

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FELIPE BEZERRA FERREIRA

ANÁLISE DE DURABILIDADE DAS BARRAS DE FIBRA DE VIDRO COMPARADA
COM AS BARRAS DE AÇO CA-50 E CA-60

NATAL/RN

2025

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE

FELIPE BEZERRA FERREIRA

**ANÁLISE DE DURABILIDADE DAS BARRAS DE FIBRA DE VIDRO COMPARADA
COM AS BARRAS DE AÇO CA-50 E CA-60**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de graduação em 2025,
pelo Curso de engenharia civil da
Universidade do Rio Grande do Norte.

Orientador: Prof. Ph.D. Fábio Sérgio da
Costa Pereira.

NATAL/RN

2025

FELIPE BEZERRA FERREIRA

**ANÁLISE DE DURABILIDADE DAS BARRAS DE FIBRA DE VIDRO COMPARADA
COM AS BARRAS DE AÇO CA-50 E CA-60**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de graduação em 2025,
pelo Curso de engenharia civil da
Universidade do Rio Grande do Norte.

A bancada examinadora do trabalho de conclusão de curso, em sessão pública
realizada em ____/____/____, considerou o candidato: _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Fábio Sérgio da Costa Pereira

Professor orientador UNI-RN

AvaliadorUNI-RN

Prof.^a Dr Carlos Gomes de Moura

Avaliador interno UNI-RN

Prof.^a Esp. Cristiane R da Silva Souza

RESUMO

Para garantir a qualidade final na construção civil é necessário o uso de materiais que contribuam para a melhoria dos resultados por meio dos avanços tecnológicos. Um desses materiais é a fibra de vidro utilizada como barras em estruturas de concreto. Esses vergalhões, podem ser utilizados de diversas formas, proporcionando um aumento da resistência à tração para estruturas de concreto armado. O principal objetivo deste trabalho foi mostrar a maior durabilidade das barras de fibra de vidro em relação às barras de aço CA-50 e CA-60 utilizadas na construção civil, através de análises físicas e químicas comparativas, características e propriedades entre vergalhões de aço e os de fibra de vidro. Foi realizada uma revisão bibliográfica ao longo do trabalho consistindo em uma revisão da literatura por meio de uma pesquisa descritiva e qualitativa, visando reunir informações e explorar conceitos relacionados ao tema de forma clara e objetiva. Na metodologia foram realizados diversos estudos com barras sendo as mesmas submetidas a um ambiente externo comum, ambiente submerso com ácido clorídrico, em estufa com alta temperatura e em corpo de prova submerso em água. Sendo obtidos os seguintes resultados: a barra de fibra de vidro teve um excelente comportamento no ambiente externo, não teve nenhuma perda de propriedade nem de espessura em submersão ao ácido clorídrico mantendo a sua propriedade e diâmetro com uma mudança de coloração puxando para vermelho, quando ela foi submetida a um ambiente de extrema temperatura 0-450°C na estufa teve uma grande perda de propriedade, de diâmetro simulando uma situação de incêndio, ficando maleável. Concluímos que as barras de fibra de vidro tem uma maior durabilidade do que as barras de aço CA-50 e CA-60.

Palavras-chave: Fibra de Vidro. Barra. Durabilidade.

ABSTRACT

To ensure the final quality in civil construction, it is necessary to use materials that contribute to improving results through technological advances. One of these materials is fiberglass used as bars in concrete structures. These rebars can be used in several ways, providing an increase in tensile strength for reinforced concrete structures. The main objective of this study was to demonstrate the greater durability of fiberglass bars in relation to CA-50 and CA-60 steel bars used in civil construction, through comparative physical and chemical analyses, characteristics and properties between steel and fiberglass rebars. A bibliographic review was carried out throughout the study, consisting of a review of the literature through descriptive and qualitative research, aiming to gather information and explore concepts related to the subject in a clear and objective way. In the methodology, several studies were carried out with bars, which were subjected to a common external environment, an environment submerged with hydrochloric acid, in a high-temperature oven and in a test specimen submerged in water. The following results were obtained: the fiberglass bar performed excellently in the external environment, and did not lose any properties or thickness when submerged in hydrochloric acid, maintaining its properties and diameter with a change in color toward red. When it was subjected to an environment of extreme temperatures (0-450°C) in the oven, it suffered a great loss of properties and diameter, simulating a fire situation, becoming malleable. We conclude that fiberglass bars have greater durability than CA-50 and CA-60 steel bars.

Keywords: Fiberglass. Bar. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção das fibras de vidro	6
Figura 2 – Tipos de fibra de vidro	8
Figura 3 – Propriedades fibra de vidro e do aço ca-50 e ca-60.....	9
Figura 4 – Propriedades fibra de vidro	10
Figura 5 – Propriedades das fibras de vidro tipo E, S e AR.	13
Figura 6 – Propriedades das fibras normalmente utilizadas como reforço em concreto.....	14
Figura 7 – Tabela com as tensões	15
Figura 8 – Fieiras e filamentos de vidro	16
Figura 9 – Roving de fibra tipo AR	17
Figura 10 – Fibra picada	17
Figura 11 – Tela de fibra	18
Figura 12 – Tecido de fibra tipo AR.....	19
Figura 13 –Esquema de fabricação de perfis pultrudados de fibra de vidro.....	20
Figura 14 –Exemplo de perfis pultrudados em fibra de vidro.....	21
Figura 15 exemplos de uso de tal material no setor da construção civil.....	26
Figura 16 –Classificação das barras de FRP.....	28
Figura 17 – Propriedades das resinas termoendurecíveis mais utilizadas em FRP.....	30
Figura 18 – -(A)Barra de CFRP, (B) barra de GFRP.....	30
Figura 19 – - Propriedades das resinas termoendurecíveis mais utilizadas em FRP.....	32
Figura 20 – Características dos Varões de GFRP.....	33
Figura 21 – Fatores que podem interferir na durabilidade dos vergalhões de GFRP.....	35
Figura 22 – Comportamento característico da absorção de água.....	37

Figura 23 –Fatores que podem interferir na durabilidade dos vergalhões de GFRP	38
Figura 24 – Comportamento característico da absorção de água, como função da raiz quadrada tempo, nos vergalhões de GFRP	40
Figura 25 –Processo de degradação dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.....	41
Figura 26 – Representação esquemática da reação de termoxidação e consequentes danos à matriz polimérica, com a formação de microtrincas na superfície dos vergalhões de GFRP.....	48
Figura 27 – Retenção da resistência à tração em função da temperatura de exposição e do diâmetro do vergalhão de GFRP.....	49
Figura 28: Medição de espessura dos vergalhões e barras	53
Figura 29: Medição de espessura dos vergalhões e barras	54
Figura 30: Preparando superfície para receber a pintura	55
Figura 31: Barras de acos prontas para recebimento de pintura.....	56
Figura 32; Tabela com espessura inicial das barras.....	56
Figura 33: Preparação de tinta epóxi.....	57
Figura 34: Pinta de barras com tinta epóxi.....	57
Figura 35: Barras com tinta epoxi, crua e armateczn.....	57
Figura 36; Esperua das barras com as demais tintas.....	57
Figura 37: Barras de fibra de vidro e de aço.....	58
Figura 38: Barras de fibra de vidro e de aço expostas	59
Figura 39: Separação das barras	61
Figura 40: Ácido clorídrico para submersão das barras	62
Figura 41: Submersão das barras	62
Figura 42: Medição das barras após submersão no ácido.....	63
Figura 43: Medição das barras após submersão no ácido	64
Figura 44:Separação das barras de fibra de vidro	65
Figura 45: Medição da barra de fibra de vidro a 350 graus	66

Figura 46: Medição da barra de fibra de vidro a 400 graus	66
Figura 47: Medição da barra de fibra de vidro a graus.....	67
Figura 48: separaçã.....	68
Figura 49: Barras submersas na água.....	69
Figura 50: corpos de prova	69
Figura 51: corpos de prova exposta a água	70
Figura 52: rompimento dos corpos de provas	70
Figura 53: rompimento dos corpos de provas	71
Figura 54; Tabela com medições antes e após a pintura	72
Figura 55; Tabela com medições após a exposição	72
Figura 56; Tabela com medições antes e após a pintura	73
Figura 57: Quebra dos corpos de provas	74
Figura 58: Quebra dos corpos de provas	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Uso de tal material no setor da construção civil.....	33
Tabela 2 – Características das fibras de vidro	37
Tabela 3 – Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.....	48
Tabela 4 – Resistência à tração dos vergalhões de GFRP.....	48
Tabela 5 – Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos à elevadas temperaturas.....	53
Figura 6 – Propriedades das fibras normalmente utilizadas como reforço em concreto.....	14
Tabela 7 - Medição inicial;	58

