



João Pedro Herrlein Souto de Oliveira

**Análise de materiais compósitos
fabricados por laminação manual com
exposição à salinização**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: José Roberto Moraes d'Almeida

Rio de Janeiro

Junho de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu pai, incentivador e meu grande apoiador na vida e durante esse árduo período de faculdade.

Agradeço a meu professor orientador, José Roberto Moraes d'Almeida, por ter me dado todo o suporte e condições de realizar esse trabalho. E Bruno Jordão, por ter me auxiliado durante os testes no laboratório.

Agradeço a minha família por sempre ter me apoiado nos caminhos que escolhi até aqui.

RESUMO

Análise de materiais compósitos fabricados por laminação manual com exposição à salinização

O tecido de fibra de vidro é um material composto por diversos filamentos de vidro, de maneira ortotrópica para resistir aos esforços projetados para o objeto. Quando laminados usando algum tipo de resina, forma-se um material composto extremamente resistente e de baixo peso. Laminados de fibra de vidro são utilizados nas mais diversas aplicações devido a sua fácil moldabilidade, capacidade de aumento de resistência em pontos específicos dependendo das direções de suas fibras. As aplicações mais conhecidas são na construção naval, pás de energia eólica, fabricação de pranchas de surf, pias, banheiras, piscinas e na indústria aeronáutica. Devido à ortotropia, pode-se projetar um objeto ou peça, utilizando o mesmo material, com diferentes finalidades. Dependendo das proporções e direções da fibra, o material torna-se mais resistente em uma direção do que em outra, acatando as especificações de projeto. Este estudo tem a finalidade de analisar a degradação de compósito de fibra de vidro quando exposto à ambientes de alta salinização (4% a 6% de NaCl) e altas temperaturas por longos períodos, que é o caso de várias das aplicações citadas acima. Os efeitos causados foram observados tanto em relação as perdas de propriedades mecânicas avaliadas por ensaio de flexão em três pontos, como em relação a coloração.

Palavras chaves: Compósito. Fibra de vidro. Salinização. Construção naval. Ortotropia.

ABSTRACT

Analysis of composite materials manufactured by hand lay-up lamination with exposure to salinization

Fiberglass fabric is a material composed of several glass filaments in an orthotropic manner to resist the stresses projected onto the object. When laminated using some type of resin, an extremely strong and lightweight composite material is formed. Fiberglass laminates are used in the most diverse applications due to their easy moldability, ability to increase strength at specific points depending on the directions of their fibers. The best known applications are in shipbuilding, wind power blades, surfboard manufacturing, sinks, bathtubs, swimming pools, and in the aeronautical industry. Due to the orthotropy, an object or part can be designed, using the same material, with different purposes. Depending on the proportions and directions of the fiber, the material becomes more resistant in one direction than in another, meeting the design specifications. This study aims to analyze the degradation of glass fiber composite when exposed to high salinization environments (4% to 6% NaCl) and high temperatures for long periods of time, which is the case in several of the applications mentioned above. The effects caused were observed both in relation to the loss of mechanical properties evaluated by three-point bending test, and in relation to coloration.

Keywords: Composite; Fiberglass; Salinization; Shipbuilding; Orthotropy.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivo	9
2 Materiais utilizados	9
2.1 Tecido de Fibra de vidro CM 1808	13
2.2 Resina Epóxi AR 260 com endurecedor AH 260	16
3 Laminação manual	18
3.1 Pesagem do material e corte das fibras	18
3.2 Aplicação da cera desmoldante	19
3.3 Posicionamento da fibra e aplicação da resina	20
3.4 Aplicação do tecido <i>peel ply</i>	22
4 Envelhecimento	23
5 Modelo	23
5.1 Módulo de elasticidade	24
5.2 Deformação máxima e velocidade de ensaio	26
5.3 Módulo de elasticidade e tensão de flexão esperado nos ensaios	26
5.4 Coloração dos corpos de prova	28
6 Resultados obtidos	28
6.1 Análise de resultados	34
6.1.1 Grupo 01	35
6.1.2 Grupo 02	35
6.1.3 Grupo 03	36
6.2 Modelo experimental	36
6.3 Coloração dos corpos de prova	39
7 Conclusão	41
Sugestão para trabalhos futuros	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Lista de figuras

Figura 2.1 – Custo aproximado de fibras	10
Figura 2.2 – Módulo específico de fibras de reforço	10
Figura 2.3 – Resistência à tração específica em fibras de reforço	11
Figura 2.4 – Resistência à compressão específica em fibras de reforço	11
Figura 2.1.1 – Tecido CM biaxial 0-90°	14
Figura 2.1.2 – Tecido <i>woven roven</i> 0-90°	15
Figura 3.1.1 – Pesagem das fibras	18
Figura 3.2.1 – Aplicação da cera no molde	19
Figura 3.3.1 – Aplicação da resina na fibra de vidro	20
Figura 3.3.2 – Aplicação do segundo tecido de fibra de vidro	21
Figura 3.3.3 – Aplicação da última camada de resina	22
Figura 3.4.1 – Aplicação da resina no <i>peel ply</i>	22
Figura 3.4.2 – <i>Peel ply</i> molhado com resina	23
Figura 6.1 – Boxplot de força na ruptura por grupo	29
Figura 6.2 – Boxplot de deslocamento na ruptura por grupo	29
Figura 6.3 – Boxplot de módulo de elasticidade por grupo	30
Figura 6.4 – Boxplot de tensão de flexão por grupo	30
Figura 6.5 – Gráfico de tensão x tempo por grupo	31
Figura 6.6 – Gráfico de corpo de prova do Grupo 01	32
Figura 6.7 – Gráfico de corpo de prova do Grupo 02	33
Figura 6.8 – Gráfico de corpo de prova do Grupo 03	33
Figura 6.2.1 – Perda do módulo de elasticidade x dias nos grupos amostrais	37
Figura 6.2.2 – Perda na tensão de flexão x dias nos grupos amostrais	38
Figura 6.3.1 – Grupo 01	39
Figura 6.3.2 – Grupo 02	40
Figura 6.3.3 – Grupo 03	40

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Preço da fibra de vidro	10
Tabela 2.2 – Propriedades de resinas epóxi	12
Tabela 2.1.1 – Informações técnicas do CM 1808	15
Tabela 2.1.2 – Peso do laminado em CM 1808	15
Tabela 2.1.3 – Módulo de Elasticidade do CM 1808	16
Tabela 2.2.1 – Propriedades da resina AR260 e endurecedor A260	17
Tabela 2.2.2 – Propriedades mecânicas da resina AR260 e endurecedor A260	17
Tabela 6.1 – Resultado dos ensaios	31

1 Introdução

O compósito de fibra de vidro é um material muito utilizado pela indústria devido ao seu custo baixo e propriedades físicas, podendo ser projetado para ter diferentes tipos de ductilidade e resistência, dependendo dos sentidos das fibras. Sua utilização é esmagadora na produção naval de embarcações recreativas e esportes náuticos de alta performance [1].

A primeira patente da fibra de vidro deu-se ainda no século XIX, porém, o início da fabricação em massa deu-se no século XX, quando a empresa americana Owens-Illinois procurava maneiras de fundir a logomarca de sua empresa em uma garrafa de vidro [2]. Em uma dessas tentativas, sem querer, pulverizou-se a garrafa de vidro, criando um aglomerado de fibras, semelhantes ao formato de um algodão. Nesse primeiro incidente foi observado que o material ali criado tinha propriedades como bom isolamento térmico e era de valor acessível. Nesse momento as aplicações da fibra de vidro ainda eram muito rudimentares, até que o estudante Kleist, que trabalhava na empresa, tentou selar duas metades de um bloco de vidro com uma pistola de pulverização de metal, só que utilizando vidro derretido ao invés do bronze. Esse experimento gerou filamentos de fibra ultrafinas, cativando a atenção da empresa. A partir desse momento foram financiados estudos para o desenvolvimento da fibra de vidro como é conhecida hoje.

Na atualidade, o uso de fibras vem se diversificando, assim como seus tipos. Hoje existem fibras de vidro, fibras de carbono, fibras minerais e compostos híbridos que misturam esses diferentes tipos. Na indústria eólica, são utilizadas fibras de vidro e de carbono, visando alta resistência; na indústria naval, utiliza-se fibra de vidro para obter baixo custo, e na parte de esporte, utiliza-se fibras de vidro e de carbono para ter alta performance. Atualmente, empresas nacionais buscam especializar-se em processos de fabricação (infusão a vácuo) para maximizar a produção.

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é quantificar as perdas de propriedades mecânicas de um compósito fabricado a partir de uma matriz de resina epóxi combinado com camadas de fibra de vidro, quando exposto à atmosfera salina.

Primeiramente, deve-se medir as propriedades mecânicas do material produzido antes dele sofrer qualquer tipo de exposição, pois validar o processo de fabricação é fundamental para sua utilização e para quantificar os processos de degradação.

Para alcançar o objetivo o material foi exposto à atmosfera salina por dois diferentes períodos, de maneira a tentar criar uma estimativa das perdas de propriedades mecânicas do material quando nessas condições em função do tempo, principalmente a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade do material.

Observou-se ainda as diferenças na coloração do material, e como ela ocorre ao longo dos meses de exposição. Esse efeito é primordial para a prevenção de erros de projeto que desconsideram a degradação do compósito.

