



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Enio da Cunha Dias

**Estudo de reparos para embarcações navais à base de compósitos de poliéster e resina epóxi sobrepostas em chapas de aço ASTM A-131**

Rio de Janeiro

2022

Enio da Cunha Dias

**Estudo de reparos para embarcações navais à base de compósitos de poliéster e resina epóxi sobrepostas em chapas de aço ASTM A-131**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra Patrícia Reis Pinto

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/CZO

D541 Dias, Enio da Cunha

Estudo de reparos para embarcações navais à base de compósitos de poliéster e resina epóxi/ sobrepostas em chapas de aço AST A-131/Enio da Cunha Dias – 2022.  
67 f.

Orientador: Alex da Silva Sirqueira  
Corientador: Patrícia Reis Pinto

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

1. Ciência e Tecnologia de Materiais – Teses. 2. Manutenção de embarcações – Teses. 3. Ensaios mecânicos em compósitos - Teses. 4. Adesão de compósitos – Teses. I. Sirqueira, Alex da Silva. II. Pinto, Patrícia Reis. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia. IV. Título.

Bibliotecária: Rosana Maria dos Passos – CRB 7 4908

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Enio da Cunha Dias

**Estudo de reparos para embarcações navais a base de compósitos de poliéster e resina epóxi sobrepostas em chapas de aço ASTM A-131**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 14 de dezembro de 2022

Orientador : Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - UERJ

Coorientadora: Profa. Dra. Patricia Reis Pinto

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - UERJ

Banca Examinadora:

---

Profa. Dra. Wilma Clemente de Lima Pinto

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias – UERJ

---

Dr. Erick Lorenzato Ferreira Vianna

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Rio de Janeiro

2022

## RESUMO

DIAS, Enio da Cunha. *Estudo de reparos para embarcações navais a base de compósitos de poliéster e resina epóxi sobrepostas em chapas de aço ASTM A-131*. 2022. 68 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Após a construção de uma embarcação, utilizando material por aço ou por plásticos reforçados com fibras, existe a necessidade de executar manutenções periódicas ao longo da sua vida útil. Entre as mais diversas áreas de manutenções de uma embarcação, tais como, propulsão, motores diesel e elétricos, um dos mais importantes: é o reparo na estrutura do casco. Nos navios em aço este reparo é feito substituindo chapas degradadas por novas com a mesma especificação de material, em embarcações de fibras, também, é feito o reparo com novas peças do mesmo material ou é utilizado a técnica de relaminação utilizando camadas de resinas e fibras. O objetivo deste estudo é englobar esses dois universos, materiais metálicos e resinas reforçadas, e realizar experimentos (reparos), utilizando base de resinas reforçadas com fibras sobre chapas de aço estrutural naval do tipo ASTM A-131. Testes mecânicos de tração, impacto de Charpy, dureza e testes hidrostáticos foram feitos e foi verificado tanto a capacidade de aderência como a resistência do compósito. Testes de microscopia foram realizados para verificar a morfologia das amostras do compósito, retirados após o ensaio destrutivo hidrostático, para realizar análise de falha. Os ensaios se mostraram bastante satisfatórios com boa aderência da resina sobre o substrato, suportando uma pressão hidrostática de mais de 35 bar, qualificando o estudo e aprovando a técnica como uma alternativa de reparo para embarcação naval em aço ASTM A-131

Palavras-chave: Manutenção de embarcação. Ensaio mecânico em compósitos. Adesão de compósitos.

## ABSTRACT

DIAS, Enio da Cunha. *Study of repairs for naval vessels based on polyester composites and epoxy resin on steel sheets ASTM A-131*. 2022. 68 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

After the construction of a vessel, using steel material or fiber reinforced plastics, there is a need to carry out maintenance throughout its useful life. Among the most diverse areas of maintenance of a vessel, such as propulsion, diesel and electric engines, one of the most important is the repair of the hull structure. In steel ships, this repair is done replacing degraded plates with new ones with the same material specification, in fiber vessels, the repair is also done with new parts of the same material or the relamination technique is used using layers of resins and fibers. The objective of this study is to join these two universes, metallic materials and reinforced resins, and to carry out experiments (repairs), using a base of resins reinforced with fibers on naval structural steel sheets of the ASTM A-131 type. Mechanical tensile tests, Charpy impact, hardness and hydrostatic tests were carried out and both the adhesion capacity and the resistance of the composite were verified. Microscopy tests were carried out to verify the morphology of the composite samples, taken after the hydrostatic destructive test, to perform failure analysis. The tests proved to be quite satisfactory, with good adherence of the resin to the substrate, enduring a hydrostatic pressure of more than 35 bar, qualifying the study and approving the technique as an alternative for repairing a naval vessel in ASTM A-131 steel.

Keywords: Vessel Maintenance. Mechanical tests on composites. Composite Adhesion

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Trincas sob corrosão-fadiga (esq.) e furo por pit (dir.) em um casco de navio com chapas ASTM A131.....	13
Figura 2 –	Gráfico do TGA de uma resina polimérica.....	16
Figura 3 –	Corpos de prova de PRF aderidos a chapas de aço ASTM A131 para ensaio de tração com força axial.....	33
Figura 4 –	Corpos de prova de PRF aderidos a chapas de aço ASTM A131 para ensaio de tração com força transversal ao eixo .....	35
Figura 5 –	Corpos de prova em “I” e em “X”.....	36
Figura 6 –	Dispositivo de ensaio do teste hidrostático.....	37
Figura 7 –	Corpos de prova de ERFC, ERFV, PRFC e PRFV.....	39
Figura 8 –	Curva DSC da resina de Poliéster – 1º Aquecimento.....	41
Figura 9 –	Curva DSC da resina de Poliéster – 2º Aquecimento.....	42
Figura 10 –	Curva DSC da resina Epóxi – 1º Aquecimento.....	42
Figura 11 –	Curva DSC da resina Epóxi – 2º Aquecimento.....	43
Figura 12 –	CPs após ensaio de tração.....	44
Figura 13 –	Curva de ensaio de tração.....	44
Figura 14 –	Corpos de Prova após ensaio de <i>Peel Test</i> .....	47
Figura 15 –	Gráfico do resultado do ensaio de impacto de Charpy.....	49
Figura 16 –	Corpos de prova após ensaio de Charpy.....	50
Figura 17 –	Ensaio Hidrostático de PRFC antes da ruptura.....	51
Figura 18 –	Representação gráfica do ensaio hidrostático não destrutivo.....	52
Figura 19 –	Gráfico de absorção de água.....	53
Figura 20 –	Amostras para investigação de falha em MEV.....	55
Figura 21 –	Amostras de PRFV em um microscópio óptico de 60x.....	56
Figura 22 –	Amostras de PRFC em um microscópio óptico de 60x.....	56
Figura 23 –	Imagem de MEV da amostra ERFC “A”.....	57
Figura 24 –	Imagem de MEV da amostra da PRFC “C” 100x.....	57
Figura 25 –	Imagem de MEV da amostra da fig. ERFV “B”.....	58
Figura 26 –	Imagem de MEV da amostra da fig. PRFV “D”.....	58
Figura 27-	Processo de laminação à mão.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Comparativo de metais e compósitos de matrizes poliméricas.....	17
Tabela 2 –	Sumário de teoria das adesões.....	25
Tabela 3 –	Composição química do aço estrutural Naval ASTM A-131.....	27
Tabela 4 –	Corpos de prova do ensaio de tração alinhado ao substrato.....	34
Tabela 5 –	Corpos de prova do ensaio de tração em “X”.....	35
Tabela 6 –	Parâmetro do ensaio de Charpy.....	39
Tabela 7 –	Propriedades do sistema não curado das resinas.....	40
Tabela 8 –	Resultados do DSC, Temperatura de Cura (TC) e Temperatura de Transição Vítrea (TC).....	43
Tabela 9 –	Comparativo do resultado dos ensaios de Tração.....	45
Tabela 10 –	Propriedades do sistema curado das resinas.....	46
Tabela 11 –	Comparativo do resultado dos ensaios de desprendimento.....	47
Tabela 12 –	Análise de variância para dados do ensaio de <i>Peel Test</i> .....	48
Tabela 13 –	Comparativo do resultado dos ensaios de Dureza.....	48
Tabela 14 –	Análise de variância para verificação de dados do impacto de Charpy.....	50
Tabela 15 –	Pressão máxima antes do rompimento do ensaio hidrostático.....	51
Tabela 16 –	Resultado da Calcinação das amostras.....	54
Tabela 17 –	Comparativo dos valores de mercado dos materiais.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
PRF	Plásticos Reforçados com Fibra
RTM	Moldagem por transferência de Resina
RE	Resina Epóxi
DGEBA	Éter de Diglicídio do Bisfenol A
ECD	Epicloridrina
BPA	Bisfenol A
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
FC	Fibra de Carbono
FV	Fibra de Vidro
IS	Indian Standard
TG/TGA	Termogravimetria
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição Vítreas
T <sub>m</sub>	Temperatura de fusão cristalina
T <sub>c</sub>	Temperatura de Cristalização
CP	Corpo de Prova
ERFC	Epoxi Reforçado com Fibra de Carbono
ERPF	Epoxi Reforçado com Fibra de Vidro
PRFC	Poliéster Reforçado com Fibra de Carbono
PRFV	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro
PRF	Polímero reforçado com Fibra

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
1.1	<b>Materiais Compósitos – Polímero Reforçado com Fibras (PRF)</b> .....	14
1.1.1	<u>Teor de Fibras em Volume</u> .....	15
1.1.1.1	<i>“Burn Off Test”</i> – Análise do teor de Fibra por Calcinação.....	15
1.2	<b>Propriedades Mecânicas dos PRF</b> .....	16
1.3	<b>Matrizes Poliméricas</b> .....	17
1.4	<b>Resinas poliméricas</b> .....	18
1.4.1	<u>Resina Poliéster Insaturada (RPI)</u> .....	19
1.4.2	<u>Resina Epóxi (RE)</u> .....	20
1.4.3	<u>Cinética das Resinas x Temperatura</u> .....	21
1.4.4	<u>Adesão em Resinas</u> .....	22
1.5	<b>Reforços – Fibras</b> .....	25
1.5.1	Fibra de Carbono (FC) .....	26
1.5.2	Fibra de vidro (FV) .....	26
1.6	<b>Substrato - Aço estrutural Naval ASTM 131 A</b> .....	27
1.7	<b>Ensaio</b> .....	28
1.7.1	<u>Ensaio de tração</u> .....	28
1.7.2	<u>Ensaio de impacto de Charpy</u> .....	28
1.7.3	<u>Ensaio de Dureza</u> .....	29
1.7.4	<u>Ensaio tipo Peel Test</u> .....	29
1.7.5	<u>Teste Hidrostático</u> .....	29
1.7.6	<u>Ensaio de Absorção de água</u> .....	30
1.7.7	<u>Microscopia Eletrônica de Varredura</u> .....	31
1.7.8	<u>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</u> .....	31
2	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	32
2.1	<b>Materiais</b> .....	32
2.2	<b>Ensaio</b> .....	32
2.2.1	<u>Ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</u> .....	32
2.2.2	<u>Ensaio de Tração Eixo Axial</u> .....	33

2.2.3	<u>Ensaio de tração Eixo Transversal (<i>Peel Test</i>)</u> .....	34
2.2.4	<u>Ensaio de Dureza</u> .....	36
2.2.5	<u>Ensaio Hidrostático</u> .....	36
2.2.6	<u>Ensaio Absorção de Água</u> .....	38
2.2.7	<u>Microscopia para análise de falha</u> .....	38
2.2.8	<u>Ensaio de Impacto de Charpy</u> .....	38
2.2.9	<u>Teor de Cinzas</u> .....	39
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	40
3.1	<b>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</b> .....	40
3.2	<b>Ensaio de Tração</b> .....	44
3.3	<b>Ensaio de <i>Peel Test</i></b> .....	45
3.4	<b>Ensaio de Dureza</b> .....	48
3.5	<b>Ensaio de impacto de Charpy</b> .....	48
3.6	<b>Ensaio Hidrostático Destrutivo</b> .....	50
3.6.1	<u>Ensaio Hidrostático Não-Destrutivo</u> .....	51
3.7	<b>Absorção de Água</b> .....	52
3.8	<b>Teor de Cinzas</b> .....	53
3.9	<b>Análise da falha por Microscopia</b> .....	54
4	<b>VALOR AGREGADO</b> .....	58
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	59
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61
	<b>Apêndice A</b> .....	66

## INTRODUÇÃO

Sabe-se que boa parte da superfície do nosso planeta é composta por água e com a necessidade de pessoas e mercadorias transitarem num mundo globalizado, a via marítima mostrou necessária para esse fluxo ocorrer e garantir o desenvolvimento das sociedades, cabendo ao Homem elaborar algo que flutuasse e se movimentasse, as primeiras embarcações da humanidade foram construídas de madeira, mas com o desenvolvimento do aço, aquelas foram sendo substituídas por esta tecnologia.

Os navios ou embarcações são segmentados em grupos conforme sua aplicação. O mercado de transporte de cargas conta com uma frota de aproximadamente 95.000 barcos mercantes (ASSARIOTS *et al.*, 2019), o que possibilita atender a demanda do comércio mundial, outro setor importante é o transporte de passageiros que favorece o mercado do turismo. Além do uso comercial, uma parte das embarcações tem utilidade para a defesa naval de um país, outras tantas, são responsáveis pelo suporte de extração de recursos naturais dos oceanos (MANDAL, 2017). Com a prosperidade do mundo globalizado e as inúmeras construções de embarcações produzidas por ano para atender a variados serviços, cabe aos operadores marítimos manterem sua respectiva frota em condições operacionais, sendo mantenedores dos navios ao redor do mundo e absorvendo toda a infraestrutura para manutenção destes meios.

A partir do início do século XX, a tecnologia das embarcações obteve forte desenvolvimento e a junção de chapas metálicas, que utilizava rebites, foi substituída por junção de solda (MANDAL, 2017). Em outro espectro, em meados do século XX, foi iniciado, embora, para a época, com conhecimento mais rudimentar de resina do que se tem hoje, embarcações utilizando um novo material, o plástico reforçado, tendo a fibra de vidro como reforço (MARSH, 2006), esse tipo de material é mais utilizado em embarcações menores devido a pouca capacidade de criar módulos e juntar as peças, diferente das embarcações metálicas (GARDINO, 2017). Com o advento da necessidade de novas aplicações, os compósitos foram, também, utilizados na área naval como forma de substituição de materiais metálicos com objetivo de redução de peso, eliminação de ruídos, de vibração e de interferência magnética, economia de custos e união de peças onde existe dificuldade de acesso (DAEI-SORKHABI, 2019).

No caso particular da manutenção do casco/estrutura do navio dos dois materiais, embora a tecnologia tenha melhorado em muitos aspectos, o conceito da metodologia de reparo e manutenção não teve grandes alterações. Em embarcações metálicas, o processo

consiste em conformação de novas chapas, corte da área degradada e substituição das novas chapas onde estavam as chapas removidas por meio de solda elétrica. Em embarcações de fibra de vidro, após ajustagem com lixamento da área danificada, são feitos reparos fixando novo material por meio de relaminação.

Navios mercantes tem seus períodos de manutenção demarcados em função de classificadoras que autorizam a continuidade da operação de um meio naval, realizando inspeções anuais e intermediárias para avaliar as condições gerais e, a cada cinco anos, faz-se uma análise estrutural de casco e dos respectivos tanques com o navio no dique, local onde os navios estão em ambientes secos, fora do contato da água (IACS, 2018), realizando também a manutenção da pintura do navio, que normalmente são duas camadas de prime epóxi e três camadas de *anti fouling* (ROBERTS, 2018) e, assim, manter um ciclo de vida da embarcação esperado que dura entre 25 a 30 anos (ASHARI *et al.*, 2018). Navios de guerra, construídos no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro ou incorporados pela Marinha do Brasil, tem manutenções de acordo com sistema de manutenção planejada para cada projeto de navio (ASSAD, 2017).

Aços-carbono com elementos de liga representam a maior parcela em massa da frota mundial (GHENO, 2018), apesar de terem uma boa relação custo/benefício para aplicação marítima, a água do mar é um eletrolítico altamente corrosivo para este material. Estruturas metálicas imersas na água do mar como barcos, sofrem severas corrosões se não forem protegidas apropriadamente. Proteção catódica é frequentemente adotada combinando com pintura para proteção dessas estruturas marítimas, podendo ser tanto as proteções por anodo de sacrifício, maioria das pequenas embarcações, como anodo por corrente impressa, melhor proteção para embarcações maiores (XU, 2021). Estatísticas mostram que danos nos cascos das embarcações são ocasionados aproximadamente por 90% de falhas atribuídas a corrosão incluindo a corrosão-fadiga, que é a uma falha combinada de tensões quando estão suscetíveis a perda de material ou alteração morfológica por corrosão. A previsão de degradação por corrosão das chapas é feita a partir de modelos ou inspeções que possam controlar a espessura da chapa (ZAYED, 2018). Durante as inspeções de docagem é realizada inspeção de espessura de chapa que monitora continuamente o desgaste por corrosão, sendo um critério de avaliação para substituição de chapas metálicas. Na Figura 1, do lado esquerdo, é possível observar uma trinca em área cuja houve perda de material por corrosão, à direita na Figura 1, observa-se um furo formado por corrosão por pit. As imagens da figura foram retiradas

de uma embarcação, após realizar a docagem no estaleiro militar do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, para realização de inspeção estrutural.

Figura 01 – Trincas sob corrosão-fadiga (esq.) e furo por pit (dir.) em um casco de navio com chapas ASTM A131.



Fonte: Autor, 2022.

Outros defeitos que podem surgir são trincas por tensões cíclicas, por concentração de tensões, por vibração de motores ou propulsores. Podem surgir também deformações por excesso de carga ou choques no casco durante realização de manobras ou mesmo acidentais. (IACS, 2018).

O objetivo deste estudo é continuar aprimorando aplicações dos compósitos na área naval, utilizando o conceito de polímero como junções adesivas e a resistência reforçada de um compósito do tipo matriz polimérica reforçada por fibras comerciais sintéticas para reparos em cascos de navios em chapas de aço ASTM A-131 como substrato, tendo a corrosão como precursora do dano.