SUMÁRIO

●	Introdução – 1.0	11
●	Desenvolvimento - 2.0	13
●	2.1 – Propriedades;	13
●	2.2 – Fabricação e aplicação	17
●	2.2.1 - Tipo de fibra	17
●	2.3 – Formas de fornecimento;	21
●	2.3.1 - Roving ou cordoalha	21
●	2.3.2 - Fibra picada	22
●	2.3.3 - Telas	23
●	2.3.4 - Tecidos	24
●	2.3.5 - Perfis	25
●	2.4 – Produção;	26
●	2.4.1 - Qualidades dos vergalhões de fibra de vidro	27
●	2.5 – Desempenho;	27
●	2.5.1 - Leveza Excepcional	27
●	2.5.2 - Alta Resistência à Corrosão	27
●	2.5.3 - Durabilidade Prolongada	28
●	2.5.4 - Redução de Custos e Maior Eficiência	28
●	2.5.5 - Sustentabilidade e Baixo Impacto Ambiental	28
●	2.6 – Contexto histórico;	30
●	2.7 – Propriedades físicas, mecânicas e geométricas;	38
●	2.8 – Durabilidade dos vergalhões de GFRP	40
●	2.9 – Efeito de absorção de água;	41
●	2.10 – Efeito do meio alcalino;	43
●	2.11 – Efeito combinado do meio alcalino e temperatura	45
●	2.12 – efeito de elevada temperatura;	49

● Metodologia – 3.0	56
● 3.1.1 - Limpeza e medição da bitola inicial;	56
● 3.1.2 - Pintura e medição;	59
● 3.1.3 - Medição a cada 30 dias;	61
● 3.2.1 Separação, Submersão e medição;	62
● 3.3.1 Separação e estufa de temperatura;	65
● 3.4.1 Separação.....	68
● 3.4.2 Expostas diretamente a água;	69
● 3.4.3 Confeccção de corpo de provas FCK 20, FCK 40;	70
● 3.4.4 corpos de prova exposta a água	70
● 3.4.5 Rompimento dos corpos de provas;	71
● Resultados e discussões - 4.0	72
● 4.1 No experimento 1	72
● 4.2 No experimento 2	73
● 4.3 No experimento 3	73
● 4.4 No experimento 4	74
● Conclusão - 5.0	75

1 INTRODUÇÃO

O tema principal foi a análise da durabilidade de barras de fibra de vidro quando comparadas a barras de aço ca-50 e ca-60. O uso de aço no concreto armado vem sendo utilizado em construções desde 1850. Conforme Gonçalves et al. (2005), teve bastantes estudos e avanços no entendimento das propriedades e comportamento desse material. No entanto em ambientes de alta maresia, fortemente agressivos, como regiões litorâneas, áreas industriais e obras rodoviárias, a durabilidade das estruturas de concreto armado com armaduras de aço vem sendo um desafio apresentado, devido à degradação por carbonatação, assim a sua armadura perdendo as suas propriedades.

A escolha do tema se justifica pela necessidade de explorar e analisar outras alternativas que reduzam os custos de manutenção e aumentem a vida útil das estruturas de concreto em ambientes agressivos. O aço estrutural, embora ele tenha relativamente em abundância e baixo custo, sofre degradação em meio ácidos e a carbonatos. O processo de carbonatação do aço em alguns meios pode ser um benefício, mas em outros a perda excessiva da passivação do aço, assim expondo as estruturas a oxidação, dessa forma a estrutura perdendo sua sessão de aço e suas propriedades.

A justificativa deste trabalho foi avaliar a durabilidade das barras de fibras de vidro, como reforço estrutural de concreto armado, sendo comparadas às de aço. Em recuperação de estrutura já é bastante comum ver a utilização de fibras sintéticas em matrizes cimentícias, mas o seu uso como material estrutural ainda é um começo e limitado no Brasil. Entretanto, a pesquisa pretende ajudar com dados e análises que possam contribuir e ampliar o uso da fibra de vidro na construção civil.

A relevância acadêmica e científica deste estudo reside no potencial de reduzir os problemas associados à degradação do aço em estruturas de concreto, oferecendo uma alternativa com maior resistência à corrosão. Além disso, o trabalho visa expandir o conhecimento sobre o comportamento das fibras de vidro em ambientes alcalinos, abordando, entre outras questões, os métodos de proteção dessas fibras contra a alcalinidade do cimento Portland, conforme explorado por Peruzzi (2007), que desenvolveu uma técnica de impregnação de PVC para proteger as fibras do tipo E, mais suscetíveis à degradação.

Na parte teórica, realizamos estudos sobre o uso de fibra de vidro em materiais cimentícios, sendo analisado o comportamento das fibras em locais agressivos. Em trabalhos anteriores como o de Peruzzi (2002), foi sugerido a adição de pozolanas, como sílica ativa e cinza, podendo assim reduzir a formação de hidróxido de cálcio no concreto, consequentemente diminuindo o impacto na fibra de vidro. Pesquisas como essas tem extrema importância para embasar os estudos desenvolvidos no decorrer do projeto.

Desta maneira, esta pesquisa buscou avaliar se a fibra de vidro pode substituir de maneira segura e vantajosa o aço estrutural em determinadas aplicações, contribuindo para o avanço das técnicas e promovendo maior durabilidade das estruturas em condições adversas do ambiente.

A justificativa da realização desse trabalho é a necessidade de verificação da durabilidade das barras de fibra de vidro para sua utilização no mercado da construção civil.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 – Propriedades;

As fibras de vidro são praticamente manuseadas em qualquer tipo de forma, sendo espessura, comprimento e entre outros. No atual mercado, pode-se encontrar diversos tipos de fibra com fins na construção civil, como por exemplo; polipropileno, aço, vidro, nylon, carbono e entre outros. Todos estes têm uma função mais específica para alguma área da engenharia.

Figura 1 - Produção de fibra de vidro;



Fonte: Vares (2019)

Figura 2 - Tipos de fibra de vidro;



Fonte: Cateb (2011)

A função da fibra de vidro como armadura em estrutura de concreto é manter as peças seguras e resistentes a choques, tração e flexão. A fibra de vidro são mantas prensadas, tecidos traçados, fitas que são desfiados sobre o molde e introduzidos a resina. A manta prensada é mais acessível a custo, mas começa a desatar filamentos no decorrer da montagem, entretanto o tecido, um pouco mais dispendioso em relação ao custo, possibilita um trabalho mais refinado, produtos mais resistentes e com excelente aspecto no final. Em virtude das suas propriedades físicas e químicas, a fibra de vidro tem uma conformidade apropriada com resinas de Silicone, Epoxi, Poliéster, e etc. (CARNIO, 2017).

A fibra de vidro apresenta diversas propriedades superiores em comparação aos materiais convencionais, destacando-se pela elevada relação resistência/peso, maior rigidez, versatilidade no design, resistência à corrosão, alta durabilidade frente à fadiga e facilidade de aplicação. Devido à sua composição, esse material tem despertado interesse para uso em estruturas protendidas, pois oferece grande resistência à tração, baixa deformação ao longo do tempo e um módulo de elasticidade moderada. Além disso, por ser não magnético, imune à corrosão e resistente a diversos produtos químicos, a fibra de vidro vem sendo progressivamente empregada no reforço externo de estruturas de concreto modernas.

Figura 3 Propriedades fibra de vidro e do aço ca-50 e ca-60

Propriedades	Aço CA50 e CA60*	GFRP**	Verga Fibra
Resistência à tração ft (MPa)	500/600	800	1200
Módulo de elasticidade E (GPa)	210	50	50
Resistência à compressão fc (MPa)	390	300	300
Resistência ao cisalhamento fv (MPa)	273	150	200
Tensão mínima de aderência da barra ao concreto (MPa)	—	12	12
Densidade (kg/m3)	7850	2000	2000

Fonte; cateb(2011)

Figura 4 - Propriedades fibra de vidro;

PROPRIEDADES DA FIBRA DE VIDRO

1.0 - Reciclagem

Devido a diferentes métodos técnicos, reciclagem de fibra de vidro é agora possível, bem como reciclar os reforços de vidro e a reciclagem de termoplásticos.

2.0 - Não apodrecimento

A fibra de vidro não se deteriora e nem apodrece. Não é afetado por ação de insetos e roedores.

3.0 - Higiene

Não é permeável.

4.0 - 4. Resistência alta a agentes químicos

Em combinação com resinas adequadas, composta com essa propriedade pode ser adquirida por filamento de vidro.

5.0 - Força mecânica

A fibra de vidro tem uma resistência específica, como a tração, que é maior do que a do aço. Essa característica marcou o início do desenvolvimento deste material para produção de compósitos de alto desempenho.

6.0 - Características elétricas

É um excelente isolante elétrico, inclusive em baixas espessuras, juntamente com a resistência mecânica e seu comportamento em diferentes temperaturas, gerou fundamento para as primeiras aplicações para a fibra de vidro.

7.0 - Incombustível

Como um material mineral, a fibra de vidro é naturalmente, portando, inflamável. Não propaga e não preserva uma chama. Não emite fumaça e agentes tóxicos quando exposta ao calor.

8.0 - Estabilidade dimensional

O filamento de vidro é insensível a alterações em temperatura e higrometria, possui um baixo coeficiente de expansão linear.

9.0 - Compatibilidade com matrizes orgânicas
A capacitância da fibra de vidro de aceitar diferentes tipos de tamanho cria uma ligação entre o vidro e a matriz que permite que ela seja combinada com muitas resinas artificiais, bem como algumas matrizes minerais (gesso, cimento).
10.0 - Permeabilidade de dielétricos
Isto é essencial em aplicações como radomes, vidraças eletromagnéticas, etc.
11.0 - Integração de funções
Os compósitos de fibra de vidro podem ser usado para produzir partes de peça única que integram em várias funções e substituem vários subconjuntos.