2 Materiais utilizados

Neste capítulo, serão apresentadas a relevância econômica, formação e composição do material de estudo. Será revisada a fabricação do material, explicando a importância de cada uma das etapas envolvidas no processo.

Os maiores produtores de fibra de vidro do mundo estão localizados nos EUA, China e Europa. Já existem produtores no Brasil, e o acesso é relativamente fácil, existindo diversos revendedores no país. A fibra de vidro possui uma vasta variedade (Tabela 2.1) em território nacional.

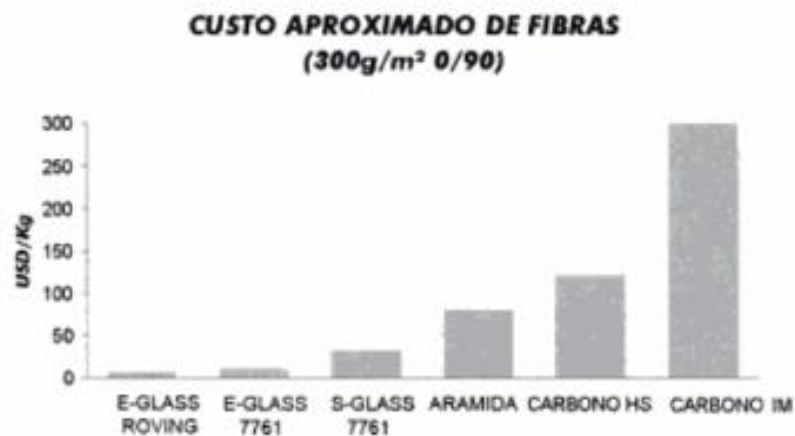
O custo de um tecido de fibra de vidro no Brasil é baixo (Figura 2.1) quando comparado com o desempenho em relação às outras fibras (Figuras 2.2, 2.3 e 2.4), não sendo considerado um fator principal nas produções de larga escala. Quando o viés econômico é analisado, o maior custo é a resina que é misturada com as fibras.

Tabela 2.1 – Preço da fibra de vidro em Abril 2022.

Tecido	Preço	Qtd
FIBRA DE VIDRO RE195HS	R\$ 18,90	kg
FIBRA DE VIDRO BIAXIAL RX450	R\$ 18,90	kg
FIBRA DE VIDRO BIAXIAL CM1808	R\$ 32,90	kg
FIBRA DE VIDRO UNIDIRECIONAL VRW700	R\$ 15,90	kg
FIBRA DE VIDRO RE200P	R\$ 22,05	kg
FIBRA DE VIDRO BIAXIAL XM1808	R\$ 35,30	kg
FIBRA DE VIDRO RE150P	R\$ 19,95	kg
FIBRA DE VIDRO RE83P	R\$ 25,20	kg
FIBRA DE VIDRO BIAXIAL XM0905	R\$ 22,30	kg
FIBRA DE VIDRO BIAXIAL EBX400	R\$ 8,82	m2
FIBRA DE VIDRO RE295P	R\$ 12,85	m2

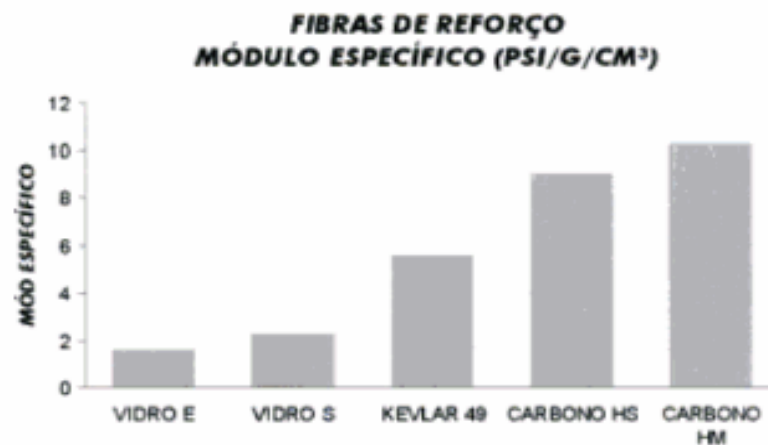
Fonte: [3]

Figura 2.1 – Custo aproximado de fibras.



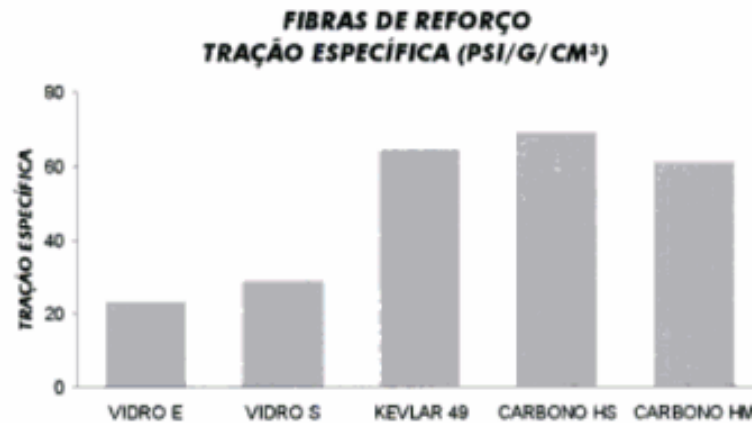
Fonte: [1]

Figura 2.2 – Módulo específico de fibras de reforço.



Fonte: [1]

Figura 2.3 – Resistência à tração específica em fibras de reforço.



Fonte: [1]

Figura 2.4 – Resistência à compressão específica em fibras de reforço.



Fonte: [1]

As resinas são basicamente polímeros sintéticos, formados a partir da união de monômeros de baixa massa molecular, formando cadeias muito longas. Dependendo da forma com que esses monômeros se unem, formam-se estruturas distintas. As resinas podem ter diferentes tipos de propriedades mecânicas. Sendo assim, existem diferentes tipos de resina, sendo as resinas epóxi e poliéster os mais comuns.

A resina poliéster é utilizada quando se busca estruturas finais com grande resistência, durabilidade alta e estrutura leve. Contém grupos de ésteres, e é formada através da reação química entre um diálcool e um diácido [4], misturado com um solvente, com temperatura e pressão controladas durante o processo. A resina poliéster é formada então com viscosidade adequada para um fácil manuseio na hora de sua utilização. Sua cura pode ser feita a frio, somente misturando com o material endurecedor, e durante o processo, sua temperatura pode facilmente ultrapassar 50°C.

A resina epóxi é utilizada quando se busca estruturas finais com viscosidade elevada, alta ductilidade e resistência a altas temperaturas, como é o caso nesse estudo. Sua estrutura é caracterizada pelo grupo epóxi, ou oxirano, formado pela união de um átomo de oxigênio a dois átomos de carbono [5]. O grupo oxirano é o grupo químico que define as propriedades da resina epóxi e a quantidade desse grupo na estrutura permite a obtenção de resinas com diferentes propriedades (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Propriedades de resinas epóxi.

SISTEMAS DE LAMINAÇÃO EPOXY						
	AR500 AH30	AR500 AH90	AR500 AH150	AR600 AH30	AR600 AH90	AR600 AH150
Viscosidade da Resina, cps	5,000	5,000	5,000	6,000	6,000	6,000
Viscosidade do Endurecedor, cps	50	30	15	30	30	15
Viscosidade da Mistura, cps	900	600	350	2,250	1,500	950
Proporção da Mistura (Peso)	100A:33B	100A:33B	100AD:33B	100A:33B	100A:33B	100A:33B
Proporção da Mistura (Vol.)	3A:1B	3A:1B	3A:1B	3A:1B	3A:1B	3A:1B
Gel Time, 25°C, 150g, min.	30	180	600	30	180	600
Dureza	81D	81D	80D	81D	81D	83D
Resistência a Tração, psi	11,900	11,200	9,800	11,900	11,600	9,900
Alongamento, %	3.2	3.9	6.9	3.2	3.9	6.9
Resistência a Compressão, psi	21,900	19,600	25,000	21,900	19,600	25,000
Resistência a Flexão	14,700	16,800	15,700	14,700	16,800	15,700
Módulo da Flexão	542,000	479,000	459,000	542,000	516,000	511,000
HDT, Room Temp. Cure, °C	60	65	60	60	65	60
HDT, Post Cure, °C	85	85	85	85	85	85
Impacto Izod, ft-lb/in	1.28	1.22	1.05	1.22	1.24	1.05
Contração, in/in	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002

Fonte: [1].

Para ocorrer a cura dessas resinas, ou seja, para elas endurecerem no momento desejado, é aplicado algum tipo de endurecedor. Normalmente cada resina tem um tipo de endurecedor próprio para ser utilizado com a sua cadeia polimérica.

O Brasil depende da importação para obter-se os materiais mais sofisticados, como tecidos multiaxiais e resinas epóxi de alta performance, porém há grande disponibilidade no mercado nacional. Indústrias navais compram tecidos com revendedores nacionais (Barracuda Composites, Megafibra) enquanto o mercado eólico, devido ao grande volume de produção costuma importar seus produtos diretamente com os fabricantes internacionais (Markforged, Gualini).