O ato de relaminação, que é a aplicação de uma camada sobre outra, já mostra o poder de adesão das resinas comercialmente usadas para este fim, as principais são: a éster vinílica, a epóxi e a poliéster (BUROGAIN, 2017), o fato, neste caso, é que a adesão é obtida no mesmo material polimérico, excetuando a área em contato pelo reforço das fibras. Das três citadas, encontra-se bastante informações das resinas epóxi, em vários estudos de pesquisa, sobre a aplicação deste material como adesivo em uma gama de substratos, incluindo, com interesse mais exclusivo para este estudo, o metal (PIAZZI, 2018), sendo utilizadas em diversas aplicações devido a sua versatilidade e boas características em geral.

As vantagens da utilização de resinas reforçadas com fibras devem-se ao fato de serem leves e de fácil armazenamento, podendo ser estocado na própria embarcação para pequenos reparos, tempo de realização do serviço mais curto e sem necessidade de uma fonte de energia elétrica próxima, equipamentos industriais e mão de obra especializada. Outra vantagem nesse reparo é que não há necessidade de fogo ou calor, diferente do reparo tradicional, o que pode economizar o tempo necessário até que o navio esvazie tanques de combustível ou óleo lubrificante. Por outro lado, a grande desvantagem é que o reparo não pode ser de grandes dimensões, devido à falta de estrutura para realização da laminação no substrato. Assim, este estudo engloba reparos pequenos, em áreas degradadas com furo por pit ou falta de estanqueidade da chapa por trincas. O estudo elaborará alguns ensaios que possa colaborar com o entendimento da metodologia da aplicação do material e comprovar que seja eficiente contra os esforços promovidos pela pressão hidrodinâmica contra o casco da embarcação.

Devido ao enfoque industrial deste estudo, foram utilizadas resinas comerciais, que, por sua vez, tendem a ser mais baratas pelo volume de demanda de mercado e de maior facilidade para compra. Especificamente para este tipo de trabalho de laminação com fibras, foram escolhidas duas resinas termofixas: resinas poliéster ou epóxi, reforçadas com fibras de vidro ou carbono

## **1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1 Materiais Compósitos – Polímero Reforçado com Fibras (PRF)**

Os materiais compósitos primam pela possibilidade de reunir características diferentes e, ao mesmo tempo, conseguirem cooperar entre si para buscar um novo material com qualidade superior. As resinas reforçadas, objeto de estudo deste trabalho, é a maior subdivisão do uso dos compósitos. Existem diversos tipos de matrizes para uma enormidade de combinação de reforços, as matrizes poliméricas tem boa aceitação em diversas aplicações de projetos de engenharia quando não há requisitos de alta temperatura, mas sobretudo, quando há necessidade de obter materiais de peso leve. Pelo conjunto de combinações possíveis de materiais compósitos sempre é possível desenvolver grupo de materiais que possam atender requisitos específicos e peculiares (BUROGAIN, 2017). O conjunto de materiais do compósito tem que estar bem aderidos

e integrados, caso contrário, a interface matriz/reforço pode ser frágil, podendo ocasionar falhas por desprendimento das fibras (VASILIEVY, 2018).

Os compósitos com reforço sintético feitos com fibras contínuas podem apresentar orientação unidirecional ou bidirecional, dessa forma, quando o material é moldado pode se adotar um sentido preferencial em virtude de que objetivo se pretende alcançar (Neto, 2018).

### 1.1.1 Teor de Fibras em Volume

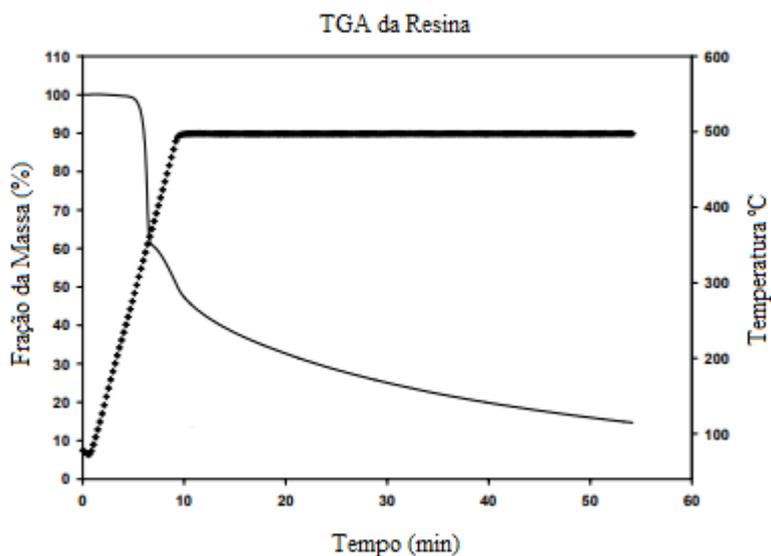
O teor de fibras influencia de forma considerada as propriedades mecânicas de um compósito. A fração volumétrica da fibra de carbono ou fibra de vidro encontra-se em torno de 30 a 50% normalmente em um compósito, mas pode variar de acordo com o processo de fabricação ou necessidade de alguns requisitos mínimos do material (EKSE, 2017).

A análise volumétrica da fibra/matriz pode indicar, em um processo de fabricação, a existência de vazios no compósito ou algum parâmetro ineficiente tal como uma cura incompleta (McDONOUGH, *et al.*, 2004).

#### 1.1.1.1 “*Burn Off Test*” – Análise do teor de Fibra por Calcinação

Um método para avaliar a concentração de fibras nos compósitos é por meio da queima (“burn off”) da resina, uma vez que este material se degrada em temperaturas menores que as fibras de vidro ou de carbono. Para o ensaio apresentar resultados satisfatórios, a temperatura não pode afetar o estado das fibras, o procedimento é descrito no método I – G da ASTM-D3171. Resumidamente, põe-se o corpo de prova em um forno mufla pré-aquecido em 500°C ou menos, dependendo do material, ajustado conforme a ignição do material, a temperatura então é configurada para deixar a matriz somente em pó e o reforço aparente, o tempo máximo deste procedimento é de até 6 horas. Após o tempo necessário do processo, é verificado o peso das fibras separadas do resto da matriz e, então, é comparado com o peso total antes da calcinação. Os estudos de (McDONOUGH, *et al.*, 2004) demonstraram que, em até 900°C, as fibras de carbono e de vidro permanecem quase intactas, não sofrendo grandes degradações nesse processo térmico. Uma faixa de temperatura para realizar a queima do polímero encontra-se um pouco abaixo da faixa de 500 °C, como pode ser visto no gráfico de TGA da Figura 2.

Figura 2 - Gráfico do TGA de uma resina polimérica



Fonte: W. G. McDonough *et al.*, 2004

## 1.2 Propriedades Mecânicas dos PRF

As propriedades mecânicas de PRF dependem das características dos seus próprios materiais constituintes, assim, pode-se citar como variação de tal característica, a distribuição, tipo e orientação da fibra, conteúdo de vazios ou bolhas, cura adequada da resina como elementos que influenciam diretamente nas propriedades dos PRF, além da natureza de fixação na interface matriz/fibra e do mecanismo de transferência de carga entre si (EL-WAZERY *et al.*, 2017). Por se tratar de materiais híbridos, os PRF são identificados como materiais anisotrópicos.

Em relação as propriedades mecânicas das matrizes poliméricas. Braun, *et al.* (2012) verificou que estas não dependem exclusivamente da sua composição química para garantir um resultado previamente esperado, outro fator preponderante é no campo das macromoléculas, variações do peso e distribuição molecular, ramificação, reticulado das ligações cruzadas e linearidade da formação das cadeias alteram de forma relevante as propriedades da resina ou matriz polimérica.

Polímeros são altamente influenciados pela temperatura, eles tendem a possuírem propriedades mecânicas enfraquecidas quando submetidos a temperatura elevada, eliminando a inserção deste material em determinados serviços que a temperatura seja mais elevada que a ambiente.

Assim como outros materiais, compósitos também apresentam fadiga em cargas cíclicas, mas apresentam boa resposta sob este efeito, não sendo tão prejudicial como nos metais, análise reforçada sob o ponto de vista de MYER (2015). A Tabela 1 apresenta valores de referência para a tensão última e densidade entre metais e compósitos, com as fibras de carbono apresentando valores altos em relação a fibra de vidro picado.

Tabela 1: Comparativo de metais e compósitos de matrizes poliméricas

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo GPA	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Última (MPa)	Alongamento (%)
SAE 1010	7,87	207	365	303	20
AISI 4340	7,87	207	1722	1515	20
TI-6Al-4V	4,43	110	1171	1068	8
FC 0°/RE	1,55	138	-	1550	1,1
FV picado/RE	1,87	15,8	-	164	1,7
FV 0°/RE	1,85	39,3	-	965	2,5

Fonte: Murray G. T., 1997.

### 1.3 Matrizes Poliméricas

A função da Matriz em um compósito é envelopar as fibras mantendo o arranjo das lacunas da interface Fibra/Matriz dispostas de acordo com a característica que se pretende obter do material, também é sua função, caso seja necessário, dissipar as cargas externas entre as fibras, protegendo-as de impactos (DEBA, 2017). A matriz polimérica garante tenacidade e modela o produto acabado, sendo, portanto, um material com menor resistência a tensão do que a fibra. Estas, por sua vez, por serem mais resistentes, absorvem as maiores cargas tensionadas do material compósito quando em condições de carregamento.

A Matriz isoladamente tem grande influência na característica do material compósito em vários aspectos no que se referem as suas propriedades mecânicas. Uma larga variedade de materiais no âmbito dos compósitos utiliza o sistema de resina reforçada com fibras, sendo muito comum e comercialmente produzida, nesse grupo, a fibra de vidro. A matriz polimérica pode ser constituída de polímero termoplástico ou termofixo. Polímeros termoplásticos tem a característica de perderem sua forma sólida

por meio de calor, mas podem ser resfriados e enrijecidos novamente, assumindo qualquer forma de acordo com o molde. Os termofixos são endurecidos por meio de reações químicas (“cura”) com algum tipo de catalisador ou, ainda, por copolimerização através do aumento de calor. Diferente dos polímeros termoplásticos, não se pode moldar o material já curado. Caso aconteça, a exposição do material sob uma fonte de calor pode desagrega-lo, uma vez que o processo de cura das resinas termofixas não é reversível (CAMPOS *et al.*, 2022).

#### **1.4 Resinas poliméricas**

As resinas poliméricas sintéticas constituem grandes cadeias de moléculas, também conhecidas como polímeros, são produtos normalmente derivados do petróleo. Atualmente, o desenvolvimento de polímeros está em grande expansão. No surgimento das resinas sintéticas, as aplicações eram bem limitadas, porém, com o passar do tempo, e com novas pesquisas e estudos, a versatilidade deste material seria evidenciada e, hoje, se destaca como alternativa de diversos materiais no ramo da engenharia (JAWORSKI, 2020).

Resinas termofixas podem conter aditivos para facilitar seu processo de endurecimento, onde alguns componentes misturados a resinas podem: reduzir ou acelerar o “gel time” (fase de transição da resina entre a fluidez permissível e a solidificação), modificar a faixa de temperatura em que ocorre a polimerização, melhorar as propriedades de tixotropia (mecanismo de escorrimento do produto líquido) da resina para facilitar sua aplicação, alterar a cor do produto com inclusão de pigmentos, reduzir toxicidade ou inflamabilidade, ou até mesmo incluir cargas com valor econômico menor do que a resina para simplesmente exercer a função de preenchimento, reduzindo o custo total do material (TRES, 2017).

Em comparação com as resinas termoplásticas, as termofixas têm a vantagem de poderem ser aplicadas e moldadas em temperaturas normais de ambiente, possuem boa estabilidade térmica e dimensional, boa rigidez e uma qualidade superior quando considerada especificamente a resistência química. A formação do reticulado (aspecto morfológico das ligações cruzadas dos polímeros) que ocorre por meio de reações químicas promove boas características gerais contra intempéries (HAN *et al.*, 2022)

Resinas termoplásticas possuem processos de fabricação com custo mais elevado para formação de materiais compósitos. Isso se deve pelo processo controlado, tanto do

calor a ser gerado, como o método de impregnação das resinas sobre as fibras. Em compensação, podem ser derretidos e resfriados diversas vezes, o que viabiliza a reciclagem e elimina o custo de refugo. Ainda, como uma vantagem a ser considerada, o processo total da peça é realizado num menor período de tempo (CAMPOS, 2022).

#### 1.4.1 Resina Poliéster Insaturada (RPI)

A Análise por Aurer (2003) complementados por Smithers (2009) observa que a RPI é a base do sistema em compósitos mais largamente utilizado na indústria marítima. Isso se deve ao fato desta resina ter propriedades excepcionais contra a ação da corrosão neste ambiente agressivo em relação a outros materiais. A RPI tem um baixo custo, possui temperaturas de “gel time” menores que as da epóxi e possui baixa viscosidade. Essas características que promovem esta resina como um material bastante versátil para manufatura em alta escala de plásticos reforçados, principalmente quando utilizados em processos automatizados como o de pultrusão (sistema de repuxo de resinas com tecidos de fibra de vidro dentro de moldes formando principalmente perfis), o de enrolamento filamental, o de centrifugação, o de moldagem por Transferência de Resina, entre outros.

A quantidade de mistura de ácidos saturados e insaturados é o que fornece a característica da propriedade da resina e influencia na reativação da cura. As resinas mais comuns no mercado utilizam ácidos saturados isoftálicos ou ortoftálicos, normalmente classificadas no rótulo comercial do produto. O ortoftálico é mais econômico e mais utilizado de uma forma global; as resinas isoftálicas vêm ganhando destaque nas indústrias, principalmente na área industrial marítima devido a sua melhor resistência contra a água salgada. Já os ácidos insaturados mais comuns são os isômeros do tipo anidrido maleico ou o ácido fumárico. Este último é mais utilizado quando se pretende obter uma melhor formação de reticulado pela copolimerização com o estireno, incrementando as propriedades gerais da resina (PARK, 2011).

O endurecimento, ou polimerização, ocorre a partir dos radicais livres, onde sua ativação transcorre por meio de catalisadores do tipo peróxidos orgânicos que se decompõe de duas maneiras: por meio de aceleradores, o que possibilita curar a resina em temperatura ambiente com taxas de polimerização mais rápida, ou por aumento da temperatura da resina.

Frequentemente, para aceleradores, são utilizados sais de cobalto numa faixa de 1% a 10%, onde os íons do cobalto reagem com o peróxido formando uma reação

reduzora. A maioria das resinas comerciais já inclui o cobalto na sua composição, por ser um material inerte até a ativação do catalisador. A adição deste material acaba facilitando a preparação da resina pelo operador que apenas se preocupa com a relação de resina e catalisador recomendada pelo fabricante. Resinas com cobalto na composição são chamadas de “pré-aceleradas”, a real aceleração da resina só é possível quando se mistura com o catalisador (XU, 2016).

O peróxido mais largamente utilizado é o Metil Etil Acetona, também conhecido como Butanox. É possível moldar a resina na fase inicial da polimerização até o ponto que a progressão sucessiva do reticulado impossibilite a fluidez da resina, a partir desse momento, a fase de gel se finaliza e inicia o processo de solidificação, chamado de cura da resina. Para um processo específico, existem possibilidades de influenciar o tempo de gel da resina, alterando as propriedades dos materiais base utilizados na resina, inserindo aditivos inibidores ou aceleradores (XU, 2016).

Uma vez curada a resina continuará o amadurecimento, podendo durar várias semanas ou menos de acordo com a temperatura ambiente e os materiais selecionados, alcançando, assim, as propriedades finais do material.

A RPI possui, em massa, de 30 a 50% de estireno. A miscibilidade da resina e do estireno depende da composição da resina determinada pelo fabricante. Os efeitos do volume do estireno na resina, após a cura, apresentam modificações diretas na estabilidade térmica e propriedades mecânicas das resinas de Poliéster Insaturada (LIMA, 2018; KANG, 2020).

#### 1.4.2 Resina Epóxi (RE)

As resinas epoxi pertencem a uma classe de resinas termofixas caracterizada por dois óxidos de etileno, ou grupos epóxis, dentro da sua estrutura molecular. Os epóxis geralmente superam a maioria dos outros tipos de resina em termos de propriedades mecânicas e resistência a intempéries ou ambientes agressivos, o que leva ao seu uso quase exclusivo em componentes de aeronaves. Assim, como sua aplicação, as RE são largamente estudadas no campo de pesquisa científica, sendo o polímero termofixo com maior número de publicações disponíveis como relatado por Park, 2011.

Os epóxis diferem das resinas de poliéster na forma de polimerização, no primeiro, existe um "endurecedor" que solidifica a resina epoxídica por meio de reações ativadas pelos agentes de cura, enquanto nas RPI, essa função é do catalisador que apenas tem

função de ativar o processo de cura da resina. O endurecedor geralmente usa uma amina para curar a RE por uma reação de adição, onde ambos os materiais reagem quimicamente. Geralmente, os epóxis são curados pela adição de um endurecedor de amina para 2 partes de resina epóxi. A proporção deve ser mantida conforme recomendação do fabricante sob o risco de a resina não reagir com o endurecedor por completo e, assim, apresentar propriedades finais diferentes das desejadas ou informadas pelo fabricante.

A resina epóxi mais comum é o Éter de Diglicídio do Bisfenol A (DGEBA) que é preparado pela reação de Eplocoridrina (ECD) e Bisfenol A (BPA). Apesar disso, pode-se produzir uma grande variedade de resinas que pode ser produzida ajustando a concentração dos reagentes. Uma resina líquida, sólida ou semissólida variando o peso molecular conforme se modifique as repetições de polimerização da resina. Assim, as resinas epóxi estão disponíveis em várias consistências, desde líquido de baixa viscosidade até um sólido sem aderência. As RE apresentam boa adesão a vários substratos devido a região periférica a superfície possuir hidróxidos e éter, principalmente boa adesão em materiais metálicos. (VERMA, 2020)

As REs têm excelente desempenho no geral, exercendo a função de matriz polimérica de compósitos reforçados com fibras de carbono, aramida e de vidro. Assim como a RPI, a RE tem bastante versatilidade nos métodos de fabricação de compósitos, podendo ser aplicados por laminação à mão ou processos automatizados/semiautomatizados, mencionado Tres (2017).