Fonte; o autor;

Fibras podem ser definidas como materiais filamentosos com razão entre comprimento e diâmetro de no mínimo 100. Embora não existam restrições quanto ao mínimo diâmetro, o máximo não deve ultrapassar 0,25mm (ASTM, 1996). O processo de constituição das fibras contempla em alinhar suas moléculas e sua alta resistência à tração está ligada a melhor atração intermolecular resultada por este alinhamento (Schwartz, 1984). Dentre as diversas fibras poliméricas, as mais utilizadas comercialmente em aplicações de engenharia são as fibras de vidro (Glass), carbono (Carbon) e aramida (Aromatic Polyamid). Segundo Hollaway (1993) as principais características das fibras utilizadas na fabricação de compósitos são:

- Elevada resistência e módulo de elasticidade;
- Uniformidade no valor de resistência de fibras individuais;
- Estabilidade e manutenção das propriedades durante manuseio;
- Baixa variação de diâmetros entre os filamentos e rugosidade superficial.

2.2 Fabricação e aplicação;

Para aplicações na construção civil a fibra de vidro é considerada mais vantajosa sobre as demais por oferecer grande resistência à tração, elevado módulo de

elasticidade e baixo custo de produção. Como mencionado inicialmente neste trabalho a utilização de fibras de vidro convencionais do tipo E deve ser precedida pelo encapsulamento de seus filamentos e imersa em uma matriz cimentícia pouco agressiva a sua composição. Porém existem no mercado diversos tipos de fibras de vidro como podemos identificar no quadro 1. As fibras mostradas a seguir podem ser divididas em dois grupos segundo Hollaway & Leeming (1999).

As do tipo E, A, C e E-CR com módulo de elasticidade de 70GPa e resistência a tração de 1.000MPa até 2.000MPa e as fibras do tipo R, S e AR com módulo de elasticidade de 85GPa e resistência a tração de 2.000MPa até 3.000MPa. Porém as fibras dos tipos R e S que são caracterizadas pela sua alta resistência são utilizadas apenas na indústria aeroespacial por seu alto custo de fabricação.

2.2.1 -Tipo de fibra	Principal aplicação
E	Aplicações usuais, baixo conteúdo de álcalis (<1%)
A	Elevado conteúdo de álcalis (10-15%)
C	Excelente resistência a corrosão, utilizada para acabamento de superfícies
E-CR	Livre de boro, boa resistência a corrosão por ácidos
R, S	Excelentes propriedades mecânicas, utilizadas para aplicações de alto desempenho
AR	Álcali resistente, empregada em concretos reforçados com fibra.

Figura 5 – Propriedades das fibras de vidro tipo E, S e AR.

Tipo de fibra	Densidade	Resistência à tração	Módulo de Young	Deformação última	Coefficiente de expansão térmica	Coeficiente de Poisson
	kg/m ³	MPa	GPa	%	10 ⁻⁷ /°C	
Vidro-E	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
Vidro-S	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Vidro álcali resistente	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-

Fonte; Beber,2003;

Segundo Peruzzi (2007), em setembro de 2007 o custo de 1 metro quadrado de tecido de fibra de vidro do tipo AR tinha o custo médio de US\$3,00 para a fibra do tipo E o custo era de US\$2,00, já para as fibras de carbono e aramida são respectivamente US\$40,00 e US\$22,00. Para o aço CA-50 o custo de 1m² de tela era de US\$1,00 no mesmo período. Porém, devemos levar em consideração que ao utilizarmos as telas, tecidos ou perfis pultrudados de fibra do tipo AR o peso total da estrutura será reduzido, pois, as fibras de vidro têm peso específico de 25,6kN/m³ contra os 78,5kN/m³ do aço.

Adicionalmente temos também a eliminação da camada de revestimento das armaduras o que reduziria todas as seções das estruturas gerando grande economia no volume total de concreto. Para as obras de arte rodoviárias ou estruturas aparentes não é necessário revestimento, pois a medida em que houver a carbonatação do concreto e diminuição do seu pH as fibras de vidro estariam mais protegidas contra a devitrificação.

2.2 Fabricação e utilização

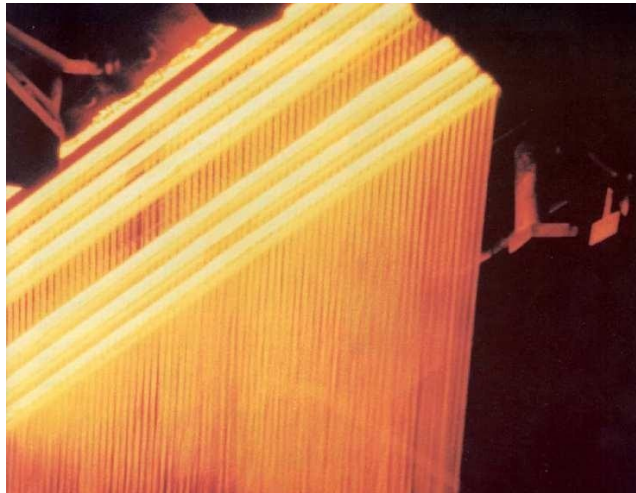
A produção das fibras de vidro explicada por (Carvalho 1993, p.39):

A matéria-prima é composta principalmente pela sílica em forma de areia, o componente básico para qualquer vidro, cerca de 50%. Os outros ingredientes são os boratos e pequenas quantidades de especialidades químicas. Os materiais são misturados numa grande quantidade, a granel (...) A mistura é então levada para o forno de fusão. Dentro do forno a areia e os outros ingredientes se dissolvem formando uma massa fundida em temperaturas que giram em torno de 1.550°C. A temperatura desta massa decresce gradualmente a partir da zona de fusão até os canais que alimentam as fieiras, no qual a temperatura alcança 1.250°C. Nesta temperatura, o vidro atinge a viscosidade mais favorável para a formação das fibras, permitindo a conformação das mesmas com baixo índice de quebra.

A massa fundida de vidro flui para bandejas de platina altamente resistentes ao calor, as quais possuem milhares de pequenas aberturas tubulares furadas com precisão, e que são chamadas de fieiras. As fieiras são placas metálicas retangulares com orifícios através do qual a massa fundida passa, originando os filamentos. Esta corrente fina de vidro fundido é puxada em um diâmetro preciso, e então resfriada por água e ar para garantir o diâmetro e criar um filamento. Logo após a sua formação, os filamentos são coletados e agrupados em mechas e feixes, e depois enrolados em bobinas.

Na manufatura, as fibras recebem, individualmente, um revestimento químico (sizing) que protege e lubrifica cada filamento, aumentando a resistência a abrasão e garantindo a integridade do feixe, visto que, sem este tratamento superficial, as fibras não serviriam de material de reforço. Uma outra função do tratamento superficial das fibras é torná-las compatíveis com a matriz a ser reforçada. Por último, as bobinas são aquecidas para secar o revestimento químico (sizing).

Figura8 – Fieiras e filamentos de vidro escorrendo por pequenos orifícios.



Fonte; (NEG, 2007)

Após o resfriamento dos filamentos de vidro e finalização do processo de sizing, as fibras de vidro são unidas em e enroladas. Estes rolos são chamados de rovings, a partir dos rovings podemos fabricar tecidos, telas, fibra picada e perfis pultrudados.

2.3 Formas de fornecimento;

2.3.1 - Roving ou cordoalha

Para a formação do roving contínuo são agrupados 150 a 200 filamentos em cordões e de 20 a 50 cordões agrupados em uma cordoalha enrolada em formato cilíndrico. O roving é a primeira forma comercial das fibras de vidro e podem ser utilizados para a produção de tubos e fibras picadas para mistura úmida no concreto e argamassas.

Figura 9 – Roving de fibra tipo AR



Fonte; Roving;

2.3.2 Fibra picada

Figura 10 – Fibra picada

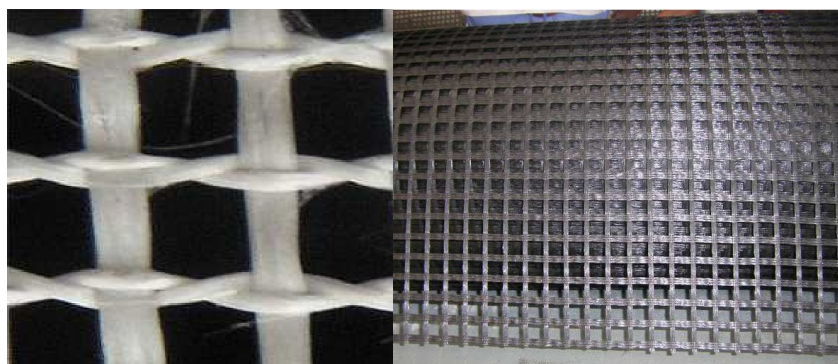


Fonte; Roving;

Obtida à partir do roving é muito utilizado na fabricação de painéis de fachada e peças pré-fabricadas de concreto, podem ser misturadas em via úmida para melhor dispersão em concretos ou argamassas e garantem boa resistência à microfissuração gerando ganhos de durabilidade. A fabricação de peças estruturais em concreto com fibras picadas da uma nova dimensão a utilização dos concretos armados com fibra de vidro, mecanismos de grande porte anteriormente fabricados em aço agora podem ser fabricados em GFRC garantindo grande durabilidade e baixa manutenção.

