

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM**

MAJORIE ANACLETO BERNARDO

**DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE POLI (CLORETO DE VINILA)
REVESTIDOS COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER E FIBRA DE VIDRO COM
DIFERENTES CAMADAS DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO**

CRICIÚMA

2023

MAJORIE ANACLETO BERNARDO

**DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE POLI (CLORETO DE VINILA)
REVESTIDOS COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER E FIBRA DE VIDRO COM
DIFERENTES CAMADAS DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais da Universidade do Extremo Sul
Catarinense - UNESC

Orientador: Prof. Dr. Matheus Vinicius
Gregory Zimmermann
Coorientador: Prof. Dr. Adriano Michael
Bernardin

CRICIÚMA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B523d Bernardo, Majorie Anacleto.

Desenvolvimento de tubos de poli (cloreto de vinila) revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro com diferentes camadas de areia descartada de fundição / Majorie Anacleto Bernardo. - 2023.

74 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2023.

Orientação: Matheus Vinicius Gregory Zimmermann.

Coorientação: Adriano Michael Bernardin.

1. Tubos de PVC. 2. Tubos - Propriedades mecânicas. 3. Fibra de vidro - Desempenho mecânico. 4. Areia de fundição. 5. Tubulação - Testes. I. Título.

CDD 23. ed. 621.8672

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Majorie Anacleto Bernardo

Desenvolvimento de tubos de poli (cloreto de vinila) revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro com diferentes camadas de areia descartada de fundição.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 31 de julho de 2023.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



EDUARDO JUNCA

Data: 11/04/2024 14:43:50-0300

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

Prof. Dr. Eduardo Junca

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



OSCAR RUBEM KLEGUES MONTEDO

Data: 11/04/2024 15:09:53-0300

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

Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



DAIANE ROMANZINI

Data: 11/04/2024 19:57:00-0300

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

Profª Drª Daiane Romanzini

Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo!

Aos meus pais Cláudio Camilo Bernardo e Maria Aparecida Anacleto Bernardo, que sem eles nada tem sentido.

Aos Professores Prof. Dr. Matheus Vinicius Gregory Zimmermann e Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin, pelo apoio, paciência e confiança e excelente orientação.

Ao funcionário do I-Parque, Maicon Israel da Silva pelas muitas ajudas técnicas durante o desenvolvimento das amostras.

Ao PPPGEM, por toda a infraestrutura disponibilizada e pela oportunidade que me foi dada para fazer este mestrado.

Ao colega Rubens Oliveira, da empresa Vetro, pelas muitas discussões técnicas e grande colaboração em todas as etapas do trabalho, obrigada pela humildade em compartilhar seu conhecimento.

Aos professores Eduardo Junca, Oscar Rubem Klegues Montedo e Daiane Romanzini que gentilmente se disponibilizaram para compor a banca examinadora.

A todos os meus amigos e amigas, colegas de universidade, professores e funcionários que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Tudo passa...

Todas as coisas na terra passam.

Os dias de dificuldade passarão.

Os dias de tristeza e os dias de felicidade, são lições necessárias.

Assim, façamos a nossa parte o melhor que pudermos,
aproveitando cada segundo, cada minuto, que por certo, também passará.

Tudo passa...

Exceto Deus.

Deus é o suficiente!

Chico Xavier

RESUMO

O uso de particulados é uma prática comum na produção de componentes em compósitos, para a fabricação de tubulações, e tem como finalidades aumentar a rigidez e baratear o custo do material, proporcionando a produção de tubulações em material compósito competitivo no mercado. Dentro dos contextos combinados de sustentabilidade, materiais compósitos e aproveitamento de resíduos industriais, o uso de areia descartada do processo de fundição (ADF) é uma alternativa para a fabricação de tubos de poli (cloreto de vinila) revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro com diferentes camadas de areia descartada de fundição. O uso de areia como particulado de enchimento em compósitos é utilizado para assegurar as propriedades mecânicas necessárias requeridas por normas, bem como uma alternativa de redução de custos e prover uma cadeia de valor aos resíduos industriais. Assim, neste trabalho foram produzidos tubos de poli (cloreto de vinila) (PVC) revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro com diferentes camadas de ADF. O principal objetivo da adição da ADF é gerar um aumento na espessura da parede do tubo e consequentemente aumentar a rigidez. Neste sentido, foi avaliada a influência da adição da ADF sobre as propriedades mecânicas, fazendo um comparativo em 3 configurações diferentes, sendo elas: tubos de PVC revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro sem adição de ADF, tubos de PVC revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro com adição de 1 e 2 camadas de ADF. A fabricação dos tubos foi realizada por laminação manual. A ADF foi caracterizada por granulometria e teor de finos, análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raio X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e termogravimetria (TG). Os tubos foram caracterizados através dos ensaios de compressão diametral, flexão de três pontos e pressão hidrostática, além de análises com microscópio ótico e caracterizações físicas (densidade, teor de vazios e absorção de água). Observou-se pela análise morfológica e caracterização física dos compósitos, que o aumento do teor de ADF promoveu maior densidade e teor de vazios ao compósito e consequentemente, maior capacidade de absorção de água. Os resultados dos testes de pressão hidrostática mostraram que a adição de areia reduziu a pressão de ruptura do tubo de 5,3 bar quando comparado ao tubo sem areia. Foi observado que a incorporação da ADF aos tubos promoveu uma resistência mecânica superior, quando comparado ao tubo sem a adição da ADF, como também ocasionou um aumento da rigidez dos tubos com aumento dos teores de ADF adicionados durante o processo de fabricação.

Palavras-chave: Tubos reforçados com fibra de vidro, areia de fundição, compósitos, propriedades mecânicas

ABSTRACT

The use of particulates is a common practice in the production of composite components, for the manufacture of pipes, and its purposes are to increase rigidity and lower the cost of the material, providing the production of pipes in composite material that is competitive on the market. Within the combined contexts of sustainability, composite materials and the use of industrial waste, the use of discarded sand from the foundry process (ADF) is an alternative for the manufacture of polyvinyl chloride tubes coated with polyester and fiberglass composites. glass with different layers of discarded foundry sand. The use of sand as a filling particulate in composites is used to ensure the necessary mechanical properties required by standards, as well as an alternative to reduce costs and provide a value chain for industrial waste. Thus, in this work poly(vinyl chloride) (PVC) tubes were produced coated with polyester and fiberglass composites with different layers of ADF. The main objective of adding ADF is to increase the thickness of the tube wall and consequently increase stiffness. In this sense, the influence of the addition of ADF on the mechanical properties was evaluated, making a comparison in 3 different configurations, namely: PVC pipes coated with polyester and fiberglass composites without adding ADF, PVC pipes coated with composites made of polyester and fiberglass with the addition of 1 and 2 layers of ADF. The tubes were manufactured by manual rolling. The ADF was characterized by particle size and fines content, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and thermogravimetry (TG) analysis. The tubes were characterized through diametral compression, three-point bending and hydrostatic pressure tests, in addition to analyzes with an optical microscope and physical characterizations (density, void content and water absorption). It was observed through the morphological analysis and physical characterization of the composites that the increase in ADF content promotes greater density and void content in the composite and consequently, greater water absorption capacity. Hydrostatic pressure test results showed that the addition of sand reduced the pipe's burst pressure by 5.3 bar when compared to the pipe without sand. It was observed that the incorporation of ADF into the tubes promoted superior mechanical resistance, when compared to the tube without the addition of ADF, but also caused an increase in the rigidity of the tubes with an increase in the ADF content added during the manufacturing process.

Keywords: Fiberglass reinforced tubes, foundry sand, composites, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos compósitos poliméricos, conforme a disposição do reforço.....	18
Figura 2. Tubulações produzidas em compósito (A), acoplamentos em poliéster reforçado com fibras de vidro (B)	22
Figura 3. Método por transferência de resina para reparos de tubulações enterradas.....	23
Figura 4. Representação esquemática das camadas utilizadas nos compósitos para aplicações em tubulações.....	24
Figura 05. Utilização de areia na fabricação de tubos em PRFV.....	25
Figura 06. Imagens MO das superfícies do (a) tecido de fibra de vidro bidirecional e (b) manta de fibra de vidro multidirecional.....	28
Figura 07. Identificação e composição das camadas utilizadas para a preparação dos compósitos.....	29
Figura 08. Ilustração da distribuição das camadas constituintes dos tubos RPVC.....	30
Figura 09. Fluxograma das etapas de fabricação do tubo RPVC sem adição de resíduo de areia descartada do processo de fundição.....	32
Figura 10. Fluxograma das etapas de fabricação do tubo RPVC com adição de resíduo de areia descartada do processo de fundição.....	33
Figura 11. Imagem do equipamento e montagem do sistema para o teste de pressão hidrostático.....	40
Figura 12. Sequência de distinção de camadas e constituintes das amostras para o teste de pressão hidrostática.....	41
Figura 13. Fluxograma das etapas de fabricação da amostra de RPVC sem adição de resíduo de ADF, para o teste de pressão hidrostática.....	43
Figura 14. Fluxograma das etapas de fabricação da amostra de RPVC com adição de resíduo de ADF (1 e 2 camadas), para o teste de pressão hidrostática.....	44
Figura 15. Análise de distribuição granulométrica da ADM.....	46
Figura 16. Microscopia obtida por MEV da ADF em diferentes magnificações (a) 150x (b) 500x.....	47
Figura 17. Análise de DRX e FRX da areia descartada de fundição.....	47
Figura 18. Propriedades térmicas observadas por termogravimétrico da ADF.....	48
Figura 19. Micrografias obtidas por MEV, na região da fratura, após o teste de resistência à tração da amostra (a) PC1; (b) PC2; (c) PC3 e (d) PC4.....	53

Figura 20. Análise de Microscopia óptica das amostras: A - amostra sem adição de ADF (PC1), B - amostra com adição de 1 camada de ADF (PC 2); C e D - amostras com adição de 2 camadas de ADF (PC 3).....	55
Figura 21. Curvas do Percentual de absorção de água versus o tempo de imersão em água das amostras PC1, PC2, PC3.....	58
Figura 22. Sequência do ensaio de compressão diametral. Sendo (A) a amostra PC1, (B) amostra PC2 e (C) amostra PC3.....	62
Figura 23. Curvas obtidos do ensaio de rigidez, das amostras PC1, PC2, PC3.....	63
Figura 24. Sequência do ensaio de flexão por três pontos: (A) PC1, (B) amostra PC 2 e (C) amostra PC 3. E apresentação das primeiras deformações aparentes no corpo-de-prova e o efeito Whitening na região da aplicação da força e deformação atingida no corpo de prova.....	65
Figura 25. Tubos rompidos após o ensaio hidrostático: (A) amostra sem adição de areia de fundição, (B) amostra com adição de 1 camada de ADF e (C) com adição de 2 camadas de ADF.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Propriedades mecânicas das fibras de vidro do tipo E-Glass e S-Glass.....	20
Tabela 02. Tabela de distribuição granulométrica.....	45
Tabela 03. Composição mineral da areia descartada de fundição.....	48
Tabela 04. Propriedades físicas de areia de fundição e dos compósitos com e sem adição de ADF.....	49
Tabela 05. Propriedades mecânicas de resistência à tração dos compósitos laminados com e sem adição de areia de fundição.....	51
Tabela 06. Propriedades mecânicas de resistência à flexão dos compósitos com e sem adição de ADF.....	54
Tabela 07. Propriedades físicas (densidade aparente, teórica, teor de vazios e espessura dos tubos produzidos) dos tubos em material compósito, com e sem ADF.....	57
Tabela 08. Resultados dos ensaios de compressão diametral.....	59
Tabela 09. Valores mínimos de rigidez em N/m ² requerido para 5% de deformação diametral.....	60
Tabela 10. Deformações diametraais dos níveis A e B, em percentagem.....	61
Tabela 11. Deformações diametraais obtidas experimental para níveis A e B.....	61
Tabela 12. Valores da força máxima, deslocamento máximo, tensão (σ) e deformação (ϵ) no ensaio de flexão por três pontos para tubos sem e com adição de areia. Sendo: média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv)	64
A Tabela 13. Resultados obtidos nos testes de pressão hidrostática.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADF – Areia Descartada de Fundição

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

cm – Centímetro

°C – Graus Celsius

g – Grama

kgf – Quilograma força

km – Quilômetro

m – Metro

mm – Milímetro

N/m² - Newton por metro quadrado

Na₂O – Óxido de sódio

MgO – Óxido de magnésio

MPa – Mega Pascal

Pa – Pascal

PVC – Poli (cloreto de vinila)

RPVC – Poli (cloreto de vinila) revestido com compósito de fibras de vidro

PRFV – Polímero reforçado com fibra de vidro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 POLI (CLORETO DE VINILA) COMO COMPONENTE ESTRUTURAL	16
3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS	16
3.2.1 Fase Matriz e de Reforço	17
3.2.2 Matriz de resinas poliméricas termorrígidas	19
3.2.3 Fibras de vidro e suas propriedades	19
3.2.4 Fatores que influenciam nas propriedades dos materiais compósitos	20
4. POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) APLICADOS EM TUBULAÇÕES	21
5. AREIA DESCARTADA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO – ADF	26
6. MATERIAIS E MÉTODOS	28
6.1 MATERIAIS	28
6.2 MÉTODOS	29
6.2.1 Análise configuracional de compósitos laminados de poliéster, fibra de vidro e resíduo de ADF	29
6.2.2 Produção dos tubos de PVC revestidos por PRFV	30
6.3 CARACTERIZAÇÕES	34
6.3.1 Caracterização da areia descartada de fundição (ADF)	34
6.3.1.1 Densidade	34
6.3.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	34
6.3.1.3 Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raio X (FRX)	34
6.3.1.4 Termogravimetria (TG)	34
6.3.1.5 Análise granulométrica da areia de descarte de fundição - ADF	34
6.3.2 Caracterização dos compósitos na forma de placas e tubos em RPVC	35
6.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura	35
6.3.2.2 Resistência mecânica dos compósitos	35
6.3.2.3 Densidade	36
6.3.2.4 Absorção de água	37

6.3.3 Resistência mecânica - Compressão diametral.....	38
6.3.4 Resistência mecânica - Flexão por três pontos em tubos.....	38
6.3.5 Microscópica óptica (MO)	40
6.3.6 Pressão hidrostática.....	40
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
7.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO - ADF.....	45
7.1.1 Distribuição granulométrica.....	45
7.1.2 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.....	46
7.1.3 Difratoograma de raios X da areia descartada de fundição.....	47
8.AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA CONFIGURACIONAL DE COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRO E ADF.....	49
8.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRO E ADF.....	49
8.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRO E ADF NA FORMA DE PLACAS.....	50
8.3 CARACTERIZAÇÃO DOS TUBOS EM MATERIAL COMPÓSITO COM E SEM A ADIÇÃO DE ADF.....	54
8.3.1 Análise de Microscopia Óptica - MO.....	54
8.3.2 Densidade e teor de vazios.....	56
8.3.3 Absorção de água.....	57
8.3.4 Resistência mecânica - Compressão diametral.....	59
8.3.5 Resistência mecânica - Flexão por três pontos.....	63
8.3.6 Pressão Hidrostática.....	65
9. CONCLUSÕES.....	68
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos têm como definição principal: Materiais que consistem em duas ou mais fases distintas, sendo uma delas uma matriz e a outra uma fase dispersa. Essas fases podem ter propriedades diferentes e são combinadas para criar um material com características específicas, muitas vezes superiores às suas partes individuais. Materiais compósitos são projetados para otimizar propriedades como resistência, rigidez, leveza e são amplamente empregados em diversas aplicações industriais (CALLISTER, 2018).

Para melhorar ou modificar as propriedades dos materiais compósitos e assim atender os requisitos técnicos particulares das indústrias são adicionadas cargas de enchimento na matriz do material em forma de partículas ou fibras. Estas cargas podem ser metálicas, poliméricas, cerâmicas e outras (CALLISTER, 2018).

Dentro da classe de materiais compósitos, há os polímeros revestidos com fibra de vidro usados para a fabricação de tubos, sendo usado desde 1950, pela indústria petrolífera como uma alternativa econômica, duradora, com maior resistência à corrosão, que conseguem suprir as exigências normativas do mercado (QUINAYÁ, 2017).

Na vasta variedade de polímeros disponíveis no mercado, o popular PVC - poli (cloreto de vinila) apresenta vantagens como a resistências a corrosão, resistência química, leveza e baixa rugosidade interna. No entanto é importante considerar as limitações do PVC -poli (cloreto de vinila), como fragilidade, faixa limitada de temperatura de operação (QUINAYÁ, 2017).

Para atender as exigências das normas técnicas como aos valores mínimos de tensão axial, pressão de ruptura e rigidez, além de atender as especificações dimensionais de tubos utilizados em transporte de água potável, água de processo, saneamento básico e drenagem, o PVC é revestido com fibra de vidro externamente para adicionar resistência mecânica e demais propriedades específicas ao uso (VETRO, 2022).

Porém para alcançar os requisitos solicitados pelas normativas, se faz a adição extra de material, ou seja, uma carga de enchimento para se obter maiores valores de rigidez. A rigidez por sua vez possui uma relação direta com a espessura da parede do tubo e esta adição de material extra se torna economicamente inviável, se for feita apenas com a adição de fibra de vidro, além de tornar os demais requisitos superdimensionados (BARROS, 2007).

A adição de particulados como a areia é vista como uma solução que possibilita a concepção de projetos mais rentáveis e ecologicamente corretos, contribuindo para a geração

de uma cadeia de valor (BARROS, 2007).

O uso de cargas minerais para reduzir custos é importante para que os materiais compósitos possam competir no mercado com diferencial de propor uma solução parcial a problemas ecológicos e ambientais, tais como o esgotamento progressivo dos recursos naturais, geração de subprodutos tóxicos, e diminuição da capacidade regenerativa do ecossistema (DALPIASZ, 2006).

O destino final dos resíduos industriais causa preocupação aos órgãos ambientais e empresas. Para se obter uma destinação mais nobre para esses resíduos, pesquisas e trabalhos estão sendo desenvolvidos em escala mundial, para propor o reaproveitamento como matéria-prima na fabricação de novos produtos, demonstrando a importância da reciclagem na proteção ambiental e desenvolvimento tecnológico (DE CASTRO, GRISON, GASPARIN, 2020).

Em seus estudos os autores Paludo e Santana (2014), demonstraram que a utilização de areia de fundição como substituinte a areia natural, acrescido de resíduos poliméricos viabilizam a reutilização dos rejeitos das indústrias metal mecânica com a finalidade de diminuição da presença destes resíduos nos aterros industriais, desta forma, minimizando, os danos causados ao meio ambiente pela remoção de um recurso natural.

Porém o uso de areias como carga normalmente diminui a resistência ao impacto e a fadiga e contribui para a propagação de fissuras do material, por outro lado a carga adicionada favorece a estabilidade dimensional, retração de resfriamento e gera aumento da rigidez (DALPIASZ, 2006).

Neste contexto, o presente trabalho contempla uma visão que trata os resíduos finais da indústria de fundição como matéria-prima de valor agregado, para a fabricação de tubos de poli(cloreto de vinila) – PVC reforçado externamente com compósito de poliéster e fibras de vidro – RPVC, com carga de resíduo de areia de fundição para atingir as propriedades mecânicas requeridas por normas e para redução de custos, gerando uma transformação em bens úteis à sociedade, otimizando a cadeia de valor do uso da areia de fundição, contribuindo para a proteção do meio ambiente, reduzindo os impactos negativos oriundos do descarte da areia de fundição nos aterros industriais.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver tubos de poli (cloreto de vinila) revestidos com compósitos de poliéster e fibra de vidro – RPVC, com diferentes camadas de areia de fundição.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar preliminarmente o efeito de diferentes configurações e concentrações dos constituintes (resina poliéster, fibra de vidro e ADF) nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

Analisar a influência da incorporação de areia descartada do processo de fundição nas propriedades físicas e mecânicas das tubulações de RPVC.

Analisar a influência de diferentes camadas de resíduo de areia descartada do processo de fundição nas propriedades físicas e mecânicas das tubulações de RPVC.

