15.pdf. Acesso em: 30 dez. 2023

GOMES, Leandro Vale. **Resíduos de minério de cobre e madeira (*erisma uncinatum*) em compósitos poliméricos**: caracterizações físicas, mecânica e inflamabilidade. 2023. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

GOMES, Saulo Salles. **Processos de materiais compósitos de matriz polimérica para aplicações em aeronaves**. 2020. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Tecnologia em Materiais) – Departamento de Ensino Geral, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2020.

GONÇALVES, Eduardo. **Termofixos e termoplásticos**. São Carlos, SP: DEMa/UFSCar, 2021. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/2021/08/12/termofixos-e-termoplásticos/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

GUIMARÃES, Michele Carolina dos Santos. **Estudo da viabilidade técnica de reciclagem de escória de refino secundário e utilização em forno elétrico a arco**. 2022. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2022.

GUIMARÃES, Renata Barbosa. **Estudo da solubilidade de incrustações formadas por gel coat no processo de produção do mármore sintético**. 2021. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Curso de Química Industrial, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacao/relatorio-de-sustentabilidade-2020/>. Acesso em: 17 mai. 2023.

KELES, Karen Costa. **Influência da basicidade da escória de alto-forno como adição ao concreto**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

LAZARINI, Rafael Gouveia. **Pré-tratamento de fibras de bagaço de cana-de-açúcar e seu uso em altos teores em compósitos com polipropileno via mistura**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12656>. Acesso em: 08 fev. 2024.

LI, Yan; MAI, Yiu-Wing, YE, Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2037–2055, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00101-9). Acesso em: 06 mar. 2024.

LITAIFF, Hannah Alagoas. **Influência da mercerização em fibras de malva nas propriedades físico-mecânicas de compósito à base de polipropileno**. 2023. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Curso de Engenharia de Materiais, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

LOTFI, Amirhossein *et al.* Natural fiber-reinforced composites: a review on material, manufacturing, and machinability. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**,

Austrália, v. 34, n. 2, p. 238-284, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0892705719844546>. Acesso em: 17 dez. 2023.

LOW, Darren Yi Sern *et al.* Recent developments in nanocellulose-reinforced rubber matrix composites: a review. **Polymers**, v. 13, n. 4, p. 1-35, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/4/550>. Acesso em: 18 jan. 2024.

MARQUES, Francisco Andson. **Análise experimental de reparo de compósitos**. 2016. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais,) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, 2016.

MARTIN, Adriana R. *et al.* Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade agave sisalana. **Polímeros**, São Carlos, SP, v. 19, p. 40-46, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100011>. Acesso em: 10 jan. 2024.

MARTINS, Maria Alice; KIYOHARA, Pedro Kunihiro; JOEKES, Inés. Scanning electron microscopy study of raw and chemically modified sisal fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 94, n. 6, p. 2333-2340, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.21203>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MELO, Júlio Eustáquio. **Madeira: características e aplicações**. Brasília: LPF, 2002.

MATOS, Rochelle Morais. **Obtenção e caracterização de compósito termoplástico de amido de milho com fibras de sisal curtas**. 2023. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2023.

MERLINI, Claudia. **Ciência e tecnologia de compósitos poliméricos**. São Paulo: Artliber Editora, 2021.

MICHELIN, Michele *et al.* Nanocellulose production: exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry. **Molecules**, v. 25, n. 15, p. 1-36, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/15/3411>. Acesso em: 17 fev. 2024.

MIRA, Maria do Rosário Gonsalves. **Plástico, design e sociedade: transformações suscitadas pelo material plástico, aplicado ao design de produto na sociedade moderna e contemporânea**. 2021. 377 f. Tese (Doutorado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MORAES, Mario Henrique Moreira de. **Caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica com adição de resíduos sólidos industriais**. 2019. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2019.