2.3.3 - Telas

Figura 11 – Telas de fibra de vidro AR



Fonte; Roving;

As telas de fibra tipo AR podem ser utilizadas em lajes como estruturas sandwich uma camada inferior lançada diretamente sobre a fôrma sem necessidade de cobrimento e uma camada superior aplicada após a concretagem. Existem telas de diversas tramas e malhas com diferentes especificações de teores de fibra por metro quadrado. Este material permite a fabricação de peças estruturais de geometria complexa onde não seria possível a utilização de armadura em aço. A fabricação de peças em concreto tipo sandwich é interessante para a o aumento da mecanização nas construções, perfis e peças estruturais podem ser fabricados em escala industrial e montados como estruturas pré-fabricadas porém com maior expectativa de vida útil e menores custos de manutenção.

Figura 12 – Exemplo de construção em GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete)



Fonte; Roving;

2.3.4 - Tecidos

Figura 13 – Tecido de fibra tipo AR



Fonte; Roving;

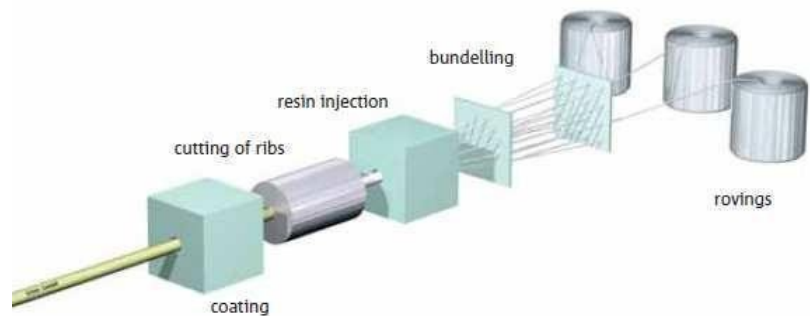
São formados a partir do roving em equipamentos de tecelagem, a aplicação de tecidos é mais indicada para fins de reforço estrutura, pois, como sua malha é muito fechada este deve ser utilizado em combinação à resinas poliméricas. A pasta de cimento teria grande dificuldade de impregnação reduzindo sua aplicação na construção civil.

2.3.5 Perfis pultrudados

Os perfis pultrudados não precisam necessariamente utilizar as fibras de vidro tipo AR, pois em seu processo de fabricação são impregnados com resinas de cura térmica que protege os filamentos da fibra tipo E. As armações em perfis pultrudados substituem as armações metálicas convencionais em aplicações que exijam grande resistência a ação de elementos químicos deletérios ao aço estrutural. Livre de corrosão, interferências eletromagnéticas e baixo peso específico as fibras de vidro tipo AR permitem a execução de obras em áreas industriais, costeiras, barragens, comportas e instalações de geração de energia sem a necessidade de manutenção constante e com alta expectativa de vida útil. Basicamente toda estrutura aparente de

concreto e exposta às intempéries pode ter sua armadura executada com perfis pultrudados para maior durabilidade.

Figura 14 – Esquema de fabricação de perfis pultrudados de fibra de vidro



Fonte; Roving;

Figura 15 – Exemplo de perfis pultrudados em fibra de vidro



Fonte; Roving;

2,4 Produção de fibra de vidro;

Segundo Araújo, Paes e Veríssimo (2013), em construções com estrutura metálica é essencial que fiquem atuais as minúcias das juntas e das interconexões na elaboração de tijolo de vedação, sendo que as proeminências das juntas e das interfaces precisam ser disponibilizadas particularmente. O autor embora chama atenção para os discernimentos de significado do tipo de conexão tijolo/armação, para a averiguação

da estanqueidade e para a união entre os sistemas de vazante da cobertura e o tijolo.

Conforme Gonzalez (2003), é considerado que a nível da estrutura que ingressará em contato com o tijolo seja apontada com uma lavagem do local. Desta maneira, as estruturas desfiguradas poderão ganhar a adesão da placa de EPS sem dificuldades e as estruturas ligadas ainda poderão ter sua rugosidade aprontada com a massa e adicionais sem a intervenção de materiais colados à estrutura.

Para Moura (2021), o processo de produção dos vergalhões de PRFV é por meio do processo de pultrusão, no qual as fibras de vidros são tensionadas por uma máquina em direção a uma cuba de penetração, em que uma resina líquida penetra as fibras, e acontece uma combinação entre esses materiais, em logo acontece por um molde redondo que confecciona a forma da seção inclinada do vergalhão. E para os vergalhões com nervuras helicoidais, acontece acréscimo de fibras de vidro no seu nível, pelo mecanismo giratório, no qual porvindouro a acréscimo, o material é esquentado, e concluído com o método de corte, de concordata com a dimensão almejada.

2.4.1 - Qualidades dos vergalhões de fibra de vidro

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente ligada à corrosão das armaduras, que ocorre devido à presença de substâncias agressivas. Nesse contexto, o vergalhão de fibra de vidro surge como uma alternativa viável para substituir o reforço de aço.

A durabilidade de um elemento estrutural reforçado com fibra de vidro pode ser definida como sua capacidade de resistir à fissuração, oxidação, degradação química, deslocamento, deterioração, fadiga e danos causados por agentes externos, ou a uma combinação desses fatores, ao longo de um período determinado. Essa resistência deve ser avaliada sob condições ambientais específicas e cargas apropriadas, conforme estabelecido pela norma ACI 440R (2007).

Com esse desempenho, a fibra de vidro aplicada à construção civil demonstra alta resistência a esforços significativos, tornando-se uma alternativa às armaduras metálicas. Por esse motivo, é essencial a realização de testes de longa duração para avaliar suas propriedades e o impacto do envelhecimento ao longo dos anos (BEIRAL, 2012).

2.5 Desempenho;

2.5.1. Leveza Excepcional

Uma das principais vantagens dos vergalhões de fibra de vidro é sua baixa densidade. Sendo muito mais leves que os de aço, eles tornam o transporte e a instalação mais simples e ágeis, reduzindo custos operacionais e otimizando o processo construtivo. Além disso, sua leveza diminui a carga sobre as estruturas de suporte, o que pode ser determinante em projetos que exigem soluções mais eficientes e versáteis.

2.5.2. Alta Resistência à Corrosão

Diferente do aço, os vergalhões de fibra de vidro possuem excelente resistência à corrosão, tornando-se ideais para ambientes agressivos, como regiões litorâneas ou locais com alta umidade. Essa característica garante maior vida útil às estruturas e reduz custos com manutenção. Em locais sujeitos à exposição química ou contato frequente com água, os vergalhões de fibra de vidro preservam sua integridade por muito mais tempo.

2.5.3. Durabilidade Prolongada

A durabilidade é um fator essencial na escolha de materiais para construção. Os vergalhões de fibra de vidro oferecem uma resistência superior a impactos e a processos de degradação ambiental. Ao contrário do aço, que pode sofrer corrosão e comprometer a estrutura, eles mantêm suas propriedades mecânicas por longos períodos, resultando em menos intervenções e menor necessidade de substituição.

2.5.4. Redução de Custos e Maior Eficiência

Além de suas qualidades estruturais, os vergalhões de fibra de vidro contribuem para uma significativa economia de tempo e dinheiro. Seu peso reduzido diminui os custos de transporte e manuseio, enquanto sua resistência à corrosão reduz a necessidade de manutenção. O processo de instalação simplificado e a maior durabilidade fazem desses vergalhões uma solução econômica e eficiente para diferentes tipos de projetos.

2.5.5. Sustentabilidade e Baixo Impacto Ambiental

Com a crescente preocupação ambiental, a construção civil busca soluções mais sustentáveis. Os vergalhões de fibra de vidro são produzidos por meio de processos que minimizam o impacto ambiental, representando uma alternativa ecologicamente responsável aos vergalhões de aço. Sua longa vida útil e resistência à corrosão reduzem a demanda por recursos para reparos e substituições, diminuindo sua pegada ambiental.

Os vergalhões de fibra de vidro estão transformando o setor da construção civil ao combinar leveza, resistência e durabilidade em um único material. Se você busca uma

solução inovadora que alia alto desempenho, economia e sustentabilidade, essa é a escolha ideal para o seu projeto.

2.6 Contexto histórico;

Foi após o fim da 2ª Guerra Mundial que ficou evidenciado o uso mais constante do vergalhão de fibra de vidro, ou apenas o FRP. Este tipo de material, que é visto com mais frequência no setor da indústria eletrônica, aeroespacial e automobilística, passa a fazer parte também da indústria da construção civil (MAZZU, 2020).

Em 1930, foi criada a chamada Fibra de Vidro que em um primeiro momento não foi direcionada a confecção de vergalhões, mas que deu início as pesquisas quanto a sua resistência estrutural.