Avaliar a influência da adição de areia descartada do processo de fundição em tubos de RPVC na resistência mecânica pelo ensaio de pressão hidrostática.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 POLI (CLORETO DE VINILA) COMO COMPONENTE ESTRUTURAL

O poli (cloreto de vinila) - PVC é um material é muito utilizado em estruturas da construção civil, nas indústrias automotivo e indústria farmacêutica devido às suas excelentes propriedades como: peso leve, alta resistência, dureza, estabilidade dimensional e baixo custo, tais vantagens tornam o poli (cloreto de vinila) uma escolha adequada como matriz em materiais compósitos devido à sua combinação de propriedades físicas, químicas, mecânicas e econômicas (ANJOS, 2018).

De acordo com autor Rubin (2014) antigamente usavam-se muitas tubulações de chumbo e ferro para transporte de efluentes que sofriam deterioração e colocavam em dúvida a qualidade do efluente. Com o desenvolvimento do PVC, as manutenções, reparos ficaram mais versáteis e econômicas.

Porém o uso deste material denota atenção por conta do ressecamento que provoca rachaduras e trincas que ocasiona diminuição na resistência mecânica, esses pontos de atenção geram desafios por busca de novos materiais para transporte de efluentes residenciais, industriais e esgotos (RUBIN, 2014).

O autor Carvalho (2011) em suas pesquisas fez uso de revestimento com fibra de vidro nos polímeros, a fim de amenizar as eventuais deficiências de instabilidade dimensional e baixa resistência, mantendo a atração comercial dos polímeros não reforçados como: o baixo custo de processamento, entrando em concorrência direta com os outros materiais de engenharia tradicional.

O presente autor afirma que as modificações obtidas com a inclusão das fibras de vidro transformam os plásticos de baixo custo em materiais de engenharia, pois passam a ter propriedades muito apreciadas, como: alta rigidez, boa resistência a temperaturas, boa estabilidade dimensional, boa resistência ao impacto e a tração, e boa resistência à fadiga (CARVALHO, 2011).

3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos ganharam nos últimos anos uma considerável atenção dos principais centros de pesquisa do mundo. Sua principal definição é: um material constituído de

dois ou mais materiais insolúveis entre si e apresentam propriedades superiores às dos componentes individuais como resultado de sua combinação (CALLISTER, 2019).

O setor industrial se beneficiou muito com o desenvolvimento dos materiais compósitos, inicialmente empregados para fins militares. Hoje, a sua utilização se dá em vários setores: automobilístico, eletroeletrônicos, esportivo, sanitário, agrícola, informática, embalagens, construção civil etc. (NUNES et.al, 2018).

Um detalhe importante para a análise técnica dos materiais compósitos é que, ao contrário dos metais cujas propriedades não mudam com a direção da carga (isotrópicos) os compósitos devido às suas propriedades complexas, adquirem diferentes propriedades com a variação das direções de carga (anisotropia). Nos materiais compósitos essas variações de propriedade ocorrem principalmente nas direções de tensão vertical e horizontal do material, garantindo um comportamento chamado de ortotrópico (ALMEIDA, 2008).

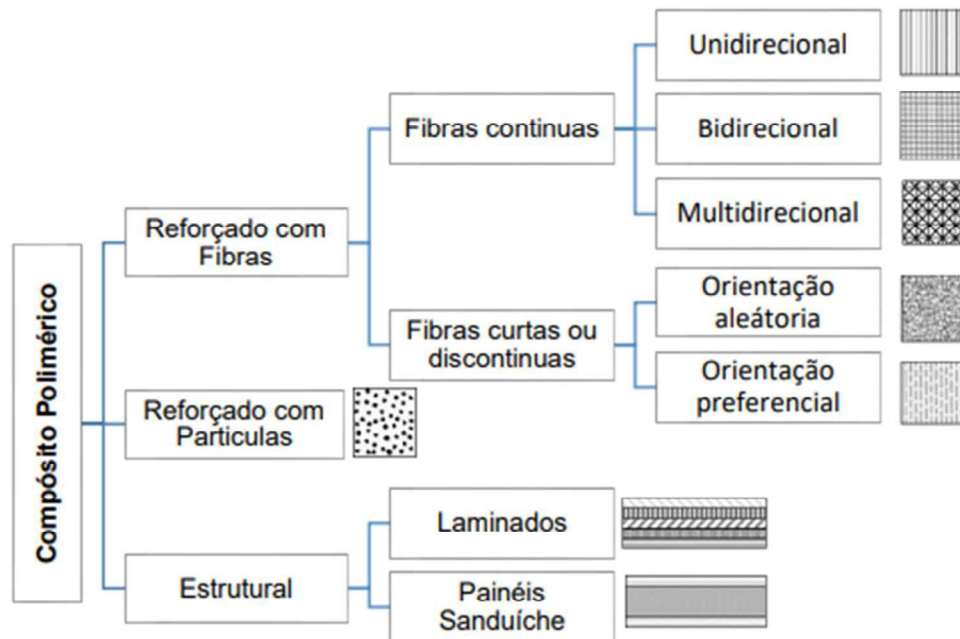
3.2.1 Fase Matriz e de Reforço

Os autores Callister e Rethwisch (2016) afirmam que a fase matriz é a fase responsável pela combinação dos materiais constituintes de um composto, e é responsável por transmitir a força mecânica externa aplicada ao compósito a fase de reforço, também tem a função de isolar o reforço ao ambiente externo, protegendo-o de possível efeito de corrosão. O reforço é o principal constituinte responsável por assegurar as propriedades mecânicas, ou seja, tem a função de resistir as forças externas projetadas ao material.

O reforço pode ser usado em forma de fibras longas, curtas ou particulados e ter origem sintética como origem natural (QUINAYA, 2017). Em relação as fibras, podem ser classificadas como: fibras curtas, cujo aquelas que a relação comprimento/diâmetro da fibra é menor que 1, as fibras longas são aquelas cuja relação comprimento/diâmetro da fibra é maior que 1, tendendo a infinito e por último o reforço particulado possui a razão entre comprimento/diâmetro próximo de 1. A orientação das fibras dentro de um compósito pode ser aleatória ou orientada (CALLISTER, RETHWISCH; 2016).

A Figura 01 apresenta a classificação dos compósitos em relação ao tipo de reforço e as suas orientações.

Figura 01. Classificação dos compósitos poliméricos, conforme a disposição do reforço.



Autor: Adaptado de Ramos, 2005.

Desta forma os compósitos feitos de reforços particulados ou de fibras curtas, com orientação aleatória possuem um comportamento isotrópico quando submetidos a um esforço externo, ou seja, a resposta deste carregamento da fase matriz para a fase de reforço serão praticamente as mesmas, independentemente da orientação do carregamento (JURUMENHA, REIS; 2011).

Os autores Pereira et. al (2021), afirmam que os compósitos ditos como compósitos estruturais usam reforços em formatos de tecidos (mantas) com um único tipo de fibra ou um misto de duas fibras (híbridos).

Os compósitos podem ter como reforços: particulados, metais e fibras. Os reforços particulados podem ser esféricos, cúbicos, tetragonais ou de qualquer outra forma regular ou irregular. Já os fibrados tem a fibra como elemento de reforço que se caracteriza o fato de possuir um comprimento muito maior que as dimensões da seção transversal. A necessidade de camadas isotrópicas levou a construção de compósitos com laminados fibra/metal, que associa as vantagens dos materiais metálicos e dos materiais poliméricos (JURUMENHA, REIS, 2011).

Ramos (2005) evidenciou que a escolha do reforço causa influência direta na resistência dos materiais compósitos, a seleção do tipo de reforço juntamente com a matriz apropriada é essencial para assegurar que o material compósito atenda as condições específicas de carga e ambiente de uso.

Como é notado há várias aplicações para as diferentes matrizes e reforços de compósitos poliméricos, os mais utilizados, e que serão estudados nesta pesquisa, são os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de vidro (JURUMENHA, REIS, 2011).

3.2.2 Matriz de resinas poliméricas termorrígidas

De acordo com a seleção da resina (poliéster, epóxi e outras) as tubulações podem trabalhar em diferentes faixas de temperatura, sendo a resina poliéster com variação aproximada de -50°C a 150°C a resina epóxi com variação aproximada -20°C a 80°C e níveis de agressividade do ambiente de operação (BARROS, 2007).

As resinas de utilização mais comuns como matriz são epóxi ou poliéster. As resinas em epóxi promovem melhor resistência mecânica e as resinas de poliéster tem um valor menor, o que permite a fabricação de dutos com menor custo, mesmo com espessuras maiores (BRAGANÇA et. al., 2006).

3.2.3 Fibras de vidro e suas propriedades

A fibra de vidro é classificada como um material inorgânico a base de silicato e é a fibra mais utilizada como reforço de materiais compósitos com matriz polimérica. As suas principais características são alta resistência mecânica e química, baixo custo e em alguns casos boas propriedades dielétricas (NAIK et. al, 2013).

Porém quando comparada com outras fibras, a fibra de vidro possui certas limitações, como: menor módulo de elasticidade, alta densidade específica, desgaste mais sensível e baixa resistência à fadiga. Estas limitações podem ser ajustadas com a composição química da fibra de vidro, que dependerá da aplicação e otimização do projeto desejado (MOKHOTHU, JHON, 2015).

Existem 5 tipos de fibras de vidro, a saber: AR-glass (Alkali-resistant glass recomendado para reforço de matrizes cimentícias diversas, como concreto, argamassas, pré-fabricados, vergalhões estruturais), C-glass (Chemical glass recomendado para aplicações em ambientes corrosivos, tanto ácidos quanto alcalinos), E-glass (electrical glass, isolante elétrico é o mais empregado para reforço dos plásticos devido ao seu ótimo custo-benefício), S-glass (recomendado para aplicações aeroespaciais, balísticas e blindagens) (NAIK et. al, 2013).

Entretanto, as fibras de vidro mais utilizadas são as do tipo E-glass e S-glass. A principal diferença entre estes dois tipos de fibra está na propriedade térmica e temperatura máxima de

operação contínua. A fibra do tipo E-glass é indicada para aplicações com temperaturas de até 600°C e a fibra do tipo S-glass pode ser usada em temperaturas mais elevadas com aproximadamente 900°C (NAIK et. al, 2013). A Tabela 01 apresenta as propriedades mecânicas das fibras de vidro dos tipos “E” e “S”.

Tabela 01. Propriedades mecânicas das fibras de vidro do tipo E-Glass e S-Glass.

Propriedades	<i>E- Glass</i>	<i>S - Glass</i>
Densidade (kg/m ³)	2,54	2,49
Módulo de Young (GPa)	72,4	85,5
Tensão máxima de Resistencia à tração (MPa)	3447	4585
Coefficiente de expansão térmica (µm/m/°C)	5,04	5,58

Autor: Adaptado de Naik et. al, 2013.

3.2.4 Fatores que influenciam nas propriedades dos materiais compósitos

Em geral, são vários os fatores que influenciam o comportamento mecânico dos compósitos. Desde o processo de fabricação utilizado, a forma com que os carregamentos são aplicados, a presença de condições de umidade, as frações de volume, as propriedades da interface, a presença de vazios, além das propriedades dos elementos constituintes do compósito (BARROS, 2010).

Defeitos no processo de fabricação também causam danos no material, como a presença de micro vazios ou bolhas, que por sua vez afetam significativamente a resistência mecânica. Os micros vazios podem agir como concentradores de tensões, reduzindo as propriedades mecânicas dos compósitos (BARROS, 2010).

A boa adesão é responsável por fazer com que a interface transfira com efetividade as tensões da matriz para o reforço, quando o compósito é solicitado a forças externas, requisito este de extrema importância para tubulações de transporte de fluidos (BARROS, 2010).

O autor Rosenow (1984), cita que para as tubulações de plástico reforçado com fibras as tensões e as deformações dos tubos dependem significativamente da ordem de empilhamento das lâminas de fibra. Em outra pesquisa os autores Xia, Takayanagi, Kemmochi (2001) estudaram a variação da distribuição de tensão, que se relaciona a espessura da parede do tubo, concluindo que os tubos com paredes grossas apresentam uma distribuição de tensão não-linear de modo descontínuo. Para os tubos de parede fina, o comportamento se apresentou linear e contínuo.

Em seus estudos o autor Natsuki (2003) criou um modelo teórico para determinação da

tensão e o tipo de dano em tubos submetidos a carga de viga em ensaio de flexão em três pontos e constatou que a sequência de empilhamento das lâminas tem influência na durabilidade do tubo.

4. POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) APLICADOS EM TUBULAÇÕES

Um dos setores da economia mundial que vem aumentando o seu crescimento de forma acelerada é o setor dos compósitos, e sua utilização tem ganhado grande destaque na aplicação em tubulações para transporte de gás e óleo e seus derivados (MELO, 2011). A utilização de dutos e tubos em PRFV possibilita aliar grande resistência mecânica, maior leveza e uma maior resistência à corrosão quando comparado aos materiais competitivos ao segmento, como os metálicos e concreto.

De acordo com a seleção da resina (poliéster, epóxi ou outras), as tubulações podem trabalhar em diferentes faixas de temperaturas e nos mais variados ambientes agressivos, assim como a combinação de diferentes tipos de fibras e cargas possibilita a construção de tubulações com uma ampla gama de possibilidade mecânicas e estruturais. A configuração das camadas e método de produção destes compósitos também tem uma influência significativa nas propriedades do produto (MELO, 2011).

Tubulações produzidas em material compósito estão ganhando cada vez mais atenção no mercado, principalmente devido suas elevadas propriedades mecânicas e pela facilidade de instalação e manutenção, quando comparado com as tubulações convencionais produzidas em metal ou termoplástico. Na manutenção de redes de tubulações utilizadas no transporte de gás e óleo, o uso de calor (nas formas de solda ou eletrofusão) exige muito controle para evitar explosões decorrentes do produto em transporte. Neste sentido, a manutenção de redes de tubulações em materiais compósitos, utilizando polímeros termofixos reforçados, tem ganhado destaque pois, nesta manutenção é empregado apenas o uso de soldagem química, sem a necessidade do uso de calor ou outra forma de energia (como a eletricidade) para tal atividade, o que diminui consideravelmente o risco nestas operações (GUNOZ, 2022).

O autor Martins (2016) afirma que o uso de polímeros reforçados com fibra de vidro alavancou a fabricação de tubos com grandes diâmetros, que passaram a ser absorvidos pelo mercado da indústria química onde a resistência à corrosão é um dos principais requisitos de projeto. No decorrer dos anos passaram a ser utilizados no mercado de água e esgoto.

Essa flexibilidade de fabricação faz com que os fabricantes tenham condições de atender às variadas exigências de mercado. Atualmente, há disponível diâmetros que variam de 25 mm até 3600 mm, que operam em pressões atmosféricas (MARTINS, 2016).

No entanto, a popularidade dos materiais compósitos tem exercido um impacto ambiental adverso. De acordo com os autores Arsenian e Lebrão (2022) em 2019 mais de 10% dos materiais compósitos são descartados forma indevida, além da falta de leis e normas específicas para o descarte de materiais compósitos, sendo estimado uma perda econômica de 10% do valor da produção de resina de poliéster que perdida durante a produção.

Além das boas propriedades mecânicas do PRFV já apontadas anteriormente, os tubos feitos em PRFV possuem baixa rugosidade superficial de sua parede interna, que reduz as quedas de pressão e facilita o transporte do fluido de interesse (BRANDÃO, 2015).

A Figura 02, mostra tubulações e componentes feitos em polímero reforçado com fibra de vidro.

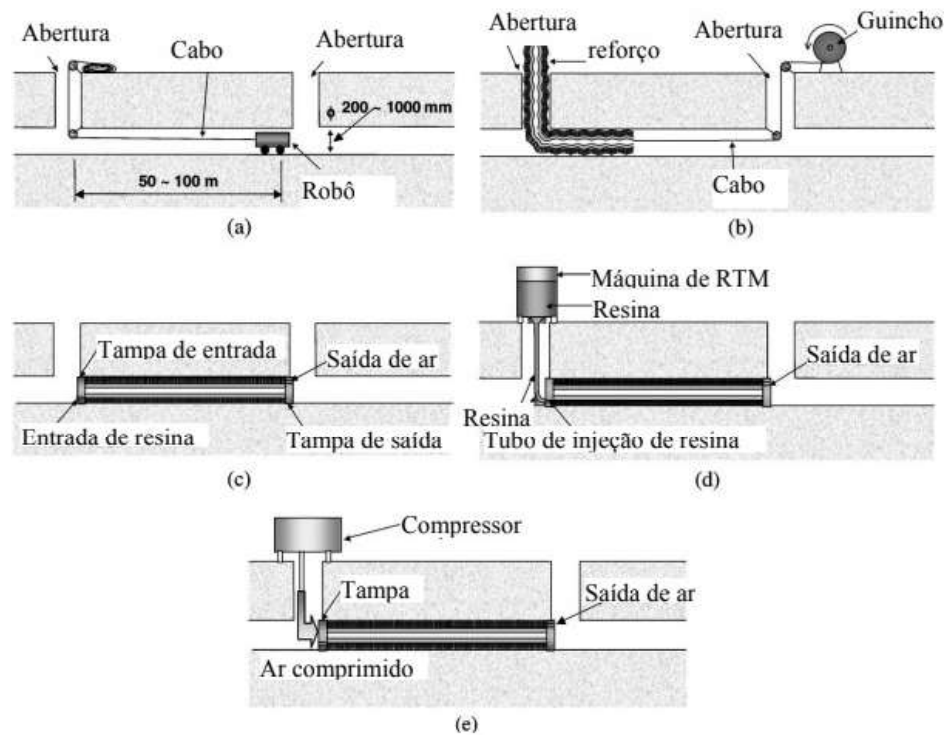
Figura 02. Tubulações produzidas em compósito (A), acoplamentos em poliéster reforçado com fibras de vidro (B).



Fonte: SEM, 2022.

Outro diferencial no uso de dutos PRFV é o seu processo de manutenção. Quando os dutos são enterrados é adotada a moldagem por transferência de resina ou RTM, processo este desenvolvido pelo autor Lee (2002), onde uma pré-forma de fibra é colocada no interior do tubo, conforme Figura 03 (a), (b) e (c) e a resina é injetada sob alguma combinação de pressão e/ou vácuo, sobre a pré-forma de fibra contra a parede do tubo (d) e (e)).

Figura 03. Método por transferência de resina para reparos de tubulações enterradas.



Fonte: adaptado de Lee, 2002.

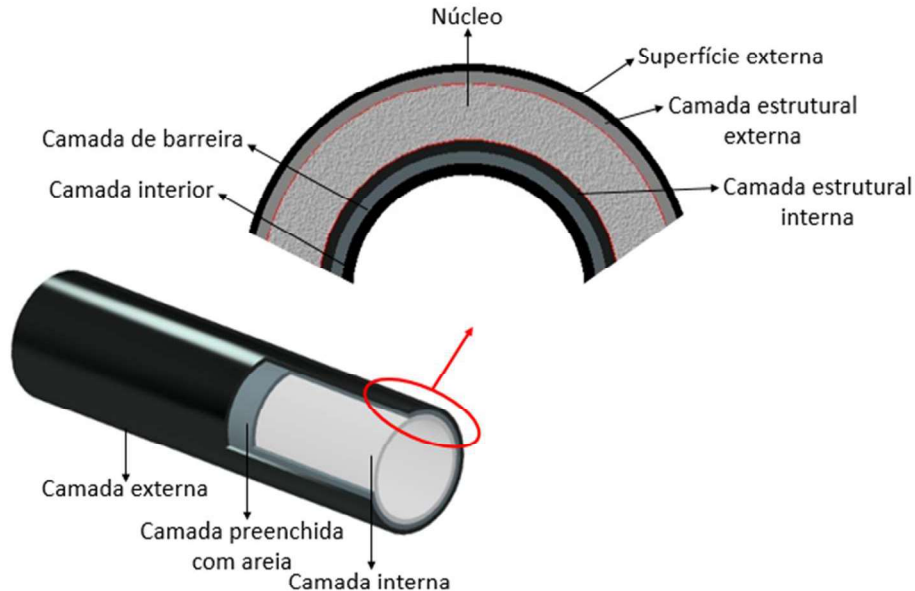
Porém, uma das principais desvantagens de tubos em materiais compósitos, quando comparado aos metálicos ou concreto é a competitividade no custo do mesmo. Para atender aos requisitos de projeto, como rigidez e características estruturais (diâmetro interno e espessura), a utilização de somente resina poliéster e fibra de vidro poderia encarecer muito o produto (MELO, 2010; REIS, 2022). Diante disto, uma alternativa a este problema pode ser solucionada pela inserção de cargas de enchimento na composição do material.