Para a fabricação dos corpos de prova analisados nesse estudo, o material foi comprado de revendedores nacionais, e fabricado pelo aluno. Foram utilizados:

- 2 x CM 1808 65cm x 40cm (437g);
- 400 g resina epóxi AR260;
- 80 g endurecedor AH260

2.1 Tecido de Fibra de vidro CM 1808

O tecido de fibra de vidro CM 1808 é classificado como uma fibra do tipo 'E' e possui fibras direcionadas nos ângulos de 0-90 graus (Figura 2.1.1) de forma biaxial não tramada acoplado a uma manta, que é um tecido composto de fibras picadas distribuídas aleatoriamente, unidas entre si por um tipo de "cola" chamada de *binder*, solúvel na resina. O *binder* cumpre a tarefa de melhorar a aderência interlaminar uma vez que a proporção de resina durante a laminação pode chegar a 2 x o seu peso e "quem cola é a resina" [1]. Tecidos multiaxiais tem seus feixes dispostos paralelamente em suas direções, sem se entrelaçar, sobrando menos espaço para o preenchimento com resina e tendo toda a sua resistência no sentido do esforço, o que já não ocorre nos tecidos "*woven roving*" (Figura 2.1.2), onde os feixes entrelaçados não estão diretamente na direção do esforço, e tão pouco podem ser tecidos em direções diferentes de 0-90°, além de deixar mais espaço para resina, que aumenta o peso do laminado.

Existem uma infinidade tipos de tecidos multiaxiais, de acordo com a direção dos seus feixes, como CM (0-90°), XM(45-45°), TVM(0-45-45°), QM(0-90-45-45°), e unidirecional, em diversas gramaturas.

Ainda podem ser encontrados sem a manta acoplada, o que é muito usado quando laminado com resinas epóxi, que economiza resina e consequentemente peso, pois o epóxi não precisa de incremento na aderência interlaminar.

Tecidos 0-90°, são comumente usados em peças submetidas a esforços ortogonais. Exemplo: casco de um barco, onde o esforço do casco e espelho de popa, se contrapõe ao empuxo da hélice do motor de popa, exercendo uma flexão no casco.

Outros tipos de tecidos multiaxiais ou unidirecionais, são usados dependendo do esforço da peça. Exemplo: Nas pás de energia eólica os tecidos estão “misturados” em direções perpendiculares entre si, posicionados no sentido longitudinal da pá.

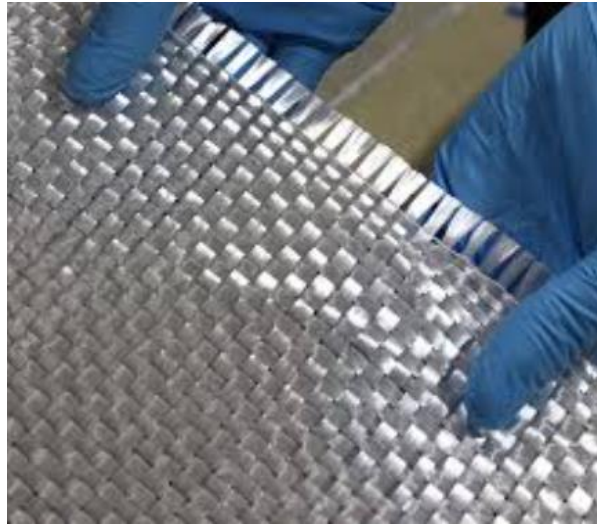
A nomenclatura do tecido empregado (CM1808) indica que: “C” é a direção da fibra do tecido; “M” é de manta (*Chopped Strand Mat*); “18” é o peso do tecido (18 onças/pé quadrado) e “08” o peso da manta (onças/pé quadrado). Ao converter obtém-se aproximadamente 600g de tecido e 300 g de manta/m².

Figura 2.1.1 – Tecido CM biaxial 0-90°.



Fonte: [3]

Figura 2.1.2 – Tecido *woven roven* 0-90°.



Fonte: [3]

As propriedades do CM 1808 estão descritas no datasheet do material (Tabelas 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3):

Tabela 2.1.1 – Informações técnicas do CM 1808.

Informações Técnicas	
Unidade	
Tipo de fibra	Vidro E
Arquitetura	Biaxial 0/90
Espessura (seco)	0,91mm
Densidade	882g/m ²

Fonte: [6]

Tabela 2.1.2 – Peso do laminado em CM 1808.

Peso do laminado			
	Unidade	Infundido	Molde Aberto
Fibra	Kg/m ²	0,879	0,879
Resina	Kg/m ²	0,439	1,025
Total	Kg/m ²	1,318	1,904

Fonte: [6]

Tabela 2.1.3 – Módulo de Elasticidade do CM 1808.

Módulo de Elasticidade

(MPa)	Infundido com Resina	Molde Aberto
Ex	19785,78	13029,66
Ey	19785,78	13029,66
Gxy	4481,1	3033,36
Ex, flexão	18820,62	12410,46
Ey, flexão	18820,62	12410,46

Fonte: [6]

2.2 Resina Epóxi AR 260 com endurecedor AH 260

A resina epóxi AR 260 com endurecedor AH 260 é um sistema de cura rápida e baixa viscosidade, facilitando o manuseio no processo de laminação manual. A mistura deve ocorrer com aproximadamente 20% de endurecedor e 80% de resina em massa. O produto será um sólido, com as propriedades segundo o datasheet do material (Tabela 2.2.1 e 2.2.2):

De uma maneira geral, as resinas epóxi é um adesivo de primeira linha, que quando usada com tecidos de fibra, produzem laminados de alta performance. Por ter alta aderência, podem ser usadas em tecidos sem a manta acoplada. É indicado sua utilização na fabricação de laminados de carbono ou kevlar, uma vez que essas fibras não possuem boa aderência a qualquer resina.

Outra vantagem sobre a resina de poliéster, é que por ter uma elasticidade muito maior, produz um laminado muito mais resistente, já que num teste destrutivo, o primeiro a romper é a resina.

A grande desvantagem é o custo, muitas vezes 10 vezes mais caro do que as resinas de poliéster, além do que em seu uso deve haver uma proporção muito mais precisa entre resina e endurecedor, justificando inclusive o uso de balanças de precisão em sua dosagem. Já a resina de poliéster, utiliza um catalisador, normalmente MEKP (Peróxido de metil etil cetona) [7], que tem proporções muito mais elásticas, normalmente em torno de 1%.

Outra grande diferença é o tempo de trabalho (*working time*). Enquanto a resina de poliéster, normalmente entra em estado de gel em 30 min, algumas epóxi podem durar até 8 horas, possibilitando trabalhos mais complexos.

Tabela 2.2.1 – Propriedades da resina AR260 e endurecedor A260.

	VALOR	MÉTODO
Densidade da Resina (lbs/gal)	9.6	ASTM E-201
Densidade do Endurecedor (lbs/gal)	7.9	ASTM E-201
Viscosidade da Resina @ 25°C (cps)	1,200	ASTM D-2393
Viscosidade do Endurecedor @ 25°C (cps)	30	ASTM D-2393
Viscosidade Mista @ 25°C (cps)	300	ASTM 2393
Taxa de mistura por peso 100A	100A : 26B	Calculado
Gel time @ 25°C (150g massa, min.)	290	ASTM D-2471

Fonte: [8]

Tabela 2.2.2 – Propriedades mecânicas da resina AR260 e endurecedor A260.

	VALOR	MÉTODO
Cor	Âmbar Claro	Visual
Dureza Shore D	87	ASTM D-2240
Resistência à tração (psi)	10,700	ASTM D-638
Módulo de tensão (psi)	458,000	ASTM D-638
Resistência ao alongamento (%)	8.8	ASTM D-638
Resistência à compressão (psi)	12,900	ASTM D-695
Resistência à flexão (psi)	17,300	ASTM D-790
Módulo de flexão (psi)	397,000	ASTM D-790
HDT - Cura Temperatura ambiente (°C)	58	ASTM D-648
HDT - Temperatura de pós-cura (°C)	98	ASTM D-648
Impacto Izod, com entalhe (ft-lb/in)	1,27	ASTM D-256
Encolhimento	<0.002	ASTM D 2566

Fonte: [8]

3 Laminação manual

A laminação manual é um processo de fabricação de materiais compósitos com mais de 50 anos, porém ainda é utilizado nos dias de hoje por construtores que visam um menor nível profissional para baratear o produto. Embora seja uma técnica antiga, o processo é eficaz, visto que ainda é utilizado no Brasil pela maioria dos fabricantes, ao invés de outros processos, como infusão ou *vacuum bag*. Hoje em dia, com a difusão do processo de infusão, esse processo de fabricação de alta performance chegou ao chão das fábricas, porém esbarra no custo de produção, no caso de peças com pouco valor agregado.

No presente estudo, utilizou-se o processo de fabricação manual, de acordo com as normas do livro Manual de Construção de Barcos [1].

3.1 Pesagem do material e corte das fibras

Cortou-se a fibra de vidro no tamanho desejado para caber dentro do suporte de vidro utilizado para a laminação. Após o corte, foi feita a pesagem (Figura 3.1.1) para calcular a quantidade de resina a ser utilizada na fabricação. No caso de tecido biaxial numa peça plana, calcula-se 70% do peso das fibras, e é utilizado esse valor para calcular o peso da resina.

Figura 3.1.1 – Pesagem das fibras



Fonte: Autor (2022)

O tecido escolhido CM1808 é de configuração das fibras bidirecionais 0-90° nos eixos x e y, assim não é necessário coordenar o posicionamento das fibras no momento de alocar o material no molde.