No entanto, o que poderia ter sido rapidamente inserido no setor, foi de contrapartida considerado lento. Isso porque sua primeira aplicação se deu na Década de 50, sendo assim a primeira aplicação registrada de FRP em concreto armado (MAZZU, 2020).

Já na Década de 60 nos EUA, e na sequência, na Década de 70 na Europa e no Japão, foram intensificadas pesquisas sobre tal utilização, com intuito de garantir a segurança, qualidade e confiabilidade da correlação desse novo componente em obras de construção civil (TAVARES, 2006).

As pesquisas eram justificadas pelo aumento dos problemas de corrosão nas armaduras de aço, e por isso diversos investidores e pesquisadores voltaram suas atenções para esta alternativa, mais precisamente no final dos anos 80 (MAZZÚ, 2020).

Para Soares (2015), a corrosão das armaduras ao longo da vida útil das estruturas, fizeram com que os profissionais das áreas das ciências dos materiais intensificassem os estudos com a finalidade de encontrar uma alternativa às armaduras em aço.

Com isso surgiram os materiais compósitos, os FRP (Fiber Reinforced Polymer), e entre eles a fibra de vidro (GFRP) foi o mais utilizado para a reabilitação devido sua elevada resistência e o seu baixo peso volumétrico. Porém, o seu elevado custo (no tempo) e sua condição de rotura (comportamento frágil) não contribuem para a aceitação do material.

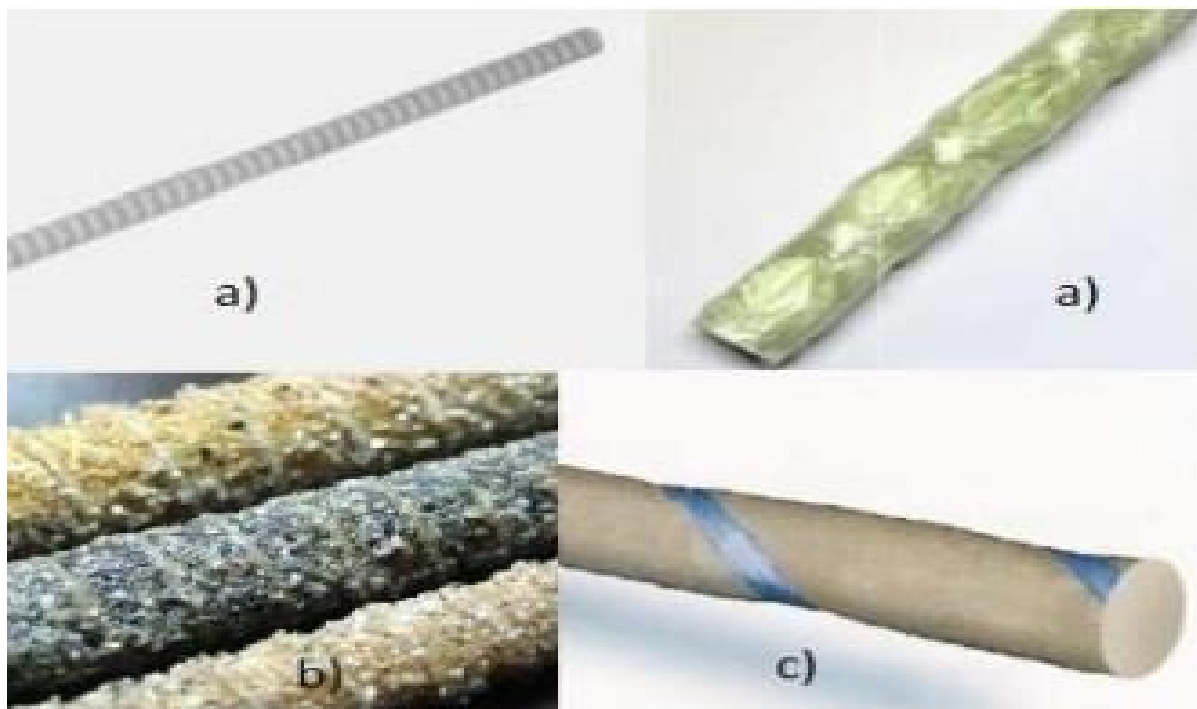
Os denominados materiais compósitos ou material composto por duas ou mais fases se destacam em termos macroestruturais ao qual são desenvolvidos por matrizes, partículas, fibras etc. Esse tipo de material, se caracteriza por possuir interconexão diferente que permite a contração das propriedades que variam em função das suas quantidades relativas e principalmente da geometria dos componentes dispersos (CATEB, 2011).

Assim, para Soares (2015), é uma solução viável o uso desse tipo de material por possuir a capacidade de controlar as patologias que prosperam progressivamente com o passar do tempo referente as infraestruturas (armadas com vergalhões de aço), do setor da Engenharia Civil e garantir o bom funcionamento das mesmas evitando a exposição ambiental, erros de projeto, de execução, etc.

Optou-se em complementar com novas tecnologias e técnicas inovadoras com a introdução dos vergalhões de fibra de vidro (GFRP), material esse, que garante um melhor desempenho estrutural no que diz respeito a todas as agravantes causadas pela deterioração das armaduras (MAZZU, 2020).

Na Figura 14, podem se vistas representações de vergalhões de GFRP.

Figura 16 - Tipos de varões de GFRP



Fonte: Gouveia (2017).

Tabela 1 - tem exemplos de uso de tal material no setor da construção civil:

Tabela 1 - Obras executadas ou reparadas com vergalhões de fibra de vidro.

LOCAL	EXECUÇÃO
Ponte Rattle Brooke, no Canadá (2011)	Foi realizado um reparo na ponte, devido a danos provenientes da passagem de um furacão no ano anterior, e a urgência de uma solução rápida era vital. Na ponte havia problemas de corrosão dos vergalhões de aço consequentes da degradação nas estruturas de concreto armado. Foram substituídos os vergalhões de aço pelos vergalhões de fibra de vidro o que trouxe mais segurança para os usuários da ponte, com resistência à corrosão e alto desempenho mecânico.
Fábrica Qatalum, no Qatar (2007)	Informações de projeto previam o uso de vergalhões de fibra de vidro. A seleção do material aconteceu pela neutralidade eletromagnética assim como suas propriedades mecânicas. Tendo sua produção realizada no Canadá, tais vergalhões foram transportados até o Qatar em contêineres o que não dificultou tal logística devido a consideração de peso dos vergalhões de fibra com relação ao aço.

Estacas de calçadas em Pineda na Flórida (2013, 2014)	Devido as ações da água salgada nos vergalhões de aço das estacas que sustentavam as calçadas em Pinda, houve profundos danos ao concreto sofrendo abrasão por parte da água do mar. Assim, devido as infiltrações e a corrosão no aço acelerou a deterioração das estruturas. Como solução, fizeram uso de vergalhões de fibra de vidro, que não corroem e que minimizou tempo e dinheiro.
Indústria Niederrhein Gold, Alemanha (2007 a 2009)	Essa indústria de bebidas recebeu um reforço não metálico de tamanho bastante considerável de fibra de vidro em uma área de 1.150 metros quadrados. Tal reforço objetivou principalmente evitar a iminência de rachaduras como também o reforço de vergalhão de fibra de vidro para fundação de um forno.
Estação de Tratamento de Água Thetford Mines, em Quebec (2011)	Usados na construção de um tanque de cloração na Estação de Tratamento de Água Thetford Mines, em Quebec, sem que o mesmo sofresse ações provenientes de corrosão. Por isso, utilizou-se de vergalhões de fibra de vidro, anticorrosivos tanto em lajes quanto em paredes da obra.
Estação de trem de Viena, na Áustria (2009)	Visando o reforço das estacas e paredes dos pisos inferiores da estação de trem livres de aço, usou-se os vergalhões de fibra de vidro que também foram utilizados nos 6.400 metros quadrados do estacionamento coberto do Centro Comercial Forum Steglitz, em Berlin, na Alemanha. O objetivo do uso foi evitar a corrosão e prevenir as rachaduras.

Fonte: compositegroup.com.br (2020).

De fato, os vergalhões feitos de fibra de vidro podem sim ter diversas utilidades e por isso, devemos entender primeiramente sua composição.

Os varões de FRP – Polímeros Reforçados com Fibras que em inglês é “Fiber Reinforced Polymer” – fazem parte do grupo dos Plásticos Reforçados com Fibras, foi uma alternativa mais aceitável e viável para substituição ou Betão armado clássico (REIS, 2009).

Isso porque, mesmo que havendo um Betão com qualidades ideais, ainda existe a iminência de fragilidades, que segundo Teles, (2008):

- A corrosão das armaduras internas e externas;
- Pouca resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- Apresenta o fendilhado exagerado que quando é associado a agressividade química provoca rápida deterioração;
- Em ambientes onde o que predomina a neutralidade magnética ocorre a necessidade de implementar requisitos especiais como o tratamento do aço.