Segundo Brockmann *et al.* (2009), as RE são bem mais duráveis que as RPI, possuindo uma vida útil maior, além de serem mais resistentes contra a ação de raios ultravioletas. As RPI também têm uma tendência de auto polimerização em temperaturas um pouco mais elevadas (sem presença do catalizador).

#### 1.4.3 Cinética das Resinas x Temperatura

A cura da resina termorrígida é um processo de interação com endurecedor que propaga mudanças nas suas propriedades químicas e físicas acompanhadas de liberação de calor. A análise dessa medida de calor em função do tempo e temperatura é importante para determinação da cinética de cura. A gelificação e a vitrificação são os dois fenômenos macroscópicos mais importantes que ocorrem durante a cura de sistemas termorrígidos.

A gelificação é a origem ao comportamento viscoelástico do fluido. O sistema passa de um líquido viscoso à um gel elástico. Após a gelificação, o processo de cura continua mais lentamente, porque a mobilidade do sistema fica mais restrita devido ao aumento da densidade de ligações cruzadas. Esse aumento do número de ligações cruzadas provoca um acréscimo na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas do material. A técnica mais utilizada no estudo do comportamento cinético destas resinas é a calorimetria exploratória diferencial

Conforme relatada por Sanches (1996), no caso das RPIs, a reação de copolimerização da resina é que é acompanhada pela liberação do calor. O calor exotérmico da cura das RPIs está associado com as reações de propagação do radical livre do estireno, com a dupla ligação do poliéster insaturado e com a decomposição do iniciador do peróxido.

Na área de compósitos, a técnica de DSC tem sido muito utilizada para obter conhecimento prático do melhor procedimento associado à cinética de polimerização na impregnação das fibras e do ciclo de cura (DRZEŹDŹON, 2018).

#### 1.4.4 Adesão em Resinas

Segundo Brockmann *et al.* (2009). A adesão é um processo de junção de dois ou mais materiais formando apenas um corpo solidário. A energia de adesão pode ser dividida em duas categorias com uma linha tênue em suas respectivas definições, essas duas categorias podem ser compreendidas basicamente pela variação da distância de dois ou mais corpos. A primeira trata-se de adesão química ou energias de curto alcance e, a segunda, forças de adesão intermolecular ou forças de longo alcance.

No estudo sob o efeito de adesão, já foram realizadas diversas formas de ensaios para obtenção de resultados empíricos das forças de adesão entre as interfaces dos materiais compósitos. Embora uma quantidade numerosa de testes possa apresentar uma maior confiabilidade na aplicação de um material compósito, mensurar a força de adesão na interface dos materiais não é algo simples de se definir, podendo ocorrer uma falha no sistema testado por diversos fatores e não, necessariamente, pela adesão dos materiais envolvidos. O mais importante na realização desses tipos de ensaios, de forma individual e/ou de forma solidária, é investigar elos de pontos fracos simulando as condições de serviço reais. Com isso, é possível compreender problemas que são considerados

aceitáveis no projeto de engenharia ou que obrigatoriamente deva ser corrigido de forma a incrementar melhorias no processo de fabricação ou, até mesmo, realizar a substituição da matéria-prima.

Antes de elaborar um material do tipo resina adesiva alguns fatores podem ser de grande valia no controle da capacidade de adesão, tais como, peso molecular, grau de ramificação, densidade das ligações cruzadas, composição química e regularidade das cadeias moleculares. Ensaio de reologia podem também ser úteis em condições cíclicas, uma vez que consegue testar o material viscoelástico em função da fase de relaxamento e de tensionado da estrutura, verificado por Park (2011).

Para começar, na análise da adesão de polímeros nos substratos, os efeitos da rugosidade podem ser contraditórios. A rugosidade pode manter pontos de ancoragem na resina, mas também, pode impedir o preenchimento completo da resina no substrato, formando bolhas de ar e formação de cavidades na interface que podem, futuramente, serem precursores de defeitos que se propagariam até uma falha por falta de adesão. Se a condição de superfície for um problema, pode-se, por meio de tratamentos superficiais, obter alterações na rugosidade ou melhorar os efeitos de atração entre os materiais a serem aderidos.

Ainda nesse contexto inicial de fixação dos materiais, Park *et al.* (2011) observaram que durante a aplicação da resina no material aderido é que ocorrem as primeiras interações interfaciais dos materiais. A capacidade de incremento da força de adesão pode ser alcançada com as mais diversas combinações dos materiais envolvidos nas forças de adesão de curto e longo alcance e, por conseguinte, modificações das interações químicas e eletronegatividade das moléculas.

Brockmann *et al.* (2009) verificou que a característica da capacidade de impregnação da resina, dentro da fase de “gel time”, é importante sobretudo do ponto de vista da moldagem e da sua aplicação. Um aspecto a ser observado na interface dos materiais é a tensão de superfície da resina na fase líquida quando aplicada no substrato. A tensão de superfície envolve duas grandezas: a força de atração que demonstra a capacidade de dois materiais em estados diferentes estarem em maior área de contato quando estão juntos e a coesão que são forças internas de um líquido que induz as moléculas a se manterem agrupadas em contato com outro material sólido. Líquidos com forças coesivas fracas e com forte atração com o material sólido tendem a se espalhar melhor na superfície contribuindo para um bom preenchimento da resina sobre o substrato. Uma forma de mensurar o binômio das tensões coesivas e de atração da

interface sólido-líquido é por meio do ensaio de ângulo de contato. Materiais metálicos normalmente possuem alta energia de superfície ou atração molecular, fortalecendo as forças de adesão de materiais adesivos.

Ghanem *et al.* (2017) estudaram a forma da adesão de dois materiais, tendo como base sete teorias que são as mais aceitas ao conceito de adesão e influenciam em menor ou maior escala a capacidade de uma resina aderir a qualquer substrato (SILVA *et al.*, 2018), são estas abaixo, no final, a Tabela 02 informa um resumo das teorias e suas ligações:

1. Travamento Mecânico – esta teoria consiste na fixação de matérias por meio de poros e cavidades dos materiais com o material aderente. A capacidade de penetração da resina poderia alcançar melhores resultados de adesão do que superfícies lisas. Esta teoria hoje em dia é muito contestada devido a existência de vários materiais terem boa aderência com as mais diversas faixas de rugosidade;
2. Eletrostática – Esta teoria considera que na interface dos materiais há uma interação entre elétrons que fornecem boa atração do polímero com os metais. Os materiais devem ser necessariamente dissimilares para que ocorra a atração eletrônica;
3. Teoria da difusão – Esta teoria é mais aceita para materiais similares, tais como, dois polímeros, as cadeias de macromoléculas interagem na interface do material aderido com o material adesivo promovendo a força da adesão total do material;
4. Capacidade de impregnação (Molhabilidade) – Esta teoria propõe que interações moleculares entre as superfícies contribuem para a formação de adesão. Uma completa penetração da resina preencheria qualquer espaço no substrato, maximizando a área de contato. Nesse contexto, devido as propriedades físico-químicas das substâncias, a tensão superficial do adesivo sendo menor que do aderente promoveria melhor penetração do material líquido;
5. Teoria ácido-base de Lewis – A atração destes elementos pode ser considerada pelas atrações eletrônicas de doação e captação de elétrons na superfície;

6. Teoria de ligamento enfraquecido – Consiste na capacidade total do polímero aderir a um substrato imediatamente após a sua aplicação. Nesse contexto, o conjunto de impurezas ou camadas de resina com vazios sob a superfície ou, ainda, a reação incompleta da resina na interface do substrato pode produzir superfície de adesão fraca, reduzindo a força de adesão dos materiais;
7. Ligação química ou molecular – É uma das mais antigas e mais aceitas para descrição do mecanismo de adesão. Nesta teoria, entende-se que não há difusão e nem efeitos eletrostáticos e a união dos materiais poderia ser atribuída por forças na superfície em grupos polares de dois materiais idênticos ou dissimilares. Então, a união deve-se por meio de interações do tipo de Van der Waals, ligação iônica, covalente ou metálica.

Tabela 2: Sumário de teoria das adesões

Nº	Teoria de adesão	Escala de ação
01	Travamento Mecânico	Macroscópica
02	Eletrostática	Macroscópica
03	Difusão	Molecular
04	impregnação	Molecular
05	Ácido - Base	Molecular
06	Elo Fraco	Molecular
07	Ligação química	Atômica

Autor: Silva *et al.* (2018)

### 1.5 Reforços – Fibras

As fibras promovem incrementos específicos de certas propriedades mecânicas em materiais compósitos, incluindo a rigidez (módulo de Young), resistência mecânica, resistência ao impacto, estabilidade dimensional, resistência ao calor, propriedades elétricas, entre outros. A junção da qualidade superior da resistência da fibra com a flexibilidade das resinas constitui a indústria de compósitos por mais de 50 anos.

Existem diversos tipos de forma de reforços em compósitos, assim: filamento contínuo, partículas, picados, fitas, tecidos com as mais variadas direções tanto unifilares como trançados. Entre essas, as fibras alinhadas são as mais comuns e mais eficientes, sendo usadas exclusivamente em materiais de alto desempenho. A maior parte de demanda de fibras na indústria de compósitos são as de vidro, carbono e aramida.

#### 1.5.1 Fibra de Carbono (FC)

O departamento de transporte dos EUA e Park (2011) apresentam dados que mostram que a FC tem uma resistência tal qual as do aço, mas com peso próximo as dos plásticos. Tem boa resistência em temperaturas ambientes, assim como, em altas temperaturas, boa rigidez, baixa expansão térmica, boa resistência química, mas são frágeis em relação aos esforços das tensões de compressão e as forças de alto impacto. Essas propriedades não são iguais em todas as direções das fibras, sendo um material altamente anisotrópico, ou seja, suas propriedades mecânicas diferem conforme o ângulo de carregamento solicitado, no caso das FC, estas possuem alta resistência na direção do eixo dos filamentos. O fato das propriedades mecânicas serem melhores na direção do alinhamento das fibras faz com que o material possa receber maior esforço em determinada direção. As propriedades únicas das FC beneficiam a indústria de alto desempenho tais quais automobilística, aeroespacial e esportes de competição.

Em sua literatura, Bader (2002) menciona que Propriedades, tais como densidade e módulo de elasticidade, são determinadas durante o processamento e, também, dependente da fibra precursora. Hoje em dia, encontram-se uma grande quantidade de fibras com variada resistência e módulo de elasticidade disponível no mercado.

#### 1.5.2 Fibra de vidro (FV)

A FV é um dos materiais precursores no uso de compósitos, provavelmente o primeiro a ser desenvolvido principalmente por ser um produto econômico e de rápida produção. Muitas vezes, se confunde o nome do compósito de matriz e reforço de fibra de vidro com o material de fibra de vidro em si, sendo chamado simplesmente de Fibra de Vidro. A FV é uma mistura de componentes derretidas em um forno e processada em dispositivos para formação de filamentos, Kulshreshtha, (2002) avalia que o material é o mais empregado na área de compósitos, podendo ser encontrado em vários tipos de

formatos, sendo o mais comum é o do tipo “E-Glass” que tem bastante resistência elétrica e boas propriedades mecânicas. O vidro é uma fibra ideal para reforço de resinas, o material é um dos mais fortes com tensão última de 3.5 GPA em um filamento de 9 a 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro, por outro lado, o módulo de elasticidade é baixo quando comparados a outros reforços, e são frágeis, sendo suscetíveis a acontecerem quebras do material, o que lhes confere baixo desempenho para resistência a fadiga. Outras características desta fibra é que não é um material combustível.

### 1.6 Substrato - Aço estrutural Naval ASTM 131 A

Esta classe de aço é destinada primordialmente para à fabricação de cascos de navios e embarcações em geral, como também aos diversos tipos de estruturas oceânicas, em especial plataformas offshore dos tipos fixa, semi-submersíveis, TLPs ( Tension-Leq Plataform ), FPSOs (Floating, Production, Storage and Offloading) e navios-sonda. A classe do material ASTM-A131 tem requisitos mínimos de especificação que garantem certas propriedades em testes de impacto, tensão de escoamento e propriedades químicas para obtenção de um material de boa soldabilidade. As classes A, B, D, CS e E são de aços com especificações de resistência comum, enquanto as classes AH, DH, EH e FH são de alta resistência.. As classes de aço estrutural para área naval, de uma maneira geral, são regidas por norma ASTM ou pelas entidades classificadoras Internacionais. A Tabela informa valores da composição química do aço ASTM A-131

Tabela 3: Composição química do aço estrutural Naval ASTM A-131

Grau A	C	Mn	Si	P	S	C + Mn/6
% (máx)	0,21	2,5 X C	0,50	0,035	0,035	0,40

Fonte: ASTM A131/131M Standard Specification for Structural Steel for Ships, 2014.

## 1.7 Ensaaios

### 1.7.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é fundamental para o conhecimento das características mecânicas de algum material. O ensaio é realizado submetendo um corpo de prova a uma carga uniaxial que será incrementada lentamente e de forma controlada até sua ruptura. As propriedades sob tração são bastante suscetíveis à preparação da amostra e condições de ensaios como velocidade, temperatura e umidade em alguns casos.

A norma ASTM D3039 define procedimentos para testes de compósitos com matriz polimérica reforçadas com fibras contínuas ou descontínuas.

O ensaio de tração tem correlação com a deformação, apresentando um gráfico de tensão x deformação com dados que podem fornecer certas propriedades do material ensaiado.

### 1.7.2 – Ensaio de impacto de Charpy

O ensaio de impacto de Charpy é uma técnica de ensaio destrutivo que caracteriza a capacidade de absorção de energia de um material por meio do impacto, em baixa velocidade, de um martelo sob um corpo de prova. Considerando materiais de compósitos laminados, Almeida *et al.* (2018) verificou que as condições de falha são fortemente dependentes das fibras (orientação, arranjo, etc.), resinas (tipo de início de propagação) e da característica da interface fibra/resina. Um compósito com elevada resistência ao cisalhamento interfacial, ou seja, com excelente ligação fibra/matriz, apresentará uma grande resistência mecânica, devido à efetiva transferência de tensão da matriz para a fibra. Entretanto, um elevado valor de resistência ao cisalhamento interfacial acarreta um compósito com baixa tenacidade já que pouca energia seria consumida durante a propagação das trincas na fratura. Estas trincas se propagam quase exclusivamente através da interface e junto à fibra que se constitui na região não-uniforme de maior concentração de tensões. Por outro lado, um compósito com baixo valor de resistência ao cisalhamento interfacial e uma ineficiente transferência de esforços da matriz para a fibra, terá relativamente maior energia. A razão para isto é que uma grande energia deve ser gasta no descolamento da fraca interface, ramificando a trinca e descolando a fibra da matriz através do mecanismo de arranque da fibra durante a fratura.

### 1.7.3 – Ensaio de Dureza

Myer (2015) avaliou que o conhecimento da dureza de um material pode determinar a resistência ao desgaste, à tensão, ao impacto e ao “descolamento”, também, informar características de rigidez e impenetrabilidade do material para materiais compósitos. A dureza tipo “D” é uma escala mais apropriada para utilização nos PRF envolvidos nesse estudo.

Defeitos na superfície da matriz ou tratamentos na superfície do material podem alterar as características de dureza de uma matriz polimérica que tanto pode incrementar o valor da dureza como o diminuir. A relação da fração volumétrica de fibras dentro de um compósito com matriz polimérica afeta consideravelmente a dureza deste compósito, incrementando a dureza tanto quanto o teor de fibras é aumentado.

### 1.7.4 Ensaio tipo “*Peel Test*” – Ensaio de “descolamento”

O ensaio de “*Peel Test*” é realizado por meio de uma máquina que registra a força suportada de um material adesivo preso a um material até que haja a separação das peças, normalmente a direção da força está em um ângulo de 90° ou 180° em relação ao material aderido.

Ebnesajjad, (2015) analisaram que o ensaio de “descolamento” é importante para conhecer a força máxima que um material poderá ficar unido com outro por meio de contato adesivo. O teste em si, não apenas, demonstra a força máxima suportada pelo adesivo, mas, também, informa as características da interface do material aderido e o aderente, possibilitando conhecer premissas do método de aplicação do material, técnicas realizadas de limpeza da superfície, tratamentos superficiais de ambos materiais e verificação de um eficiente sistema de cura.

### 1.7.5 Teste Hidrostático

O teste hidrostático é um método de verificar a resistência da parede de um material ou verificar vazamentos. Testes hidrostáticos são normalmente usados para certificação de equipamentos ou sistemas de tubulação. Os testes consistem em pressurizar o equipamento, normalmente, por 1,5 vezes a pressão de trabalho por um

determinado tempo, o teste é interrompido prematuramente se existir algum vazamento ou se exceder a resistência do material.

#### 1.7.6 Ensaio de Absorção de água

Conforme Muñoz (2015), existem três principais mecanismos de absorção de água em PRF, a saber:

- ✓ Difusão – Este mecanismo de transporte de absorção ocorre nos vazios dentro das cadeias dos polímeros
- ✓ Capilaridade – Este mecanismo de transporte age na interface da Fibra e da Matriz
- ✓ Absorção - Transporte da água por meio das moléculas

Munoz (2015) fez estudos com materiais poliméricos analisando a absorção de água e notificou que no início do processo, a absorção segue um aumento linear até que o aumento do volume e peso da massa do corpo de prova torna-se bem baixo, demonstrando o saturamento da mistura. Sendo assim, um período de 24 hrs de absorção seria o suficiente para análise das propriedades mecânicas de um material.

Em determinadas fibras de PRF, a capacidade de absorção da água diminui quando se eleva o teor de fibra, assim como, pode influenciar a capilaridade de absorção de água. A absorção de água pela resina pode comprometer a adesão da interface com a fibra, mas este efeito pode ser revertido segundo relata Munoz (2015), observação feita a partir de vários estudos com matrizes poliméricas com fibra de vidro e carbono. Ainda nesses apontamentos foram verificados que as análises empíricas demonstraram variações do volume absorvido de água, mas que, em geral, todos apresentaram propriedades mecânicas reduzidas conforme volume fracionário de água que foi incorporado.