3.2 Aplicação de cera desmoldante

Para evitar que a peça se prenda no molde, aplica-se uma camada de cera desmoldante à base de carnaúba em toda a área do molde (Figura 3.2.1). Assim são evitados quaisquer tipos de danos ao molde onde o laminado está sendo fabricado. Se houver alguma falha nessa etapa, é possível haver uma retenção do laminado ou peça no molde, danificando um ou ambos.

Pela alta aderência do epóxi, recomenda-se a aplicação de 4 mãos de cera, a garantir total cobertura do molde. No caso de moldes de alta rotatividade são usados também desmoldantes semipermanentes, diminuindo em muito a mão de obra de encerar o molde a cada laminação. Alguns desmoldantes semipermanentes permitem a desmoldagem de até 10 peças sem reaplicação.

Figura 3.2.1 – Aplicação da cera no molde.



Fonte: Autor (2022)

3.3 Posicionamento da fibra e aplicação da resina

As fibras devem ser aplicadas de modo que satisfaça o projeto, no caso desse estudo, posicionam-se os tecidos um em cima do outro, pois as fibras são bidirecionais 0-90° nos eixos x e y.

A aplicação da resina deve ser feita de forma homogênea até o preenchimento total da área do laminado. Para tanto, primeiramente é espalhada 50% da resina no molde, (sem o tecido consegue-se espalhar a resina uniformemente).

Posteriormente o tecido é colocado sobre a resina e é feita a impregnação com auxílio do rolo de lã (Figura 3.3.1). O restante da resina é espalhado pontualmente nas partes ainda secas. O laminador, deve ficar atento a quantidade de resina utilizada, uma vez que a proporção fibras/resina, além do peso e custo, interfere enormemente na resistência do laminado. O laminado com proporções de resina acima de 50% do total fica invariavelmente quebradiço. Nas primeiras camadas, um excesso de resina é justificável, uma vez que esta será absorvida pelo tecido das camadas subsequentes.

Figura 3.3.1 – Aplicação da resina na fibra de vidro



Fonte: Autor (2022)

Após a impregnação total da primeira camada de fibra, o próximo tecido é posicionado em cima do anterior, e o processo de laminação se repete até a última camada (Figura 3.3.2 e 3.3.3).

No nosso exemplo, não foi usado o rolo de ferro tira bolhas, uma vez que estava sendo feito um laminado fino com tecido biaxial (de fácil impregnação) e era uma peça simples.

O rolo de ferro tira bolhas/compactador é uma ferramenta indispensável no caso de laminações mais complexas, especialmente no caso de laminação com mantas. Ele é todo frisado, e usado como o rolo de lã compactando o laminado e expulsando as bolhas pelos frisos.

Figura 3.3.2 – Aplicação do segundo tecido de fibra de vidro.



Fonte: Autor (2022)

Figura 3.3.3 – Aplicação da última camada de resina



Fonte: Autor (2022)

3.4 Aplicação do tecido *peel ply*

O *peel ply* é um tecido de nylon permeável, que é impregnado após a última camada (Figura 3.4.1) de fibra. Aplica-se resina após seu posicionamento (Figura 3.4.2), pois é um tecido permeável. Depois da cura do laminado, ele é obrigatoriamente retirado (*peel ply*), deixando uma superfície limpa, áspera, e pronta para uma eventual laminação secundária ou colagem, sem necessidade de lixamento. Muitas vezes, pode ser deixado na peça até que ela venha a ser novamente utilizada, evitando que ela seja contaminada por sujeiras do ambiente.

Figura 3.4.1 – Aplicação da resina no *peel ply*.



Fonte: Autor (2022)

Figura 3.4.2 – *Peel ply* molhado com resina.



Fonte: Autor (2022)

4 Envelhecimento

O ensaio de envelhecimento foi realizado na PUC-RIO, em uma câmara de *salt-spray* (SSEQ Walk-in 14, EQUILAM), que simula a condição de atmosfera salina, na temperatura de 50°C. A atmosfera salina criada na câmara seguiu o modo de operação recomendado pela norma ASTM B117, a saber:

- Saturador com aspergimento constante, com uma pressão de saída variando entre 0,7 ~1,6 kgf/cm².
- Solução aspergida com uma concentração entre 4% e 6% de NaCl.

Os corpos de prova foram retirados para ensaio após aproximadamente 1992 horas e após 3312 horas. Após a retirada da câmara os corpos de prova foram embalados em plástico bolha, para evitar qualquer perda de umidade antes de serem ensaiados à flexão.

5 Modelo

O estudo se trata da análise do material quando exposto a condições de alta temperatura e grande exposição a atmosfera marinha. Condição comum à qual estão expostos os compósitos empregados na indústria naval.

Os corpos de prova foram separados em três grupos, com 8 amostras nos dois primeiros grupos e 9 amostras no último grupo. O primeiro manteve-se armazenado à temperatura ambiente e sem exposição alguma. O segundo e o terceiro foram submetidos à salinização com concentrações entre 4% e 6% de NaCl à 50°C pelo período de 83 e 138 dias respectivamente.

Pela fabricação, o corpo de prova possui as seguintes características:

- *Largura* = 25 mm
- *Espessura* = 2,3 mm
- *Comprimento* = 250 mm
- *Peso* = 21,36 g
- *Densidade da fibra* = $d = 882 \frac{g}{m^3}$

5.1 Módulo de elasticidade

Para o cálculo do módulo de elasticidade teórico do material compósito, adota-se a regra das misturas [9], onde cada fase do compósito (resina e fibra) contribui para as propriedades mecânicas do material dependendo apenas da sua fração volumétrica. Através desse método é possível atingir valores aproximados do módulo de elasticidade.

Módulo de elasticidade da resina (Tabela 2.2.2):

$$E_r = 397000 \text{ psi} = 2,74 \text{ GPa}$$

Módulo de elasticidade do tecido CM1808 (Tabela 2.1.3):

$$E_f = 12,41 \text{ GPa}$$

Para o cálculo do percentual de fibra e resina no compósito, utiliza-se as características dos corpos de prova. No total, 28 corpos de prova foram fabricados.

$$Largura = b = 25 \text{ mm}$$

$$Espessura = h = 2,3 \text{ mm}$$

$$\text{Comprimento} = l = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Peso} = p = 21,36 \text{ g}$$

$$\text{Densidade da fibra} = d = 882 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$n = \text{corpos de prova} = 28$$

$$c = \text{camadas de fibra} = 2$$

Calcula-se o peso total e peso das fibras pelas suas propriedades:

$$P_{\text{total}} = p \cdot n = 598 \text{ g}$$

$$P_{\text{fibra}} = n \cdot c \cdot b \cdot l \cdot d$$

$$P_{\text{fibra}} = 28 \cdot 2 \cdot b \cdot l \cdot d$$

$$P_{\text{fibra}} = 2 \cdot 0,025 \cdot 0,25 \cdot 882 = 308,7 \text{ g}$$

E o percentual de fibra e resina:

$$V_f = \frac{308,7}{598} \cdot 100 = 51,6 \%$$

$$V_r = 100\% - V_f = 48,4 \%$$

Assim, o compósito fabricado possui 52% de fibra de vidro CM1808 e 48% de resina epóxi aproximadamente.

Para calcular o módulo de elasticidade teórico do compósito, utiliza-se a regra das misturas:

$$E_{ct} = E_f V_f + E_m V_r$$

$$E_{ct} = 12,41 \cdot 0,516 + 2,74 \cdot 0,484 = 7,73 \text{ GPa}$$

5.2 Deformação máxima e velocidade do ensaio

Para o cálculo da deformação máxima e velocidade de ensaio, utiliza-se a norma NBR 7447, onde determina-se as propriedades de flexão de materiais plásticos rígidos na forma de barras de seção retangular.

Para atingir a taxa de deformação padrão $Z = 0,01 \text{ (mm/mm)/min}$, especificada na norma NBR 7447, na superfície sob tração, calcula-se a velocidade do ensaio:

$$R = \frac{Z \cdot L^2}{6 \cdot h} = \frac{0,01 \cdot 36,8^2}{6 \cdot 2,3} \approx 1 \text{ mm/min}$$

L = distancia entre os pontos de apoio

Z = taxa de deformação padrão

h = espessura do corpo de prova

R = velocidade do ensaio

Os corpos de prova produzidos com resina epóxi podem deformar em grandes proporções antes de sua ruptura, por isso deve-se finalizar o ensaio quando atingir a deformação máxima $r = 0,05 \text{ mm/mm}$ na superfície sob tração. A deflexão correspondente é calculada por:

$$D = (r \cdot L^2)/(6 \cdot h) = (0,05 \cdot 120^2)/(6 \cdot 5) = 24 \text{ mm}$$

5.3 Módulo de elasticidade e tensão de flexão esperado dos ensaios

Obtém-se o módulo de elasticidade dos ensaios segundo a norma NBR 7447, usando os dados coletados do ensaio realizado na PUC-RIO pelo autor, com auxílio do estudante de pós graduação Bruno Jordão. O módulo de elasticidade é determinado utilizando a porção linear inicial da curva carga-deflexão utilizando os valores obtidos em cada um dos 9 corpos de prova. Durante o ensaio, devem ser medidos os valores da carga aplicada e deflexão simultaneamente.