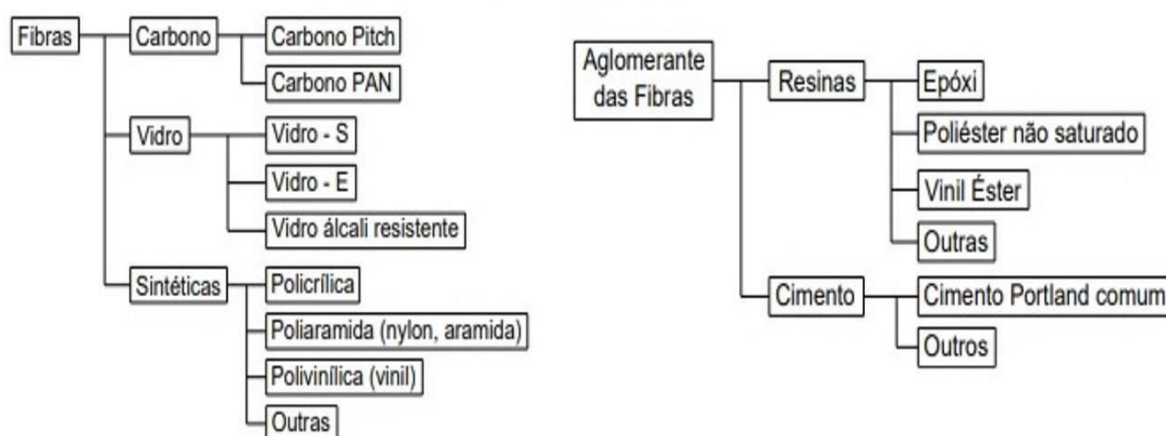
O material de FRP é resistente a agentes corrosivos como a maresia que por meio da abrasão e corrosão se mantém resistente, diferentemente das estruturas de aço

convencional que devido as ações de agentes externos, perdem com o tempo suas capacidades de resistência (REIS, 2009).

Esse tipo de material que em sua estrutura é composto por polímeros reforçados com fibras, caracterizada por uma combinação de dois ou mais elementos não solúveis entre si. Subdividido em reforço e matriz polimérica, o segundo é responsável por envolver o primeiro, ao qual sua constituição de fibras pode ser encontrada nas formas de tecidos, barras, fitas e até mesmo no formato laminado (MATOS, 2021).

A Figura 18, vem apresentando como as barras de FRP são classificadas de acordo com os materiais constituintes e a conformação superficial. (MAZZÚ, 2020, p.31).

Figura 18 - Classificação das barras de FRP.



Fonte: Mazzu (2020).

Mais comumente adotadas em FRP, as fibras podem ser de vidro, carbono, e até mesmo de aramida e basalto. Assim como suas matrizes poliméricas mais utilizadas na produção de barras e afins podem ser de poliéster, epóxi, fenólica e éster vinílica (MATOS, 2021).

A fibra é um material compósito apto para uso em reforço interno de estruturas de concreto. A utilização desse tipo de material conta com a fibra de vidro direcionadas no sentido longitudinal que permite absolver os esforços de tração e também conta com a matriz polimérica ou resinas, que tem a função de proteger e transmitir tensões em um

contexto geral (FARIAS; ANTUNES, 2019).

A correlação existente entre as fibras e as matrizes poliméricas garantem a rigidez e agem contra a umidade, da maresia, de ácidos, garantindo a não ocorrência de flambagem devido as fibras transferirem as cargas entre si. É importante frisar que podem incluir alguns aditivos que proporcionem o melhoramento de suas propriedades como os fillers (MELO; TEIXEIRA; CARNEIRO, 2018).

Figura 19 - Propriedades das resinas termoendurecíveis mais utilizadas em FRP.

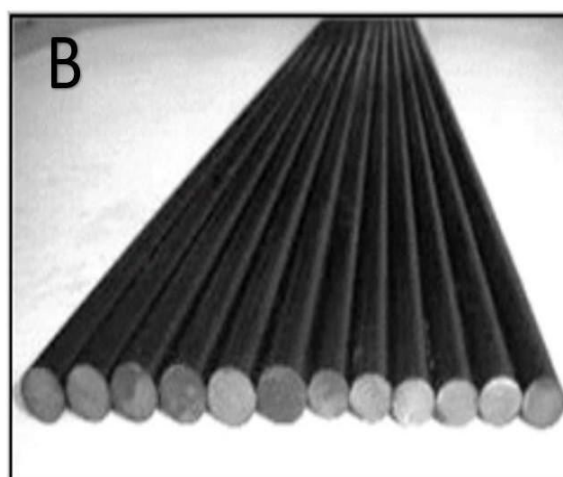
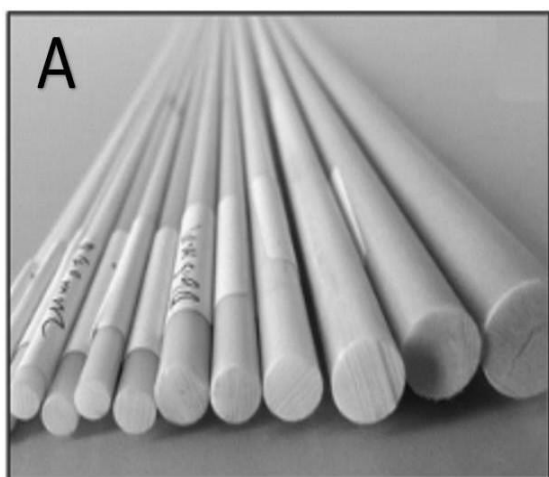
Propriedade	Resina		
	Poliéster	Éster vinílico	Epóxi
Densidade (g/cm³)	1,1 – 1,4	1,1 – 1,3	1,2 – 1,3
Temperatura de transição vítrea (°C)	100,00	110,0	120,0
Resistência à tração (Mpa)	34,5 – 103,5	73,0 – 81,0	55,0 – 130,0
Módulo de Elasticidade (Mpa)	2,1 – 3,4	3,0 – 3,3	2,8 – 4,1
Alongamento	2,5	6,0	8,0

Fonte: Mazzu (2020).

Segundo Couto (2007), existem condicionantes para utilização desse tipo de barra que é o fato de as mesmas não serem dobradas. Sendo que para um uso específicos, esse tipo de barra já deve ser solicitado nas fabricas com a formatação desejada.

A Figura 20, traz uma representação de barras de FRP que podem ser empregados no reforço de lajes e vigas de concreto. Tais barras são fabricados pelo processo de pultrusão, que puxam as fibras encharcadas na resina matriz dentro de um molde.

Figura 20 - (A) Barra de CFRP, (B) barra de GFRP.



Fonte: Melo; Teixeira & Carneiro (2018).

A fibra de vidro por mais que não aparente ser, é um material resistente à tração, no sentido longitudinal das suas fibras. Sendo realizado a impregnação delas com resina. Podem constituir um varão que surge como opção vantajosa que servirá como solução para armaduras de estruturas de concreto armado nas condições mais excepcionais (MATOS, 2021).

Tabela 2 - Características das fibras de vidro utilizadas no fabrico dos vergalhões de GFRP.

MATERIAL	PESO VOLUMÉTRICO	TENSÃO TRAÇÃO	TENSÃO DE COMPRESSÃO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	COEF. DE POISSON
	g/m ³	MPa	MPa	GPa	-
Vidro-E	1,99	3500-3600	500	74-75	0,2
Vidro-S	1,99	4900	500	87	0,22
Vidro Álcali	1,99	1800 - 3500	500	70 - 76	-

Fonte: Mazzú (2020), Vares (2019).

A fibra de vidro do Tipo E, tem como característica o baixo teor alcalino, possui características também de isolante elétrico, tem boa resistência à tração e flexão. Esse tipo de fibra é o mais empregado para reforços dos materiais plásticos devido ao seu ótimo custo-benefício (GOUVEIA, 2017).

Quanto ao Tipo S de fibra de vidro possui altas propriedades mecânicas que fazem com que esse tipo seja recomendado para aplicações em diversos campos como o campo civil, aeroespaciais, balísticas e blindagens (GOUVEIA, 2017).

É importante frisar que de acordo com Mazzú (2020), a resina possui um papel importante nesse tipo de material. Justifica-se o papel exercido pelas resinas devido a

ação para manter as fibras unidas, o que promove a transferência de esforços entre as fibras, deixando-as mais estáveis, e não menos importante, possui o papel de proteger as fibras da ação do ambiente.

De acordo com Roberto (2019), os vergalhões de fibra de vidro (GFRP) apresenta várias características específicas que podem ser vistas a seguir:

- Baixo peso e elevada resistência à tração;
- Economia aproximada de até 30% em comparação com o vergalhão de aço, na conclusão da obra e de até 90% no transporte;
- Flexível, pode ser trabalhado em rolos;
- As barras produzidas variam na polegada que vão de 4mm a 20mm, sendo que o comprimento da armadura composta é feito em rolos de 50 e 100 metros, até o diâmetro de 10mm;
- Podem ser usados em ambientes muito agressivos;
- O material não enferruja, não colapsa quando entra em contato com o concreto;
- possui durabilidade de 80 anos ou mais;
- As barras não perdem sua durabilidade, não se decompõem, não correm, não reagem com ácidos ou álcalis;
- A construção em concreto se torna mais durável;
- Possuem propriedades dielétricas e não conduz eletricidade;
- Pode evitar rachaduras e tensões internas da estrutura de concreto;
- Possuem fácil instalação;
- Possuem baixa condutividade térmica e elevada resistência ao congelamento tendo como ponto forte seu limite de temperatura para reforço do GFRP onde a operação da malha é de -70°C à $+200^{\circ}\text{C}$.