MORAES, Mario Henrique Moreira de. **Estudo de ligante geopolimérico obtido a partir de metacaulim e escória granulada de alto-forno**. 2022. 100 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

NICOLAU, Gêssica. **Aspectos gerais de compósitos reforçado com fibras**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Pós Graduação em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/gessicanicolau/aspectos-gerais-de-compsitos-reforados-com-fibras>. Acesso em: 05 jan. 2024.

NEHRING, Victor *et al.* Utilização da escória de alto-forno em materiais cimentícios. *In: A Construção Civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social*. Guarujá, SP: Editora Científica, 2021. p. 323-330.

OLIVEIRA, L. S. *et al.* Compósitos produzidos com resíduo de lama vermelha e fibras naturais: análise de flamabilidade. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 42767 42776, jul. 2020.

OLIVEIRA, Janaina da Costa Pereira Torres de. MACHADO, Maria Clara de Oliveira. Estudo das propriedades mecânicas da resina poliéster cristal. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS E SABERES MULTIDISCIPLINARES, 1., 2022. Volta Redonda. Anais [...]. Volta Redonda, RJ: UFOA, out. 2022. Disponível em: <https://conferenciasunifoa.emnuvens.com.br/tc/article/view/4/2>. Acesso em: 09 jan. 2024.*

OSWALDO CRUZ QUIMICA. **FORTICOM 6100: forticom6100 é uma resina poliéster insaturada Ortofitálica cristal pré-acelerada**. São Paulo, p. 06. 2024

PAGIO, Mariana Zani *et al.* Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 167–186, abr./jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200599>. Acesso em: 05 jan. 2024.

PALMEIRA, Alexandre Alvarenga *et al.* Desenvolvimento de compósito polimérico reforçado com fibras de coco. *In: COLÓQUIO TÉCNICO CIENTÍFICO DO UNIFOA, 15., 2021, Volta Redonda. Anais [...]. Volta Redonda, RJ: UFOA, out. 2021. p. 64-71.*

PECCA, Sérgio Almeida. **Estudos de baixo carbono para indústria siderúrgica no estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo: CETESB, 2018. <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/4ce546ca-73e7-4ff3-bf23-b02defadc906>. Acesso em: 12 fev. 2024.

PEREIRA, Ana Paula dos Santos; RAMOS, Flavio James Humberto Tommasini Viera; SILVA, Marcelo Henrique Prado da. Caracterização estrutural de geopolímeros sustentáveis de escória de aciaria LD e escória de aciaria LF com KOH. **Revista Matéria**, v. 25, n. 3, 2020.

PEREIRA, Larissa de Fátima Chaves. **Simulação por elementos finitos do comportamento mecânico de materiais compósitos reforçados com fibras naturais**. 2018. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências,

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46811?mode=full>. Acesso em: 28 nov. 2023.

PERES. Maria das Neves Pontes Barata; SILVA. Douglas Santos; FUJIYAMA, Roberto Tetsuo. Efeito da adição de fibras de sisal de 15 mm no comportamento mecânico de compósitos de matriz cimentícia com entalhe definido. *In: Ciência e engenharia de materiais: princípios e fundamentos em pesquisa*. Científica Digital, 2022. p. 61-80.

PIMENTEL, Maurício Gomes *et al.* Caracterização da escória de alto-forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. *In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA; SEMANA OFICIAL DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 74.*, 2017, Belém. **Anais [...]**. Belém, 2017. Disponível em: https://www.confex.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/48_cdedafpdriv_suncc.pdf. Acesso em: 28 nov. 2023.

PIMENTEL, Maurício Gomes *et al.* Caracterização da escória de alto-forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2019.

QUEIROZ, Diego Pontes de. **Compósitos de matriz polimérica com resíduos industriais reforçado com fibra de aço**. 2019. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2019.

RADWAN, Mohammed K. H. *et al.* Sustainable ternary cement blends with high-volume ground granulated blast furnace slag–fly ash. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, p. 4751-4785, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01633-4>. Acesso em: 16 nov. 2023.