Segundo a norma, o módulo de elasticidade obtido experimentalmente para cada corpo de prova é:

$$Ec = \frac{L^3}{4 bh^3} \cdot \frac{F}{y} \quad (1)$$

$y = \text{distância deslocada no eixo vertical}$

Para obter o módulo de elasticidade de cada grupo de corpos de prova, calcula-se a média para todos os corpos de prova ensaiados segundo a norma NBR 3534-1:

$$Em1 = \frac{\sum En}{n} \quad (2)$$

A tensão de flexão a uma carga F é calculado, em $Newtons/m^2$, segundo a Norma 7447, através da fórmula:

$$\sigma_f = \frac{M}{W} \quad (3)$$

Onde M = momento de flexão para carga F , dado pela fórmula:

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad (4)$$

$L = \text{espaço entre as hastes de apoio em milímetros}$

$F = \text{força aplicada em Newtons}$

W é o módulo da seção retangular:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (5)$$

$b = \text{largura da seção retangular em milímetros}$

$h = \text{espessura da seção retangular em milímetros}$

Para uma melhor aproximação da tensão no ensaio, leva-se em consideração a componente horizontal do momento de flexão:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot y^2}{L^2}\right) \quad (6)$$

Nos corpos de prova que não foram submetidos às câmaras de salinização, espera-se que ocorra um valor aproximado entre o E_t calculado na fabricação e o E_c medido nos ensaios.

5.4 Coloração dos corpos de prova

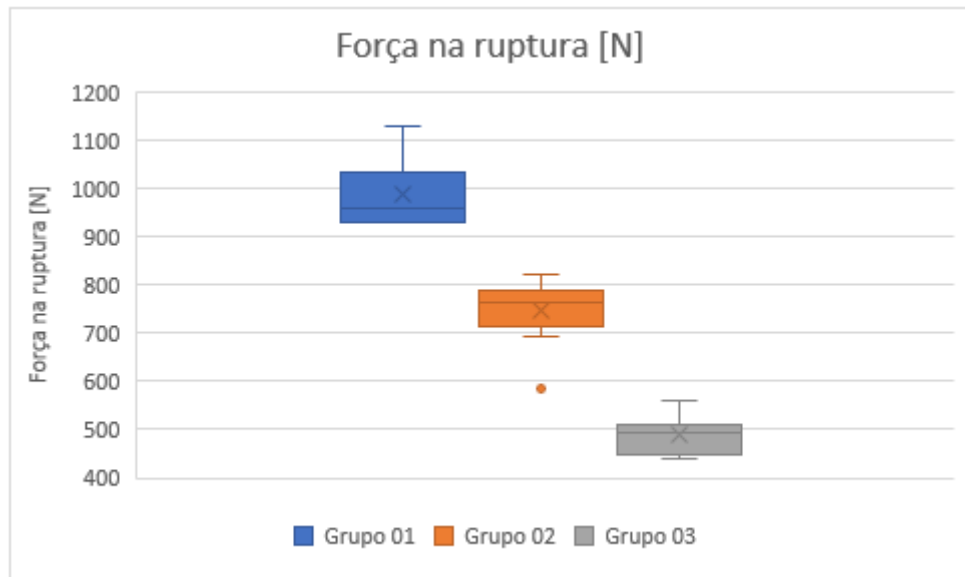
A coloração dos corpos de prova está diretamente ligada ao tempo de exposição do material ao meio no qual ele está operando [11]. Nesse estudo o processo foi acelerado pelas câmaras de salinização e por isso é esperado que, em poucos meses, observe-se o que demoraria meses ou anos.

Correlacionar as propriedades mecânicas dos compósitos com a sua cor é útil para identificar possíveis falhas em projetos e minimizar os riscos de ocorrer falha em estruturas utilizadas por eles. Espera-se obter uma relação direta entre a coloração pós desgaste e perdas de propriedades mecânicas, sendo possível identificar materiais defeituosos sem a necessidade de um teste específico.

6 Resultados obtidos

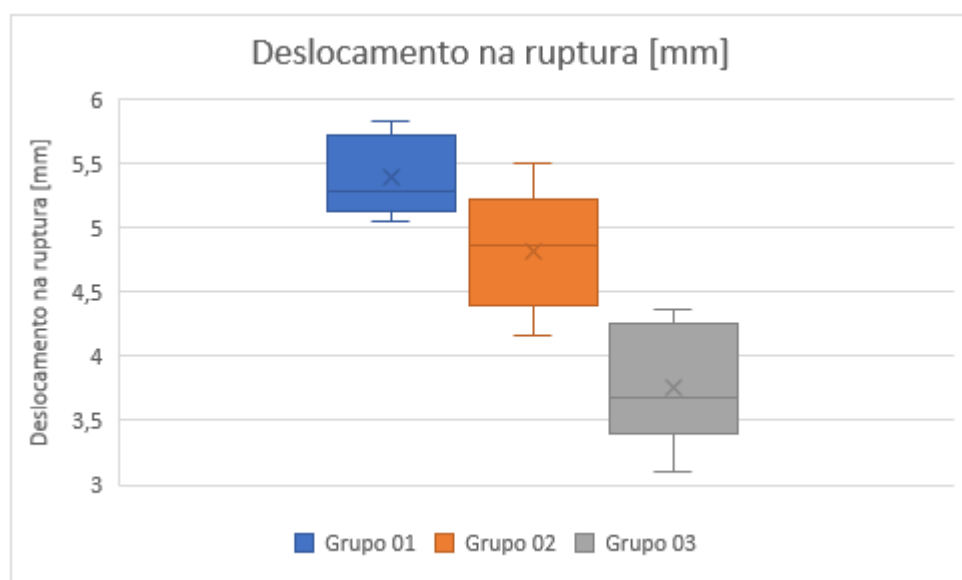
A partir dos ensaios de flexão, obtém-se os resultados experimentais do estudo. As figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 e tabela 6.1 mostram os resultados obtidos.

Figura 6.1 – Boxplot de força na ruptura por grupo.



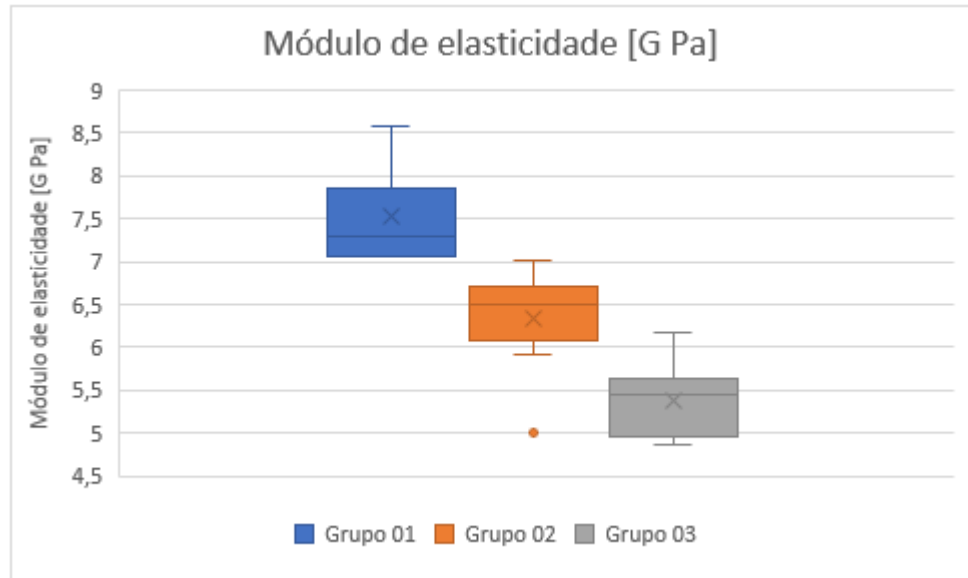
Fonte: Autor (2022)

Figura 6.2 – Boxplot de deslocamento na ruptura por grupo.



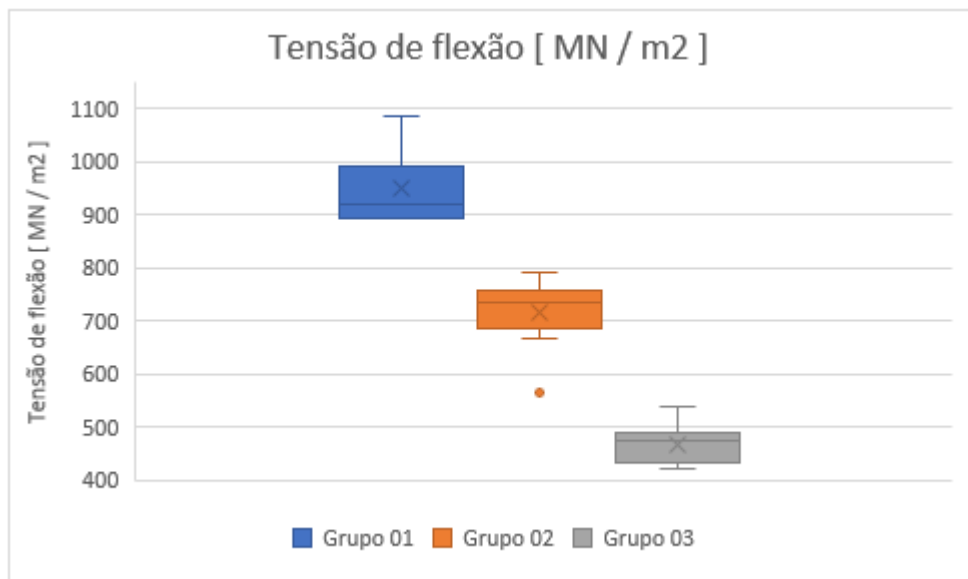
Fonte: Autor (2022)

Figura 6.3 – Boxplot de módulo de elasticidade por grupo.