### **1.7.7 MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura**

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica capaz de fornecer informações visuais precisas sobre a morfologia de materiais sólidos, além da análise de suas características microestruturais. O princípio da técnica de microscopia eletrônica de varredura se baseia em um feixe de elétrons acelerados por um canhão de elétrons, este feixe quando entra em contato com a amostra, varre sua superfície, gerando uma série de sinais, que são utilizados para formar as imagens e dessa maneira obter informações sobre a topografia das amostras.

Esta técnica de microscopia pode aprofundar detalhes importantes do mecanismo de falha de um compósito, capacidade de impregnação de uma resina, avaliar a capacidade da força adesiva de um material sob o aderente e vazios na estrutura.

### **1.7.8 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

A técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC) é largamente utilizada para a caracterização de polímeros. Consiste em um ensaio no qual é medida a diferença de temperatura entre a amostra a ser caracterizada e uma substância inerte, quando ambas são submetidas a um programa controlado de temperatura (CANEVAROLO, 2003). A amostra é submetida a uma rampa de aquecimento uniforme, com temperatura monitorada por meio de um termopar e comparada com a temperatura da amostra de referência (LUCAS, 2001) As transições entálpicas (endotérmicas ou exotérmicas), são responsáveis pela mudança na temperatura e indicam mudanças de fases, fusão, oxidação e vaporização, entre outras reações químicas (MOTHÉ, 2009). A análise de DSC é comumente utilizada para a determinação das temperaturas de transição vítrea, fusão cristalina e cristalização ( $T_g$ ,  $T_m$  e  $T_c$ ), entalpias de fusão e ocorrência de cinética de reações como cura e decomposição.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material utilizado para formação da matriz polimérica foram as resinas: epóxi 2001 (endurecedor EPOXI 3154) da Redelease e poliéster insaturado (catalizador Arazyn 11.0) da ARA Química.

A resina epóxi base do sistema epoxi é um produto líquido, resultante da Eplicoridrina com o Bisfenol A (DGEBA) com endurecedor a base de poliamina (DETA) com boas propriedades para laminação a mão, peso específico de 1,16 g/cm<sup>3</sup> e viscosidade 11000 – 14000 cP a temperatura de 25°C. A proporção da mistura aplicada foi de 2 partes da base de epóxi para 1 parte de endurecedor conforme orientações do fabricante.

A resina de poliéster insaturada utilizada foi a isoftálica, de baixa reatividade e “pré-acelerada”, o catalisador utilizado foi o peróxido de metil etil cetona (butanox) na proporção de 100:1.

As fibras de reforço utilizadas foram as malhas de fibras de vidro picadas do tipo “e-glass”, da e-composite, unidos por um ligante em pó de poliéster compatível com o monômero de estireno com 300g/m<sup>2</sup> de gramatura. As fibras de carbono são de tecido unidirecional de trama plana e módulo com 300g/m<sup>2</sup> de gramatura e com módulo de elasticidade padrão, 290 GPA

### 2.2 Ensaaios

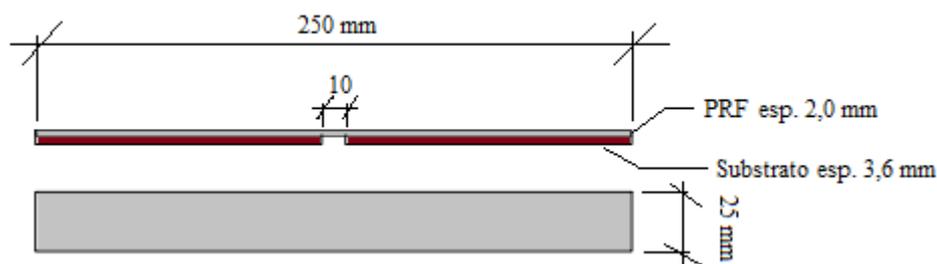
#### 2.2.1 Ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Foram separadas duas amostras de resinas poliéster e epóxi. Então, logo em seguida, as amostras foram misturadas conforme instrução do fabricante, colocados em um cadinho de alumínio e então realizado o ensaio. Primeiramente, foi realizado o ensaio com uma amostra de 8,40 mg de resina Poliéster e, depois, outra com 5,48 mg de resina Epóxi, utilizando o equipamento DSC Shimadzu, modelo DSC-60. As curvas DSC foram realizadas com faixa de temperatura de 0° a 300°C a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. A curva exotérmica mostra o processo de cura da resina que é inerente dos processos de cristalização de polímeros.

### 2.2.2 Ensaio de Tração Eixo Axial

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram alinhados ao substrato e cortados em 40 partes de chapa de aço ASTM A 131 com dimensões de 25,0 x 120,0 x 3,7 mm de forma plana. Depois, foi realizada a limpeza superficial das peças com solvente Thinner Natrielli para remover qualquer contaminação. As peças foram impregnadas com resina e, então, as malhas de fibra foram sobrepostas as resinas, sendo colocada duas camadas de fibra de vidro picados e duas camadas de fibra de carbono (uma camada de fibra de carbono unidirecional alinhada ao substrato e outra transversal). Assim, as chapas foram unidas por meio da adesividade do PRF pelo método de laminação a mão (*Hand-lay-up*) com espaçamento de 10,0 mm entre as chapas como visto na Figura 3, deixando o PRF de forma contínua e mantendo o esforço total de tração no compósito durante o ensaio de tração, realizando um ensaio adaptado do procedimento da ASTM D3039, a grande mudança no objetivo do teste é que será testado tanto a resistência à tração como a resistência à força de “descolamento”, o ensaio será concluído quando o compósito tiver sido rompido ou quando este se descolar do substrato. A área total de contato do PRF com o substrato foi considerada de 6000 mm<sup>2</sup>, conforme desenho. A célula de carga do ensaio é de 5 kN, a velocidade deste carregamento é de 50 mm/min, testado no equipamento Instron EMIC, modelo 23-30.

Figura 3. Corpos de prova de PRF aderidos a chapas de aço ASTM A131 para ensaio de tração com força axial



Fonte: Autor, 2022.

Os 20 corpos de prova foram identificados como R1 a R20, sendo 05 de cada conjunto de material, conforme visto na Tabela 4.

Tabela 4. Corpos de prova do ensaio de tração alinhado ao substrato

Material	R1-R5	R11-R15	R6-R10	R16-R20
Resina	Epoxi	Poliéster	Epoxi	Poliéster
Fibra	Vidro	Vidro	Carbono	Carbono

Fig.09. 20 Corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Autor 2021.

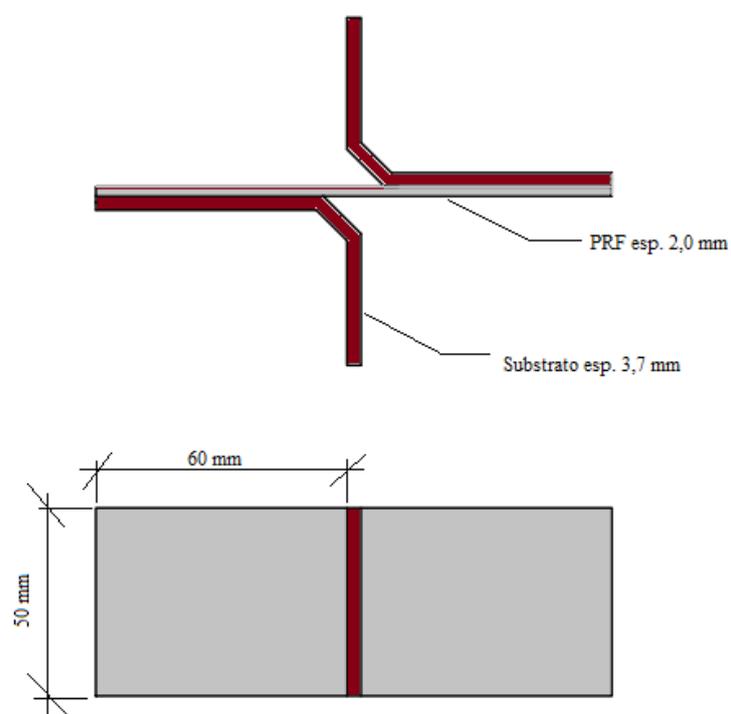
### 2.2.3 Ensaio de tração Eixo Transversal (*Peel Test*)

Foram construídas 40 peças em formato “L” com dimensões de 50,0 x 60,0 x 3,7 mm na aba superior, lixados manualmente e utilizado solvente para limpeza, para construção dos corpos de prova para realização do ensaio de tração com a força na direção de 90° em relação a superfície de contato do substrato e o PRF conforme visto na Figura 10. Assim como os outros corpos de prova, a união das peças foi realizada por meio do PRF pelo método de laminação a mão, mantendo a mesma área na superfície de contato do ensaio de tração axial que é de 6000 mm<sup>2</sup>, considerando nesta área, o vão sem contato de adesão do substrato. A célula de carga do ensaio é de 5kN, a velocidade deste carregamento é de 50 mm/min, testado no equipamento Instron EMIC, modelo 23-30. Estes CPs estarão identificados conforme Tabela 5, a Figura 3 mostra a dimensão do corpo de prova e a Figura 4 mostra o ensaio sendo realizado com a posição do CP em relação ao suporte de fixação da máquina.

Tabela 5. Corpos de prova do ensaio de tração em “X”

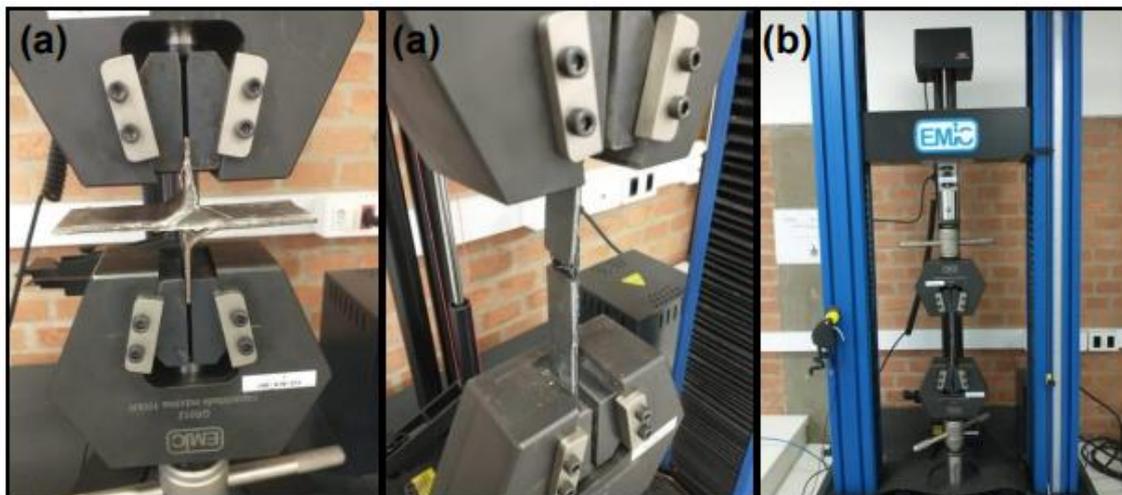
Material	W1-W5	W11-W15	W6-W10	W16-W20
Resina	Epoxi	Poliester	Epoxi	Poliester
Fibra	Carbono	Carbono	Vidro	Vidro

Figura 4. Corpos de prova de PRF aderidos a chapas de aço ASTM A131 para ensaio de tração com força transversal ao eixo



Fonte: Autor, 2022.

Figura 5. (a) Corpos de prova em “I” e em “X” no equipamento (b) Instron EMIC, modelo 23-30



Fonte: Autor, 2022.

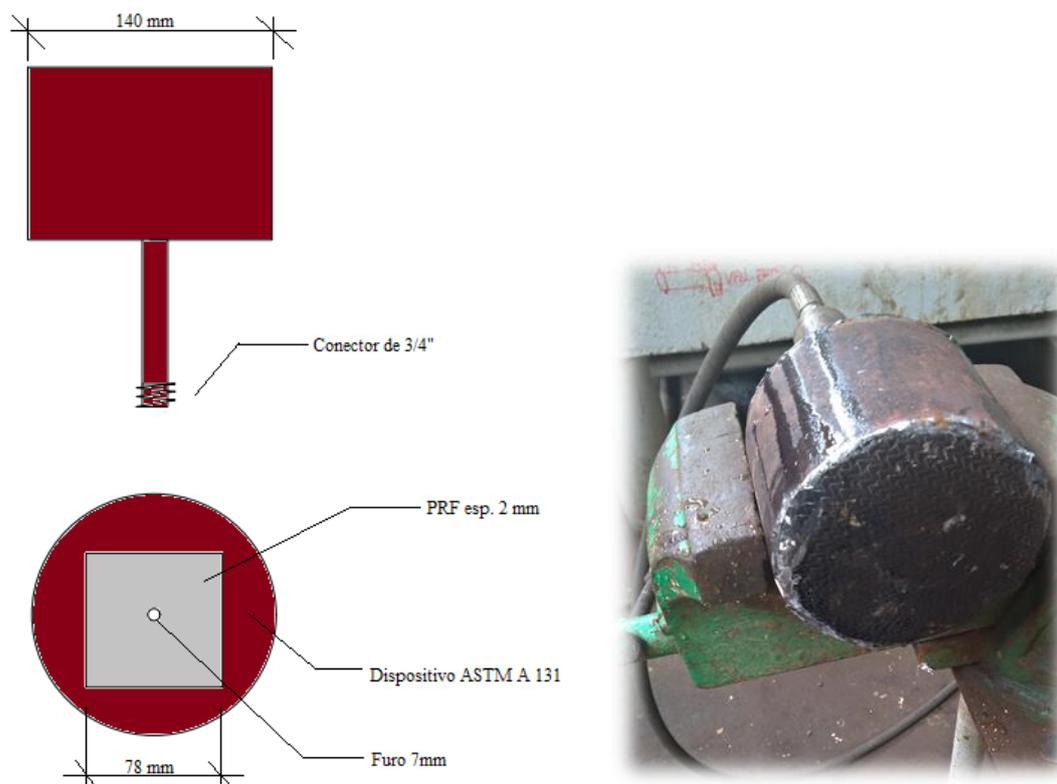
#### 2.2.4 Ensaio de Dureza

Foram produzidas 20 placas de 100 mm x 10 mm x 06 mm, sendo 05 amostras de PRFV, 05 de PRFC, 05 ERFV e 05 ERFC. Foram tomados 10 pontos em cada corpo de prova, com espaçamento mínimo de 06 mm em cada ponto de teste, utilizando o durômetro TEC-35540D e procedimento adotado pela norma ASTM D2240

#### 2.2.5 Ensaio Hidrostático

Foi fabricado um dispositivo para realização de teste hidrostático com terminal roscado de  $\frac{3}{4}$ " na parte de baixo para acoplar uma conexão que possibilite gerar a pressão controlada por uma válvula e produzida por um compressor. A velocidade de transmissão para o dispositivo é uma taxa de aproximadamente 5 bar por minuto. Um furo centralizado, que simula uma falta de integridade na estrutura, de diâmetro de 7 mm no topo do dispositivo promove uma abertura para que a pressão atue diretamente no PRF conforme Figura 6.

Figura 6. Dispositivo de ensaio do teste hidrostático



Fonte: Autor, 2022.

O ensaio hidrostático terminará quando houver o rompimento do reparo para identificar qual o limite de resistência do PRF aderido ao metal ASTM A 131. A área de contato do PRF com o aço se mantém em  $6000 \text{ mm}^2$  aderido de forma centralizada e na superfície superior do dispositivo. A área do PRF no dispositivo é um quadrado de aresta de  $78,0 \text{ mm}$ .

O segundo teste hidrostático terá um conceito não destrutivo. Após a montagem do dispositivo e a fixação do PRF no dispositivo, é realizado o incremento de pressão até alcançar o limite máximo da pressão do teste que é de  $3 \text{ bar}$  e, mantêm-se essa pressão por um minuto, em seguida esta pressão decai até  $0,5 \text{ bar}$  gerando uma etapa de “relaxamento” do material a ser testado, então, após  $03$  minutos, a pressão é incrementada até  $3 \text{ bar}$  novamente. Esse ciclo é feito  $4$  vezes e, então, é avaliado se o material foi aprovado no teste.

### 2.2.6 Ensaio Absorção de Água

Foram separados corpos de provas para imersão de água deionizada por um período de 24 horas, com dimensões de 38 mm x 38 mm x 3 mm, sendo monitorados e medidos por um período de 24, 36 e 72 horas, conforme normas IS 1998/ASTM D 570, e aplicado a equação (1) para obtenção do volume de água absorvida pelo compósito.

$$M_t(\%) = \frac{m_t - m_1}{m_1} * 100 \quad (1)$$

onde  $M_t$  = porcentagem da água absorvida em determinado tempo “t” (%)

$m_t$  = massa da amostra FRP com água absorvida em gramas

$m_1$  = massa da amostra de FRP em gramas

### 2.2.7 Microscopia para análise de falha

Após ruptura do PRF no ensaio hidrostático, foi separado uma parte do material conforme Figura 13, onde se vê uma área delimitada, circulada com marcador industrial, esta área é o ponto onde o material de PRF foi danificado pelo rompimento do ensaio hidrostático. Este material será submetido a investigação do mecanismo de fratura do compósito por meio do microscópio eletrônico de varredura e óptico de 80 vezes Lorben, modelo GT319.

As amostras, conforme citadas, foram cortadas com as dimensões de 20 mm x 20 mm e foi realizado um recobrimento (metalização) com ouro (Au) em uma câmara de alto vácuo modelo Leica EM ACE600, e na fixação das fibras, no stub, utilizou-se fita de carbono, a fim de melhorar a condução elétrica. A análise das amostras foi realizada em um microscópio de varredura da fabricante FEI, modelo QUANTA FEG 250

### 2.2.8 Ensaio de Impacto de Charpy

Foi fabricado um molde retangular de madeira para a produção de corpos de prova revestido de cera de carnaúba para o desmolde das placas das resinas reforçadas com os mesmos arranjos de outros corpos de prova, sendo três mantas de fibras de vidro com posicionamento na manta de forma aleatória, por se tratar de fibras picadas não há

direcionamento, e três tecidos de fibra de carbono com posições alternadas em 180° em cada espécime de resina. Após desmoldado, foram cortados corpos de prova com disco, formando 40 corpos de prova, sendo 10 de ERFC, 10 de ERFV, 10 de PRFC e 10 de PRFV com dimensões de 100 x 10 ( $\pm 0,27$ ) x 3 ( $\pm 0,21$ ) mm e sem entalhe com base na norma ASTM D6110, a Figura 7 apresenta cada tipo de compósito já processado pronto para ser utilizado no ensaio.