Em contrapartida, segundo Farias & Antunes (2019), como desvantagem as

estruturas armadas com o GFRP possuem custos mais elevados em comparação as estruturas armadas em aço, onde para as barras de GFRP podem custar 70% a mais do valor das barras de aço, pois no ato de dimensionar são exigidos uma área maior para reforço, em relação a área do aço.

2.7 Propriedades FÍSICAS, MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS DO GFRP

De acordo com Vares (2019), o coeficiente de expansão térmica se relaciona diretamente com o tipo de fibra, assim como com a quantidade dos materiais que compõem as barras. Os valores típicos de coeficientes de expansão térmica são definidos da seguinte forma: Direção Longitudinal 6,0 - 10,0 e Direção Transversal 21,0 - 23,0. Sendo que o peso específico dos tipos de compósitos é originado a partir da função do peso específico das fibras e da fração da matriz.

Em varões de GFRP as fibras de vidro chegam a ocupar um número que varia de 50% a 70% em relação ao volume total. Uma informação importante é que quando é acrescentado mais fibra na mistura, o coeficiente de dilatação térmica linear do varão aproxima-se dos resultados apresentados pelas fibras isoladas. Já quando há uma redução no volume das fibras na mistura, encaminha a um coeficiente com valores próximos do valor exibido pela resina isolada (DALFRÉ; MAZZU, 2020).

Quanto a resistência a tração, os principais fatores que podem influenciar são as propriedades da matriz e das fibras, que dependendo das quantidades fracionadas dos materiais constituintes, correlacionados com físico-química e os procedimentos de controle na fabricação das barras (VARES, 2019).

A resistência à tração quando relacionado a seção transversal da barra é variável onde, quando o tamanho área transversal for maior, menor será a resistência à tração da barra. Tal resistência é comprometida quando ocorre a perda de resistência à tração ocasionado através do aumento da área de interface entre as fibras e a resina (TAVARES, 2006).

Já a compressão longitudinal quando solicitadas, não são aplicados os conceitos relativos à tração pois existe a ocorrência de micro fissuração nas fibras pois os valores

de resistência consequentemente são menores que na tração (TAVARES, 2006).

Em suma, de acordo com Gouveia (2017), nos varões de GFRP o comportamento é elástico até que ocorra à ruptura, não sendo passivo de ocorrência de um comportamento plástico como vistos em armaduras de aço, que por sua vez, apresentam comportamento elástico-plástico. É importante evidenciar que os principais fatores que colaboram diretamente com as propriedades de tração dos varões de FRP podem ser: a distribuição das fibras de vidro e matrizes; volume interação física e química; processo de fabricação e controle de qualidade.

Figura 22 - Características dos Varões de GFRP.

FATORES	CARACTERISITICAS
Resistência à Compressão	A força de compressão dos varões do GFRP varia entre 55, 78 e 20% da força de tração
Resistência ao Corte	Os varões de GFRP apresenta uma baixa resistência ao corte devido à falta de reforço das fibras entre camadas.
Aderência	Dependem de fatores como: design (geometria da sua superfície); fabricação; propriedades mecânicas e condições ambientais.
Fluência	Fatores como elevadas temperaturas, radiação ultravioleta, elevada alcalinidade do meio, ciclos de molhagem-secagem, ciclos de gelo-desgelo acarretam na deformação permanente do material.
Fadiga	Os varões de GFRP estão sujeitos aos fatores externos como as condições ambientais.
Geometria	Os varões de GFRP estão disponíveis em diâmetros que variam entre os 6 mm aos 32 mm.
Durabilidade	Contém componentes no material compósito que influencia as suas propriedades a longo prazo, são eles: A matriz; A fibra e A interação da fibra/ matriz.
Temperatura	as elevadas temperaturas alteram a ligação entre as fibras e a matriz, mudando o comportamento dos varões de GFRP, diminuindo, portanto, a rigidez, a resistência à tração, à flexão e ao corte

Fonte: Gouveia (2017).

De forma resumida, o GFRP pode ser definido como sendo um composto de fibra de vidro e catalisadores, que são transformados em vergalhões. A matéria prima de destaque é a fibra de vidro e demais componentes, que promovem alta resistência, que em relação ao aço, ela é muito maior. Já as resinas misturadas corretamente com os

compostos e consequentemente aliadas à fibra de vidro, resultam em uma alta resistência efetiva, que atende as expectativas cobrada pelas normas, nacionais e internacionais (ROBERTO, 2019).

2.8 DURABILIDADE DOS VERGALHÕES DE GFRP

Os vergalhões de GFRP são caracterizados pela sua resistência a corrosão eletroquímica e por apresentar maior resistência à tração em relação aos vergalhões de aço convencionais, no entanto, a sua durabilidade pode ser reduzida em ambientes alcalinos, elevadas temperaturas, ciclos de gelo/degelo e exposição à radiação ultra- violeta, levando à redução de sua resistência mecânica.

Cada um dos elementos constituintes do vergalhão de GFRP (matriz polimérica, fibras de vidro e interface) pode estar suscetível à degradação, mas devem manter a integridade do vergalhão durante toda a vida útil, podendo ser avaliado por meio de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. A matriz polimérica deve ser resistente ao ambiente de exposição, portanto, deve evitar a deterioração das fibras de vidro e da região da interface, fornecendo uma barreira contra agentes agressivos (SAWPAN *et al.*, 2014), tais como: espécies iônicas, temperatura e radiação ultravioleta, além das características de fabricação do vergalhão como: acabamento superficial, homogeneidade da resina e defeitos de fabricação.

A possibilidade de deterioração depende de diferentes parâmetros, tais como tipo de fibra e matriz, processo de fabricação (taxa de cura, microfissuras térmicas, taxa de molhamento, conteúdo de vazios) e ambientes de exposição. Além disso, o uso dos vergalhões de GFRP como reforço interno às estruturas de concreto armado com várias condições ambientais e mecânicas faz da avaliação da durabilidade dos vergalhões de GFRP nas estruturas de concreto uma tarefa complexa e multidimensional.

O mecanismo de degradação dos vergalhões de GFRP se inicia por meio das quebras de ligações covalentes na cadeia principal ou nas cadeias secundárias da macromolécula da matriz polimérica. Essas quebras proporcionam radicais livres, ou seja, moléculas reativas com elétrons não compartilhados, podendo ser combinados a outros radicais formando ligações fracas (DE PAOLI, 2008).

De acordo com Micelli e Nanni (2004), o desempenho dos vergalhões de GFRP é reduzido devido às interferências ambientais, mecânicas ou à combinação destas, como pode ser verificado na21.

Figura 23. Fatores que podem interferir na durabilidade dos vergalhões de GFRP.



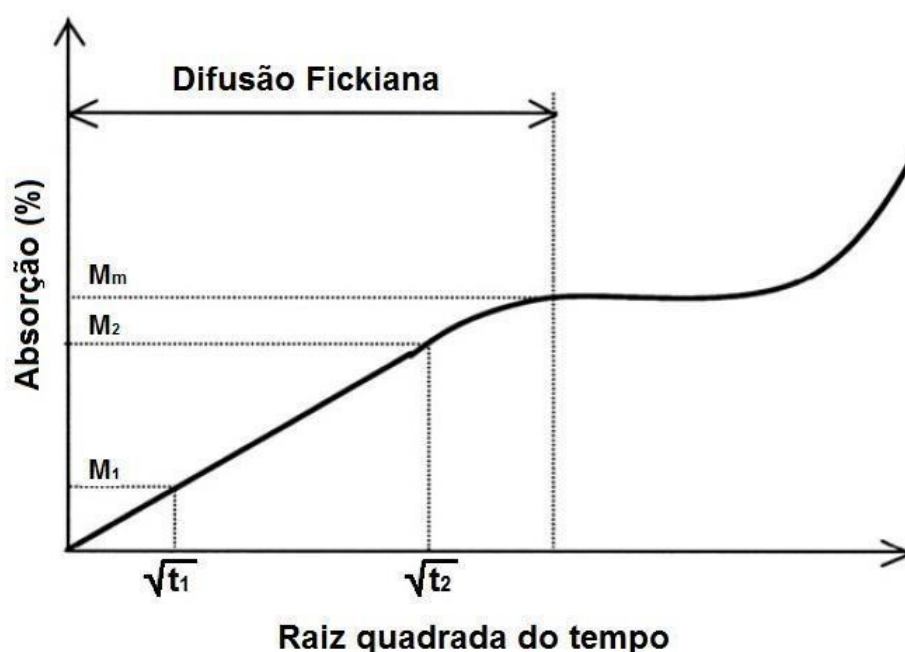
Fonte: Adaptado da ISIS (2007).

2.9 Efeito da absorção de água;

A absorção de água tem um impacto significativo na degradação dos vergalhões de GFRP. Esta ocorre através da matriz polimérica, sendo transmitida radialmente por ação capilar até a superfície da fibra de vidro. O contato da água com as fibras de vidro, faz com que seja iniciadas reações químicas entre as moléculas de água, íons hidroxila o óxido de silício, o que pode provocar a sua decomposição. Este processo prossegue até a obtenção do equilíbrio. A entrada de água está associada ao aumento da separação entre as cadeias moleculares da matriz polimérica, induzindo, assim, tensões internas, fenômeno conhecido por plastificação (WEITSMAN, 2012). Além disso, o volume da matriz polimérica aumenta e microfissuras se formam em direção ao interior do vergalhão de GFRP (WON *et al.*, 2012).