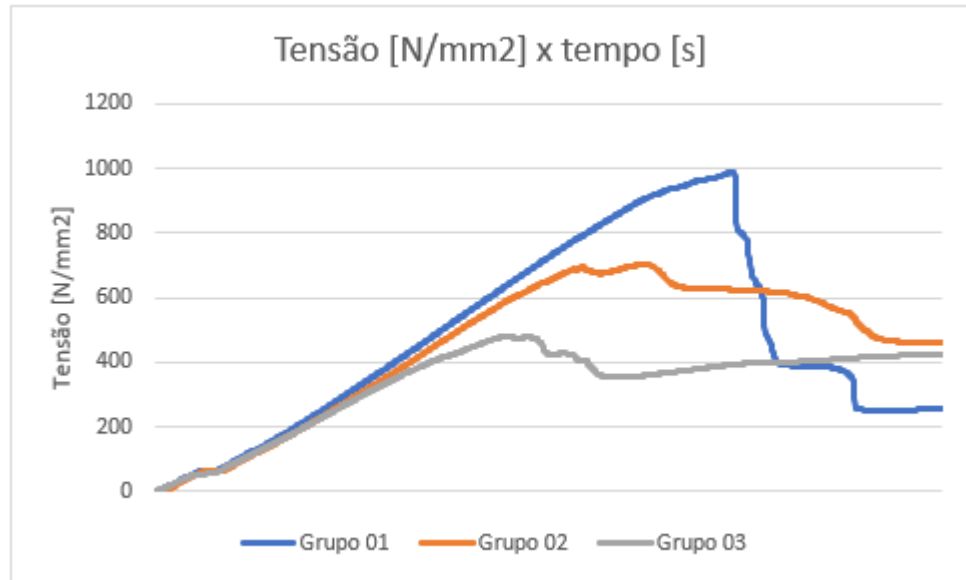
Fonte: Autor (2022)

Figura 6.4 – Boxplot de tensão de flexão por grupo.



Fonte: Autor (2022)

Figura 6.5 – Gráfico de tensão x tempo por grupo.



Fonte: Autor (2022)

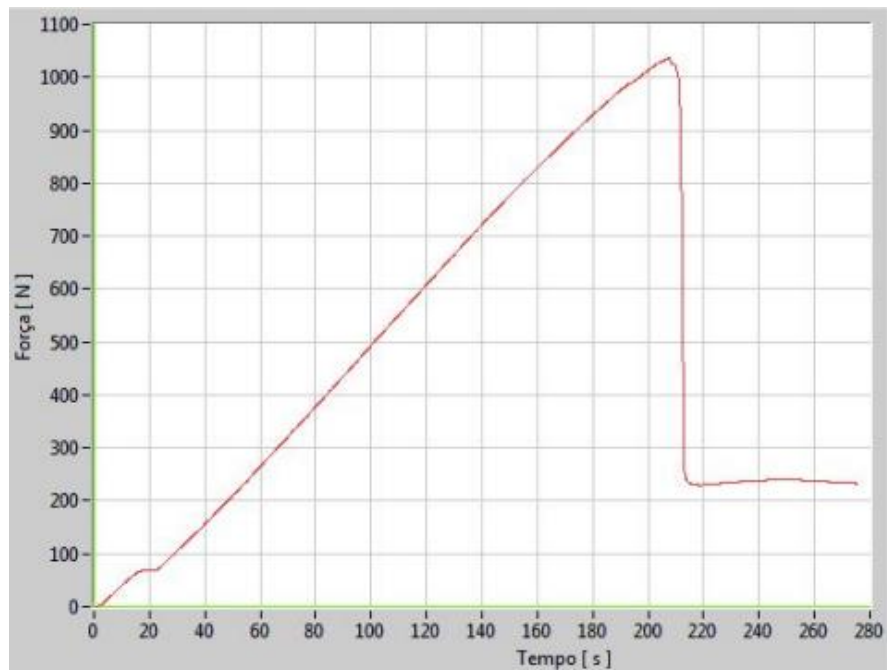
Tabela 6.1 – Resultado dos ensaios.

Grupo 01	Dmax (mm)	Fmax (N)	Grupo 02	Dmax (mm)	Fmax (N)	Grupo 03	Dmax (mm)	Fmax (N)
1	5,14	1020,70	1	5,32	693,80	1	3,09	501,40
2	5,83	929,80	2	4,62	763,20	2	4,36	441,90
3	5,46	942,80	3	4,49	586,60	3	3,68	456,10
4	5,05	1029,50	4	4,28	732,80	4	3,64	478,30
5	5,70	958,40	5	4,95	751,30	5	3,50	496,70
6	5,10	1129,80	6	4,16	779,40	6	3,28	440,10
7	5,19	1034,40	7	4,85	823,50	7	3,77	518,60
8	5,28	929,00	8	5,10	787,30	8	4,29	560,40
9	5,73	930,20	9	5,50	789,40	9	4,22	493,20
						10	3,28	417,4
Média	5,39	989,40	Média	4,81	745,26	Média	3,71	480,41
σ	0,30	69,07	σ	0,46	70,12	σ	0,45	42,69

Fonte: Autor (2022)

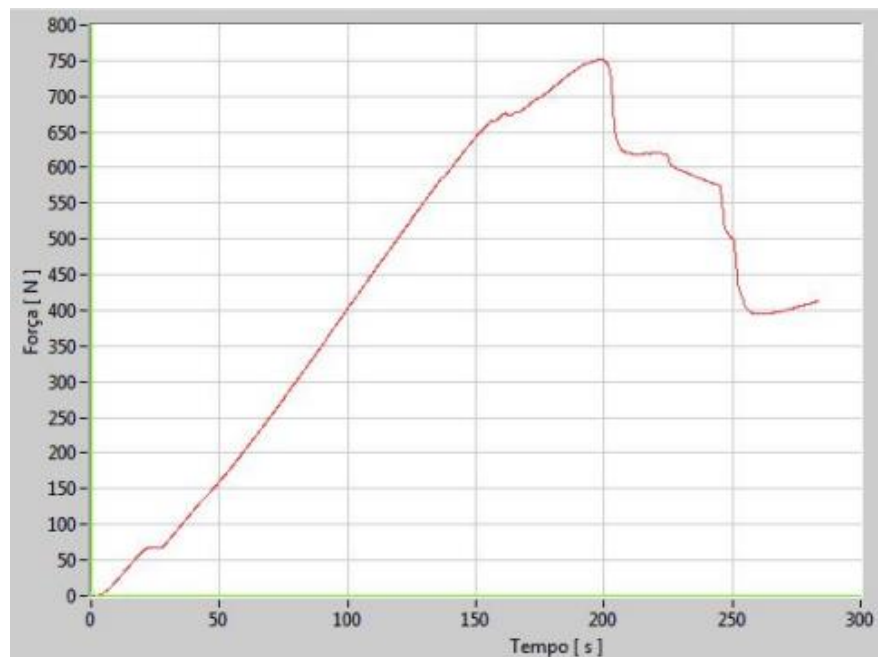
Conforme observado na Figura 6.5, os corpos de prova sofrem falha de maneira diferente dependendo do tempo de envelhecimento. Observa-se que os que não foram envelhecidos (Figura 6.6) sofrem uma ruptura abrupta, enquanto os outros dois grupos (Figura 6.7 e Figura 6.8) as fibras rompem gradativamente.

Figura 6.6 – Gráfico de corpo de prova do Grupo 01.



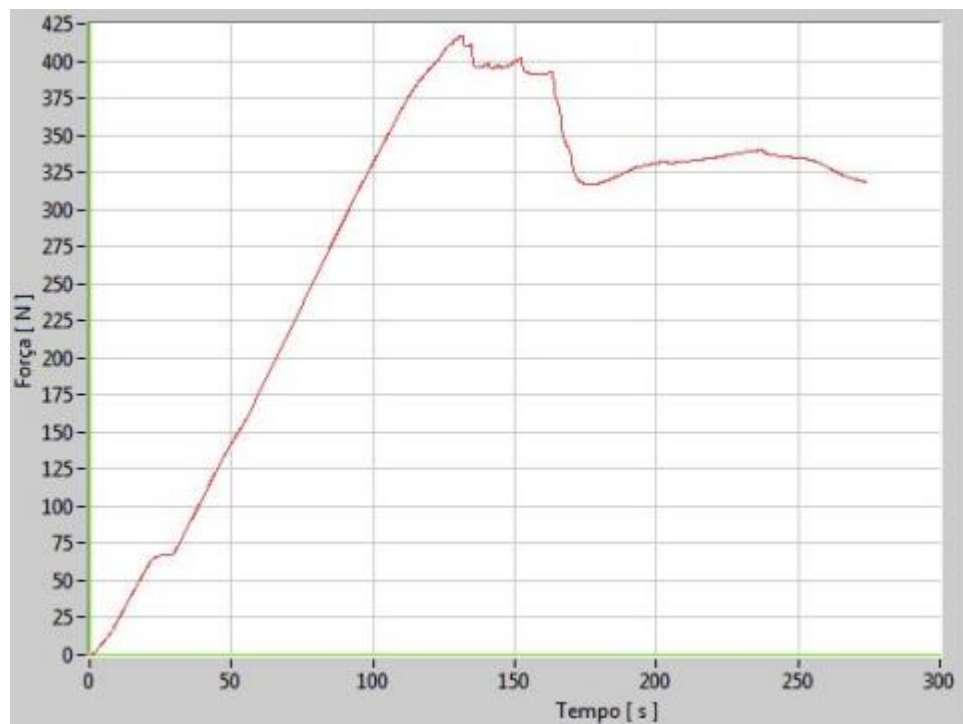
Fonte: Autor (2022)

Figura 6.7 – Gráfico de corpo de prova do Grupo 02.