Conhecida como camada de núcleo, na parte interna da tubulação GFRP, é muito comum a incorporação de uma camada de areia impregnada com resina, principalmente em aplicações de tubos enterrados ou subterrâneos (FARRUKH, 2021; BAZLI, 2019). Nestes tubos, produzidos com compósito sanduíche ou também denominado multicamada, paredes mais grossas (espessura) são necessárias para aumentar a rigidez aparente do tubo como uma questão chave para a instalação.

A rigidez aparente do tubo representa a resistência do tubo contra a deflexão do tubo decorrente do carregamento transversal como uma característica física. Neste sentido, o uso de cargas de enchimento são uma alternativa eficiente e barata para utilização na composição de

tubulações (RAFIEE, 2013). A Figura 04, apresenta um desenho esquematizado destas configurações de compósitos multicamadas utilizadas na produção de tubos.

Figura 04. Representação esquemática das camadas utilizadas nos compósitos para aplicações em tubulações.



Fonte: adaptado de Rafiee, 2013.

Neste sentido, a carga de enchimento utilizada no centro do compósito, de acordo como são utilizadas, podem exercer grande influência nas propriedades do mesmo. Cargas de enchimento geralmente são muito utilizadas para diminuir os custos dos produtos. As cargas inertes geralmente diminuem a resistência ao impacto e muitas vezes contribuem para uma maior propagação de trincas, diminuindo também a resistência à fadiga. Por outro lado, a presença de cargas particuladas em sistemas compósitos pode melhorar algumas propriedades do sistema como, por exemplo, estabilidade dimensional, menor retração no resfriamento e maior rigidez.

A areia, material comumente utilizado na produção de tubulações em compósitos, é um material granular que ocorre naturalmente, composto por rochas finamente divididas e partículas minerais. A composição da areia é altamente variável, dependendo das fontes e condições rochosas locais, mas o constituinte mais comum da areia é a sílica (SiO_2), geralmente na forma de quartzo, que, porque de sua inércia química e dureza considerável, é o mineral mais comum resistente às intempéries e não tóxico (SULTANA, 2013).

Segundo Barros (2007), a aplicação de areia em tubos produzidos em compósitos, vide Figura 05, vem sendo utilizada como carga por alguns fabricantes de tubulações, permitindo a concepção de projetos rentáveis e ecologicamente corretos, pois reduz o custo do produto e o

consumo de matéria-prima industrializada. O processo consiste na deposição de camadas de areia durante o processo de *filament winding* ou bobinamento de filamento, processo industrial mais usual para produção de tubos em material compósito.

Figura 05. Utilização de areia na fabricação de tubos em PRFV.



Fonte: Barros, 2007.

Beycioğlu et. al. (2020) reportaram recentemente sobre o uso de cinza volante, como carga de enchimento, em tubos de compósitos de poliéster reforçados com fibra de vidro. Os autores observaram que a cinza volante pode ser um interessante substituto ao uso de areia como carga de enchimento, e que as formulações avaliadas atendem as normas regulamentadoras.

O uso de resíduos pode uma alternativa interessante na composição de compósitos. Alternativamente ao uso da areia convencional, um resíduo que sempre foi alvo de muitas investigações científicas para reuso é a areia descartada do processo de fundição. A areia quimicamente ligada, utilizada no processo de fundição de metais, consiste em 93-99% de sílica e cerca de 1 a 3% de aglutinante químico (SIDDIQUE, 2011).

5. AREIA DESCARTADA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO - ADF

O uso de resíduos sólidos como matéria-prima para os materiais que fazem uso de recursos naturais não renováveis é algo que ganha destaque atualmente, neste contexto, encontra-se a indústria de fundição que em contrapartida é considerada grande fonte de emissão de resíduos sólidos, mesmo com funcionalidade para outros setores produtivos (Reis; Ferreira, 2004).

Um dos resíduos que se destaca é a areia descartada de fundição (ADF), obtido durante os processos de moldagem de peças metálicas. Somente nos EUA ocorre a geração de 15 milhões de toneladas de ADF anualmente (American Foundrymen's Society, 2018) e na Índia, esse número é de 1,71 milhão de toneladas anuais (Siddique; Singh, 2017).

Uma legislação mais atuante nos assuntos relacionados ao meio ambiente faz com que os fabricantes se preocupem em pesquisar sobre a redução do impacto ambiental, diminuição da quantidade de resíduos, substituição de matérias-primas ou do tratamento daqueles que inevitavelmente são gerados durante os processos produtivos (JURUMENHA; REIS, 2011).

A geração de resíduos é inevitável para o processo de fundição, principalmente areia de moldes e machos. Diante deste fato, o interesse por propor soluções na reutilização desta areia também é inevitável uma vez que a quantidade de areia residual é bastante significativa (JURUMENHA; REIS, 2011).

Segundo dados fornecidos pela Associação Brasileira de Fundição, são geradas em média 3 milhões de toneladas de areia descartada de fundição ADF no Brasil. Os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina registram os maiores valores de produção de ADF, sendo de 1.045.000 t/ano. O estado de São Paulo gera aproximadamente 749.000 t/ano e no estado de Minas Gerais são geradas cerca de 709.000 t/ano (CARNIN, 2020).

A predileção ambiental de resíduos de areia descartada do processo de fundição para fabricação de novos produtos requer um conhecimento confiável da composição da areia e das variações da composição do resíduo de areia, principalmente em relação às suas características ambientais. Essas informações, juntamente com um sistema de controle de qualidade eficaz, também são necessárias para a promoção do aproveitamento dos resíduos de areia (JURUMENHA; REIS, 2011).

De acordo com a NBR 15.702 a Areia descartada de fundição (ADF) é definida como areia proveniente do processo produtivo da fabricação de peças fundidas, como areias de macharia, de moldagem, “areia a verde” entre outras areias e classificam-se como classe II,

resíduo não perigoso e livre de mistura com qualquer outro resíduo ou material estranho ao processo que altere suas características (NBR 15.702, 2009).

A areia usada no processo de fundição deve apresentar boa refratariedade, resistência mecânica, permeabilidade adequada e plasticidade além de ser quimicamente inerte aos metais fundidos. A areia precisa possuir boa estabilidade dimensional e térmica a elevadas temperaturas, e por último devem possuir pureza e potencial hidrogeniônico (pH), de acordo com os requisitos dos sistemas ligantes (TORRE, 2004. apud RAFAELLI, 2015).

O reforço particulado apresenta em sua maioria, uma fase mais dura e mais rígida do que a matriz. Que tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula (OLIVEIRA, 2005).

O grau do reforço ou melhora do comportamento mecânico dependerá da ligação da interface matriz/partícula. Para que ocorra um reforço eficaz, as partículas devem estar distribuídas uniformemente ao longo da matriz e as frações volumétricas das fases matriz e partículas são fundamentais para a determinação do comportamento mecânico (OLIVEIRA, 2005).

De acordo com o autor Flowtite (2013) a areia de fundição é considerada de boa qualidade, quando possui o mínimo de 95% de sílica, granulometria predominante de 60 mesh e baixíssima umidade (máximo de 0,50% em peso).

As propriedades mecânicas de resistência à tração e de flexão, possuem relação com vários fatores coligados às características dos agentes ligantes, das condições ambientais e das areias sendo a distribuição granulométrica da areia bem-sucedida promove melhor preenchimento de espaço entre os particulados, melhorando a coesão, visto que o excesso de finos pode ocasionar problemas de fragilidade do material resultante (GIORGINI, LORIS et al.; 2016).

Normalmente, os parâmetros delineados para o controle granulométrico da areia de fundição são o fator de finura, o teor de grãos finos e a distribuição granulométrica. Porém, um ponto importante sobre o tamanho da partícula subatômica e que muitas vezes é negligenciada na busca por melhores propriedades mecânicas é a concentração de grãos em cada peneira de teste padrão ou seu perfil de grãos (GIORGINI, LORIS et al.; 2016).

Os autores Abreu et. al (2010) em seus estudos que avaliaram a influência do módulo de finura que fornece uma medida quantitativa da granulometria do particulado e dos teores de finos de areias de fundição, observaram que quanto menor o módulo de finura, maior é a resistência à tração, confirmando que diferentes módulos de finura oferecem diferentes comportamentos mecânicos.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

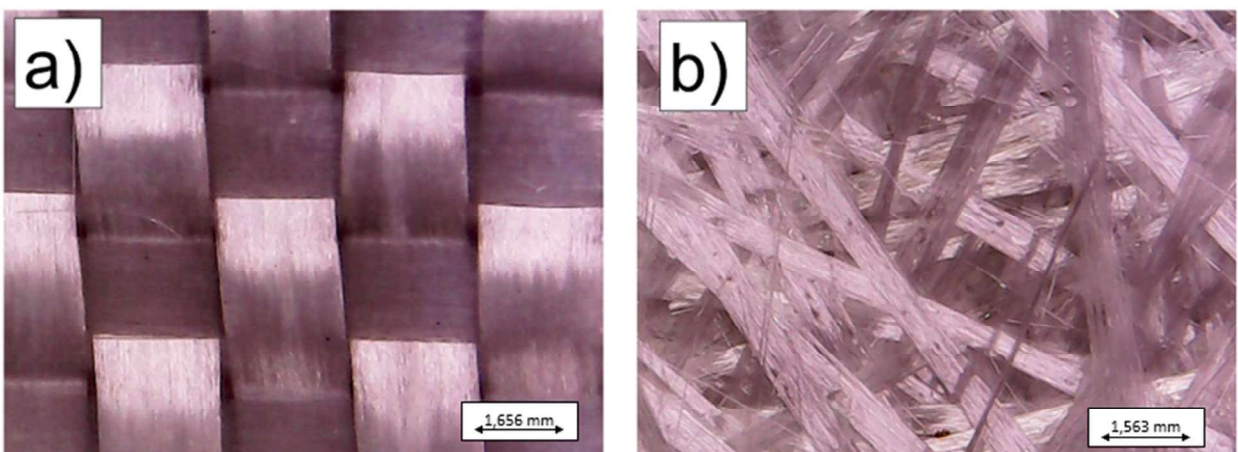
Este trabalho seguiu uma sequência de etapas para a caracterização dos materiais, preparação e avaliação dos compósitos em forma de placas e tubos. Destaca-se que foi mantido as quantidades e orientações de colagem das fibras de vidro durante a preparação dos compósitos, assim como os mesmos percentuais de resina entre as camadas nas tubulações RPVC desenvolvidas neste trabalho.

6.1 MATERIAIS

Para a fabricação dos tubos RPVC foram utilizados tubos poli(cloreto de vinila) -PVC com diâmetro interno de 2 in ou 50 mm, espessura de 2,4 mm e comprimento de 1 m. Resina poliéster insaturada ortoftálica com 30% de estireno e catalisador MEKP à base de metil-etil-etilo (Butanox M500), fornecida pela empresa Redelease Redecenter Materiais Plásticos e Acessórios LTDA. Areia residual de fundição (sem tratamento adicional), fornecida pela empresa WEG de Jaraguá do Sul/SC. Manta multidirecional de fibra de vidro com gramatura de 300 g/m² e tecido bidirecional de fibra de vidro com gramatura de 200 g/m², foram fornecidas pela empresa Texiglass Indústria e Comércio Têxtil. De acordo com o fornecedor, as fibras vidro são compatíveis com a resina de poliéster insaturada, proposta para o uso deste trabalho.

A Figura 06, apresenta as micrografias obtidas por MO das duas fibras de vidro utilizadas neste trabalho, sendo classificadas como tecido bidirecional (a) e manta multidirecional.

Figura 06. Imagens OM das superfícies do (a) tecido de fibra de vidro bidirecional e (b) manta de fibra de vidro multidirecional.



Fonte: A autora, 2023.

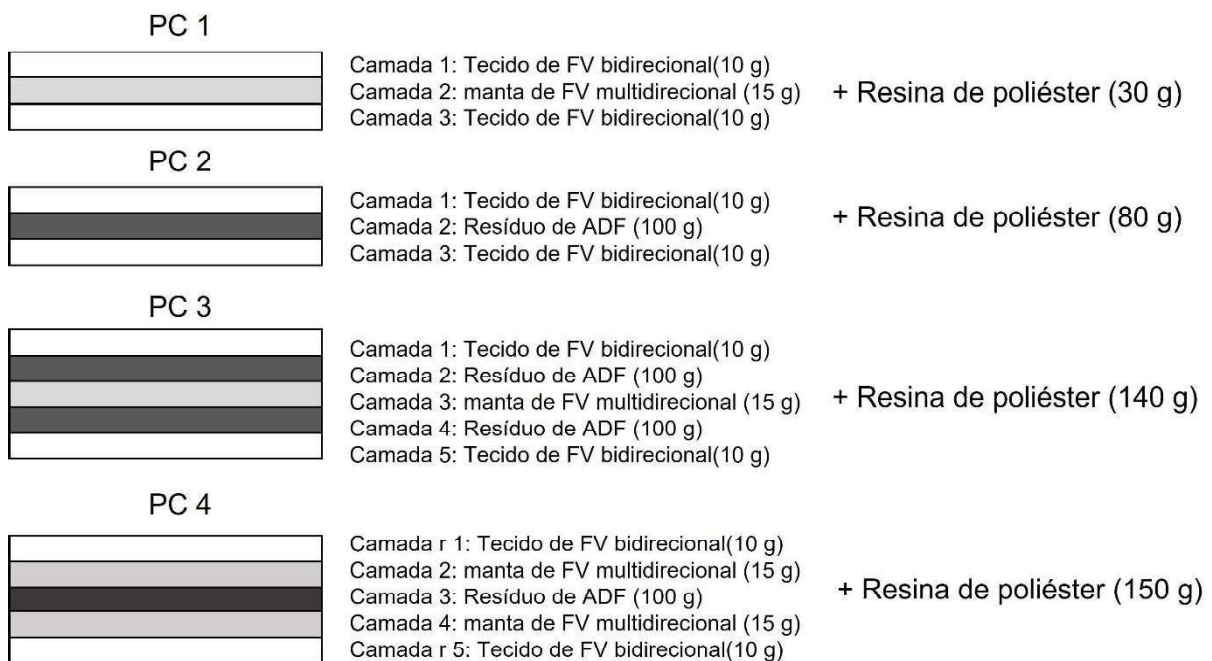
6.2 MÉTODOS

6.2.1 Análise configuracional de compósitos laminados de poliéster, fibra de vidro e resíduo de ADF

Na primeira etapa do trabalho, foi realizada a avaliação preliminar de diferentes configurações de camadas (fases) dos componentes para a produção de compósitos laminados de poliéster, fibra de vidro e resíduo de ADF na forma de placas. Neste sentido, para produção de corpos de prova, a preparação dos compósitos foi realizada por laminação manual (*hand lay-up*) de acordo com as configurações e as quantidades (gramas) mostradas na Figura 07. Um molde de metal, revestido com silicone com dimensões de 200 mm × 150 mm foi utilizado para a produção das amostras.

A espessura dos compósitos variou dependendo do número de camadas utilizadas para a laminação. Após a laminação das camadas, os compósitos foram colocados em estufa térmica a 70 °C por 30 minutos e posteriormente mantidos em ambiente com temperatura controlada de 23 °C por 72 h, para posterior corte da placa em corpos de prova.

Figura 07. Identificação e composição das camadas utilizadas para a preparação dos compósitos.



Fonte: A autora, 2023.

6.2.2 Produção dos tubos de PVC revestidos por PRFV

Foram produzidas três configurações de tubos de PVC revestidos com PRFV, com distintas camadas manta e tecido de fibra de vidro e adição de resina e ADF, com base nos resultados obtidos na seção 4.2.3. Todos os tubos foram moldados por laminação manual (*hand layup*), conforme detalhado na sequência.

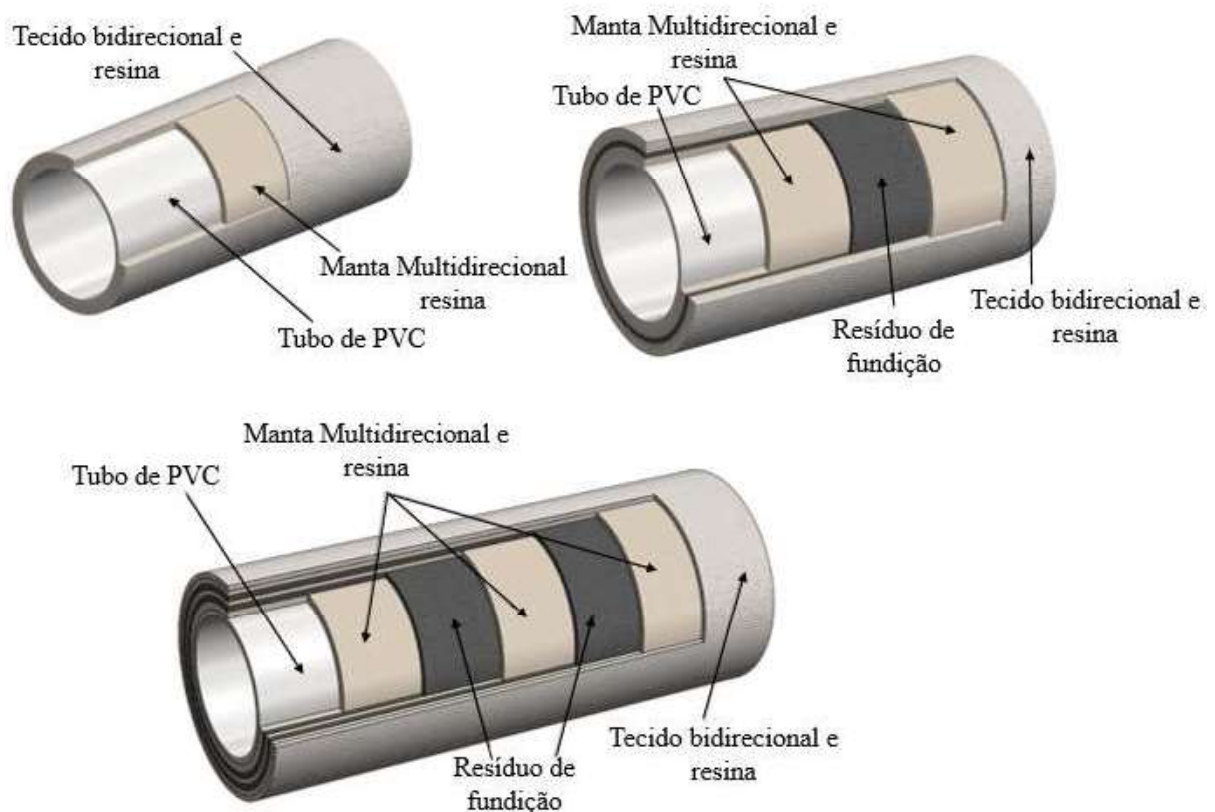
O primeiro tubo de RPVC foi aplicado uma camada de manta multidirecional, resina e tecido bidirecional de fibra de vidro.

No segundo tubo de RPVC, foi adicionada uma camada de ADF entre as camadas intermediárias de resina, manta multidirecional e tecido bidirecional de fibra de vidro.

Por fim, no terceiro tubo de RPVC, foram adicionadas duas camadas de ADF entre camadas intermediárias de resina, manta multidirecional e tecido bidirecional de fibra de vidro.

A Figura 08, ilustra a disposição das camadas de manta multidirecional e tecido bidirecional e ADF, usadas na concepção dos tubos RPVC.

Figura 08. Ilustração da distribuição das camadas constituintes dos tubos RPVC.



Fonte: A autora, 2023.