Figura 7 - Corpos de prova de ERFC, ERFV, PRFC e PRFV



Fonte: Autor, 2022..

A Tabela 6 apresenta dados de como foram realizados os ensaios de Charpy utilizando como referência a norma ISO 179. A posição na base do martelo foi do tipo Edgwise, onde a área maior se posiciona para cima e o martelo atinge o corpo de prova de forma lateral, o espaço onde o martelo é atravessado tem 60 mm (span), os pêndulos utilizados foram o 2 J e o 4J.

Tabela 6: Parâmetro do ensaio de Charpy

<b>Norma de Referência</b>	ISO 179-1:2010 – “Plastics -- Determination of Charpy impact properties -- Part 1: Non-instrumented impact test” [27]		
<b>Posição CP</b>	Edgwise	<b>Pêndulo</b>	2J(ERFC)/4J
<b>Entalhe</b>	sem	<b>Span</b>	60 mm
<b>Equipamento</b>	NZ Philpolymer, modelo XRL - 400		

Fonte: Autor, 2022..

### 2.2.9 Teor de Cinzas

Para determinação da quantidade de material inorgânico, calcinou-se a amostra em uma mufla. Dessa forma, todo o material orgânico é eliminado, sem que o material de reforço

seja danificado, e através da pesagem da amostra antes e depois da calcinação determina-se a quantidade de material inorgânico presente no cadinho (ISO 179-1, 2010). Foram pesadas duas amostras de cada grupo de compósito e levadas ao forno de mufla para aquecimento a 500°C por um período de 50 minutos a uma taxa de aquecimento de 20°C por minuto, utilizando o equipamento de mufla e balança analítica Shimdzu modelo AUW220D. Após as medições, será calculado o valor percentual de material inorgânico encontrado dentro do cadinho relacionado com o valor da amostra total.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os corpos de prova foram processados com a técnica Hand Lay-up, os detalhes podem ser vistos no apêndice A. As resinas, após mistura, mantiveram o tempo de *gel time* conforme dados do fabricante apresentados na Tabela 7, garantindo uma boa penetração da resina nas fibras, uma vez que o tempo, durante a fase de laminação, não ultrapassou o período de *gel time*.

Tabela 7. Propriedades do sistema não curado das resinas

<b>Temperatura de manipulação</b>	18-30°C
<b>Gel time Epoxi</b>	20 a 30 min
<b>Tempo de Endurecimento (100 gr a 20°C)</b>	3-4 horas
<b>Gel time resina Polyester</b>	10 a 15 min

Fonte: Ara Química, 2011 e Redelease, 2018.

#### 3.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Na Figura 8 é possível ver que o início do processo de reticulação da resina Poliéster inicia a 26,27 °C e termina com 243°C, apresentando a máxima liberação de calor em 123,86 °C, a curva não é totalmente uniforme, apresentando um duplo pico, com liberação de calor na temperatura de cura a 101,13 °C no primeiro topo, o duplo topo pode

apontar para um sistema mais complexo de cura com reações diferenciadas dentro do reticulado. A variação de calor total do processo é de 394,06 J/g e o tempo de cura total é de 21,7 min.

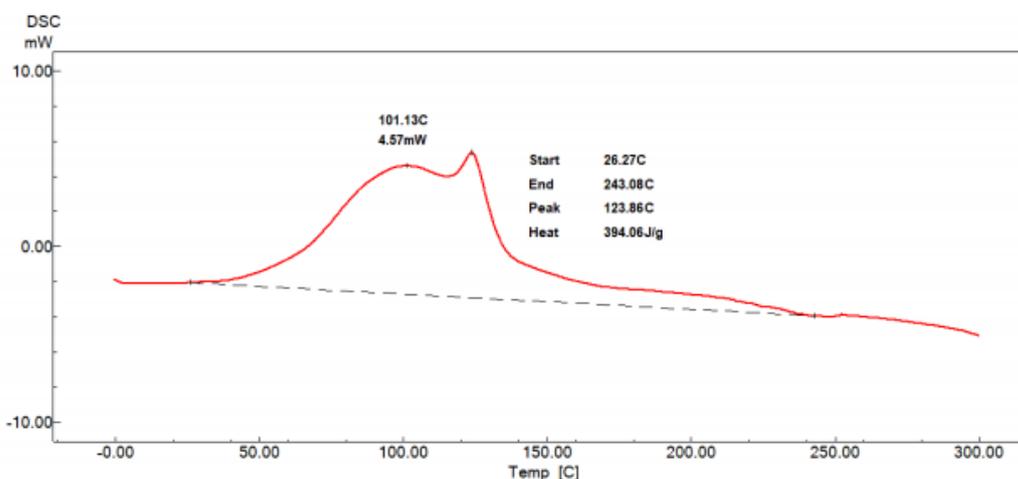
Na Figura 10, observa-se que o início do processo de reticulado da resina Epóxi inicia em 18,10 °C e termina em 221, 90 °C, apresentando a máxima liberação de calor em 98,71 °C, a variação de calor total do processo é de 369,30 J/g e o tempo de cura total é de 20,3 min.

A curva de 2ª ordem da DSC representa a variação de capacidade calorífica, porém sem variações de entalpia. Assim, estas transições não geram picos nas curvas de DSC. Tais curvas mostram características associadas ao relaxamento das tensões térmicas dos polímeros e apresentam a característica da temperatura de transição vítrea, como a TG não é um ponto da curva, mas uma faixa, o ponto médio desta faixa de temperatura é indicado, no gráfico, como a TG do material. A Tabela 11 apresenta o ponto médio do gráfico das Figuras 9, resina poliéster, e 11, resina epóxi, indicado em linhas tracejadas.

A TG do material está associada a cristalinidade e a morfologia das regiões cristalinas. Quanto maior a cristalinidade, maior é a TG do polímero, a densidade do material e a rigidez, por outro lado, a resistência ao impacto diminui.

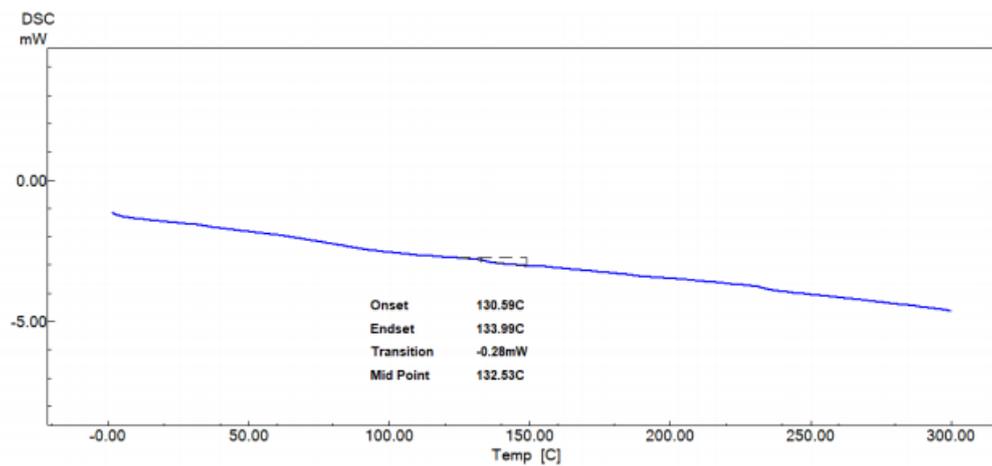
Embora o valor da TG da resina Poliéster esteja bem acima da Epóxi, foi perceptível que a maior variação dos resultados dos ensaios de Charpy foram entre o grupo de fibras, vidro e carbono, e não entre as resinas.

Figura 8. Curva DSC da resina de Poliéster – 1º Aquecimento



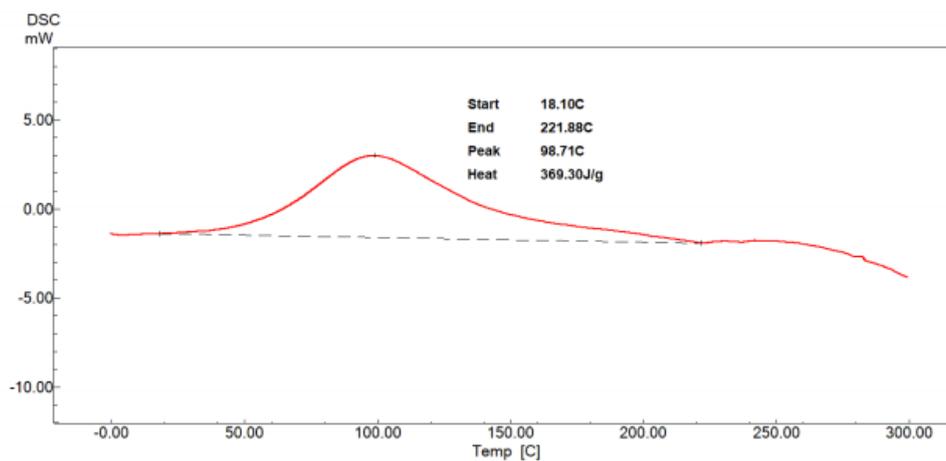
Fonte: Autor, 2022..

Figura 9. Curva DSC da resina de Poliéster – 2º Aquecimento



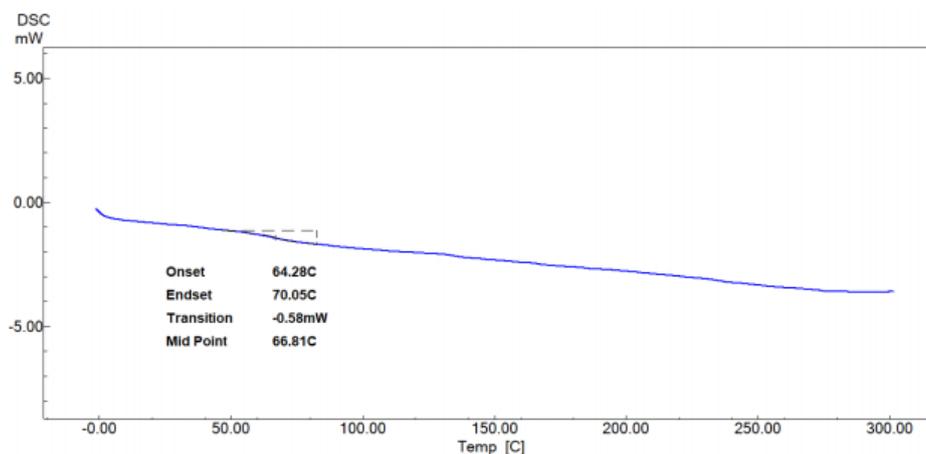
Fonte: Autor, 2022..

Figura 10. Curva DSC da resina Epóxi – 1º Aquecimento



Fonte: Autor, 2022..

Figura 11. Curva DSC da resina Epóxi – 2º Aquecimento



Fonte: Autor, 2022..

Tabela 8: Resultados do DSC, Temperatura de Cura (TC) e Temperatura de Transição Vítrea (TC)

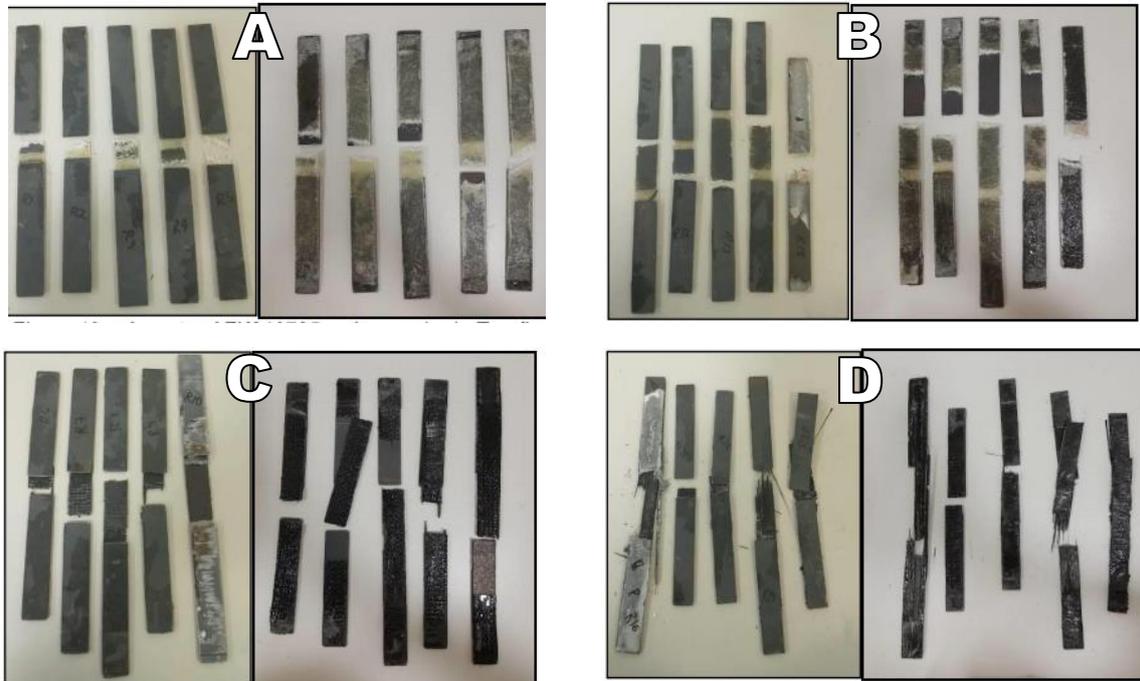
Amostra	1º Aquecimento TC (Cº)	2º Aquecimento TG (Cº)
Resina Poliéster	101,13	132,63
Resina Epóxi	98,71	66,81

Fonte: Autor, 2022..

### 3.2 Ensaio de Tração

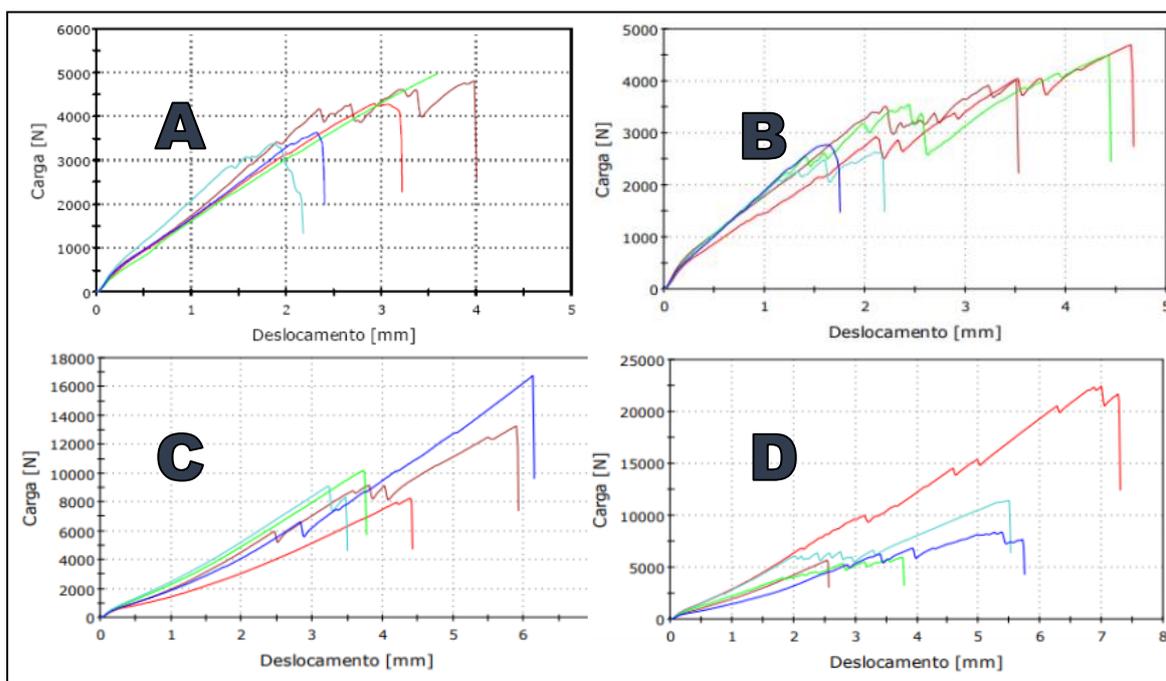
A Figura 12 apresenta os CPs rompidos após ensaio de tração atendendo o padrão da ASTM D3039 e metodologia deste estudo. A Figura 13 apresenta o gráfico elaborado pelo equipamento de teste durante o ensaio de tração dos 20 corpos de prova e a Tabela 9 mostra os valores de deslocamento, carga máxima e tensão fornecidas pelo gráfico.

Fig. 12. CPs após ensaio de tração A) ERFV R1 a R5 B) PRFV R11 a R15 C) ERFC R6 a R10 D) PRFC R16 a R20



Fonte: Autor, 2022..

Fig. 13. Curva de ensaio de tração A) ERFV B) PRFV C) ERFC D) PRFC



Fonte: Autor, 2022..

Tabela 9: Comparativo do resultado dos ensaios de Tração

Material	Deslocamento (mm)	Máxima Carga (N)	Tensão (MPa)
ERFV	2,93 ± 0,87	4222,87 ± 701,24	84,46 ± 14,02
PRFV	3,26 ± 1,34	3720,79 ± 957,83	74,42 ± 19,16
ERFC	4,67 ± 1,29	11536,10 ± 3476,73	230,72 ± 69,53
PRFC	4,83 ± 1,71	10813,00 ± 6885,58	216,26 ± 137,71

Fonte: Autor, 2022..

No ensaio de tração, os compósitos formados por fibra de carbono apresentaram maior resistência, cerca de duas vezes mais, que as de fibra de vidro. Os resultados gerais da tensão última do ensaio ficaram próximos da literatura pesquisada para fibra de carbono (EKSE, 2017) e cerca de 25% menor para as fibras de vidro (BHA, 2019), por não se tratar de material unidirecional, a densidade e orientação aleatória pode apresentar resultados diferentes de acordo com o material fornecido.