REIS. Ingrid Moreira. **Influência da granulometria do resíduo de mármore e granito em compósitos poliméricos com fibras vegetais de sisal**. 2019. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia com ênfase em Mecânica) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2019.

REIS, Ingrid Moreira *et al.* Potencial de utilização do resíduo de mármore e granito com fibras de sisal em compósitos de matriz polimérica. *In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 11.*, 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre, RS: Instituto Venturi, 2020.

ROCHA, Denis Rodrigues da. **Estruturas de aeronaves: análise do aumento da utilização de materiais compósitos**. 2020. 49 f. Monografia (Especialização em Ciências Aeronáuticas) – Curso de Ciências Aeronáuticas, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, SC, 2020. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/a6243735-61f1-4744-b2a1-29d786e34e95>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SAKAMOTO, Clóvis. **Resina poliéster insaturado**. São Paulo: SILAEX, [2018?]. Disponível em: <https://silaex.ind.br/resina-poliester>. Acesso em: 26.01. 2024.

SANTOS, Claudio Gouvêa dos. **Materiais compósitos**. Ouro Preto: UFOP, 2019.

SANTOS, Déborah Júlia Costa Dos. **A influência do tratamento alcalino nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de matriz poliéster ortoftálica**. 2023. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2023.

SANTOS, Eryck Eduardo Simplicio dos *et al.* Análise da variação da granulometria da lama vermelha nas propriedades dos compósitos. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 3, p. 1437-1445, maio/jun. 2020.

SANTOS, Robson de Andrade; BRANDÃO, Weliton Neves. **Sisal**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>. Acesso em: 29 jan. 2024.

SAQLAIN, Muhammad *et al.* Desphosphorization in ironmaking and oxygen steelmaking. Aalto University. 2018. disponível em: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201806273570>

SILVA, Maria Célis Pinheiro da *et al.* **Caracterização de escória de alto-forno para fabricação de telhas**. In: Congresso Nacional da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 72., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2017.

SOUSA, Ana Paula Souza de. **Influência dos resíduos do beneficiamento de caulim e cobre nas propriedades físicas, mecânica de impacto e flamabilidade dos compósitos de matriz poliéster isoftálica**. 2022. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2022.

SOUZA, Ricardo Fernandes de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz de poliéster e carga de pó de carnaúba**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

TAN, KhangWei *et al.* An insight into nanocellulose as soft condensed matter: Challenge and future prospective toward environmental sustainability. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 1309-1326, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.402>. Acesso em: 17 fev. 2024.

TAVARES, Janylle Feitosa de Souza. **Estudo da incorporação de resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica**. 2021. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2021.

TEIXEIRA, Luiz Guilherme Muniz. **Caracterização das propriedades mecânicas de um compósito fabricado com resina poliéster e fibra de vidro**. 2021. 57 f. trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2021.

THOMAZ, Eduardo. **Escória de alto-forno**. Rio de Janeiro: IME, 2012. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.pdf. Acesso em: 21 fev. 2024.

VERMA, Manvendra; DEV, Nirendra. Sodium hydroxide effect on the mechanical properties of flyash-slag based geopolymer concrete. **Structural Concrete**, v. 22, p. 368-379, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202000068>. Acesso em: 16 nov. 2023.

VIEIRA, Geovanni da Costa. **Estudo termomecânico da resina poliéster/nanopartículas de haloisita com aditivo retardante de cura**. 2022. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.

WANG, Guodong *et al.* Experimental study and residual fatigue life assessment of corroded high-tensile steel wires using 3D scanning technology. **Engineering Failure Analysis**, v. 124, p. 105335, 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World steel in figures**. Belgium: [s.n.], 2020.

ZWAWI, Mohammed. A review on natural fiber bio-composites, surface modifications and applications. **Molecules**, v. 26, n. 2, p. 1-28, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/2/404>. Acesso em: 17 fev. 2024.