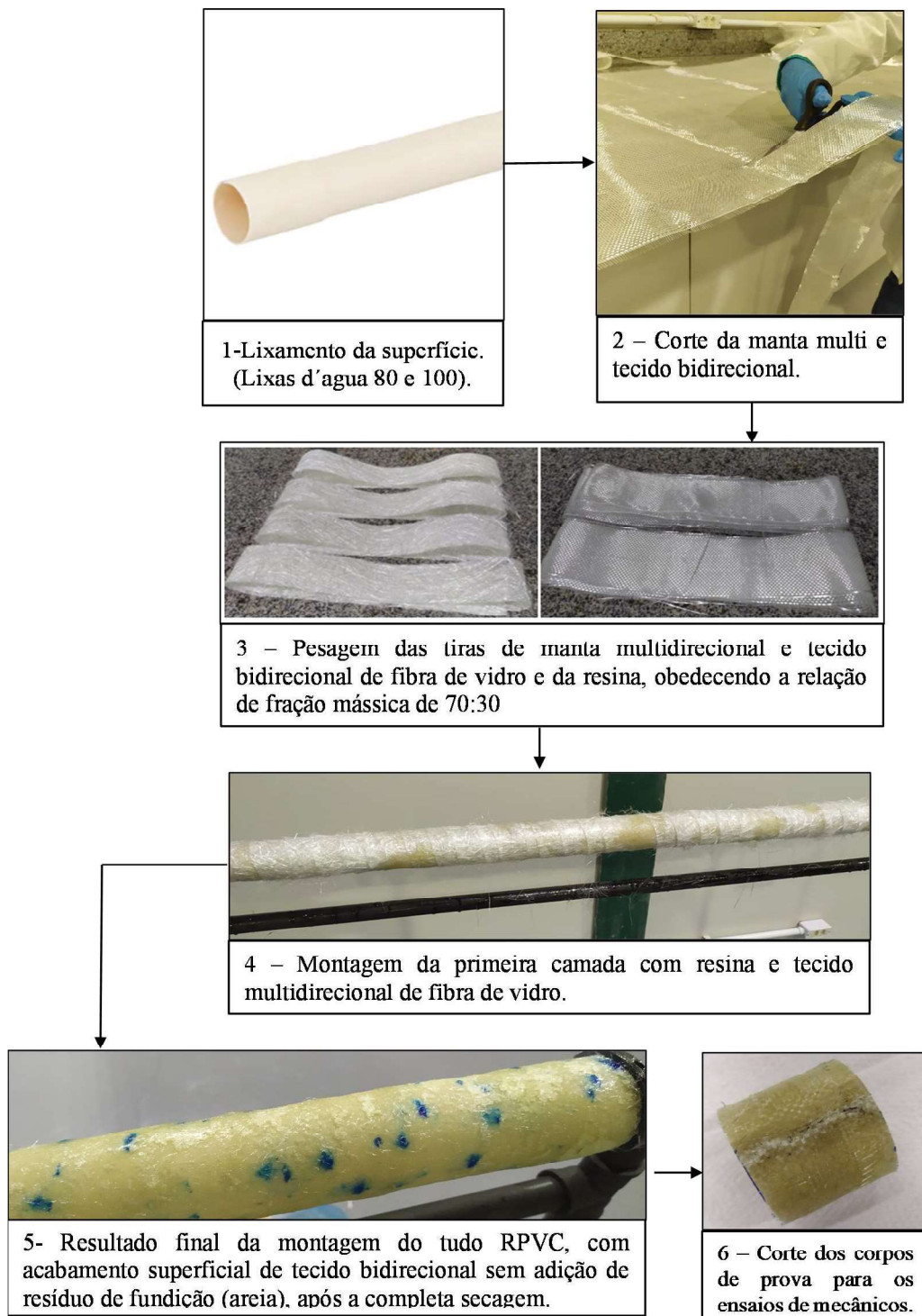
Destaca-se que os tubos foram finalizados com tecido bidirecional e as camadas intermediárias são feitas com manta multidirecional. A justificativa é decorrente da caracterização preliminar realizada na produção de compósitos laminados na forma de placas, em diferentes configurações de camadas e teor de constituintes, conforme reportado na seção 4.2.1, e cujos resultados serão apresentados na sequência deste trabalho.

Após a determinação dos teores e das partes formadoras dos tubos RPVC, foram cortadas de forma manual as tiras de manta multidirecional e tecido bidirecional de fibra de vidro, com as seguintes dimensões: 60 cm de largura \times 1,0 m de comprimento, foram definidas estas dimensões para ter maior controle de manuseio durante a fabricação dos tubos. Antes da aplicação do revestimento de PRFV, os tubos foram lixados manualmente utilizando lixas com granulometrias de 80 e 100.

A parte seguinte do processo de fabricação do tubo foi a adição de resina e a primeira camada de manta multidirecional para dar início à parte de reforço estrutural, responsável por suportar as cargas transmitidas ao tubo. A sequência de montagem das camadas respeitou a fração mássica de resina para fibra de 70:30. Toda a construção dos tubos foi realizada em uma única etapa. O tempo de repouso do conjunto foi de 72 horas em condições de ar calmo e temperatura ambiente. A fim de minimizar a ocorrência de danos durante os cortes dos corpos de prova os mesmos cortados com discos de corte diamantados.

O fluxograma das etapas de fabricação do tubo RPVC sem adição de ADF é mostrado na Figura 09. A Figura 10 mostra o fluxograma das etapas de fabricação do tubo RPVC com adição de ADF.

Figura 09. Fluxograma das etapas de fabricação do tubo RPVC sem adição de resíduo de areia descartada do processo de fundição.



Fonte: A autora, 2023.

Figura 10. Fluxograma das etapas de fabricação do tubo RPVC com adição de resíduo de areia descartada do processo de fundição.



Fonte: A autora, 2023.

6.3 CARACTERIZAÇÕES

6.3.1 Caracterização da areia descartada de fundição (ADF)

6.3.1.1 Densidade

A densidade foi determinada através da picnometria de gás hélio em um equipamento de marca Quanta chrome, modelo Ultrapyc 1200e.

6.3.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizado em equipamento da marca ZEISS, modelo EVO MA 10. Devido a necessidade de se obter uma superfície condutora, as amostras foram cobertas com uma fina película de ouro aplicado por *sputtering* em uma metalizadora de marca Denton vacuum/Modelo desk IV.

6.3.1.3 Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raio X (FRX)

As fases cristalinas presentes na ADF foram determinadas em um difratômetro de raios X Shimadzu, modelo LABX XRD-6000, com 34 30 kV e corrente de 30 mA. Foi empregado um tubo de cobre (radiação $\text{CuK}\alpha$) e faixa de varredura 2θ de 5 a 85o. A composição química do resíduo de areia de fundição foi determinada em um espectrômetro de fluorescência de raios X Philips PW 2400 (XRF).

6.3.1.4 Termogravimetria (TG)

A análise de TG foi realizada em equipamento modelo STA 449F3 da marca Netzsch® em atmosfera de ar sintético, que é isento de impurezas garantindo resultados mais precisos e confiáveis, com taxa de aquecimento de 10°C/min e temperatura máxima de 1000°C.

6.3.1.5 Análise granulométrica da areia de descarte de fundição - ADF

A distribuição granulométrica foi realizada conforme as determinações da comissão de estudos de matérias Primas - CEMP 081, onde a distribuição granulométrica se iniciou com a

limpeza prévia e a pesagem de cada uma das peneiras. A sequência de peneiras utilizadas, pelo classifica Mesh/Tyler foram: N° 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 e 270 da série padrão da ABNT, acompanhadas de prato coletor e tampa e um peneirador mecânico.

6.3.2 Caracterização dos compósitos na forma de placas e tubos em RPVC

6.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

A caracterização morfológica dos compósitos foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um equipamento Carl Zeiss LS-10, com tensão de aceleração de 10 kV. Todas as amostras foram cobertas com uma fina camada de ouro. As amostras analisadas foram rompidas durante o teste de tração, no qual foi observada a região da fratura dos corpos de prova.

6.3.2.2 Resistência mecânica dos compósitos

Os ensaios de resistência à tração das amostras foram realizados de acordo com ASTM D3039 / D3039M – 17 utilizando uma máquina de ensaio universal Emic (modelo DL10000), com velocidade de 2 mm.min⁻¹. A partir deste ensaio, foi determinada a tensão das amostras e a força de tração por largura (F_r) é apresentada na Equação 1 e 2, respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$F_r = \frac{Q}{b} \quad (2)$$

Sendo:

σ = tensão (MPa)

F = Força (N)

A = área (mm²)

F_r = força de tração (kN/m)

Q = carga aplicada ao corpo de prova no momento da ruptura (kN)

b = largura do corpo de prova (m).

O teste de resistência à flexão dos compósitos na forma de placas foi realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos Emic, modelo DL10000 (célula de carga: 200 kgf) a uma velocidade de teste de 1,8 mm/min de acordo com ASTM D7264M-07. A tensão de flexão foi calculada segundo Equação 3.

$$\sigma = \frac{3P}{2bh^2} \quad (3)$$

Sendo:

σ = tensão (MPa)

P = força aplicada (N)

L = suporte entre apoios (mm)

b = largura do corpo de prova (mm)

h = espessura do corpo de prova (mm)

6.3.2.3 Densidade

A determinação da densidade foi realizada conforme a norma ASTM D792. As amostras foram pesadas em balança analítica e após mergulhadas em etanol e novamente pesadas. O cálculo da densidade foi realizado conforme a Equação 4:

$$\rho = \frac{(a \times b)}{(a-c)} \quad (4)$$

Sendo:

ρ = densidade (g.cm⁻³);

a = massa da amostra (g);

b = densidade do etanol (g.cm⁻³) e

c = massa da amostra imersa no etanol (g).

O teor de vazios foi determinado de acordo com a norma ASTM D792. A densidade teórica do compósito foi calculada através da Equação 5:

$$\rho_T = (PVC \cdot \rho_f) + (P \cdot \rho_P) + (FV \cdot \rho_{FV}) + (ADM \cdot \rho_{ADF}) \quad (5)$$

Sendo:

ρ_T = densidade teórica do compósito (g.cm^{-3});

PVC = percentual da fração mássica do tubo de PVC;

ρ_{PVC} = densidade do PVC (g.cm^{-3}), no qual foi considerado o valor de $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$;

P = percentual da fração mássica da matriz de poliéster o no compósito;

ρ_p = densidade da matriz de poliéster (g.cm^{-3}), no qual foi considerado o valor de $1,17 \text{ g.cm}^{-3}$

FV = percentual da fração mássica de fibra de vidro no compósito

ρ_f = densidade da fibra de vidro (g.cm^{-3}), no qual foi considerada $2,55 \text{ g.cm}^{-3}$

ADF = percentual da fração mássica de ADF no compósito

ρ_{ADF} = densidade da ADF (g.cm^{-3}), no qual foi considerado $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$

O teor de vazios é obtido pela diferença entre a densidade experimental e a densidade teórica, conforme Equação 6:

$$V = \left(\frac{\rho_T - \rho_E}{\rho_T} \right) \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

V = teor de vazios;

ρ_T = densidade teórica do compósito (g.cm^{-3}) e

ρ_E = densidade experimental do compósito (g.cm^{-3}).

6.3.2.4 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM D570-98. Os polímeros sem carga e os compósitos foram mantidos em estufa por 4 h a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Após, foram imersos em água destilada dentro de recipientes separados e mantidos a temperatura ambiente. A massa de cada corpo de prova foi determinada utilizando uma balança de precisão e o aumento de massa foi determinado de acordo com a Equação 7:

$$A.A (\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (7)$$

Sendo:

$A.A$ (%) = percentual de absorção de água

m_i = massa do corpo de prova antes da imersão

m_f = massa do corpo de prova após a imersão

Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão (0,0001g) nos intervalos de tempo de 0, 2, 4, 8, 12, 24, 48 e 72 horas. Este procedimento foi repetido até ser alcançada o ponto de saturação. Ao final do ensaio foi obtida a Curva Absorção de água (%) versus o tempo de imersão (h). Cada ponto da curva representa a média de quatro corpos de prova.

6.3.3 Resistência mecânica - Compressão diametral

O ensaio mecânico de compressão diametral é usado para verificar a compressão ao longo do diâmetro de um tubo, a norma ABNT NBR 15536-1:2007 especifica os métodos de ensaio para os tubos de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Como não há uma norma específica para tubos de RPVC, o procedimento foi adaptado conforme norma citada. Foi utilizada uma máquina de ensaios universal EMIL DL 10000, com pratos rígidos paralelos e velocidade constante de 2 mm/min até rompimento ou atingir deflexão de 5% do diâmetro médio, que pode ser calculada pela Equação 8 (ABNT NBR 15536-1,2007). Foram utilizados 5 corpos de prova por amostra.

$$R = 0,200 \cdot \left(\frac{F/L}{\Delta y} \right) \quad (8)$$

Sendo:

R é a rigidez, expressa em Newtons por metro quadrado (N/m²)

F é a carga aplicada, expressa em Newtons (N);

L é o comprimento do corpo-de-prova, expresso em metros;

Δy é a deformação diametral, expressa em metros (m).

6.3.4 Resistência mecânica - Flexão por três pontos em tubos

O ensaio mecânico de flexão por três pontos baseia-se na aplicação de uma força no ponto central de um corpo de prova que esteja apoiado nas extremidades de modo a obter a

ruptura. A norma regente para este ensaio é a ASTM D790, visto que não há uma norma brasileira para esse segmento. O corpo-de-prova para este ensaio possui comprimento nominal conforme relação comprimento/espessura de 60:1 (ASTM, 2017).

A norma indica que para os testes para ensaio de flexão em 3 pontos haja uma divisão em dois procedimentos de ensaio, sendo o primeiro quando a ruptura do material é gerada de pequena deflexão, usado para mensurar propriedades de flexão, e o segundo quando o material não rompe ou escoar na superfície externa dentro do limite de ruptura, quando as condições do primeiro procedimento são usadas (ASTM, 2017).

Foi utilizado um equipamento universal de ensaio mecânicas, marca EMIC, modelo DL10000. Para ensaio foi adotado a taxa de deformação de 2 mm/min com a distância entre apoios de 210 mm, sendo que a condição de parada ocorre quando se atinge a deformação máxima ou a fratura do material (ASTM, 2017).

A tensão na força máxima (σ) e deformação na força máxima (ε) aplicados para tubos no ensaio de flexão por três pontos são descritos pelas Equações 9 e 10, respectivamente. Fez-se a análise estatística da média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv) destes dados.

$$\sigma = \frac{8LsDF}{\pi(D^4-d^4)} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{6D}{Ls^2} * \Delta l \quad (10)$$

Sendo:

F = carga aplicada - força (N)

D = diâmetro externo do tubo (mm)

d = diâmetro interno do tubo (mm)

Ls = distância entre os suportes (neste caso de 210 mm)

Δl = deflexão máxima (ou deslocamento máximo) devido à carga aplicada

σ = tensão (MPa)

ε = deformação (mm).

6.3.5 Microscópica óptica (MO)

A análise por microscopia óptica (MO) dos compósitos foi realizada para observar e analisar as estruturas formadas após a montagem final dos tubos, a análise foi feita em um microscópio Olympus BX41M-LED.

6.3.6 Pressão hidrostática

A análise da pressão hidrostática foi realizada pela empresa SCitec – Testes e inspeções de Palhoça - SC. Para o presente ensaio foi utilizado uma bomba HAWK – Serie NHD 1220 R, com variação de pressão de 0 até 200 bar. O tipo de carregamento foi água. A Figura 11, mostra o equipamento usado no ensaio de pressão hidrostático.

Figura 11. Imagem fotográfica apresenta o equipamento e montagem do sistema para o teste de pressão hidrostático.

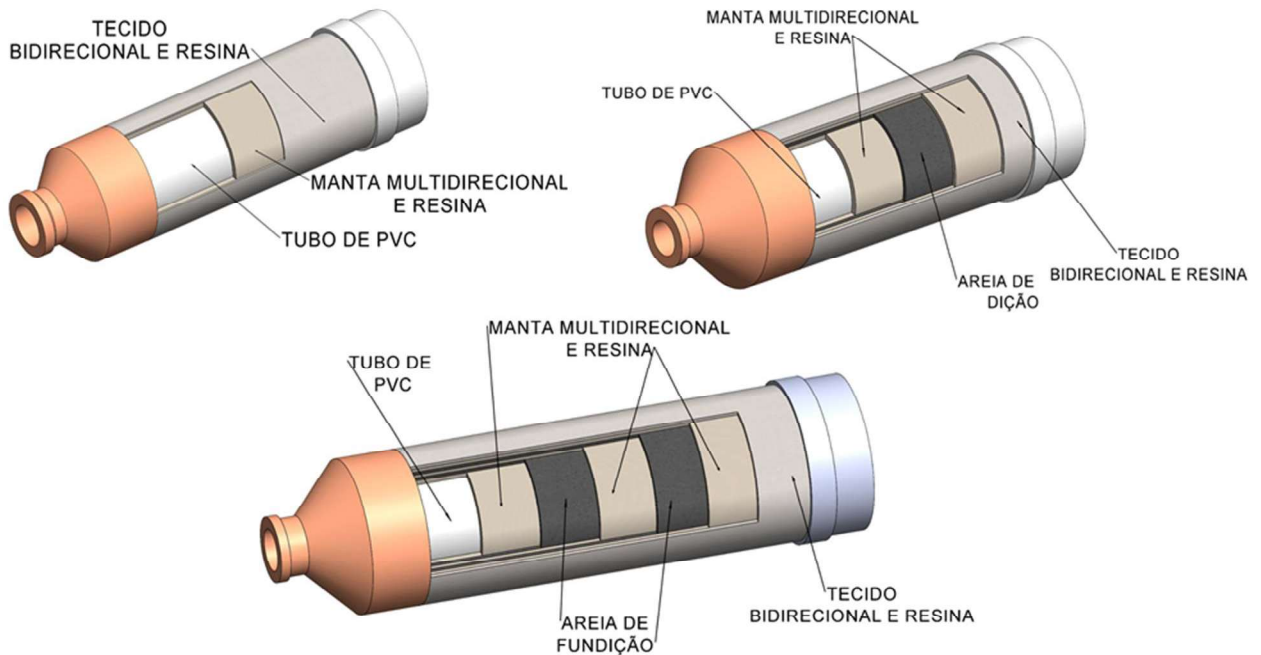


Fonte: A autora, 2023.

O ensaio foi realizado segundo norma ASTM D1599. Para ensaio de pressão hidrostática foi necessário fazer pequenas adaptações no tubo, sendo apresentados na Figura 12, que mostra a distribuição das camadas de fibra de vidro e da carga de ADF usadas na

fabricação dos corpos de prova, bem como os componentes terminais (tampão tipo *caps* e flange de redução) incorporados nos tubos.

Figura 12. Sequência de distinção de camadas e constituintes das amostras para o teste de pressão hidrostática.



Fonte: A autora, 2023.

Os tubos foram preparados seguindo recomendações da norma ASTM D1599, que para tubos de até 6 polegadas o comprimento da amostra entre as extremidades não deve ultrapassar a 12 polegadas (300 mm) e vedados em uma das extremidades com *caps* e na outra extremidade foi acoplado uma bucha de redução de 50 x 25 mm. Para este ensaio foram fabricados tubos com as mesmas configurações descritos anteriormente. O ensaio foi realizado em triplicata.

A pressão foi elevada de modo gradativo até a ruptura das amostras. Apesar da norma estabelecer um tempo de ruptura entre 60 s e 70 s, este tempo ficou em torno de 7 min devido à limitação do equipamento utilizado. Com os resultados obtidos do ensaio pressão e deformação foram utilizados para calcular a resultante de tensão e o módulo de elasticidade circunferencial da parede do tubo.