As fibras de vidro apresentaram uma ruptura transversal em todos os corpos de prova, os CP de matriz Poliéster teve a ruptura na parte do material que está fixado na chapa, as de epóxi, exceto o CP R15, na área em vazio. Por existir ruptura, não foi observado falha do teste por desprendimento do material aderido nas chapas, embora possa se observar que a adesão da resina epoxi tenha maior força que a Poliester, uma vez que a ruptura do ensaio somente ocorreu na área onde não há fixação de material compósito na chapa.

As fibras de carbono apresentaram um misto de tipos de ruptura, algumas falhas ocorreram por desprendimento do material aderido, CPs R19 e R20, outras com “desfiamento” das fibras, CP R16, do tipo explodida, CP R17, e por ruptura transversal, CPs de R6 a R10. Por se tratar de material com maior resistência mecânica, as fibras, mesmo isoladas, tendem a manter a integridade mesmo com a separação da matriz polimérica. A maior resistência mecânica da fibra influenciou no aspecto da falha, que em alguns casos, aconteceram por desprendimento do material. Vale observar que os compósitos de epóxi apresentaram uma ruptura com menor desfiamento, o que pode significar uma melhor função da matriz em aglutinar as fibras, outro fator, é que não houve algum CP com desprendimento de material como na resina poliéster, demonstrando uma melhor adesão da resina. Os valores de tendência média ficaram levemente superiores nas resinas epóxis comparadas com as de poliéster.

A Tabela 10 traz dados do fabricante sobre a resistência mecânica das resinas sem qualquer material adicionado, como cargas ou fibras. A resistência maior da resina epóxi foi reproduzida nos ensaios de tração, garantindo uma maior tensão de ruptura nos corpos de prova com esse material do que a resina poliéster. Os compósitos de Fibra de vidro tiveram um aumento de resistência mecânica na faixa de 60% comparado com a resina curada, sem reforço, mas o material com fibra de carbono teve um aumento considerado, cerca de 200%, demonstrando a capacidade da resistência mecânica desta fibra na condição de orientação bidirecional.

Tabela 10: Propriedades do sistema curado das resinas

<b>Força de tensão de ruptura</b>	20,0 – 43,0 MPa
<b>Elongação</b>	2,8 %
<b>Força de tensão de ruptura ASTM D 638</b>	53,0 MPa
<b>Elongação</b>	2,6 %

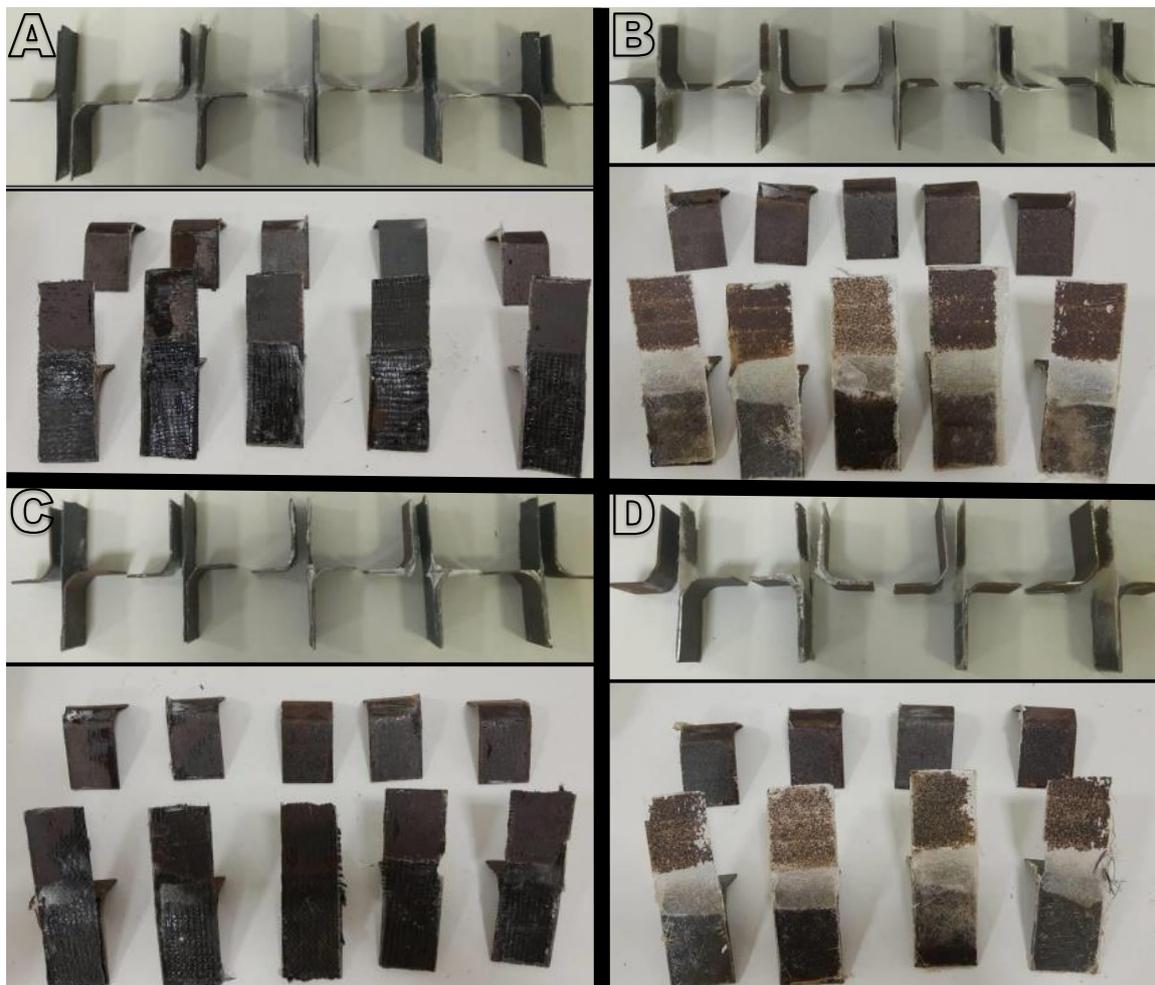
Fonte: ARA Química, 2011 e Redelease, 2018.

### 3.3 Ensaios de Peel Test

Os ensaios do tipo “X” foram adaptados a uma máquina de ensaio de tração com o objetivo de realizar um teste do tipo “Peel Test” que é um ensaio ajustado para este estudo a fim de entender qual sistema de adesão é melhor no substrato ASTM A-131.

Os resultados apresentaram alto desvio padrão, excetuando os CPs de W1 a W4 e W16 a W19 (02 CPs foram descartados). O material do compósito apresentou integridade total e ocorreu apenas desprendido, sem danos, ao compósito, conforme figura 14. O material residual do metal no compósito sugere que o tratamento superficial da chapa poderia ser mais profundo com processo de lixamento por ferramenta elétrica, o que poderia acarretar no “metal mais aparente” ou “metal ao branco”, removendo óxidos mais profundos, por outro lado, fazendo analogia ao tratamento de ancoragem de pintura, a superfície pode ficar menos rugosa o que eliminaria o tratamento superficial por jateamento da chapa, acarretando em menor fixação da resina no substrato (SILVA *et al.*, 2018)

Figura 14 - A) ERFC W1 a W4 B) ERFV W6 a W10 C) PRFC W6 a W10 D) PRFV W16 a W19



Fonte: Autor, 2022.

O teste realizado foi elaborado para que haja um esforço alto no desprendimento entre a chapa e o compósito com objetivo de avaliar exclusivamente a performance das resinas. No que se pode constatar na Tabela 11, as resinas epóxi resistem mais ao esforço de descolamento, embora não exista uma diferença considerável, devido aos valores alto de desvio padrão e valores altos de  $p$  (maior que 0,05) na análise de variâncias (ANOVA) conforme verificado na tabela 12, não se pode realizar comparações absolutas entre os grupos de compósitos para esse ensaio.

Tabela 11: Comparativo do resultado dos ensaios de desprendimento

Material	Deslocamento (mm)	Máxima Carga (N)
ERFC	<b>2,24 ± 1,72</b>	<b>90,13 ± 10,21</b>
ERFV	<b>2,83 ± 1,69</b>	<b>85,79 ± 46,56</b>
PRFC	<b>5,84 ± 3,09</b>	<b>75,11 ± 35,22</b>
PRFV	<b>3,26 ± 2,06</b>	<b>56,73 ± 13,75</b>

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 12: Análise de variância para dados do ensaio de *Peel Test*

Grupo	Média	Variância	F	valor-P	F crítico
Coluna 1	91,15	104,2398	0,920517	0,45635	3,343889
Coluna 2	85,788	2167,533			
Coluna 3	75,112	1240,664			
Coluna 4	56,6025	191,3985			

Fonte: Autor, 2022.

### 3.4 Ensaio de Dureza

Os valores da dureza SHORE D das amostras de PRF se mantiveram próximas, não havendo uma influência grande de propriedades mecânicas, tais como os ensaios de tração do material, onde as fibras de Carbono apresentaram maior resistência mecânica. Os pontos analisados no ensaio de dureza tiveram grande variação de valores, isso se deve, provavelmente, pelo fato da compactação das fibras serem diferenciadas ao longo da superfície do material analisado.

Tabela 13: Comparativo do resultado dos ensaios de Dureza

	PRFC	PRFV	ERFC	ERFV
Dureza	73,5 ± 4,14	76,4 ± 3,41	73,4 ± 5,12	69,3 ± 4,08

Fonte: Autor, 2022.

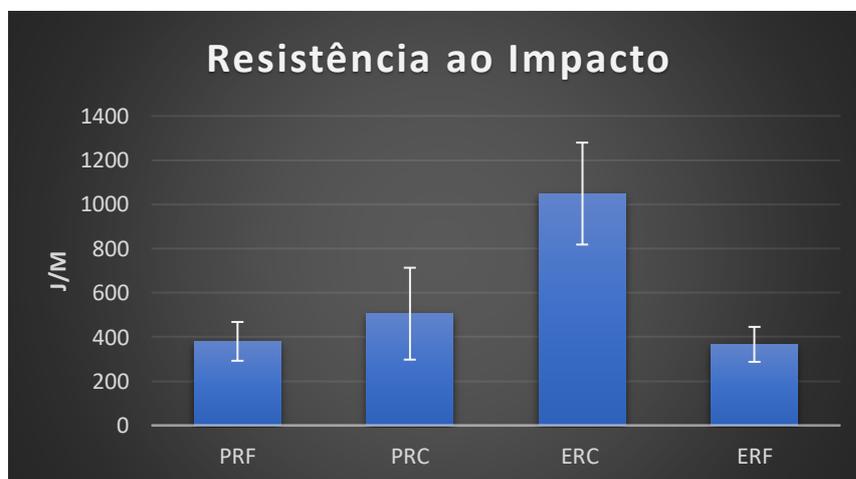
Conforme verificado na Tabela 13, a maior diferença das amostras foi verificada no reforço de vidro. A amostra com resina Epóxi apresentou menor rigidez em relação a resina Poliéster. A faixa de dureza apresentada em torno de 70 Shore D compreende os materiais do tipo polímeros rígidos conforme literatura pesquisada

### 3.5 Ensaio de impacto de Charpy

Este ensaio é importante para avaliar as condições de flexibilidade ao impacto do material, que também influencia a resistência mecânica, um polímero tem sua resistência diminuída quando a estrutura absorve energia de deformação durante teste de impacto pelo conjunto matriz/fibra (Mazarim, 2018).

O valor da energia absorvida das amostras de fibra de carbono foi próximo entre si e maior em relação as de fibra de vidro conforme verificado na Figura 24, deve-se notar que foi utilizado um pêndulo diferente na amostra de resina epóxi reforçada com fibra de carbono, tipo 2J. De uma forma geral, os materiais com reforço de fibra de carbono tiveram um resultado com maior absorção de energia, mostrando que essas fibras, além de conferir maior resistência mecânica, também, confere boa flexibilidade à estrutura do compósito. Do ponto de vista de distribuição de dados, após análise de variância, conforme compilados na Tabela 14, e assumindo valores de P menor que 0,05, tal como, fator F sendo maior que F crítico, podemos considerar os resultados como significamente estatísticos, fazendo com que as hipóteses de comparação sejam aceitáveis.

Fig. 15. Gráfico do resultado do ensaio de Charpy



Fonte: Autor, 2022.

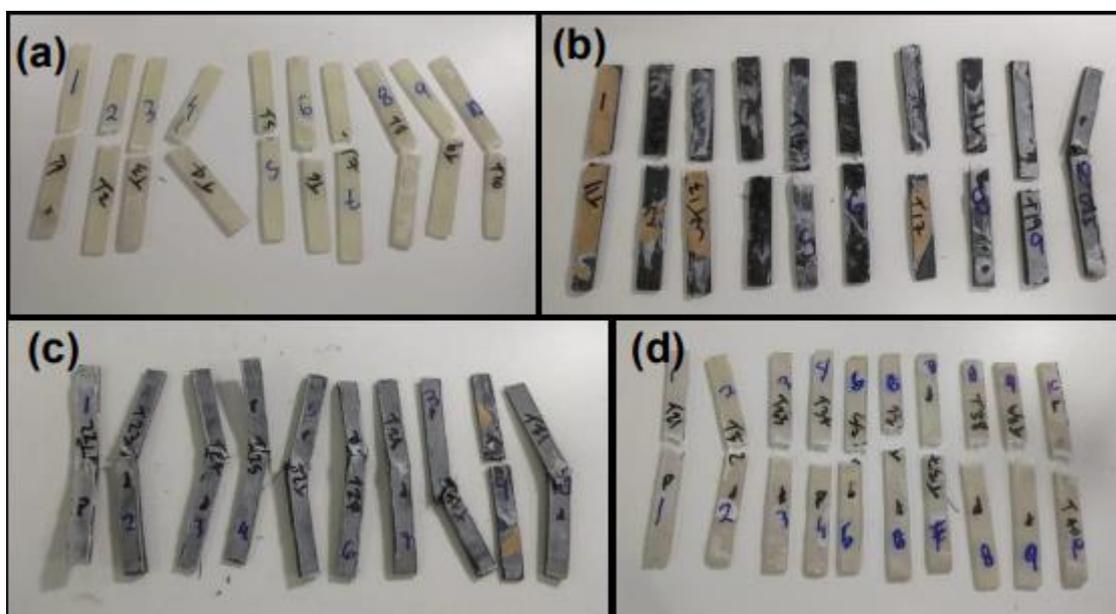
Tabela 14: Análise de variância para verificação de dados do impacto de Charpy

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Coluna 1	10	3801,78	380,178	7708,127	37,52929	3,55E-11	2,866266
Coluna 2	10	5054,04	505,404	43189,36			
Coluna 3	10	10486,37	1048,637	53186,54			
Coluna 4	10	3665,45	366,545	6259,856			

Fonte: Autor, 2022.

Os corpos de prova, em sua maioria, tiveram rompimento total e com ruptura de 90° após o ensaio de Charpy conforme Figura 16.

Fig. 16. Corpos de prova após ensaio de Charpy a)ERFV b)ERFC c)PRFC d)PRFV



Fonte: Autor, 2022.

### 3.6 Ensaio Hidrostático Destrutivo

Foi utilizado o dispositivo de ensaio hidrostático conforme metodologia e aplicado a resina reforçada com fibras no topo do dispositivo, após cura de 24 horas, foi realizado o ensaio hidrostático destrutivo e foi verificado a pressão máxima conforme Tabela 15.

Tabela 15. Pressão máxima antes do rompimento do ensaio hidrostático

Material	Pressão máx (bar)	Média	Característica da Falha	Força $P=F/A$ (N)
ERFV	45	40	Multipontual	679,60
ERFV	40		Pontual	604,09
ERFV	35		Pontual	528,58
ERFC	75	63	Desprendimento parcial, Multipontual	1132,67
ERFC	60		Desprendimento parcial, Pontual	906,13
ERFC	55		Pontual	830,62
PRFV	55	48	Multipontual	830,62
PRFV	45		Multipontual	679,60
PRFV	45		Pontual	679,60
PRFC	55	53	Desprendimento parcial, Multipontual	830,62
PRFC	45		Pontual	679,60
PRFC	60		Pontual	906,13

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 15 apresenta a pressão máxima suportada dos PRFs aderido ao metal ASTM A131, a força, na área onde existe a passagem de pressão fornecida pelo compressor, e a característica da falha do ensaio (pontual, multipontual, desprendimento parcial). A pressão máxima alcançada no dispositivo em cada PRF mostrou-se próximo. As resinas reforçadas com fibra de vidro tiveram valores menores de pressão suportada. Normalmente, ensaios destrutivos de pressão podem apresentar grande variação de resistência hidrostática, como foi o caso. A resina epóxi com fibra de carbono apresentou melhores resultados em média, por outro lado, comparando com os resultados da resina poliéster, não foi possível avaliar que a diferença do uso de fibras diferentes impactou no resultado final. A Figura 17 mostra o exato momento em que ocorre a falha no ensaio hidrostático.

Fig. 17 – À esquerda, Ensaio Hidrostático de PRFC antes da ruptura, à direita, rompimento do composto em múltiplos pontos na área central.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.6.1 Ensaio Hidrostático Não-Destrutivo

Utilizando a mesma técnica do ensaio destrutivo, foram realizados mais 12 ensaios hidrostáticos com pressão atingindo um valor máximo de 03 bar, dessa vez, o objetivo era que o material não falhasse. Todos os ensaios foram aprovados conforme metodologia proposta e, após realização de uma inspeção visual, verificou-se que o material de PRF não apresentava indícios de deformação.