Fonte: Autor (2022)

Figura 6.8 – Gráfico de corpo de prova do Grupo 03.



Fonte: Autor (2022)

6.1 Análise de resultados

Nesta etapa compara-se os resultados obtidos, com os esperados no início do projeto. Para cada grupo de corpos de prova, pode-se calcular seu módulo de elasticidade (eq. 1), utilizando a força e deflexão máxima, obtida nos ensaios.

Os valores médios para cada grupo estão listados a seguir:

$$Ec1 = 7,52 \text{ G Pa}$$

$$\sigma1 = 1032 \text{ N/mm}^2$$

$$Fmax1 = 989,40 \text{ N}$$

$$Dmax1 = y = 5,38 \text{ mm}$$

$$Ec2 = 6,34 \text{ G Pa}$$

$$\sigma2 = 776,80 \text{ N/mm}^2$$

$$Fmax2 = 745,20 \text{ N}$$

$$Dmax3 = y = 4,81 \text{ mm}$$

$$Ec3 = 5,30 \text{ G Pa}$$

$$\sigma3 = 500,62 \text{ N/mm}^2$$

$$Fmax3 = 417,40 \text{ N}$$

$$Dmax3 = y = 3,71 \text{ mm}$$

6.1.1 Grupo 01 – Corpos de prova não envelhecidos

Os resultados do grupo 01 de corpos de prova, que não ficaram expostos à salinização, podem ser comparados com o resultado esperado antes dos testes.

Percebe-se que houve um erro de 3% quando se compara o módulo de elasticidade $E_{c1} = 7,52 \text{ GPa}$ com o teórico calculado $E_t = 7,73 \text{ GPa}$. Validando o processo de fabricação do material.

Pelo gráfico da Figura 6.6, percebe-se que houve uma ruptura brusca, caracterizando um comportamento similar com o de uma fratura frágil do material [10]. Esse comportamento ocorre devido à boa adesão entre fibra e matriz. Após o rompimento, a força aplicada manteve-se constante, próxima dos 250 N.

6.1.2 Grupo 02 – Corpos de prova envelhecidos por 83 dias

O grupo 02, manteve-se por 83 dias exposto à salinização, reduzindo significativamente algumas de suas propriedades, quando comparados com o Grupo 01, conforme mostrado nas Figuras 6.1 a 6.4. Percentualmente, os valores médios das propriedades analisadas apresentaram as seguintes reduções:

$$\begin{aligned} E_{c2} &= 6,34 \text{ GPa} = -16\% \\ \sigma_{2max} &= 776,89 \text{ N/mm}^2 = -25\% \\ F_{max2} &= 745,2 \text{ N} = -25\% \\ D_{max2} &= 4,81 \text{ mm} = -11\% \end{aligned}$$

Percebe-se que o fator crítico é a força necessária para ocorrer a ruptura, pois o material quando exposto por quase 3 meses à atmosfera salina, perdeu 25% de sua resistência mecânica.

Pelo gráfico (Figura 6.7) do Grupo 02, percebe-se que há, inicialmente, uma queda mais acentuada da carga, seguida de rupturas em diferentes níveis de tensão, ao contrário do Grupo 01. Esse comportamento é devido a falha das interfaces fibra/matriz devido ao efeito de absorção de água. Assim, um grande número de fibras permanece sem se romper o que implica em uma resistência residual após a falha superior ao do compósito do Grupo 1. O valor de carga residual observado na Figura 6.7 é da ordem de 400 N.

6.1.3 Grupo 03 – Corpos de prova envelhecidos por 138 dias

O grupo 03, manteve-se por 138 dias exposto à salinização, reduzindo ainda mais suas propriedades mecânicas, quando comparado ao Grupo 01, conforme também está mostrado nas Figuras 6.1 a 6.4. Percentualmente, os valores médios das propriedades analisadas apresentaram as seguintes reduções:

$$\begin{aligned} E_{c3} &= 5,30 \text{ GPa} = -30\% \\ \sigma_{3max} &= 500,62 \text{ N/mm}^2 = -52\% \\ F_{max3} &= 417,4 \text{ N} = -58\% \\ D_{max3} &= 3,71 \text{ mm} = -39\% \end{aligned}$$

No grupo 03, todas as propriedades tiveram perdas significativas, provavelmente inviabilizando o uso desse material para projeto. Mais da metade da resistência mecânica foi perdida, seu módulo de elasticidade perdeu 30% e deflexão máxima antes da ruptura é 39% menor.

Pelo gráfico (Figura 6.8) do Grupo 3, percebe-se que a falha do compósito ocorreu de maneira similar ao Grupo 02, porém o efeito de rompimento gradual das interfaces fibra/matriz é ainda maior, e ocorre em uma tensão menor no corpo de prova. Na Figura 6.8 é possível verificar que a resistência final do experimento é a menor de todas, indicando uma baixa transferência de carga.

6.2 Modelo experimental

Embora simples devido ao pequeno grupo de amostras no experimento, é possível elaborar um modelo para as perdas de propriedades ao longo do tempo com os 3 grupos amostrais (Figura 6.6.1 e 6.6.2).

Obteve-se a equação $E_c(d) = 1,0057 \cdot E_{c1} - 0,0021 \cdot d$ para a perda de módulo de elasticidade em função dos dias de envelhecimento e $\sigma_c(d) = 1,0164 \cdot \sigma_{c1} - 0,0037 \cdot d$ para a perda de tensão de flexão em função dos dias, através de uma aproximação linear dos 3 pontos (Figura 6.6.1 e 6.6.2). Assim, pode-se estimar a perda do módulo de elasticidade e tensão de flexão durante a salinização. Para efeitos comparativos, tem-se no intervalo entre 30 e 180 dias as seguintes perdas no módulo de elasticidade:

$$Ec(d) = 1,0057 \cdot Ec1 - 0,0021 \cdot d$$

$$Ec(30) = 6,87\%$$

$$Ec(60) = 13,17\%$$

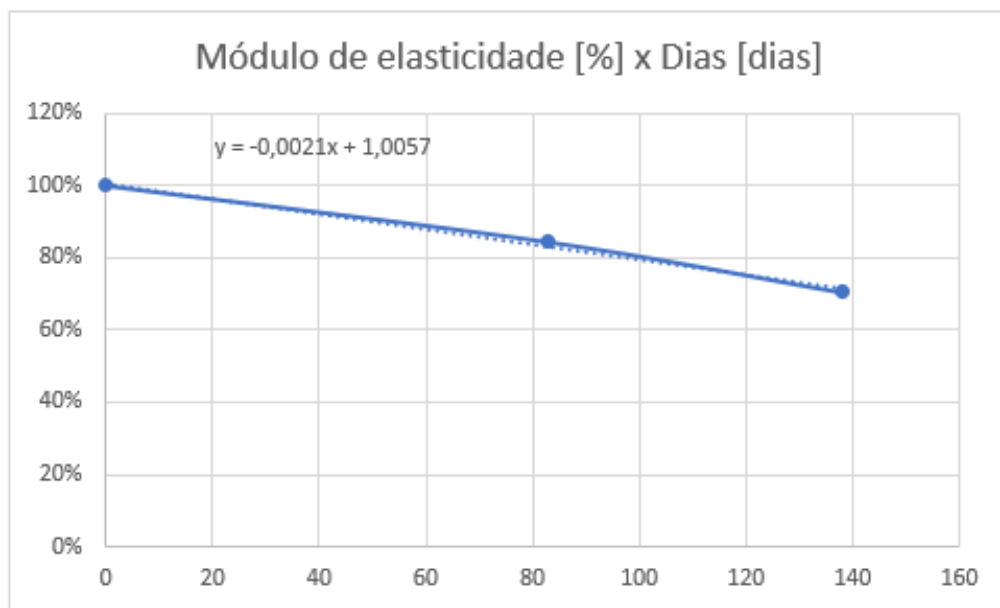
$$Ec(90) = 19,47\%$$

$$Ec(120) = 25,77\%$$

$$Ec(150) = 32,07\%$$

$$Ec(180) = 38,37\%$$

Figura 6.2.1 – Perda do módulo de elasticidade x dias nos grupos amostrais.