A determinação da força resultante e do módulo de elasticidade circunferencial foram realizadas pelas Equações 11 e 12 (NTS 048/2014).

$$F_r = \frac{P(d_i+t)}{2} \quad (11)$$

$$E_c = \frac{F_r}{e} \quad (12)$$

Sendo:

F_r = resultante de tensão (kN/m)

P = pressão (kPa)

d_i = diâmetro interno do tubo (m)

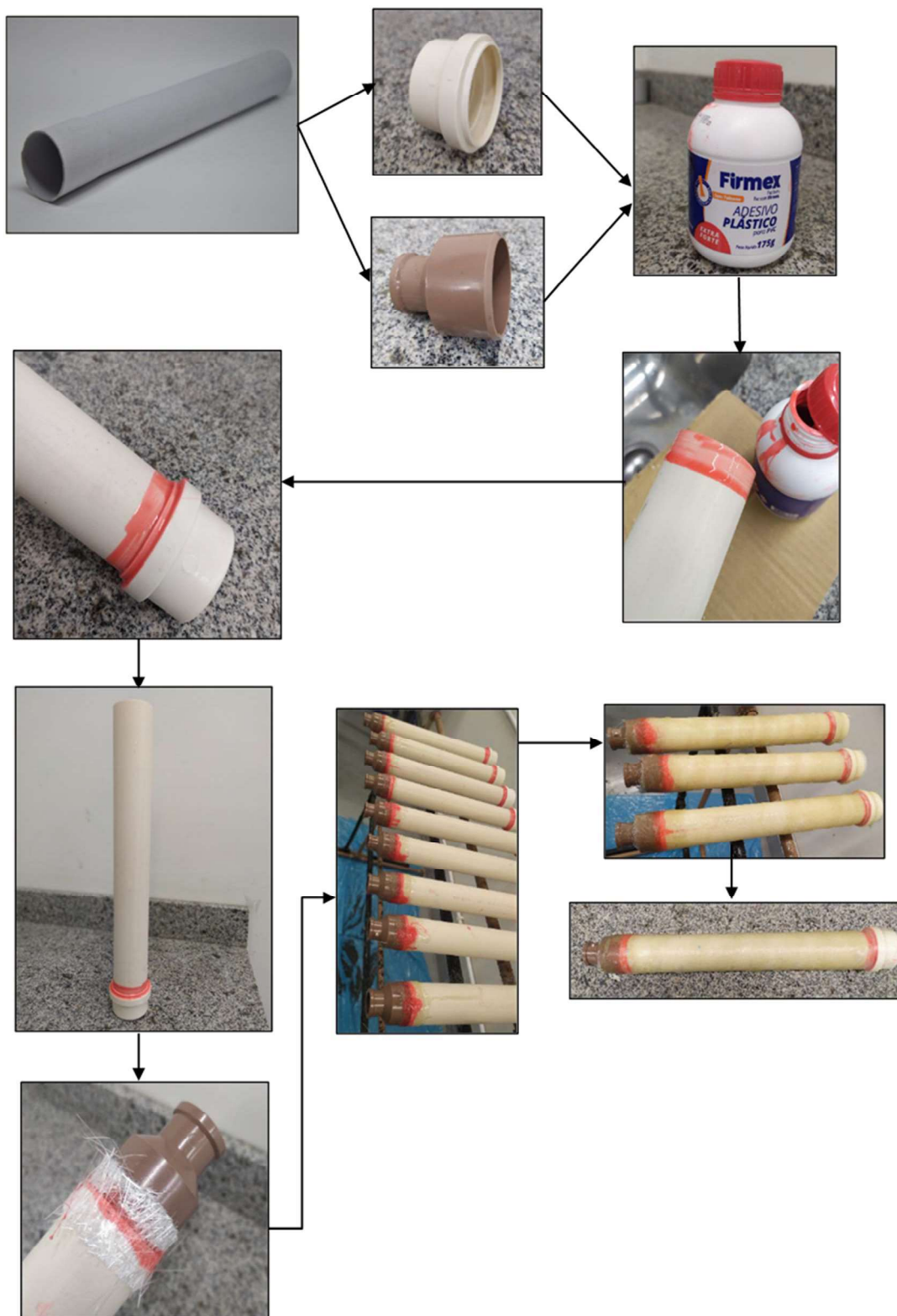
t = espessura do tubo (m)

E_c = Módulo de elasticidade circunferencial (kN/m)

e = deformação circunferencial (variação do perímetro / perímetro inicial)

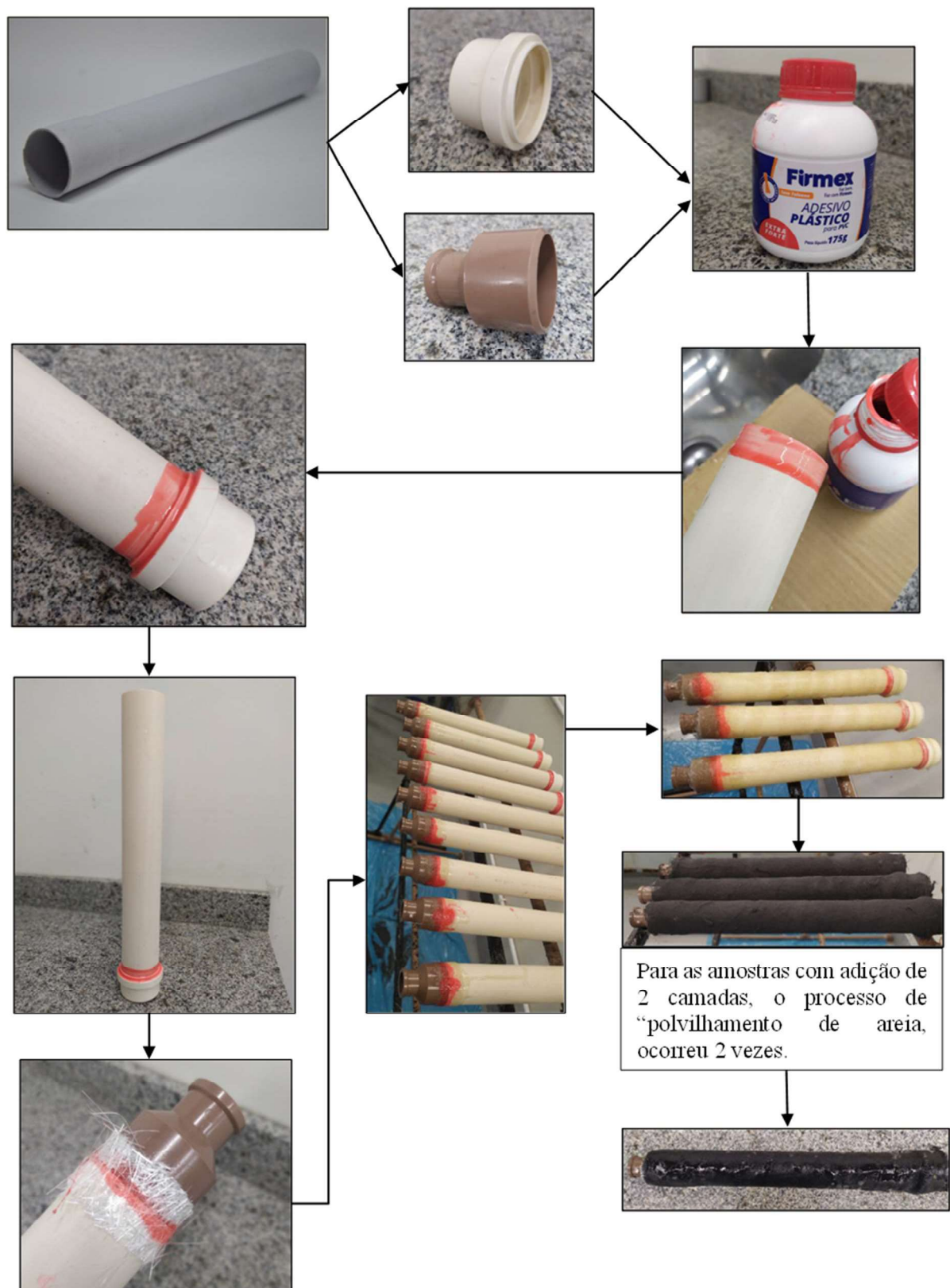
As Figuras 13 e 14, mostram os fluxogramas dos processos de fabricação dos corpos de prova do teste de pressão hidrostático.

Figura 13. Fluxograma das etapas de fabricação da amostra de RPVC sem adição de resíduo de ADF, para o teste de pressão hidrostática.



Fonte: A autora, 2023.

Figura 14. Fluxograma das etapas de fabricação da amostra de RPVC com adição de resíduo de ADF (1 e 2 camadas), para o teste de pressão hidrostática.



Fonte: A autora, 2023.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO - ADF

7.1.1 Distribuição granulométrica

A Tabela 02, apresenta os valores da distribuição granulométrica da areia de fundição, onde o teor de finos apresentou um valor de 0,36% e o maior percentual de retenção 38,39% ocorreu na peneira de *mesh* 70 (0,210 mm de abertura), conforme é ilustrado na Figura 13. A concentração máxima de areia retida também pode ser determinada com o somatório em porcentagem das peneiras *mesh* 50, 70 e 100 pois cada uma delas apresentou mais de 10,0% de retenção, neste caso a concertação é 91,53%.

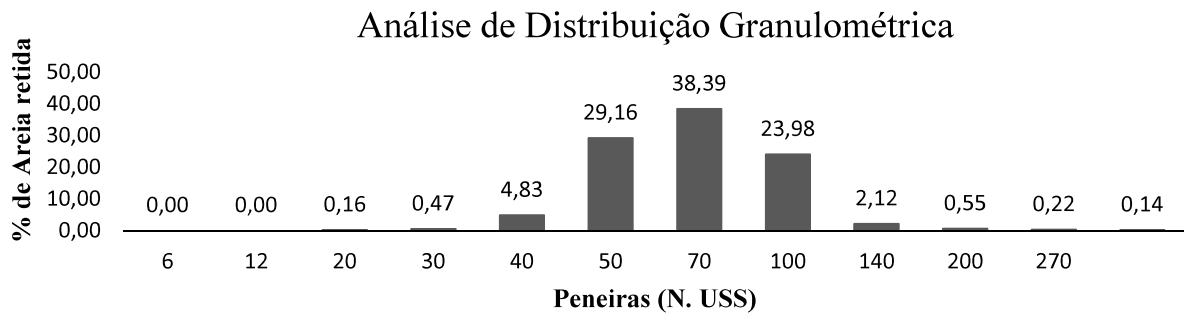
Tabela 02. Tabela de distribuição granulométrica.

GRANULOMETRIA					
Peneiras ABNT		AFS ¹	Areia retida		
Abertura malha (mm)	Peneira (MESH)	Fator	(g)	(%)	(g. fator)
3,360	6	3	0,000	0,00	0,00
1,680	12	5	0,000	0,00	0,00
0,840	20	10	0,078	0,16	0,78
0,590	30	20	0,234	0,47	4,68
0,420	40	30	2,407	4,83	72,21
0,297	50	40	14,538	29,16	581,52
0,210	70	50	19,138	38,39	956,9
0,149	100	70	11,955	23,98	836,85
0,105	140	100	1,056	2,12	105,6
0,074	22	140	0,274	0,55	38,36
0,053	270	200	0,109	0,22	21,8
0,020	Prato	300	0,069	0,14	20,7
		Total	49,858	100	2639,4

Fonte: A autora, 2023.

¹ Maior soma percentual de areia retida em três peneiras consecutivas da série padrão.

Figura 15. Análise de distribuição granulométrica da ADM.



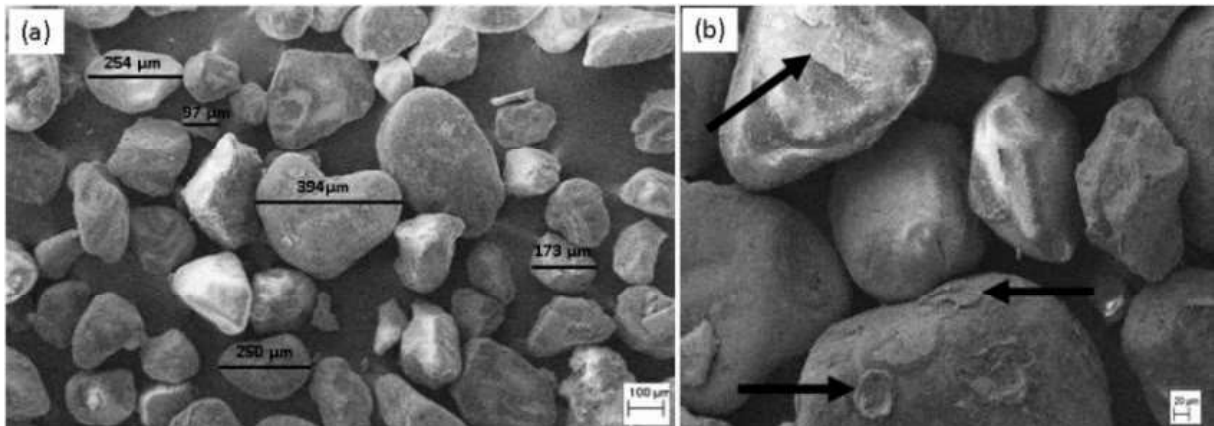
Fonte: A autora, 2023.

7.1.2 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A heterogeneidade da ADF, é significativa ao desempenho geral do compósito, a ADF pode ter uma variedade de tamanhos de partículas, com isso uma distribuição adequada de tamanhos de partículas pode melhorar a compactação e a coesão dentro do compósito, resultando em uma estrutura mais forte de estável, a mesma pode ser observada através das análises de MEV.

A Figura 14, apresenta as micrografias obtidas por MEV da ADF, no qual se observa que a areia apresentou partículas com dimensões que variam de 100 a 400 μm , com formato granular irregular, que significa a presença de partículas com diferentes tamanhos e formatos. Também é possível observar fragmentos de areia com microtextura rugosa, que de acordo com Dário (2020), isso decorre da presença de resina ligante, geralmente de composição fenólica, que é usada no processo de fundição e pode ser benéfica, pois promove melhor adesão interfacial com a matriz polimérica quando utilizada como elemento de reforço em compósitos.

Figura 16. Microscopia obtida por MEV da ADF em diferentes magnificações (a) 150x (b) 500x.



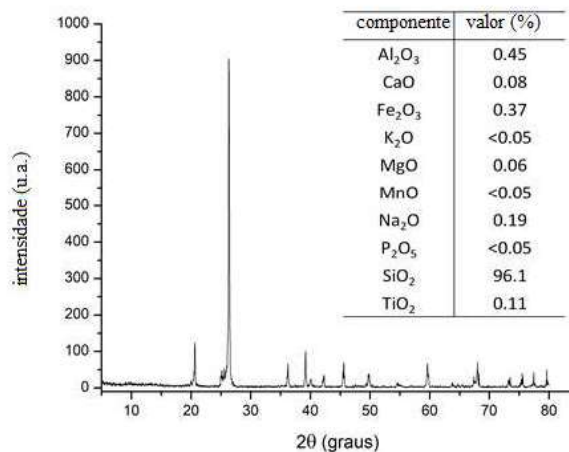
Fonte: A autora, 2023.

7.1.3 Difratoograma de raios X da areia descartada de fundição

A Figura 15, mostra o espectro de DRX e a análise de FRX (tabela) da ADF e a Tabela 03, a análise composicional da ADF por DRX. Pela análise de DRX pode-se observar a presença de uma única fase cristalina, identificada como quartzo (SiO_2). Outros elementos presentes estão contidos em fases amorfas ou cristalinas em quantidade insuficiente para serem detectados por esta técnica.

A Figura 16 também mostra o resultado da análise química do resíduo de areia de fundição obtido por FRX, no qual observa-se que a amostra apresenta a presença majoritária da sílica (96%) na forma de SiO_2 (quartzo), conforme confirmado por difração de raios-X. Além disso, foram identificados os elementos alumínio, ferro, sódio e titânio. Este comportamento também foi evidenciado por Mastella et al. (2014) e Dário (2020).

Figura 17. Análise de DRX e FRX da areia descartada de fundição.



Fonte: A autora, 2023

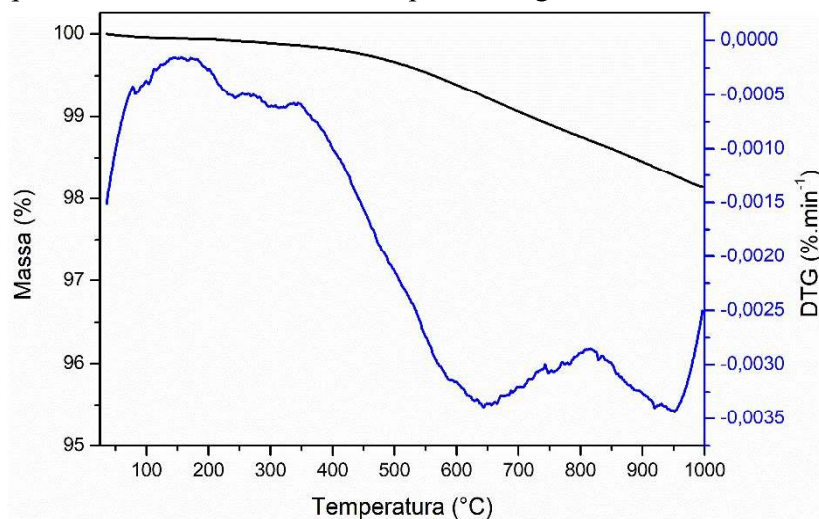
Tabela 03. Composição mineral da areia descartada de fundição.

Cartão JCPDS ² n°	Abreviatura	Nome do Composto	Fórmula Química
1 46-1045	Q	Quartzo	SiO ₂

Fonte: A autora, 2023.

A Figura 16, apresenta os termogramas de degradação da ADF. Observa-se que, os valores termogravimétricos da areia de fundição e seu respectivo com pico exotérmico que ocorreu aproximadamente aos 500 °C, também é observada uma perda de massa aproximadamente de 1,68 %, valor aceitável de acordo com a norma ASTM E155. Este valor pode ser atribuído a queima de resinas fenólicas presentes nas areias de macharia e a decomposição de compostos orgânicos voláteis. Esta característica também foi observada por Maia (2017).

Figura 18. Propriedades térmicas observadas por termogravimétrico da ADF.



Fonte: A autora, 2023.

² JCPDS (Join Committee on Powder Diffraction Standards) é o comite responsável pela criação e manutenção de padrões de difração de raios X, para identificação de materiais por difração de raios-X (DRX). Ao comparar os padrões de difração da amostra com os padrões JCPDS é possível identificar os onstituintes cristalinos da amostra, ajudando a determinar a composição mineralógica e estrutural.

8. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA CONFIGURACIONAL DE COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRO E ADF

8.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRO E ADF

A Tabela 04, apresenta os resultados para as densidades, teores de vazios e espessuras dos compósitos laminados preparados neste estudo. A amostra PC3 apresentou a maior densidade de $1,68 \text{ g/cm}^3$ entre todas as amostras investigadas neste estudo, pois possui duas camadas de areia de fundição. As amostras PC2 e o PC4, com apenas uma camada de areia de fundição, apresentaram densidades semelhantes de $1,59$ e $1,58 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. O aumento da densidade dos compósitos foi proporcional ao aumento do teor de areia de fundição, uma vez que a densidade da areia de fundição é maior que a da resina poliéster ortoftálica pura. Devido ao fato de que a densidade da areia de fundição utilizada neste estudo foi de $2,65 \text{ g/cm}^3$, que é superior à do compósito poliéster/fibra de vidro.

Tabela 04. Propriedades físicas de areia de fundição e dos compósitos com e sem adição de ADF.

Amostras	Densidade (g.cm^{-3})	Teor de vazios (%)	Espessura do laminado (mm)
ADF	$2,65 \pm 0,01$	--	--
PC 1	$1,50 \pm 0,14$	21,6	$1,1 \pm 0,1$
PC 2	$1,58 \pm 0,10$	22,8	$2,1 \pm 0,2$
PC 3	$1,68 \pm 0,17$	19,5	$4,8 \pm 0,2$
PC 4	$1,59 \pm 0,13$	16,0	$4,0 \pm 0,1$

Fonte: A autora, 2023.

As densidades reais e teóricas das amostras foram utilizadas para determinar o seu conteúdo de vazios. Verificou-se que o teor de vazios dos compósitos diminuiu com o aumento de sua espessura. As amostras PC3 e PC4 apresentaram baixos teores de vazios de 19,5 e 16,0%, respectivamente. A amostra PC4 apresentou menor teor de vazios do que o PC3 devido ao seu maior teor de resina de poliéster e, portanto, maior adesão entre os particulados de areia. Nayak

e Satapathy (2021) ao avaliarem a incorporação de pó de mármore em resina poliéster isoftálica insaturada observaram comportamento semelhante.

A amostra PC1, sem a areia de fundição, apresentou um elevado teor de 21,6%, o que indica que o processo utilizado, laminação via *hand lay-up*, é suscetível a erros construtivos devido à formação de vazios no compósito. Conforme observado durante a fabricação dos compósitos, durante a laminação do compósito, a maior formação de vazios ocorre na camada com a manta de fibra de vidro multidirecional devido à dificuldade da resina em preencher os vazios da manta. Porém, analiticamente o compósito PC2 com uma camada de areia entre as duas camadas de fibra de vidro na forma de um tecido bidirecional, apresentou o maior teor de vazios de 22,8% entre todas as amostras. Os vazios podem ser formados durante o processo de fabricação por vários motivos como o método de produção envolvendo laminação manual é impreciso e sujeito a falhas, viscosidade da resina utilizada, umidade, diferentes tipos de fibras e cargas e incompatibilidade química entre os componentes (HAMDAN, 2019).

A espessura dos compósitos depende do número de camadas utilizadas no processo de laminação. A espessura das amostras de PC3 e PC4, que consistiam em mais camadas de areia e fibra de vidro, foi duas vezes maior que as outras amostras. Dependendo da aplicação, por exemplo um tubo, a espessura do compósito é de grande importância, pois existem diversas normas que preveem relações entre o diâmetro e a espessura do tubo.