Fig. 18 – Representação gráfica do ensaio hidrostático não destrutivo



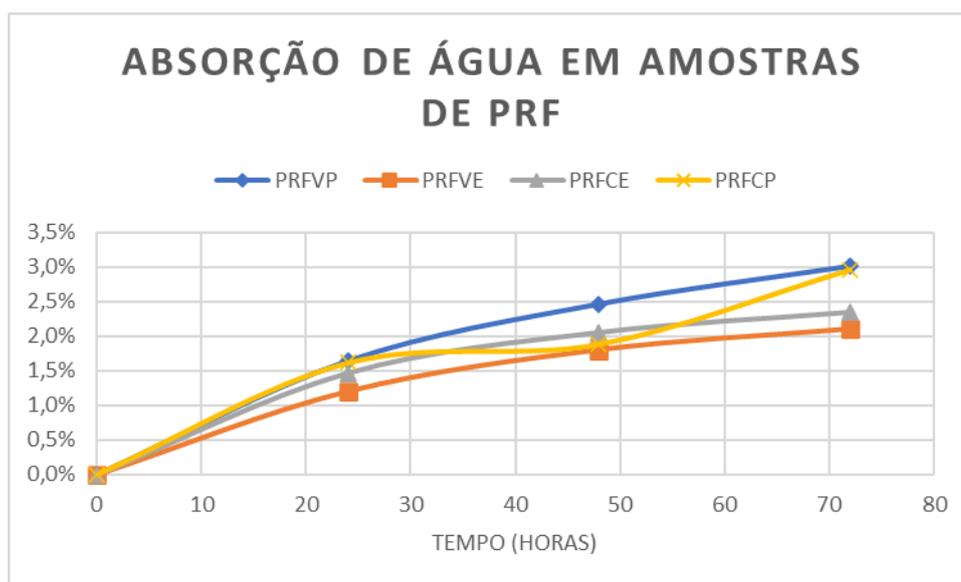
Fonte: Autor, 2022.

### 3.7 Absorção de Água

Após medições realizadas de amostras puramente de PRF, secas e imersas em água, em balança de precisão, foi montada uma tabela e plotado o gráfico abaixo mostrando a absorção de água pelo compósito conforme a Figura 19.

A absorção de água pelo compósito é acompanhada de efeitos de diminuição de propriedades mecânicas conforme literatura pesquisada. Verificou-se, no gráfico, que a curva de absorção tem um coeficiente linear maior no início da imersão da amostra e tende a estabilizar em torno de 3%. Do (2017) analisou o efeito de absorção e saturação de água em compósitos de fibra de carbono, o estudo demonstrou que existe perda de 19% na tensão última e 10% no módulo de elasticidade, outros estudos, também apresentam perdas nas propriedades mecânicas após absorção de água do material compósito.

Fig. 19 – Gráfico de Absorção de Água



Fonte: Autor, 2022.

### 3.8 Teor de Cinzas

As amostras apresentaram uma proporção de peso do reforço por polímero próximas entre si como apresentada na Tabela 16, o que era esperado, já que a compactação da resina e do reforço tiveram o mesmo método e, também, o mesmo operador para produção dos corpos de prova. A exceção foi a amostra de epóxi com reforço de fibra de vidro que apresentou resultados na faixa de 22%, esta amostra ensaiada

pode ter mais vazios devido a dispersão das fibras quando aplicadas no processo de laminação.

A proporção de 30% de fibra na matriz polimérica é adequada na laminação de compósitos de fibra de vidro e carbono. Não existe muito controle de compactação na laminação à mão, então, a faixa de 30% de fibras parece ser bem reproduzido para o modelo desta técnica.

Na literatura, a porcentagem do teor de fibras testadas em experimentos varia bastante, até mesmo pelo fato do ineditismo das pesquisas, mas comercialmente, as fibras de carbono/vidro apresentam faixas de teor em peso de 30 a 50% em relação a resina polimérica (MUTHU, 2016).

Uma quantidade maior de fibras de reforço tende a melhorar a resistência mecânica do compósito, assim como diminuir sua energia de absorção do impacto.

Tabela 16: Resultado da Calcinação das amostras

Amostra	Teor de Cinzas	
	Medidas (%)	Média (%)
ERFV	22,32	22,09
	21,85	
ERFC	32,71	33,26
	33,82	
PRFC	32,51	31,51
	34,78	
PRFV	32,56	32,56
	32,61	

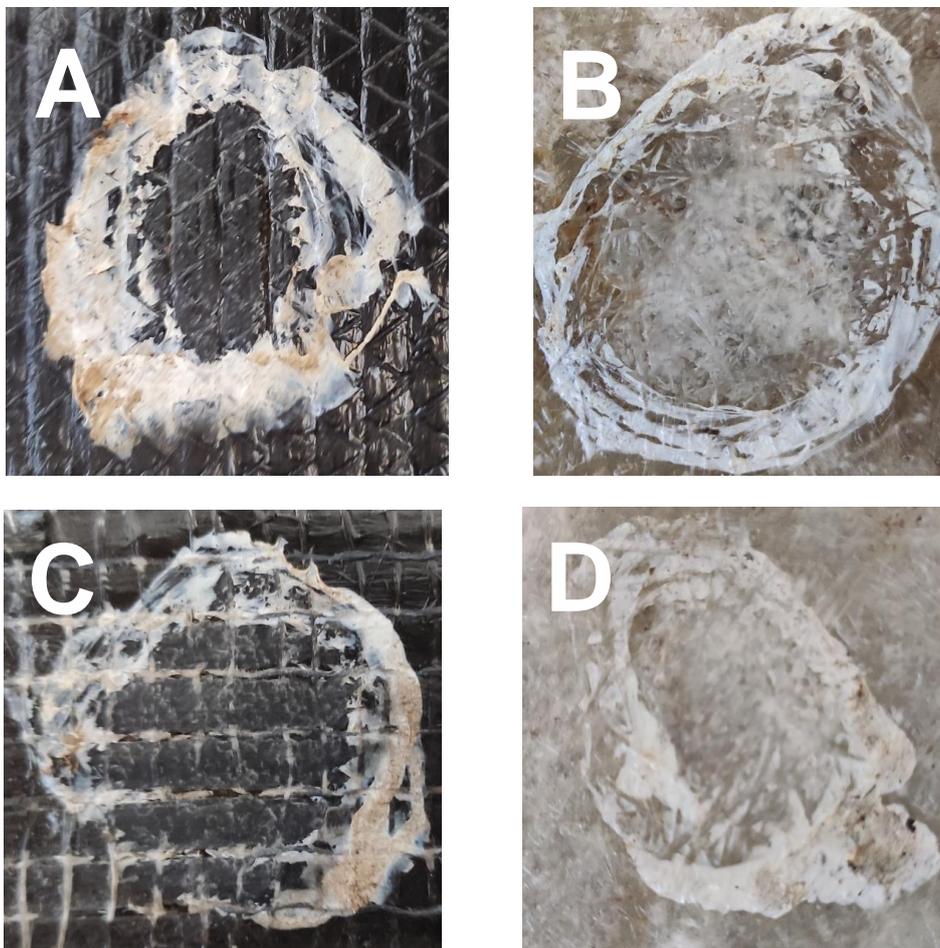
Fonte: Autor, 2022.

### 3.9 Análise da falha por Microscopia

Após coleta de material, retirado dos testes de ensaio hidrostático, apresentado na Figura 20, foi iniciado o processo de avaliação de falha da estrutura do compósito. Inicialmente, foi utilizado um microscópio óptico para análise inicial da estrutura do material laminado e das fibras, percebe-se que pela imagem da Figura 20 não há indícios de descontinuidade no material, então a proposta será estudar de forma microscópica. As

imagens, Figura 21 e 22, do microscópio óptico, também mostram que não houve danos aparente na estrutura nas fibras no compósito. A figura 21 mostra uma falha na superfície da resina, não se pode comprovar se é uma falha superficial ou se foi rompido durante o teste de estanqueidade. A figura 22 mostra a fibra de carbono intacta, mas a “linha têxtil” que fixa as fibras rompida, gerando indícios de ser esta área onde ocorreu a falha do ensaio hidrostático e dentro da área circular.

Figura 20. Amostras para investigação de falha em MEV. A) ERFC. B) ERFV C) PRFC  
D) PRFV



Fonte: Autor, 2022..

Fig.21. Amostras de PRFV em um microscópio óptico de 60x



Fonte: Autor, 2022.

Fig.22. Amostras de PRFC em um microscópio óptico de 60x



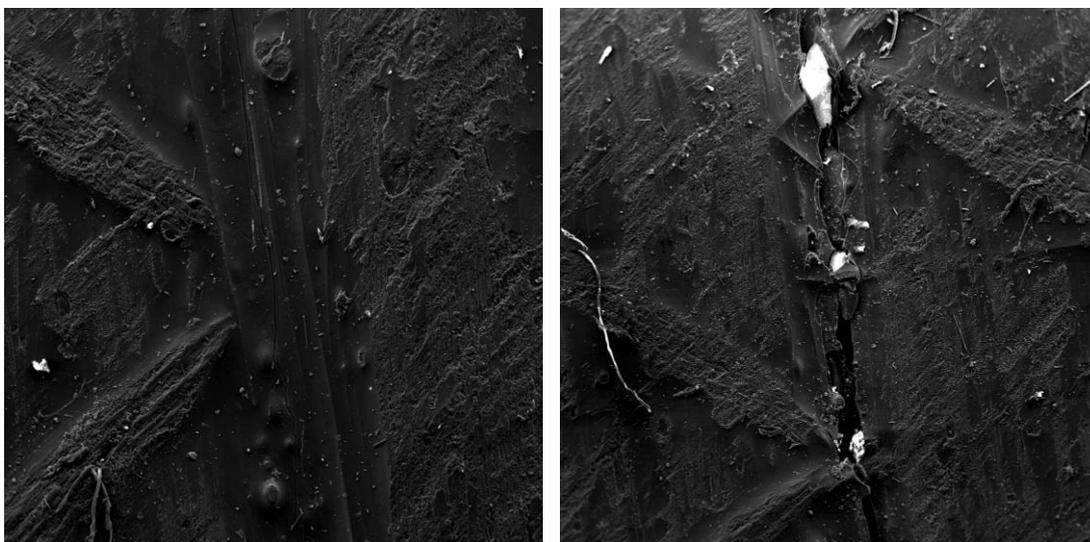
Fonte: Autor, 2022.

A figura 23 apresenta uma imagem com detalhes da fibra e uma trinca vertical na região central onde está localizada a área da resina. A técnica de interpretação por meio do MEV facilitou a investigação desta pesquisa sobre o defeito causado pelo ensaio hidrostático, percebe-se que o defeito é formado em uma área mais exposta pela resina, o que pode sugerir que o ensaio hidrostático gera uma pressão uniforme no material e tende a romper no ponto mais fraco, que neste caso, é a resina, não há de rompimento estrutural, mas falhas por passagens pequenas no material, ocorrendo a falta de estanqueidade da água.

A figura 24 mostra o arranjo de fibras de carbono ao fundo e a linha têxtil que sustenta a amarração das fibras à frente, não houve nenhum dano nesta área pesquisada. A resolução em aspecto de alto/baixo relevo do MEV auxilia na interpretação das imagens e investigação dos defeitos

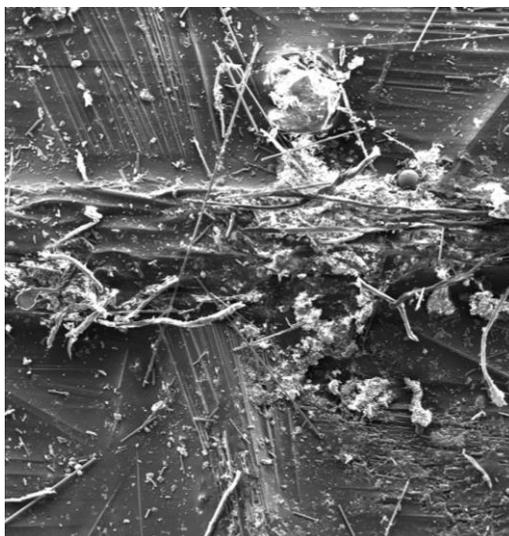
A figura 25 mostra defeitos na superfície da resina adjacente à uma fibra que podem ser por problemas de porosidade do material ou algum ponto de rompimento devido à pressão do ensaio hidrostático. A figura 26 mostra uma trinca na área onde a resina está mais exposta, provavelmente pelo rompimento do ensaio hidrostático, assim como observado em outras imagens.

Figura 23. Imagem de MEV da amostra ERFC “A” 80x (esq.) e 50X (dir.)



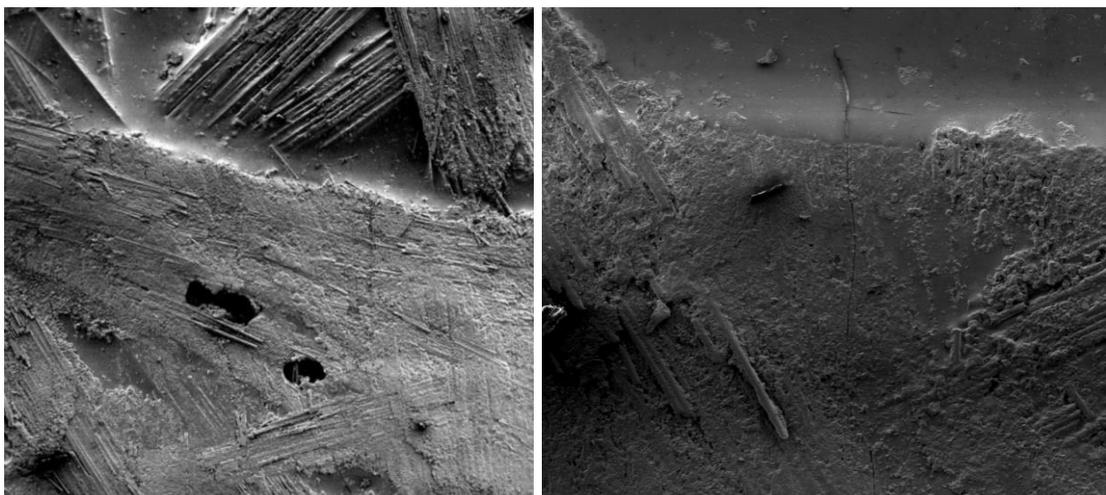
Fonte: Autor, 2022.

Figura 24. Imagem de MEV da amostra da PRFC “C” 100x



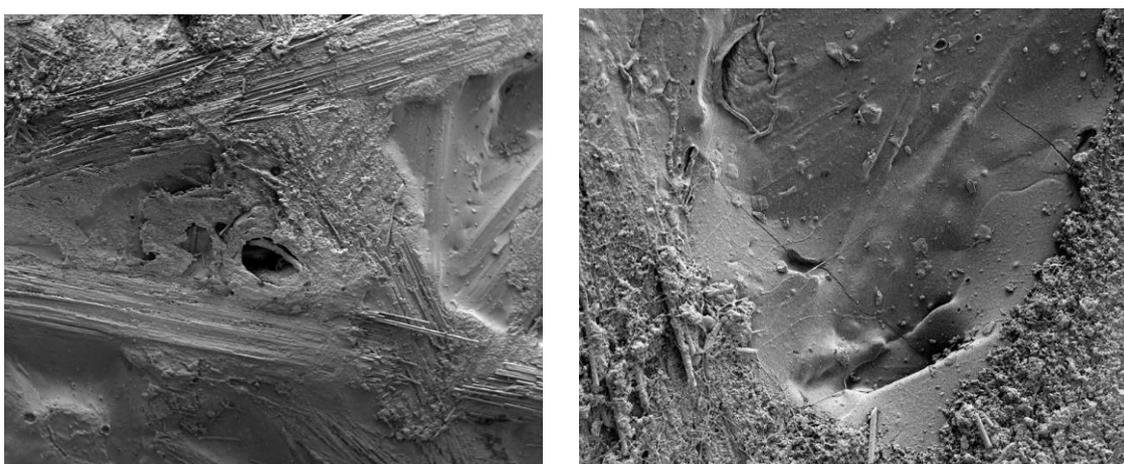
Fonte: Autor, 2022.

Figura 25. Imagem de MEV da amostra da fig. ERFV “B” 60x (esq.) e 300x (dir.)



Fonte: Autor, 2022.

Figura 26. Imagem de MEV da amostra da fig. PRFV “D” 80x (esq.) 300x (dir.)



Fonte: Autor, 2022.

#### 4. VALOR AGREGADO

A Tabela 19 apresenta o custo unitário do material de resina e fibra, em seguida traz os valores do material do compósito por quilo e a densidade do material, por se tratar de material leve, o custo por quilo pode apresentar uma comparação de forma errada com o metal. Assim, o custo do peso por unidade de volume da ERFV é  $73,02 \text{ Kg.cm}^3$  e o metal é  $156,00 \text{ Kg.cm}^3$ , logo, o compósito torna-se uma alternativa aceitável economicamente quando comparado com o reparo com metal.

Tabela 17. Comparativo dos valores de mercado dos materiais

<b>Material</b>	<b>Unidade/(dens.)</b>	<b>Preço Unitário</b>
Resina Poliéster	Kg	R\$ 84,93
Resina Epóxi	Kg	R\$ 54,89
Fibra de Vidro Picado (300g/m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup> /Kg	R\$ 260,00/R\$ 866,00
Fibra de Carbono Unidirecional (300g/m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup> /Kg	R\$ 9,00/R\$ 30,00
PRFV - (70/30)	Kg/g/cm <sup>3</sup>	68,45/1,54
ERFV - (70/30)	Kg/g/cm <sup>3</sup>	47,42/1,51
PRFC - (70/30)	Kg/g/cm <sup>3</sup>	319,25/1,28
ERFC - (70/30)	Kg/g/cm <sup>3</sup>	298,22/1,36
Metal – chapa sobreposta montada	Kg/g/cm <sup>3</sup>	20,00/7,8

Fonte: Autor, 2022.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo analisou a possibilidade de realizar reparos em chapas de aço naval, mais especificamente a A-131, utilizando o método de reparo de casco de fibra que consiste em fazer laminações de compósitos na estrutura, aproveitando o fato das resinas termofixas terem atributos de adesividade e capacidade de aderirem a vários substratos, entre eles, o metal. Os ensaios ajudaram a garantir a eficiência da metodologia e caracterizar o material para melhor padronização.

Muitos ensaios deste estudo testaram o esforço máximo das amostras até a quebra de material, embora seja difícil identificar com exatidão qual é o parâmetro máximo de tensões combinadas que simule as mesmas condições de situações extremas reais de operação de uma embarcação, pode-se constatar que os esforços dos testes são superiores por várias vezes a condição da pressão estática de uma embarcação na água.

Para efeito de reparo, não considerando as cargas cíclicas, o teste hidrostático apresenta uma situação mais próxima de um modelo real, em que as fibras e a matriz são testadas diretamente em água, portanto sendo uma excelente simulação.