Fonte: Autor (2022)

Para a perda de tensão, obtém-se a seguinte formulação, utilizando uma aproximação linear de 3:

$$\sigma c(d) = 1,0164 \cdot \sigma c1 - 0,0037 \cdot d$$

$$\sigma c(30) = 9,46\%$$

$$\sigma c(60) = 20,56\%$$

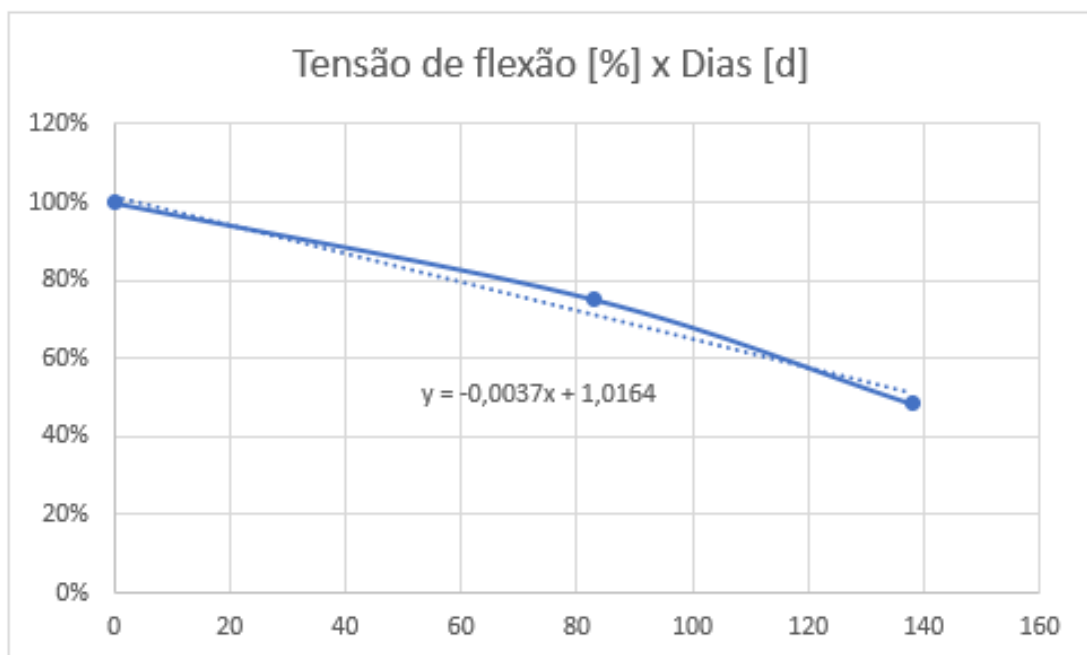
$$\sigma c(90) = 31,66\%$$

$$\sigma c(120) = 42,76\%$$

$$\sigma c(150) = 53,86\%$$

$$\sigma c(180) = 64,96\%$$

Figura 6.2.2 – Perda na tensão de flexão x dias nos grupos amostrais



Fonte: Autor (2022)

6.3 Coloração dos corpos de prova

Observa-se que o Grupo 01, que não foi exposto, possui uma coloração homogênea verde-amarelo, obtida na fabricação dos corpos de prova e mantendo-se original devido ao armazenamento em condições ideais de temperatura e umidade.

No Grupo 02, exposto por 1992 horas, percebe-se a coloração amarela surgindo inicialmente pelas bordas do corpo de prova, e seguindo em direção ao centro. Isso deve-se pela absorção de água dentro das câmaras de salinização.

No Grupo 03, exposto por 3312 horas, percebe-se que já houve absorção suficientemente para a coloração dos corpos tornar-se completamente amarelada. Nesse ponto é possível identificar que o material já estará comprometido como constata-se nos resultados dos ensaios mecânicos.

Figura 6.3.1 – Grupo 01.



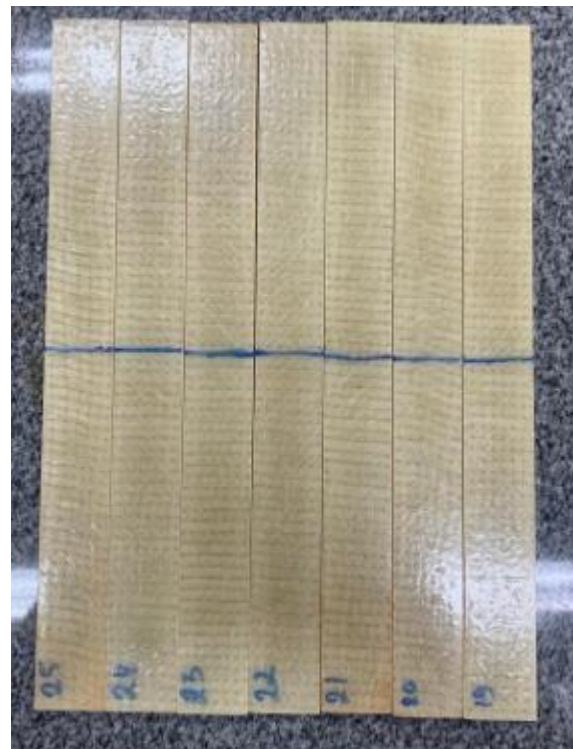
Fonte: Autor (2022)

Figura 6.3.2 – Grupo 02.



Fonte: Autor (2022)

Figura 6.3.3 – Grupo 03.



Fonte: Autor (2022)

7 Conclusão

Um grupo de corpos de prova de foi produzido com tecido de fibra de vidro e resina epóxi e a qualidade do processo de fabricação foi validada comparando o valor experimental do módulo de elasticidade com o valor teórico calculado.

Para avaliar o desempenho do material quando em uso, foi realizado um ensaio de envelhecimento, que utiliza a exposição à uma atmosfera salina à temperatura de 50°C. Após o envelhecimento foram realizados ensaios de flexão, baseados na norma ABNT 7447. Os resultados obtidos foram bastante expressivos e foi possível observar dois comportamentos mais relevantes. Em relação às perdas de propriedades mecânicas, que foram o princípio do objeto de estudo, mais da metade da resistência mecânica foi perdida com 138 dias, e 30% do módulo de elasticidade. Também foi observado uma mudança substancial no modo de falha do compósito. Enquanto no Grupo 1, sem envelhecimento, ocorreu uma ruptura abrupta, indicando a presença de uma boa interface fibra/matriz, nos grupos 02 e 03, envelhecidos por 83 e 138 dias, respectivamente, a ruptura ocorreu para níveis de tensão inferiores e de modo controlado, indicando a ruptura das interfaces por efeito da absorção de água. O efeito da absorção de água no comportamento mecânico do compósito foi avaliado qualitativamente também analisando a mudança de cor do material.

A partir dos dados obtidos foi possível elaborar um modelo para as perdas de propriedades ao longo do tempo, que serve como base para projeto da vida do material em serviço.

Sugestão para trabalhos futuros

- Envelhecer por período de tempo maior e ver se o modelo proposto é capaz de prever o valor experimental obtido em ensaios mais longos;
- Fazer o envelhecimento na temperatura ambiente, para estabelecer um modelo de previsão de vida usando o princípio da superposição tempo-temperatura.
- Analisar a mudança de cor por técnica de colorimetria e tentar correlacionar a mudança de cor com as alterações nas propriedades mecânicas.
- Utilizar mais grupos de corpos de prova, para qualificar melhor o modelo.
- Realizar fotos parciais em certos períodos de tempo, para qualificar melhor a mudança de cor do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NASSEH, Jorge. Manual de Construção de Barcos. [s.l.]. [[s.n.] (2000)
- [2] Manual de construção de barcos. A história da fibra de vidro, c2021. Página inicial. Disponível em: < <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/a-historia-da-fibra-de-vidro/> >. Acesso em: 11 de abril de 2022.
- [3] Catálogo de fibra de vidro. E-composites. Disponível em: < <https://www.e-composites.com.br/tecidos?PS=64&O=OrderByNameASC> >. Acesso em 11 de abril de 2022
- [4] CASTRO, Alessandro. Resina poliéster: caracterização e estudo das condições de cura e propriedades mecânicas. Disponível em: < https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/105241/Alessandro_Castro1.pdf?sequence=1 > . Acesso em 25 de maio de 2022
- [5] Resina Epóxi. Silaex, 2022. Disponível em: < <https://silaex.ind.br/epoxi> >. Acesso em: 25 de maio de 2022.
- [6] Fibra de vidro CM1808; Datasheet Tecido fibra de vidro CM1808; Barracuda Compósitos.
- [7] CANEVAROLO, Sebastião. Ciência dos polímeros. Artliber Edição 2. Disponível em:
<
http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastia%CC%83o%20V..pdf > Acesso em: 20 de abril de 2022
- [8] Resina epóxi AR260 com endurecedor AH260.Datasheet resina Epoxi AR260; Barracuda Compósitos.

[9] Materiais compósitos. Maxwell, 2022. Disponível em: <
https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15391/15391_3.PDF > . Acesso em 26 de maio de 2022.

[10] Caracterização de fraturas frágil e dúctil em microscopia eletrônica de varredura (MEV). Rmct, 2022. Disponível em: <
http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_ed_especial_web_2017/PICM_2017-A2.pdf >
Acesso em: 26 de maio de 2022.

[11] EFEITOS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (UV) NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO INTERLAMINAR DE COMPÓSITOS DE CARBONO/EPÓXI. Ipen, 2022. Disponível em: <
<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2003/Document/365.pdf> > Acesso em: 26 de maio de 2022.