8.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRO E ADF NA FORMA DE PLACAS.

A Tabela 05, apresenta as propriedades mecânicas de deformação, tensão de ruptura, módulo elástico e força de ruptura obtidas no ensaio de resistência à tração dos compósitos com e sem as camadas de areia de fundição. Observa-se que de modo geral, a resistência à tração dos compósitos diminuiu com a adição da areia de fundição. De acordo com Wong et al. (2010) a incorporação de areia em compósitos diminui sua tensão de ruptura, ductilidade e a energia absorvida para resistência à fratura.

Também se destaca que, a eficiência de um material de reforço depende de seu tamanho de partícula. Quanto maior o tamanho da partícula de reforço, menor é a sua eficiência, fato que está diretamente associado à área superficial da interface. A presença de múltiplas fases, como camadas de fibra de vidro e areia de fundição, como mostrado na Figura 8, também contribuem para a deterioração das propriedades, pois a região de interfase (região de conexão das fases)

cria pontos fracos no compósito, que pode levar a delaminação do mesmo se não eficientemente aderida uma fase a outra.

Em sistemas poliméricos, a introdução de materiais particulados geralmente não leva a uma melhoria substancial nas propriedades mecânicas de tração do sistema em comparação com a introdução de materiais fibrosos. Isso ocorre porque, no caso de materiais de reforço particulados, a tensão não é efetivamente transferida da matriz para as partículas de reforço por causa de sua pequena área de superfície. Além disso, essas partículas também podem atuar como agentes nucleantes para a formação de trincas, que reduzem a resistência mecânica dos compósitos.

Tabela 05. Propriedades mecânicas de resistência à tração dos compósitos laminados com e sem adição de areia de fundição.

Amostras	Deformação (%)	Tensão na ruptura (MPa)	Módulo elástico (MPa)	Força de tração (kN/m)
PC 1	10,1 ± 0,2	287,0 ± 9,7	6673 ± 120	319 ± 25
PC 2	6,0 ± 1,0	68,1 ± 1,1	3329 ± 380	135 ± 20
PC 3	5,7 ± 1,2	37,1 ± 5,1	2877 ± 133	163 ± 42
PC 4	7,5 ± 0,5	77,6 ± 12,8	3208 ± 341	295 ± 32

Fonte: A autora, 2023.

Ao comparar as propriedades mecânicas do PC2 e PC3 com uma e duas camadas de areia de fundição, respectivamente, pode-se observar que o aumento do teor de areia resultou na diminuição da capacidade de deformação dos compósitos e na deterioração de suas propriedades mecânicas de resistência à tração. O alongamento parece ter uma forte correlação com a quantidade de polímero usado na fabricação de compósitos. A amostra PC3, que tinha o menor teor de resina, apresentou a menor capacidade de deformação. A diminuição das propriedades mecânicas dos compósitos com a ADF, em comparação com a amostra PC1, também pode ser atribuída à má adesão entre o tecido de fibra de vidro, principalmente nas amostras PC2 e PC3 e as camadas de areia, o que resultou em deslocamento e delaminação durante o ensaio mecânico.

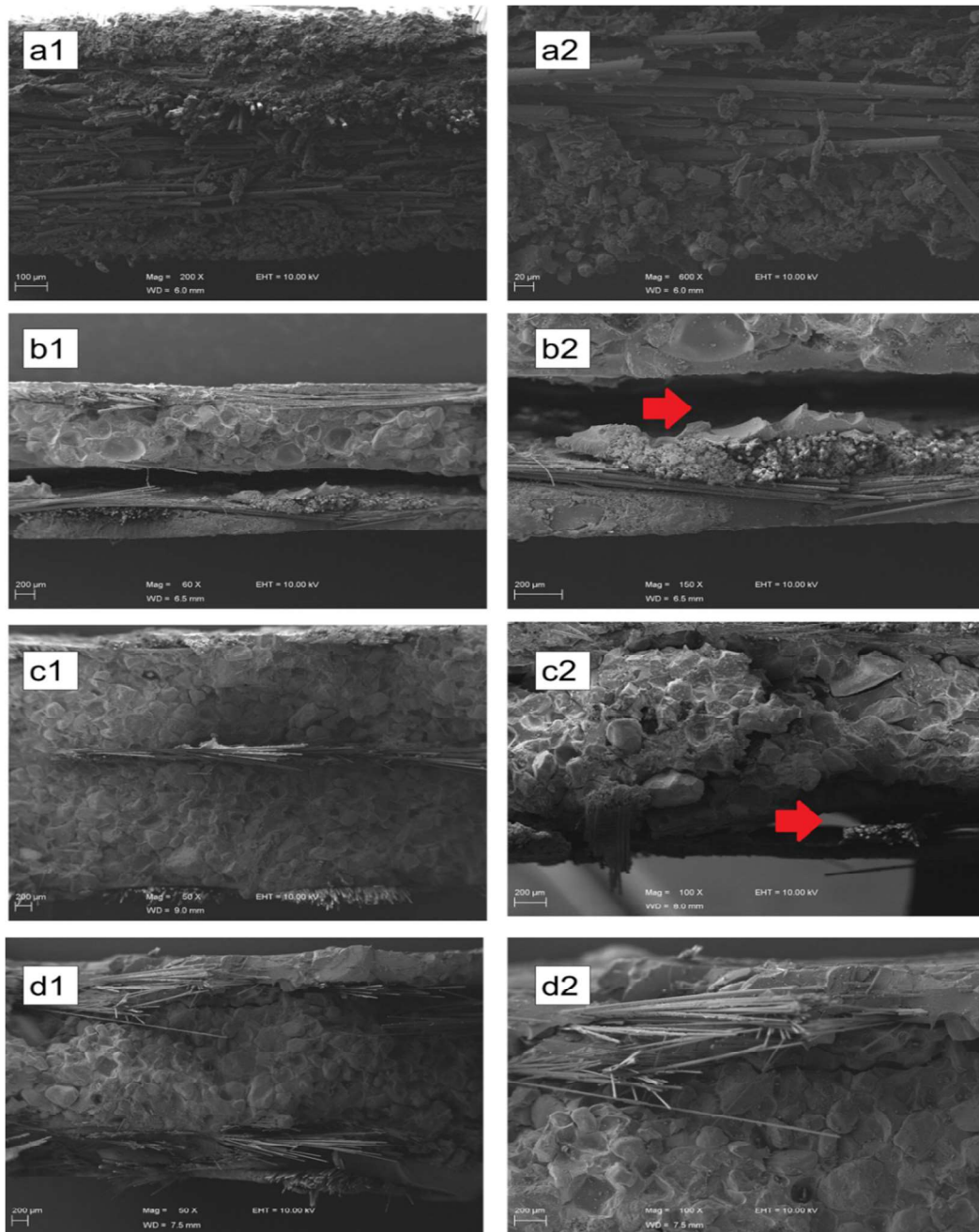
No comparativo da amostra PC2 com a amostra PC4 é notória a requisição de maior força de tração durante o ensaio de tração, pois a amostra PC4 possui mais camadas de ADF e

fibra, assim como um maior teor de resina (150 g) que por sua vez auxilia na uniformidade e adesão entre as camadas.

A amostra PC4 apresentou superiores propriedades mecânicas em relação a amostra PC3 devido ao maior teor de polímero e eficiente contato entre a camada de areia e a manta de fibra de vidro multidirecional, que era mais rugosa que o tecido da fibra de vidro bidirecional e permite melhor ancoragem das partículas de areia na camada central. Este efeito também foi demonstrado pela força de tração dos compósitos. Conforme observado na Figura 6, que apresenta as imagens obtidas por microscopia óptica das superfícies de ambas as fibras de vidro utilizadas neste estudo, a manta com fibra de vidro multidirecional apresenta textura mais rugosa que o tecido de fibra de vidro bidirecional. Essa maior rugosidade melhora a adesão física das fases, favorecendo a resposta mecânica da amostra PC4 em relação às demais amostras reforçadas com areia de fundição.

Esse fenômeno é mostrado na Figura 17, que mostra as micrografias de MEV das regiões de fratura dos compósitos após o teste de resistência à tração. É possível observar que o principal mecanismo de fratura é a delaminação de fases, mais pronunciada no PC2 e PC3, conforme indicado pelas setas. Na amostra PC4, não foi observada delaminação de fase, na região da interfase.

Figura 19. Micrografias obtidas por MEV, na região da fratura, após o teste de resistência à tração da amostra (a) PC1; (b) PC2; (c) PC3 e (d) PC4.



Fonte: A autora, 2023.

Também é necessário considerar que, o ensaio de tração de um corpo de prova expressa sua resposta mecânica em função de sua área. Além disso, a espessura de um corpo de prova está diretamente relacionada à sua resposta ao estresse. Para a preparação de tubos, esta espessura pode ser adaptada de acordo com os requisitos de projeto. Assim, a análise da carga (força) aplicada na largura do corpo de prova, sem considerar sua espessura, fornece resultados promissores com a inserção de areia de fundição em compósitos. As amostras PC1 (sem

partículas de areia) e PC4 apresentaram Fr (força de ruptura) semelhantes, enquanto as amostras PC2 e PC3 apresentaram Fr inferior às amostras PC1 e PC3. Esse resultado corrobora a hipótese de que a camada de manta com fibras multidirecionais foi mais eficaz para interagir com a camada de areia do que a manta de fibra de vidro bidirecional.

A Tabela 06, apresenta as resistências à flexão dos compósitos com e sem a adição de ADF. Semelhante aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração, o valor da tensão dos compósitos diminui com a adição da areia de fundição. No entanto, a resistência máxima (força máxima de carga aplicada) dos compósitos aumentou com a inserção da areia de fundição. Por exemplo, comparando as amostras PC3 com PC1, a força máxima necessária para quebrar foi maior que 9,1 vezes. Comparado ao PC2, o PC3 apresentou um aumento significativo na resistência por causa de sua grande espessura e configuração com duas camadas de areia, o que contribuiu para sua alta rigidez. A amostra PC4 apresentou melhor resposta de resistência máxima do que a amostra PC3, apesar de sua menor espessura devido à melhor compatibilidade de suas fases constituintes e maior teor de polímero.

Tabela 06. Propriedades mecânicas de resistência à flexão dos compósitos com e sem adição de ADF.

Amostras	Força máxima na ruptura (N)	Tensão de flexão (MPa)	Módulo elástico de flexão (GPa)
PC 1	8,75 ± 0,9	335,8 ± 21,2	9,38 ± 0,1
PC 2	23,5 ± 4,8	270,4 ± 81,4	6,56 ± 0,2
PC 3	80,1 ± 4,8	181,7 ± 20,1	5,06 ± 0,1
PC 4	100,0 ± 6,2	234,9 ± 10,1	6,94 ± 0,1

Fonte: A autora, 2023.

8.3 CARACTERIZAÇÃO DOS TUBOS EM MATERIAL COMPÓSITO COM E SEM A ADIÇÃO DE ADF

8.3.1 Análise de Microscopia Óptica - MO

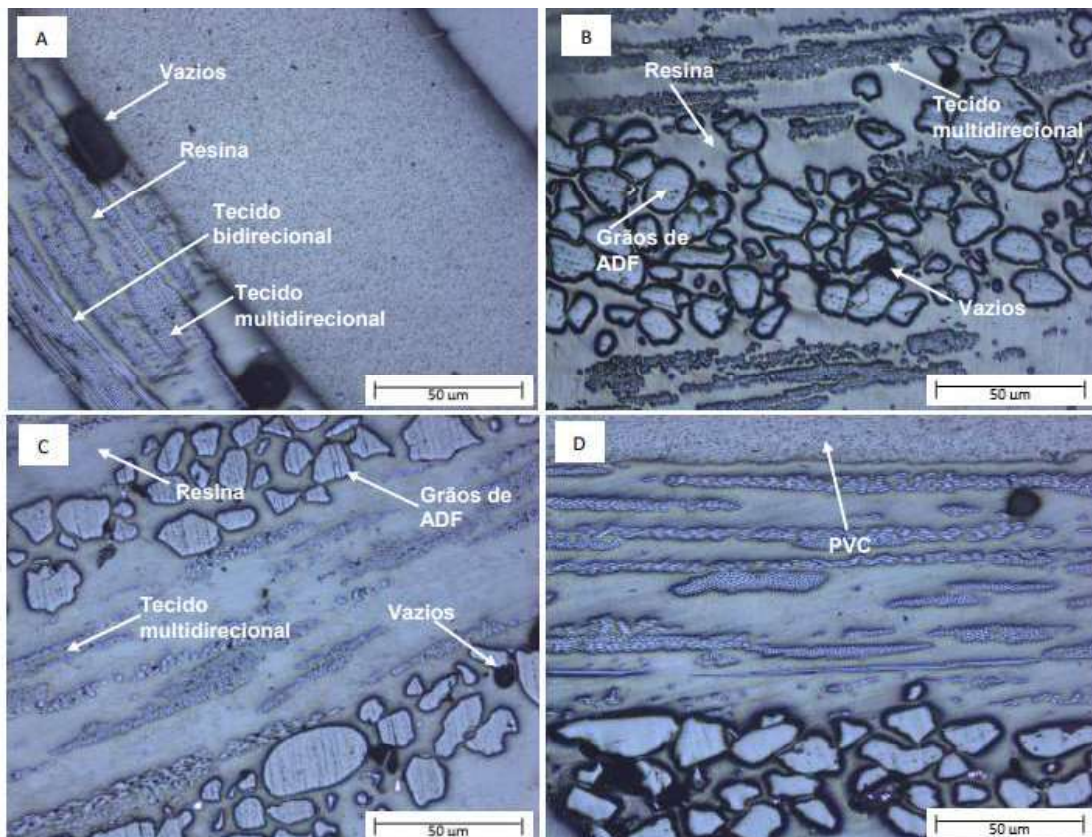
A Figura 18, apresenta as micrografias obtidas por microscopia óptica, no qual foi realizada uma análise comparativa das estruturas das amostras dos compósitos confeccionados sem adição de ADF (PC 1) com uma camada de ADF (PC 2) e com duas camadas de ADF (PC

3). Observa-se que em geral, todas as amostras apresentaram pequenas proporções de vazios nas interfaces entre a matriz e as fibras e /ou manta. Estes vazios estão diretamente atrelados o processo de laminação manual dos compósitos. Os vazios podem ser visualizados tanto na região da camada de resina poliéster e fibra de vidro como nas camadas de resíduo de areia de fundição impregnada com resina.

A presença de espaços vazios é comumente associada à laminação manual. De acordo com Salasinska et al., (2022) a laminação manual é uma técnica primária para laminação que facilita a produção de produtos acabados usando ferramentas predominantemente baratas, como espátulas e pincéis. No entanto, como o processo é extremamente dependente da habilidade manual do operador, é difícil obter produtos de alta qualidade, sendo corriqueiro a presença de defeitos estruturais, com presença de vazios. Esta é a principal desvantagem desse método.

Pelas micrografias, observa-se que na região das interfaces (região de adesão das fases de PVC, resina de poliéster com fibra de vidro e areia descartada de fundição) não foram observadas vazios ou trincas significativas.

Figura 20. Análise de Microscopia óptica das amostras: A - amostra sem adição de ADF (PC1), B - amostra com adição de 1 camada de ADF (PC 2); C e D - amostras com adição de 2 camadas de ADF (PC 3).



Fonte: A autora, 2023.

Através da Figura 18, pode-se confirmar a boa adesão das fases constituintes do compósito polimérico, justificada por diversos motivos, entre eles: a superfície rugosa dos grãos de areia que possuem superfície rugosa e quando incorporadas a matriz causam um intertravamento mecânico que auxilia no aumento da interface entre matriz e reforço. Este intertravamento proporciona uma ligação forte entre as fases e melhora a transferência de carga.

8.3.2 Densidade e teor de vazios

A densidade é um parâmetro importante, pois fornece informações sobre o grau de compactação e molhabilidade da matriz polimérica sobre as partículas de areia e fibra de vidro (BAGGIO et al., 2022). Já o teor de vazios representa a proporção de espaços vazios existentes no material e está diretamente ligado a densidade, que por sua vez traz informações sobre a porosidade, que podem comprometer a durabilidade e a resistência mecânica do compósito (NUNES, MANES; 2019).

A Tabela 07, apresenta os valores de densidade e o teor de vazios das amostras obtidas. Observa-se que o compósito PC 1, apresentou o menor valor de densidade, com aproximadamente $1,2391 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ e o maior valor de densidade aparente foi registrado na amostra PC 3 com valor de $1,4616 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$.

Baseado em suas pesquisas, Dário (2020) afirma ser esperado um maior valor de densidade em compósitos poliméricos com adição da ADF. A areia é um sólido granular composto principalmente por quartzo, que possui um valor de densidade superior ($2,65 \text{ g/cm}^3$) aos demais constituintes (PVC e poliéster). Nayak e Satapathy (2021) ao avaliarem a incorporação de pó de mármore em resina poliéster isoftálica insaturada, observaram comportamento semelhante de aumento da densidade com aumento do teor de carga.

Teor de vazios, refere-se à quantidade de espaços vazios ou porosidade no material, e observando os dados da Tabela 05, evidencia que a amostra PC 3 apresentou maior percentual de volume não ocupado com 24,35 %, que pode ser decorrente da irregularidade da forma e tamanho das partículas e difícil molhabilidade pela resina de poliéster nesta região, visto que é de natureza granular irregular, dificuldade de obter um empacotamento uniforme das partículas aliado ao processo de fabricação, neste caso a laminação manual. Uma possível má adesão entre a resina e a ADF contribuiu para este percentual de volume não ocupado, a falta de coesão e inclusão de ar na amostra.

Segundo estudos de Hamdan et al. (2019), os vazios podem ser formados durante o processo de fabricação por vários motivos como o método de produção envolvendo laminação

manual é impreciso e sujeito a falhas, alta viscosidade da resina utilizada, umidade, diferentes tipos de fibras e cargas e incompatibilidade química entre os componentes. Componentes voláteis ou mesmo contaminação também podem formar vazios por vaporização durante o ciclo de cura do compósito (COSTA, 2016; ISMAIL, 2019; ANDERSON, 2015).

Conseqüentemente, esses vazios podem gerar trincas e serem nucleantes para formação de defeitos na microestrutura do compósito. Neste sentido, para evitar a formação de vazios, cuidados devem ser tomados tanto em termos de quantidade (indicada pelo volume de vazios) quanto de forma dos vazios ou poros. Vazios esféricos quase sempre estão presentes no interior das camadas, enquanto vazios alongados, depositados na interfase, ou seja, entre as camadas de compósitos, podendo causar defeitos intralaminares quando sujeitos a esforços mecânicos (Jawaid, 2011; Saenz-Castilho, 2019).

Observa-se também que, conforme esperado, a adição progressiva de ADF ocasiona um aumento na espessura da parede do tubo. A espessura dos compósitos depende do número de camadas utilizadas no processo de laminação. Dependendo da aplicação, por exemplo um tubo, a espessura do compósito é de grande importância, pois existem diversos padrões que preveem relações entre o diâmetro e a espessura do tubo.

Tabela 07. Propriedades físicas (densidade aparente, teórica, teor de vazios e espessura dos tubos produzidos) dos tubos em material compósito, com e sem ADF.