A fibra de carbono, assim como esperado, apresentou maior resistência no ensaio de tração, melhor comportamento no ensaio de Charpy, mas não foi visto melhoria

significativa no teste hidrostático. As resinas apresentam boa adesão ao material e boa resistência mecânica, a resina epóxi tem uma resistência ao “descolamento” melhor que a poliéster observados dados de tendência média pelo ensaio de *Peel Test* e observação no ensaio de tração. No campo da transição vítrea das resinas, estas apresentaram temperaturas bem superiores as condições normais de temperatura, eliminando a hipótese do efeito de “emborrachamento” por excesso de calor.

Os ensaios de absorção de água do compósito se alinham com os dados da literatura técnica para matrizes poliméricas com fibras sintéticas, embora a absorção da água influencie negativamente as propriedades mecânicas, isto não é relevante, por se tratar de pouca diferença nas premissas deste projeto.

Do que se pode avaliar na análise de falha por microscopia, a incidência da falha ocorre na matriz polimérica por meio de trincas ou pequenos furos que não são perceptíveis visualmente.

O reparo por compósito em chapas de aço ASTM A131 é totalmente viável e foi verificado e testado neste estudo, a metodologia com resinas comerciais mostrou-se eficiente e econômica com fator de proporção de peso 70% de resina e 30% de fibras, além de não exigir equipamentos e ferramentas mais complexas para realização do serviço.

O Compósito com melhor custo benefício é a matriz polimérica de resina epóxi e reforço de fibra de vidro. Vale ressaltar que os custos deste compósito se tornam mais econômico que o metal ASTM A-131 quando comparado peso por unidade de volume. Atualmente, 90% do material aplicado em fibras de vidro para embarcações são com resinas poliéster e fibra de vidro, o custo deste reforço quando picado é bem econômico e as resinas, epóxi e poliéster, poderiam ser substituídas sem perda de qualidade ou perda de atrativo econômico. A utilização de fibra de carbono, devido ao seu alto custo de produção, ainda deve ser utilizado apenas em casos especiais na indústria naval.

## REFERÊNCIAS

- A. PIZZIL E K. L. MITTAL. Handbook of adhesive technology. Nova York. EUA, 2018
- A. ZAYED *et al.* Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions. Ocean Engineering.V. 163, Pages 299-306, 2018
- ALMEIDA, OLIVIER DE. *et al.* Charpy test investigation of the influence of fabric weave and fibre nature on impact properties of PEEK-reinforced composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 1–17, 2018.
- ARA ASHLAND - ARA QUÍMICA. Boletim Técnico da Resina Poliéster Arazyn 11.0. Rev. 0, 2011
- Asariotis, R. *et al.* United Nations Conference on Trade and Development.
- ASTM International – ASTM D570 - Standard test for water absorption of plastics, 2018
- ASTM International – ASTM D6110 Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics, 2018
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM A131/131M Standard Specification for Structural Steel for Ships. 2014
- ASTM International. ASTM D2240 - Standard Test Method for Rubber Property — Durometer Hardness, 2021
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3039/3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Vol 14.02, 1995
- BHAT, RITESH *et al.* Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites. *Journal of materials and research and technology.* 3653-3661, 2019
- BRAUN, DIETRICH *et al.* Polymer Synthesis: Theory and Practice Fundamentals, Methods, Experiments, 5ª edição, Springer, 2012
- CAMPOS, BERNARD MIRANDA *et al.* Thermoplastic matrix-based composites produced by resin transfer molding: *A review*, 2022. <https://doi.org/10.1002/pc.26575>
- CANEVAROLO, S. J. Técnicas de Caracterização de Polímeros. São Paulo: Artliber, 2003.
- CHANDA, MANAS E ROYL, SAIL K. Industrial Polymers, Specialty Polymers, and Their Applications. Ed. CRC. Nova York. EUA, 2009

DAEI-SORKHABI, AMIR HOSSEIN e HOSSEINZADEH-NODEHI, SEYED FARHAD. Numerical study of the effect of carbon fiber/ epoxy resin adhesive thickness on the creep behaviour of carbon steel plate joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33:16, 1790-1805, 2019. doi: [10.1080/01694243.2019.1613946](https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1613946)

DHAWAN, VIKAS *et al.* Effect of Natural Fillers on Mechanical Properties of GFRP Composites. *Journal of Composites* Volume 2013, Article ID 792620, Hindawi, 2013. doi.org/10.1155/2013/792620

DO, V-T. *et al.* Effect of polypropylene on the mechanical properties and water absorption of carbon-fiber-reinforced-polyamide-6/polypropylene composite, *Composite Structures*, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.011>

DRZEŹDŹON, J. *et al.* Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques, *Trends in Analytical Chemistry*, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.037>.

EBNESAJJAD, SINA e LANDROCK, ARTHUR H. *Adhesives Technology Handbook (Third Edition) - Testing of Adhesive Bonds*. 339-352 p., 2015 [doi.org/10.1016/B978-0-323-35595-7.00012-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35595-7.00012-7)

EKSI, S. E GENEL, K. Comparison of Mechanical Properties of Unidirectional and Woven Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites. Special issue of the 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering. Vol. 132, 2017

EL-WAZERY, M. S. *et al.* Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 121-131 p., 2017

GHANEM, AMYL e LANG, YUJIE. *Introduction to polymer adhesion*. Nova Scotia, Canada. 2017 [doi.org/10.1590/S0104-14281999000200011](https://doi.org/10.1590/S0104-14281999000200011)

GHENO, MARIA SIMONI; SILVA, RIVAL COELHO. Caracterização mecânica e estrutural do aço astm A131 classe DH36 em comparação com aço ASTM A36 utilizado para projetos estruturais. *A indústria 4.0 e o papel da ciência e da tecnologia frente aos desafios da sustentabilidade*. v.1, n.1, p. 153-168, 2018.

HAN, ZHIKIANG *et al.* Effects of fabric combinations on the quality of glass fiber reinforced polymer hull structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 14. 2022 <https://doi.org/10.1177/0892705718778744>

IACS – International CONTAINER SHIPS Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structure. London, 2018

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 179-1:2010 – “Plastics -- Determination of Charpy impact properties - Part 1: Non-instrumented impact test. Suíça, 2010

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3451-1:2019: Plastics -- Determination of ash -- Part 1: General methods. Suíça, 2019

IVAN GRABOVAC e DAVID WHITTAKER. Application of bonded composites in the repair of ships structures – A 15-year service experience. *Composites: Part A* 40 (2009) 1381–1398, 2009. [doi:10.1016/j.compositesa.2008.11.006](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.11.006)

JAWORSKI C. CAPRICHIO *et al.* Multifunctionality in Epoxy Resins, *Polymer Reviews*, 60:1, 1-41, 2020 [doi: 10.1080/15583724.2019.1650063](https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1650063)

JÜRGEN H. AURER, AB KASPER. Unsaturated Polyester Resins - Polymers with unlimited possibilities, 1ª edição, Augsburg, Alemanha, Himmer, 2003.

Kang, Dai *et al.* Effects of a Reactive Phosphorus–Sulfur Containing Flame-Retardant Monomer on the Flame Retardancy and Thermal and Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin. *Polymers*. 2020

KULSHRESHTHA, A.K. E VASILE, C. Handbook of Polymer Blends and Composites. 1ª edição, vol 1, Exeter, Reino unido, Rapra Technology Limited, 2002.

KUTZ, MYER. Mechanical Engineers' Handbook. 4ª edição, New Jersey, EUA, John Wiley & Sons, Inc., 2015

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G. e MONTEIRO, E. Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. Rio de Janeiro: E-papers, 2001.

MAFALDA LIMA *et al.* Simple strategy toward the substitution of styrene by sobrerol-based monomers in unsaturated polyester resins. *Green Chemistry*, 2018

MARSH, G. 50 years of reinforced plastic boats. *Reinforced Plastics*, 50(9), 16–19, 2006 [doi:10.1016/s0034-3617\(06\)71125-0](https://doi.org/10.1016/s0034-3617(06)71125-0)

MATTIA BARTOLI *et al.* SYNTHESIS AND APPLICATIONS OF UNSATURATED POLYESTER COMPOSITES. P. 579-598, 2019, .

MAZARIM, S. G. e SALERNO G. Resistência ao impacto de Compósitos de Fibra de Carbono e Resina Epoxi em Comparação ao Aço SAE 1010. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 2018. [doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0127-0142](https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0127-0142)

MICHELLE L. COSTA, *et al.* Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. *Polímeros* vol.9 no.2 São Carlos,1999

MORTAZAVIAN, SEYYEDVAHID *et al.* Effect of Water Absorption on Tensile and Fatigue Behaviors of Two Short Glass Fiber Reinforced Thermoplastics. *SAE Int. J. Mater. Manf.*, Volume 8, Issue 2, 435-443 p., 2015. [doi:10.4271/2015-01-0546](https://doi.org/10.4271/2015-01-0546)

MOTHÉ, C. G. e AZEVEDO, A. D. D. Análise Térmica de Materiais. São Paulo: Artliber, 2009

MUÑOZ, E. e GARCÍA-MANRIQUE, J. A. Water Absorption Behaviour and Its Effect on the Mechanical Properties of Flax Fibre Reinforced Bioepoxy Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015. [doi.org/10.1155/2015/390275](https://doi.org/10.1155/2015/390275)

MURRAY, G. T. *Handbook of Materials Selection for Engineering Applications Mechanical Engineering*. 1ª edição, California, EUA, CRC Press, 1997

MUTHU, JACOB *et al.* The Effects of Carbon Nanofiber on the Mechanical Properties of Glass/Coir Fiber Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Polymer Composite*, 2016

NETO, FLAMINIO LEVY e PARDINNI, LUIS CLAUDIO. *Compositos estruturais: Ciência e tecnologia*. 1ª ed. SP. Edgard Blucher, 2018

PARK, SOO-JIN e SEO, MIN-KANG. *Interface Science and Composites*. 1ª edição, South Korea, Department of Chemistry, Inha University. 2011

REDELEASE. Boletim Técnico da RESINA EPOXI 2001 ENDURECEDOR EPOXI 3154. Rev 0, 2018

REVIEW OF MARITIME TRANSPORT, Nova York. EUA. 2019

ROBERTS, C. Delamination of coating from a ship's hull. *J. Prot. Coatings Linings* 35, 9–12, 2018

SANCHES, ELISABETE MARIA SARAIVA. *Resinas de poliéster insaturado: Relação Estrutura e Propriedades. Influência da Adição do Copolímero Poli(Estireno-b-Isopreno-b\_Estireno) nas Propriedades Mecânicas das Resinas*. 1996. 104 p..Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, SP, 1996, Orientadora: Cecília Amélia Carvalho Zarvaglia.

SANTOS, ROBERTO HENRIQUE ASSAD. Tese. *Política de manutenção de meios navais*. 2017. Tese. Escola Superior de Guerra. Rio de Janeiro.

SCOTT BADER. *Composites Handbook*. 1ª Edição, Reino unido, Scott Bader, 2002

SILVA, LUCAS F. M. *et al.* *Handbook of Adhesion Technology*. 2ª edição. Ed. Springer. Oxford, Inglaterra, 2018

SMITHERS – A SMITHERS GROUP COMPANY. *Handbook of Thermoset Resins*. 1ª edição, Shawbury, Reino Unido, Lightning Source, 2009.

Srivastava1, Yashi *et al.* Melting, crystallization and storage stability of virgin coconut oil and its blends by differential scanning calorimetry (DSC) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). *Association of Food Scientists & Technologists (India)*, 2016

SUJON, MD. ABU SHAID *et al.* Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy

hybrid composites. *Journal of materials and research and technology*. 10971-10980, 2020

TRES, PAUL A. *Designing for plating*. 8ª ed. Hanser. Ciccinnatti, Estados Unidos, 2017

TRIPATHY, DEBA KUMAR e SAHOO BIHU SAHOO. *Properties and applications of Polymer Nanocomposites*. Ed. Springer. Alemanha. 2017

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Handbook: Manufacturing Advanced Composite Components for Airframes*. 1ª edição, Springfield, Virginia, EUA, 1997

VASILIEVY, VALERY V. e MOROSOV, EVGENY V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4ª ed. Holanda. Elsevier, 2018

W. G. McDonough *et al.* A Test Method to Determine the Fiber and Void Contents of Carbon/Glass Hybrid Composites. *Journal of ASTM International*, Vol. 1, No. 3, 1-15 p., 2004.

WALTER BROCKMANN *et al.* *Adhesive Bonding Materials - Applications and Technology*. 1ª Edição. Darmstadt, Alemanha, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2009.

XIAOQIANG XU *et al.* Kinetic analysis of isothermal curing of unsaturated polyester resin catalyzed with *tert*-butyl peroxybenzoate and cobalt octoate by differential scanning calorimetry. *J Therm Anal Calorim*, 2016 [doi:10.1007/s10973-017-6246-z](https://doi.org/10.1007/s10973-017-6246-z)

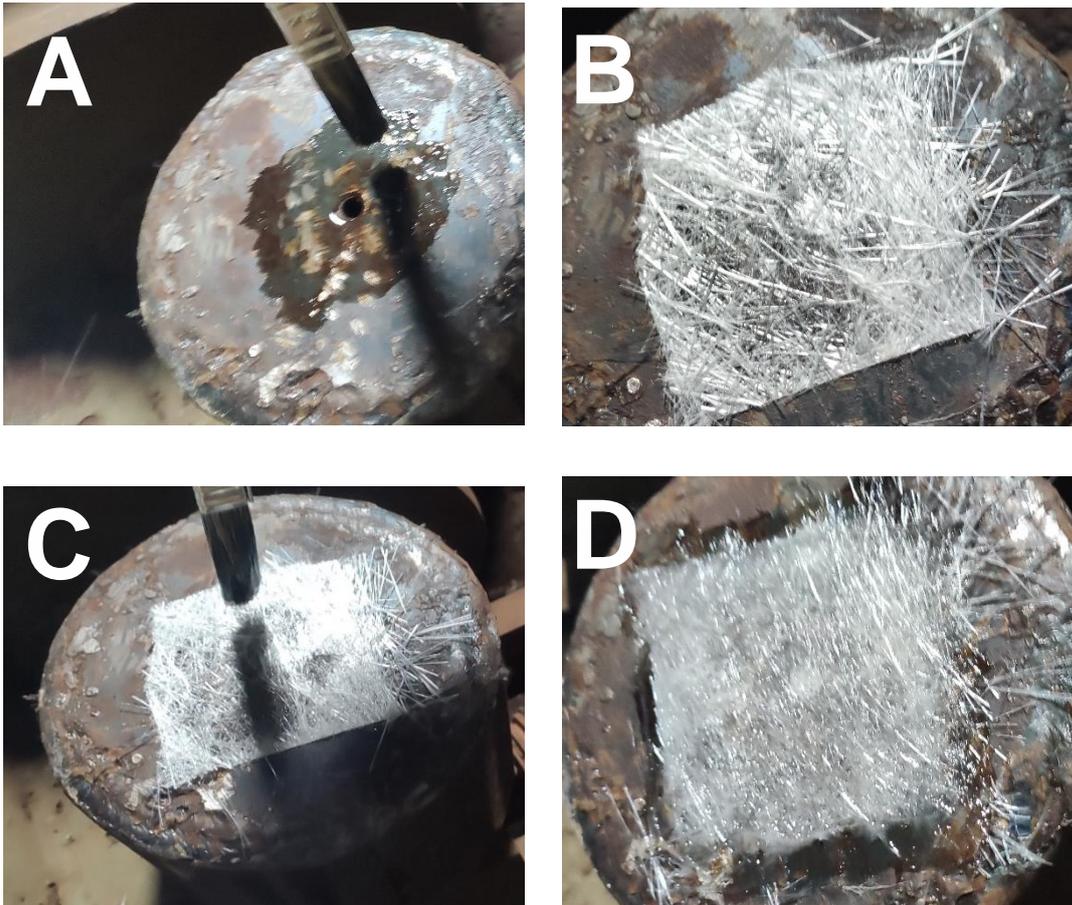
XU, LIKUN *et al.* Challenges and solutions of cathodic protection for marine ships. *Corrosion Communications*. V.2, Pages 33-40, 2021

## **Apêndice A - Processo de Laminação a Mão (“Hand Lay-Up”)**

O processo de laminação a mão é o mais simples entre as técnicas de processos de fabricação de compósitos atuais. Embora seja simples, esse sistema pode facilitar muito o entendimento dos demais. A metodologia da laminação a mão é lenta em comparação com processos mais recentes como infusão à vácuo ou RTM (“Resin Transfer Moulding”), basicamente a laminação a mão é utilizada quando não se tem uma produção em série de peças. Por outro lado, a laminação a mão é bastante versátil em relação a modelagem da peça

A quantidade de resina a ser laminada pode ser calculada pelo peso do reforço a ser usado. Para tecido de fibra de vidro picados, 30 a 35% de fibras em relação ao material é o normalmente praticado, conforme descreve Bader (2002). Para tecidos trançados, essa taxa aumenta para 50%. Após aplicação inicial da resina na área de contato do substrato, deve-se sobrepor a primeira camada de fibra presa firmemente dentro da área resinada auxiliado com a pressão de um pincel ou rolo, assim, impregnando a fibra na resina, mantendo aglutinadas. O reforço deve ser moldado durante sua aplicação. Uma vez que o tecido de fibra esteja impregnado, então, poderá ser aplicada nova camada, e assim por diante conforme necessidade da espessura do material. Antes de aplicar a segunda camada, a primeira deve estar o mais possível isenta de bolhas. O pincel deve ser de forma impactante e pontilhada, o seu uso de forma “arrastada” e lateralmente pode danificar o arranjo das fibras. Uso de rolos é melhor quando a área de trabalho é longa. Espátulas podem facilitar o trabalho de retirada de bolhas. Não é recomendado realizar a aplicação de mais que 04 camadas de uma vez só para que assim se previna o excesso de reação exotérmica, o que poderia causar distorções, trincas, cura inadequada e desprendimento de material, a necessidade de material maior que 04 camadas podem ser feitas após um espaço de tempo. Dependendo do material a ser laminado pode ser necessário usar insertos de metal ou batoques. O material está curado de acordo com as recomendações do fabricante

Figura 27: Processo de laminação à mão. A) colocação da resina no substrato. B) Inserida a Fibra sobre a resina. C) Aplicação de outra parte de resina sobre a Fibra e compactando como uma operação do tipo “martetele” usando um pincel. D) Camada de fibra resinada esperando cura.



Fonte: Autor, 2022.