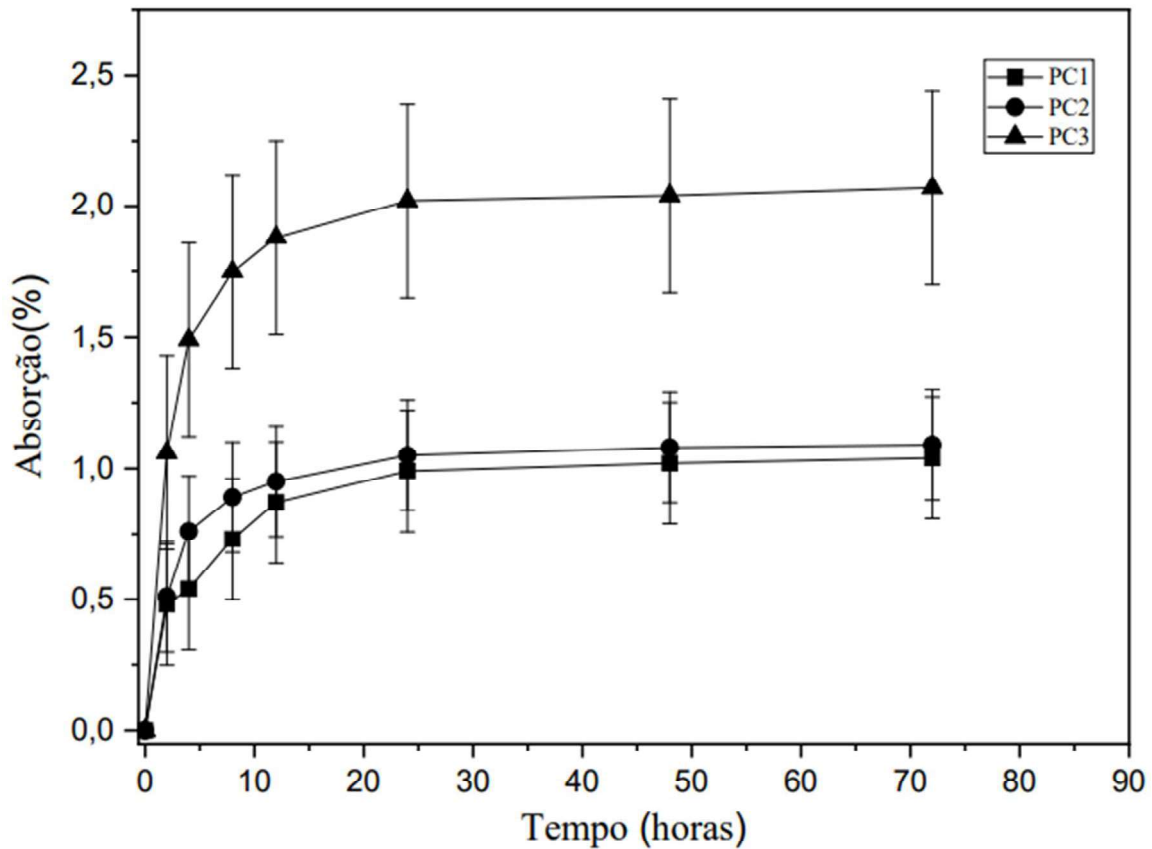
Amostras	Densidade aparente (g/cm³)	Densidade teórica (g/cm³)	Teor de vazios (%)	Espessura do tubo (mm)
PC 1	1,23 ± 0,01	1,53	19,60	4,43 ± 0,01
PC 2	1,43 ± 0,04	1,81	20,99	5,27 ± 0,01
PC 3	1,46 ± 0,08	1,93	24,35	6,81 ± 0,01

Fonte: A autora, 2023.

8.3.3 Absorção de água

A Figura 19, apresenta os resultados da análise de absorção de água dos tubos com e sem a adição de ADF em diferentes camadas. As curvas evidenciam a crescente na taxa de absorção de água até o atingimento na estabilidade (saturação) das amostras no tempo 4 horas. O maior percentual de absorção de água ocorreu no compósito PC 3, no qual foi observado um incremento de massa de 2,07 %, valor que pode ser justificado pelo maior teor de vazios decorrentes da presença do resíduo de areia descartada de fundição.

Figura 21. Curvas do Percentual de absorção de água versus o tempo de imersão em água das amostras PC1, PC2, PC3.



Fonte: A autora, 2023.

A amostra sem adição de areia representa o menor percentual de absorção de água com 1,04%, e a ausência da carga granular contribuiu para que as fibras obtivessem melhor aderência e poucos espaços disponíveis para a absorção de água. A amostra com adição de 1 camada de areia, obteve incremento da massa de 1,09% no maior percentual observado de absorção de água.

O mecanismo de absorção de água exerce grande importância aos compósitos com adição de cargas granulométricas, pois este tipo material geralmente é destinado situações em que a resistência mecânica e durabilidade são solicitadas. Os autores Coelho et.al (2019) apontam que a água pode penetrar nas microfissuras e vazios existentes entre a matriz e reforço, causando um aumento da massa do material, eventualmente favorecendo a plasticidade do material que pode acarretar o aumento das tensões internas e rompendo prematuramente a estrutura. Assim como a absorção de água pode reagir quimicamente com a matriz polimérica e promover a degradação.

A absorção de água de materiais compósitos depende de muitos fatores, como temperatura, fração de volume da fibra, conteúdo de vazios, orientação do reforço, natureza da fibra (permeável ou impermeável), geometria das superfícies expostas e difusividade e proteção da superfície (ANDREOPOULOS, 1998). O principal mecanismo de penetração de umidade em compósitos é a difusão. Esse mecanismo envolve a difusão direta de água na matriz e, em menor grau, nas fibras. Os outros mecanismos comuns são capilaridade e transporte por microfissuras.

Segundo Georgio Poulos et al. (2016) a forte resistência intermolecular da ligação fibra/matriz diminui a taxa de absorção de água do material. Para melhor adesão entre as fibras e a matriz, a taxa de absorção de água deve ser reduzida, pois há menos lacunas na região interfacial. A adição da areia de fundição nos compósitos facilitou a penetração de água nos mesmos. Esta água foi então depositada na interface polímero/carga. Portanto, um aumento no teor de carga nos compósitos acarretou o maior preenchimento dos vazios pela água. Assim, o compósito com duas camadas de areia de fundição intercaladas entre camadas da fibra de vidro e poliéster apresentou maior teor de vazios que as amostras com 1 camada e sem a adição da areia de fundição.

8.3.4 Resistência mecânica - Compressão diametral

A Tabela 08, apresenta, os resultados referentes a resistência mecânica por compressão diametral nas amostras de tubos com e sem a presença de ADF. Observa-se que a adição da ADF promove um aumento gradativo da rigidez e tensão por compressão diametral com o aumento do teor de carga e comparativamente ao análogo sem a adição de ADF. Esta característica é importante em aplicações onde a estabilidade dimensional do tubo é crítica, como exemplo cita-se os sistemas de tubulação que requerem manter uma seção transversal uniforme ao longo do tempo (fluência).

Tabela 08. Resultados dos ensaios de compressão diametral.

Amostras	Rigidez (N/m ²)	Desvio padrão (N/m ²)
PC 1	2190,6	261,02
PC 2	6776,0	515,92
PC 3	9320,9	789,05

É observado um incremento de 6829,4 N/m² na rigidez na amostra PC 3, comparativamente a amostra de PC 1.

Na prática a norma ABNT NBR 15536-2 fornece uma tabela para verificação da classe de rigidez que são adimensionais e correspondem ao valor de rigidez em Newtons por metro quadrado (N/m²) os valores especificados são de 2.500,3.750,5.000,7.500 e 10.000 N/m², para uma deformação diametral de 5% do diâmetro médio do corpo de prova e assim atender as especificações de empregabilidade do tubo. A Tabela 09, apresenta os valores mínimos de rigidez fornecida pela norma ABNT NBR 15536-2, segundo sua classificação. A classe de rigidez do tubo corresponde ao valor especificado na Tabela 8, igual ou imediatamente inferior ao menor valor medido na amostra.

Tabela 09. Valores mínimos de rigidez em N/m² requerido para 5% de deformação diametral.

Diâmetro nominal DM	Classe de rigidez				
	2.500	3.750	5.000	7.500	10.000
50 a 600	-	-	5.000	7.500	10.000
700 a 3600	2.500	3.750	5.000	7.500	10.000

Fonte: ABNT NBR 15536-2, 2023.

Com os valores de rigidez obtidos na Tabela 7, é visto que o tubo sem adição de ADF (PC1) não atende ao requisito mínimo de rigidez exigido por norma, para ser classificado em uma classe de rigidez, levando em consideração que os tubos foram produzidos com diâmetro interno de 50 mm. A classe de rigidez direciona a aplicação específica do tubo e a capacidade de tubo resistir as cargas externas e as deformações sob as diversas condições de uso. Os tubos com emprego de uma e duas camadas de ADF (PC2 e PC3) são classificados na faixa de rigidez de 7500 e 10000 respectivamente.

Segunda Norma ABNT, após definida a classe de rigidez, os corpos de prova devem suportar os níveis de deformação diametral, apresentados na Tabela 10, sem apresentar falhas, como especificado para cada nível, detalhados abaixo:

- ✓ Nível A: Os corpos de prova não devem apresentar evidências visuais a olho nu, de fissuras, fendas ou ruptura das superfícies interna e externa;

- ✓ Nível B: Os corpos de prova não devem apresentar evidências visuais a olho nu, de dano estrutural da parede tais como: separação interlaminar, ruptura de reforço de fibra de vidro, fratura ou colapso da parede do tubo.

A norma indica que os valores não devem ser inferiores à classe de rigidez especificadas, nas condições em que ela for superior, os níveis de deformação diametral devem ser calculados conforme a equações 13 e 14, a seguir.

$$\text{Nível A} = \frac{194}{R^3} (\%) \quad (13)$$

$$\text{Nível B} = \frac{324}{R^3} (\%) \quad (14)$$

Sendo:

R é referente a rigidez do tubo, dada em N/m²

Tabela 10. Deformações diametraes dos níveis A e B, em percentagem.

Nível de deflexão	Classe de rigidez				
	2500	3750	5000	7500	10000
A	14,3	12,5	11,3	9,9	9,0
B	23,9	20,9	18,9	16,6	15,0

Fonte: ABNT NBR-15536 – 2, 2023.

Após os cálculos foram obtidos os valores das deformações diametraes para os níveis A e B, sendo apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Deformações diametraes obtidas experimental para níveis A e B.

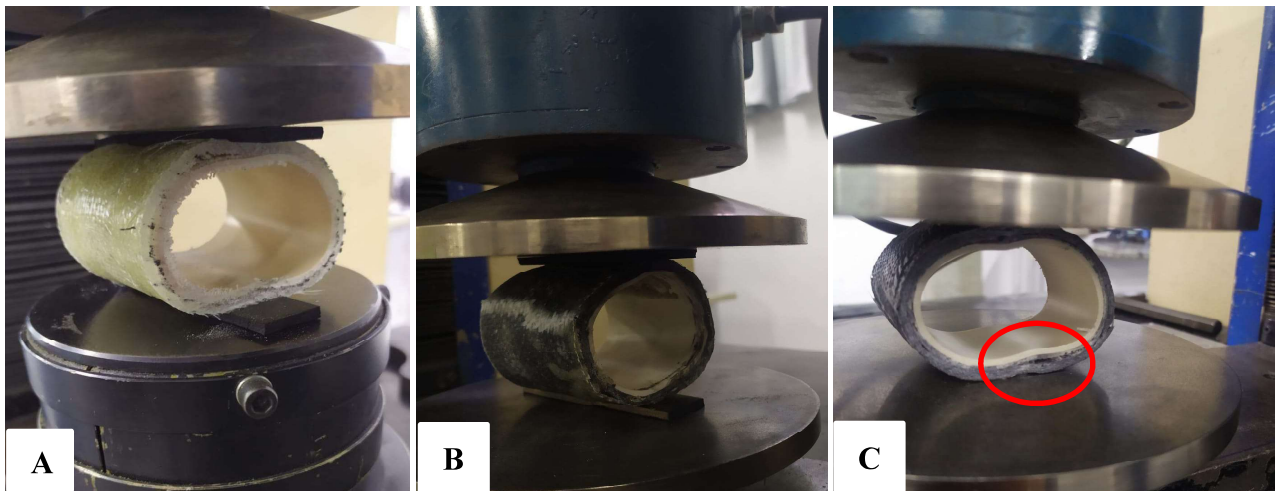
Amostras	Nível A	Nível B
PC 1	15,33	25,61
PC 2	10,56	17,63
PC 3	9,53	15,92

Fonte: A autora, 2023.

Pelas características visuais dos corpos de prova, apresentados na Figura 23, todas as amostras foram classificadas no Nível A. Neste sentido, observa-se que os valores obtidos estão ligeiramente superiores aos requeridos pela classe de rigidez tabelado, destacadas em negrito na Tabela 11.

A Figura 20, apresenta as características visuais dos corpos de prova durante o ensaio de compressão diametral, no qual pode ser observado o comportamento de deformação dos diferentes tubos diante do carregamento de força axial. Não foram observados defeitos como fissuras, fendas ou ruptura das superfícies interna e externa, porém a amostra PC3, apresentou uma separação interlaminar (evidenciada na Figura 23), que desclassifica essa amostra para nível B.

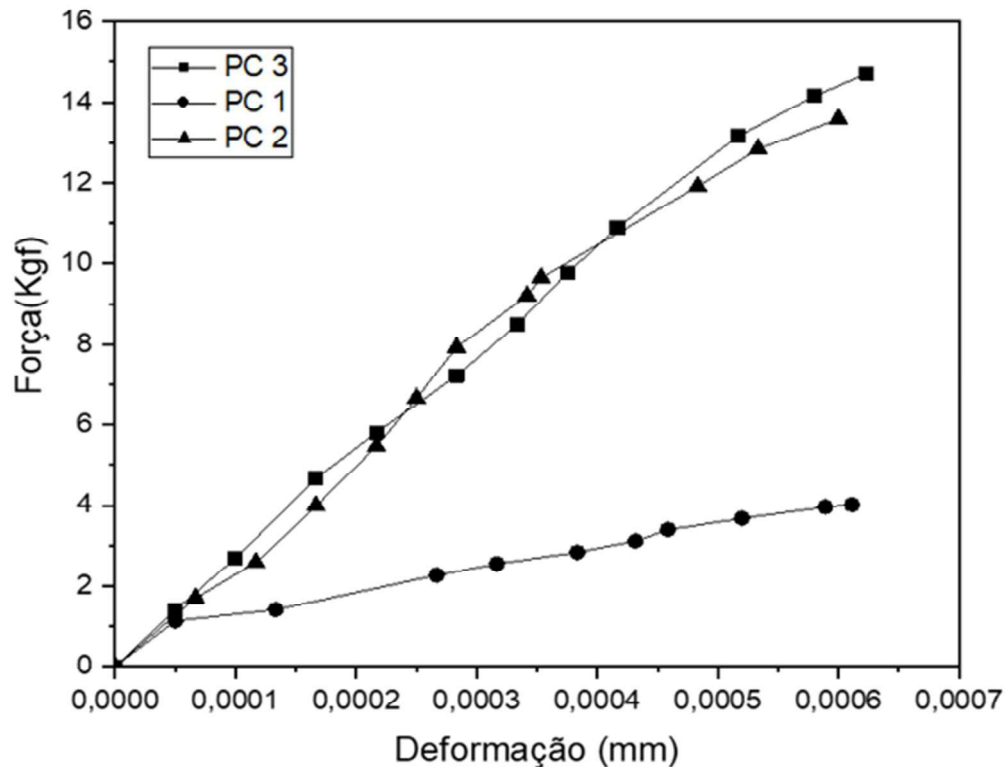
Figura 22. Sequência do ensaio de compressão diametral. Sendo (A) a amostra PC1, (B) amostra PC2 e (C) amostra PC3.



Fonte: A autora, 2023.

A Figura 21, apresenta os valores de carga aplicada (força) pelo deslocamento, obtidos no ensaio mecânica de compressão diametral. Ressalta a sobressaída dos valores de resistência dos tubos com adição de areia comparados a amostra sem adição de ADF. Esta relação também é decorrente da relação direta da rigidez ser dependente da espessura da parede do tubo.

Figura 23. Curvas obtidos do ensaio de rigidez, das amostras PC1, PC2, PC3.



Fonte: A autora, 2023.

8.3.5 Resistência mecânica - Flexão por três pontos

A Tabela 12, apresenta os valores para ensaio mecânica de flexão para os tubos, no qual são apresentados os valores de Força máxima, deslocamento ou deformação máxima, tensão e deformação.

As diversas configurações de fabricação dos tubos (quantidade e distribuição das camadas de areia) possibilitaram observar os efeitos causados pela adição de ADF, na capacidade de suportar maiores valores de cargas e conseqüentemente maiores valores de tensão. Justificada pela atuação da areia como fase rígida, que limita o movimento relativo entre as fibras do compósito (SILVA, 2020).

Tabela 12. Valores da força máxima, deslocamento máximo, tensão (σ) e deformação (ϵ) no ensaio de flexão por três pontos para tubos sem e com adição de areia. Sendo: média (\bar{x}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (cv).

	Força Máx (N)	Deslocamento na força máxima (mm)	σ (MPa)	ϵ (mm)
PC 1	3719,01(\bar{x}) \pm 1316,77 (s)	31,39(\bar{x}) \pm 5,53 (s)	385,2(\bar{x}) \pm 19,05 (s)	0,229(\bar{x}) \pm 0,96 (s)
cv (%)	35,40%	28,23%	49,51%	4,19%
PC 2	6707,60(\bar{x}) \pm 805,11 (s)	7,79(\bar{x}) \pm 0,38 (s)	1017,0(\bar{x}) \pm 0,12 (s)	0,1956(\bar{x}) \pm 0,07(s)
cv (%)	12%	4,91%	1%	1%
PC 3	7314,13(\bar{x}) \pm 8962,6 (s)	11,24(\bar{x}) \pm 0,04 (s)	1049,8(\bar{x}) \pm 0,19 (s)	0,1631(\bar{x}) \pm 0,09(s)
cv (%)	24,40%	0,42%	1,4%	1,2%

Fonte: A autora, 2023.

A média da força máxima ficou em 3719,1 \pm 1316,77 N para a amostra PC 1 e 6707,6 \pm 805,11 N para a amostra PC 2 e 7314,13 \pm 8962,6 N a amostra PC3, o que evidencia que a ação efetiva de reforço com a adição da ADF nos tubos. Porém, a adição de ADF, causou uma queda nos valores de deformação (ϵ), do compósito sendo que para a amostra PC1 a deformação foi de 0,229(\bar{x}) \pm 0,96 as amostras PC2 registrou 0,1956(\bar{x}) \pm 0,07(s) e 0,1631(\bar{x}) \pm 0,09(s) a amostra PC3.

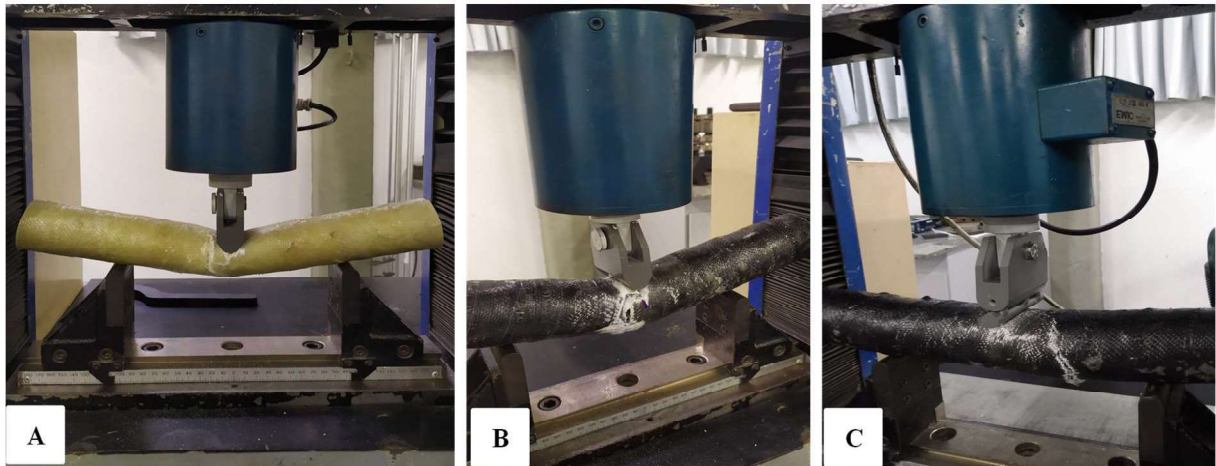
Fica evidente a diminuição na capacidade de deformação com maiores teores de ADF, visto que ela atua como componente de rigidez que reduz a capacidade do compósito de deformar sob carga.

Silva (2020), confirma que o uso de carga de reforço favorece na criação de pontos de concentração de tensão dentro do compósito, especialmente quando é submetido a cargas mecânicas, prejudicando a capacidade de deformação do material. Outro aspecto importante também relatado pelos autores, é a dificuldade de dispersão uniforme do particulado na matriz durante o processo de fabricação do compósito, isso pode levar ao aparecimento de regiões de alta concentração de partículas resultando no aparecimento de pontos fracos na amostra.

A Figura 22, apresenta as imagens dos corpos de prova no decorrer do ensaio de flexão. É observado o surgimento de regiões com coloração branca, que é tecnicamente conhecido como efeito whitening. Durante o ensaio de flexão de três apoios, o material é submetido a tensões de tração e compressão, que provocam deformações e mudanças na aparência do material (manchas brancas) na região de deformação plástica (SILVA, 2014). Para

Laiarinandrasana et al (2009) apud Silva (2014), este efeito gera nucleação e crescimento de cavidades no corpo-de-prova, aumentando a porosidade do material.

Figura 24. Sequência do ensaio de flexão por três pontos: (A) PC1, (B) amostra PC 2 e (C) amostra PC 3. E apresentação das primeiras deformações aparentes no corpo-de-prova e o efeito Whitening na região da aplicação da força e deformação atingida no corpo de prova.



Fonte: A autora, 2023.

8.3.6 Pressão Hidrostática

O teste de pressão hidrostática foi realizado com a finalidade de avaliar a integridade dos tubos quando submetidos a aplicações sob cargas de fluidos, além da identificação de descontinuidade na estrutura do compósito. Lembrando que a pressão interna é o principal tipo de carregamento que as tubulações são submetidas (OLIVEIRA, 2022).

A Tabela 13, aponta os valores de pressão de ruptura, força de ruptura e o módulo de elasticidade circunferencial o tubo.

Tabela 13. Resultados obtidos nos testes de pressão hidrostática.

Amostras	Pressão de ruptura (bar)	Força de ruptura (kN/m)	Módulo de elasticidade circunferencial (kN/m)
PC 1	$7,7 \pm 0,282$	$20,81 \pm 0,954$	$133,41 \pm 0,743$
PC 2	$10,45 \pm 1,909$	$28,87 \pm 5,275$	$183,85 \pm 0,942$
PC 3	$11,7 \pm 2,262$	$33,22 \pm 6,427$	$211,58 \pm 1,013$

Fonte: A autora, 2023.

Como pode ser observado na Tabela 13, a adição de areia causou mudanças significativas no comportamento do material, com aumento da resistência ao ensaio de pressão hidrostática. A pressão de ruptura foi superior para as amostras que receberam adição de ADF.

Este comportamento também foi observado por Barros (2007) em suas pesquisas e se justificou pelo aumento da rigidez causada com o acréscimo de quantidade de areia nas formulações. Porém, o autor ressalta que, a adição de areia, apesar de benéfica para o aumento da rigidez pode causar uma distribuição desigual de tensão sob pressão tornando mais suscetível a ruptura.

No quesito de força resultante que depende do diâmetro interno + espessura da parede dos tubos, foi registrado uma diferença de 1,37 kN/m entre as amostras PC1 e as amostras PC2. Comparando a amostras PC 1, com a amostra PC 3 temos a diferença de 1,58 kN/m, ao observarmos os dados referentes ao módulo de elasticidade circunferencial, os valores se mantem com o mesmo comportamento.

A Figura 25, apresenta as imagens dos tubos após ensaio de pressão hidrostática. Como pode ser observado, as rupturas nas amostras apresentaram características semelhantes, sendo que todas as amostras romperam no fundo, o que sugere que os valores reportados não são conclusivos, uma vez que esta pode ser classificada como uma região de fragilização e que ocorrerão de falhas induzidas.

Figura 25. Tubos rompidos após o ensaio hidrostático: (A) amostra sem adição de areia de fundição, (B) amostra com adição de 1 camada de ADF e (C) com adição de 2 camadas de ADF.



Fonte: A autora, 2023.

A falha ocorreu na parte de interna e traseira dos corpos de prova (caps) que é justificada por diversas razões como a concentração de tensões na região onde há uma descontinuidade da geometria da peça (uso de juntas/caps), tornando-a mais suscetíveis a falhas. Endossando as afirmações do autor Barros (2007) de que o fluido se comporta na estrutura no sentido axial e circunferencial, colaborando para o desprendimento de partes frágeis no momento da falha.

9. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a viabilidade de incorporar resíduo de areia de fundição em compósitos multicamadas para uso em tubulações de RPVC. Referente a caracterização da ADF, na distribuição granulométrica foi obtido um baixo percentual de teor de finos, ou seja, uma pequena porção de partículas menores que os grãos de areia. Esse baixo percentual é benéfico pois a presença de muitos finos, pode ocasionar porosidade e prejudicar o desempenho estrutural dos tubos. Referente a heterogeneidade da ADF a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV evidenciou que elas possuem diferentes formatos e tamanhos que auxilia na melhora a adesão entre as partículas e a matriz poliméricas – provocando a melhora nos aspectos de resistência a compressão. A análise química da ADF, apontou presença majoritária de 96% de sílica na forma de SiO₂ (quartzo) e foram identificados outros elementos como: alumínio, ferro, sódio e titânio.

Com relação aos compósitos produzidos na forma de placas, com e sem a adição de ADF em diferentes configurações, pode ser observado que, embora a incorporação de areia tenha resultado na deterioração de algumas propriedades mecânicas dos compósitos, a manipulação da configuração e frações de massa das camadas de resina, fibra de vidro e areia permitiu a produção de compósitos adequados para aplicações em tubulações. Além disso, a incorporação da areia aumentou a rigidez e a espessura dos compósitos.

O compósito PC4 apresentou o melhor desempenho mecânico devido a melhor adesão no contato entre a camada de areia e a manta de fibra de vidro multidirecional, que por ser mais rugosa que o tecido de fibra de vidro bidirecional (usada em PC2 e PC3) permitiu melhor ancoragem e aderência da camada de areia.

Com relação as caracterizações nos tubos de RPVC, observa-se que, o aumento na densidade das amostras com aumento do teor de ADF, visto que a ADF é um material inorgânico mais denso que os demais constituintes e o percentual de absorção de água foi maior nas amostras com 2 camadas de ADF, pois a areia quando incorporada ao compósito, pode atuar como caminhos livres de infiltração de água e ser absorvida pelo material.

Quanto a análise de microscopia óptica, nas amostras, observou-se boa adesão entre o PVC, tecido/manta e a carga de ADF, acusando poucos pontos de porosidades. Sobre a resistência mecânica a compressão diametral a adição de areia contribuiu para o aumento da espessura da parede externa do tubo, deste modo aumentou a rigidez circunferencial. Analisando os resultados do ensaio de flexão de 3 pontos, fica evidente que a amostra com adição de duas camadas de areia apresentou maior valor de tensão (σ), ou seja, a amostra

apresentou maior resistência interna para a força externa aplicada por unidade de área e, conseqüentemente, teve menor valor de deformação (ϵ), o que significa uma menor variação de uma dimensão por unidade de comprimento quando o corpo é submetido a um esforço.

Quanto ao desempenho das amostras nos ensaios de pressão hidrostática, o incremento de ADF provocou aumento significativo na pressão suportada, resultante da tensão e módulo elástico circunferencial quando comparado ao tubo de RPVC sem a adição de ADF.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Avaliar a resistência à corrosão dos tubos RPVC em diferentes ambientes como: água salgada, ácidos e compará-los com tubos com diferentes percentuais de areia de fundição.
- ✓ Avaliar o comportamento térmico dos tubos RPVC em diferentes condições de temperaturas, a fim de verificar a adequação para aplicações em ambientes com variações térmicas.
- ✓ Avaliar o desempenho em condição de carga dinâmica.
- ✓ Prover simulações computacionais, para prever o comportamento estrutural dos tubos e otimizar o design.
- ✓ Avaliar a degradação do tubo RPVC ao longo de um período.
- ✓ Reforçar a região de fundo do tubo, para maior exatidão dos valores de pressão hidrostática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU J. H., NUNES R., VISCONTE L. Misturas NR/SBR: Influência da Composição e do Modo de Preparação Sobre Propriedades Mecânicas e Reométricas, 2010.
- ALMEIDA, J. F., Caracterização de Tubos Compósitos por Microscopia Digital. In: XIV Seminário de Iniciação Científica da PUC-Rio, p. 1-8, 2006.
- ANDERSON, J. P., ALTAN, A. “Formation of Voids in Composite Laminates: Coupled Effect of Moisture Content and Processing Pressure.” Polym. Compos. 16:376–384, 2005.
Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.22952> . Acesso: 10/06/2023.
- ANJOS, P.I. Análise da Viabilidade Mecânica da Redução de Peso do Compartimento de Carga de uma Pick-Up pela Substituição de Painéis Metálicos Por Polímeros Reforçados. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-B8WH29>. Acesso: 28/06/2023.
- ARSENIAN.F. A LEBRÃO.G.W. Dimensionamento das transferências energéticas envolvidas em processo de reciclagem por micro-ondas para compósito de resina de poliéster reforçado com fibra de vidro.
Disponível em: <https://maua.br/files/arsenian-lebrao-1670868040.pdf>. Acesso: 28/06/2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D570-98 – Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. West Conshohocken: ASTM, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D790. Descreve ensaios de flexão de três pontos em plásticos rígidos e semirrígidos assim como em materiais compósitos de fibra com reforços de fibra longa, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D792 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity -Relative Density- of Plastics by Displacement, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D1599
Standard test method for resistance to short-time hydraulic pressure of plastic pipe, tubing, and fittings, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. Compósitos I: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15,702. Areia descartada de fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR15536-1. Sistemas para adução de água, coletores-tronco, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais - Parte 1: Tubos e juntas para adução de água, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR15536-2. Sistemas para adução de água, emissários de esgoto sanitário e águas pluviais - Tubos e conexões de plástico reforçado de fibra de vidro - PRFV, 1998.

BAUNGARTEN, P., MAGNAGO, R. Resistência a Compressão Mecânica de Compósitos de Poliuretano e Cimento, com Adição de Lodo de Vidro como Substituto da Areia. *MIX Sustentável*, v. 6, p. 175-182. ISSN 24473073, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.pg.175-182>

Acesso: 08/07/2023.

BARROS, G., A. Tubulações de PRFV com adição de areia quartzosa visando sua aplicação na indústria do petróleo. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2007.

BARROS, G. A; SILVA, C, CUNHA, R, FELIPE, R, MEDEIROS, G, “Avaliação do desempenho mecânico de tecidos desenvolvidos de fibras de sisal para reforço em compósitos poliméricos”. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

BAZLI, M.; ASHARAFI, H., JAFARI, A.; ZHAO, XL.; RAMAN, R.K.S.; BAI, Y. Effect of Fibers Configuration and Thickness on Tensile Behavior of GFRP Laminates Exposed to Harsh Environment. *Polymers*, 2019.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym11091401>

Acesso: 08/07/2023.

BEYCIOĞLU, A., O. kaya, Z.B. YILDIRIM, B. Bagrıaçık, M. DOBISZEWSKA, N. MOROVA, and S. Çetin."Use of GRP pipe waste powder as a filler replacement in hot-mix asphalt." *Materials*. (Basel) 13:1–15, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13204630>

Acesso: 18/07/2023.

BRANDÃO, A. Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar. 2015. 55f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2015.

BRAGANÇA S., VICENZI, J, GUERINO, K , BERGMANN.; “Recycling of iron foundry sand and glass waste as raw material for production of whiteware” *SAGE Journals*.2006.

Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X06061155>

Acesso: 18/07/2023.

CALLISTER JR., *Ciência e Engenharia de Materiais - uma nova Introdução*, 10 ed, Rio de Janeiro, LTC, 2019.

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

CARNIN, R. L. P. Por que o Brasil não tem uma Lei Federal para usar a Areia Descartada de Fundação em outros processos.2020.

Disponível em: <https://www.editoraexpressao.com/publicacoes>

Acesso: 19/07/2023.

CARVALHO, A. “Durability of composites: strain corrosion failure”. In: *Acma Infrastructure Conference*, Las Vegas, 2011.

COSTA, M.L., M.C. REZENDE, and S.F.M. de ALMEIDA. 2006. "Effect of void content on the moisture absorption in polymeric composites." *Polym. - Plast. Technol. Eng.* 45:691–698. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03602550600609549>
Acesso: 19/07/2023.

DALPIAZ, G. Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos particulados em matriz de polipropileno. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

DÁRIO, C.P. Dissertação de mestrado: Obtenção de material compósito a partir de resíduos plásticos e areia de fundição. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, 2020.

DE CASTRO, A. M.; GRISON, V.; GASPARIN. Development of a lamination process of composite material with carbon fiber and epoxy resin matrix from the wing of an aircraft. *Brazilian Applied Science*. 2020. DOI: 10.34115/basrv4n6-038. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/21329>. Acesso: 20/07/2023.

FARSHAD, M., “Determination of the Long-Term Hydrostatic Strength of Multilayer Pipes”. *Polymer Testing Magazine*, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.07.001>
Acesso: 20/07/2022.

FARRUKH, S.; GOHARI S.; MOZAFARI, F.; MOSLEMI, N.; BURVILL C., SMITH, A. Mechanical characterization of particulated FRP composite pipes: A comprehensive experimental study. *Polymer Testing*, 93, 107001, 2021; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107001>
Acesso: 17/05/2023.

FLOWTITE - flowtite technology AS.
Disponível em: <https://www.flowtite.com/>
Acesso: 02/05/2022.

GIORGINI, LORIS., Pyrolysis of Fiberglass/Polyester Composites: Recovery and Characterization of Obtained Products. *FME Transactions*, p. 405-414, 2016.

GUNOZ, A.; KEPİR, Y.; KARA, M. The investigation of hardness and density properties of GFRP composite pipes under seawater conditions. *Turkish Journal of Engineering*, 34 - 39, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31127/tuje.775536>
Acesso: 17/08/2022.

Hamdan, M.H.M, J.P. SIREGAR, S. THOMAS, M. J. JACOB, J. JAAFAR, AND C. TEZARA. 2019. "Mechanical performance of hybrid woven jute–roselle-reinforced polyester composites." *Polym Polym Compos*. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0967391119847552>
Acesso: 05/08/2022.

ISMAIL, A.S., M. JAWAID, J. NAVEEN. "Void content, tensile, vibration and acoustic properties of kenaf/bamboo fiber reinforced epoxy hybrid composites." *Materials*, 2019.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12132094>

Acesso: 05/08/2022.

JAWAID, M., H.P.S.A. KHALIL, A.A. BAKAR, and P.N. KHANAM. 2011. "Chemical resistance, void content and tensile properties of oil palm/jute fibre reinforced polymer hybrid composites." *Mater*, 2018.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.033>

Acesso: 18/10/2022.

JURUMENHA, REIS, "Experimental investigation on the effects of recycled aggregate on fracture behavior of polymer concrete". *Materials Research Magazine*, 2011.

DOI: 10.1590/S1516-14392011005000060

LAIARINANDRASANA L., BESSON J., LAFARGE M., HOCHSTETTER G., "Temperature dependent mechanical behaviour of PVDF: Experiments and numerical modeling", In: *International Journal of Plasticity* 25, p. 1301–1324, 2009.

LEE, D. G., CHIN, W. S., KWON, J. W., Yoo, A. K., *Repair of Underground buried Pipes with Resin Transfer Molding*. Elsevier, Korea, 2002.

MANO, E. B., *Polímeros como Materiais de Engenharia*. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1991.

MARTINS., N., *Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal*. 2016. 100p. Tese 59 (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MENDONÇA, P. T. R., *Materiais Compostos e Estruturas-sanduíche*. Barueri / SP, Ed. Manole, 2005.

MELO J. D., F. LEVY, N., G. DE ARAUJO BARROS, and F.N. De Almeida Mesquita. 2011. "Mechanical behavior of GRP pressure pipes with addition of quartz sand filler." *J. Compos. Mater.* 45:717–726.

Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998310385593>

Acesso: 02/11/2022.

MOKHOTHU, T.H.; JOHN, M.J. Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites. *Carbohydrate Polymers*. p.337-354, 2015.

NAIK, N. K.; SIRISHA, M.; INANI, A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013.

NATSUKI, T., TAKAYANAGI H., TSUDA, H., "Prediction of Bending Strength for Filament-Wound Composite Pipes". *Journal of reinforced plastics and composites*, Japão, 2003.

Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0731684403022008002>

Acesso: 26/02/2023.

NAYAK, S.K, SATAPATHY.A, 2021. "Development and characterization of polymer-based composites filled with micro-sized waste marble dust." *Polym. Polym. Compos.* 29:497–508. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0967391120926066>
Acesso: 20/03/2023.

NUNES.G, MANES.A, AMICOL.S. Processamento de compósitos espessos aramida/epóxi por Infusão a vácuo e desempenho sob impacto, Congresso Brasileiro de Polímeros, 2018.

OLIVEIRA, W., Comportamento mecânico e Característica da Fratura em Compósitos Híbridos, Dissertação de M.Sc., PPGEM/UFRN, Natal, RN, Brasil, 2005.

OLIVEIRA, V.G. Análise do comportamento de fluência de compósitos cilíndricos de basalto/epóxi e de vidro/epóxi submetidos a diferentes temperaturas e carregamento hidrostático. Master's Dissertation, USP, 2022.

PEREIRA, W.A; CERON, I; SOUZA E SILVA, M; FREITAS, M, P, C; SILVA, E, R; COSTA, F, M. "Development of polymeric composites reinforced with buriti leaf fiber". *Matéria RJ*,2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1232>.
Acesso: 20/03/2023.

QUINAYÁ, P. Tese de doutorado: Fabricação e Caracterização de Materiais Compósitos Resina Epóxi/Fibras de Bucha (*Luffa cylindrica*). Pontifia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (2017).
Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/31211/31211.PDF>

RAFIEE, R. "Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes." *Compos. Part. B. Eng.* 45:257–267,2013.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.009>
Acesso: 09/04/2023.

RAMOS, V. D., COSTA. M., SOARES. P., et al., "Compósitos híbridos de resina epóxi modificada com copolímero de butadieno acrilonitrila terminado em carboxil e microesferas de cinzas volantes", pg. 219–226, 2005.

REIS, J, FERREIRA, M., Assessment of Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete Reinforced with Short Carbon and Glass Fibers. Elsevier, Portugal, 2004.

REIS, J.M.L.; COSTA A.R.; MATTOS, H.S.C. Repair of damage in pipes using bonded GFRP patches. *Composite Structures*, 296, 115875, 2022.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115875>
Acesso: 03/06/2023.

ROSENOW, M. W. K., "Wind Angle Effects in Glass Fiber-Reinforced Polyester Filament wound pipes". *Composites Magazine*, 1984.
Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(84\)90727-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(84)90727-4)
Acesso: 26/09/2022.

RUBIN, C. Artigo da Revista TAE – Tratamento de água e efluentes: Nova Geração De Tubulações Para Efluentes E Esgotos Dá Cara Nova Às Redes.

Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/476/nova-geracao-de-tubulacoes-para-efluentes-e-esgotos-da-cara-nova-as-redes>

Acesso: 16/10/2022.

SAENZ-CASTILLO, D., M.I. MARTÍN, S. CALVO, F. RODRIGUEZ, GÜEMES.A, 2019. “Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites.” *Compos. Part. A. Appl. Sci. Manuf.* 121:308–20.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.035>

Acesso: 12/11/2022.

SEM - Fabricante de tubos, conexões e equipamentos em geral em PRFV (Plástico Reforçado em Fibra de Vidro).

Disponível em: <https://sem.com.br/quemSomos>

Acesso em 21/07/2022.

SIDDIQUE, R.,SINGH.G. 2011. "Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing." *Resour. Conserv. Recycl.* 55:885–892.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>

Acesso em 21/07/2022

SILVA, I. L. A.; SANTOS, A., J., G., FARIAS., D., C., COSTA., D., S., determinação de propriedades mecânicas de tração de compósitos híbridos reforçados utilizando fibras de bambu tratadas em solução NaOH. 2019. *Brazilian Applied Science Review*.

Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv5n6-010>

Acesso em 04/07/2022

SILVA, E. Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito com resina poliéster e carga de pó de cimento. 2020. 77f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020

SULTANA, R. AKTER, A. 2013. "Preparation and Characterization of Sand Reinforced Polyester Composites." *Int. J. Eng. Technol.*

VETRO - Soluções inteligentes em fibra de vidro

Disponível em: <https://www.vetro.com.br/institucional/historico>

Acesso em: 13/06/2023.

XIA, M., TAKAYANAGI, H., KEMMOCHI, K.,"Analysis of Filament-Wound Fiber-Reinforced Sandwich Pipe Under Combined Internal Pressure and Thermomechanical Loading". *Composite Structures* 2002. DOI:10.1016/S0263-8223(01)00181-7

ZIMMERMANN.M.G. V, JUNCA.E, BERNARDO.M.A. CATTO.A. L, BORSOI.C.

Desenvolvimento de compósitos de poliéster insaturado/fibra de vidro com areia de fundição, *Revista TMM - Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*.

Disponível: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20222772>

Acesso em: 09/05/2023.