A quantidade de água absorvida aumenta linearmente durante um certo tempo. Em seguida, a absorção permanece constante quando o vergalhão chega ao estado de saturação, podendo aumentar, à medida que a água penetra nas microfissuras que se formaram devido à degradação da matriz polimérica.

Figura 24. Comportamento característico da absorção de água, como função da raiz quadrada tempo, nos vergalhões de GFRP.



Fonte: Adaptado de WON *et al.* (2012).

A interface entre a fibra de vidro e a matriz polimérica é enfraquecida, provocando o seu descolamento. Os efeitos degradativos devido à absorção de água afetam, também, o desempenho mecânico do vergalhão de GFRP, alterando a temperatura de transição vítrea e a elasticidade, resultando em uma perda da capacidade de proteção e transmissão de esforços para as fibras de vidro (WEITSMAN, 2012). A difusão de água no interior da matriz polimérica difere em função da quantidade de moléculas absorvidas e características microestruturais, como polaridade, grau de reticulação, presença de monômeros residuais, tais como o estireno, no caso da resina do tipo poliéster (YIN *et al.*, 2019).

Para modelar o processo de difusão de água, inúmeros modelos foram propostos ao longo dos anos. O modelo Fickiano unidimensional vem sendo utilizado devido à sua simplicidade (Equação 4)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Equação 4}$$

Em que c é a concentração, x é a direção da difusão e D é o coeficiente de difusão na direção x . A absorção de água (M_t) em função do tempo pode ser calculada utilizando a Equação 5 (WANG *et al.*, 2016).

$$M_t = M_m \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{Dt}{h^2} \pi^2 (2n+1)^2 \right] \right\} \quad \text{Equação 5}$$

Em que M_m é a absorção de saturação (ou percentual) de água e h é a espessura da amostra (adotada como o diâmetro do vergalhão de GFRP).

O coeficiente de difusão (D) pode ser obtido na faixa linear da Figura 11 e calculado por meio da Equação 6 (WON *et al.*, 2012).

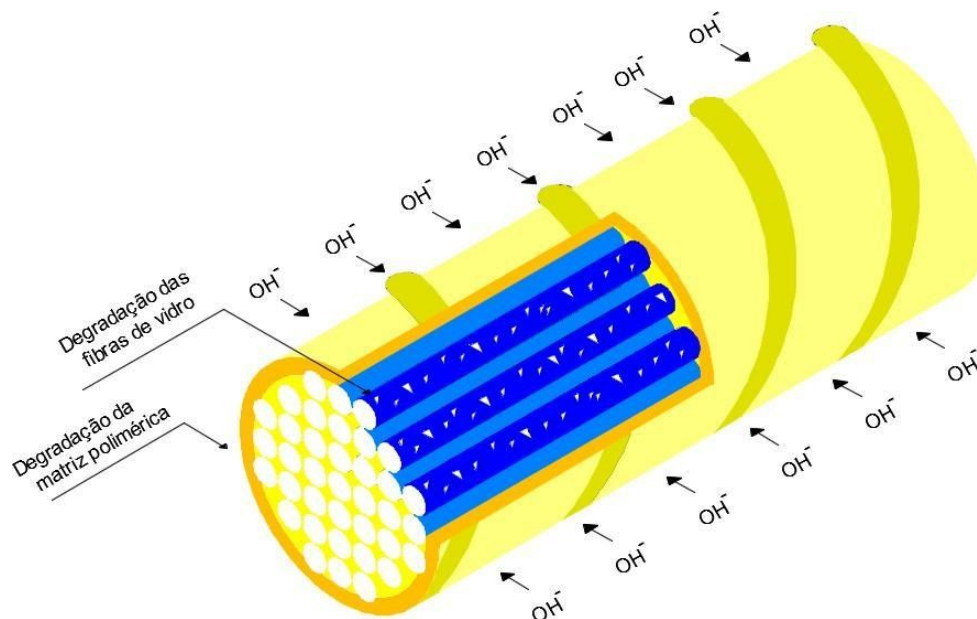
$$D = \frac{\pi^2 h^2 (M_2 - M_1)}{16 M_m (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})^2} \quad \text{Equação 6}$$

Em que M_1 e M_2 representam a absorção de água para os tempos t_1 e t_2 , respectivamente.

2.10 Efeito do meio alcalino;

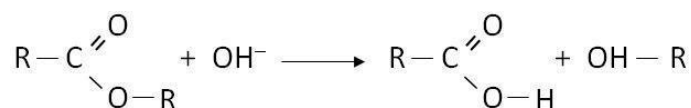
Estudos mostram que a elevada alcalinidade da solução dos poros do concreto (pH entre 12,5 e 13,5) é a principal responsável pela degradação dos vergalhões de GFRP (MICELLI e NANNI, 2004; CERONI *et al.*, 2006; D'ANTINO *et al.*, 2018). A degradação dos vergalhões de GFRP submetidos ao ambiente alcalino (concreto) tem início quando os íons hidroxila (OH^-), moléculas de água e íons alcalinos se difundem por meio da matriz polimérica, conforme esquema mostrado na Figura 25, sendo responsável por diversos mecanismos degradantes na matriz polimérica e nas fibras de vidro.

Figura 25. Processo de degradação dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.



Fonte: O autor.

O mecanismo de degradação dos vergalhões de GFRP em ambiente alcalino se inicia com a difusão dos íons hidroxila e das moléculas de água, inicialmente, na matriz polimérica da região periférica do vergalhão de GFRP. Esta difusão envolve um grau de complexidade maior quando comparada a materiais com estrutura cristalina definida. A matriz polimérica pode apresentar regiões parcialmente cristalinas (semicristalinas) e cristais dispersos na parte amorfa restante, fazendo com que o transporte de massa ocorra através de dela. As regiões amorfas possuem maior abertura entre as moléculas, o que viabiliza a interdifusão dos íons hidroxila e das moléculas de água (SAWPAN, 2016). Essas espécies iônicas promovem o rompimento de ligações, principalmente no grupo éster, de ligação mais fraca, provocando a reação de hidrólise, conforme Equação 7, com a formação de álcool e sal de ácido carboxílico (ZHU *et al.*, 2011).



Equação 7

A degradação da resina polimérica provoca o aumento de volume, fissuração e plastificação, o que pode afetar suas propriedades físicas e mecânicas (CHEN *et al.*, 2007). Com o prosseguimento da difusão, os íons hidroxila (OH^-), que se encontram na solução dos poros do concreto, quebram as ligações de sílica. Com o tempo, as fibras de vidro perdem peso e resistência (Equação 8), gerando sua fragilização (ARABI *et al.*, 2018). A degradação não estará mais relacionada apenas à taxa de difusão, mas, também, à atividade de dissolução da SiO_2 .



2.11 Efeito combinado do meio alcalino e temperatura

A ação combinada do meio alcalino com a temperatura provoca uma aceleração da degradação dos vergalhões de GFRP, provocando maior difusão de espécies iônicas na matriz polimérica. Além disso, a diferença no coeficiente de dilatação térmica entre a matriz polimérica e a fibra de vidro (como pode ser visto nas Tabelas 1 e 2) pode resultar em tensões internas ao vergalhão de GFRP e consequentemente danos na interface fibra-matriz.

Para investigar o comportamento a longo prazo dos vergalhões de GFRP submetidos ao ambiente alcalino e temperatura, vários grupos de pesquisa vêm realizando testes para determinar as alterações das propriedades físicas, químicas e mecânicas nestes vergalhões. Abbasi e Hogg (2005) realizaram uma investigação da durabilidade de três categorias de vergalhões de GFRP com fibras de vidro E, sendo a primeira constituída por resina poliéster isoftálica, a segunda constituída por resina éster vinílica e a terceira constituída por resina epóxi. Estes vergalhões foram expostos ao ambiente alcalino ($\text{pH} = 13,6$) a 60°C por 30, 60 e 120 dias. Os resultados revelaram que a natureza da resina polimérica determina a magnitude e a taxa de degradação do vergalhão de GFRP, sendo a resistência à tração reduzida devido à exposição ao ambiente alcalino, conforme pode ser verificado na Tabela 6. Estes pesquisadores ainda relataram que este comportamento pode estar relacionado a alterações na transferência de tensão entre as fibras e a matriz do vergalhão de GFRP.

Chen *et al.* (2007) conduziram uma investigação da durabilidade de vergalhão de GFRP sob várias condições ambientais (água, solução alcalina com pH semelhante à solução dos poros do concreto, solução salina e solução alcalina combinada com cloretos) nas temperaturas de 40°C e 60°C, durante 70 dias. Após o período de exposição, os vergalhões de GFRP foram submetidos ao ensaio de tração. Os resultados do teste de tração mostraram um comportamento elástico até a falha, devido à ruptura das fibras. Os autores evidenciaram que o ambiente alcalino (com pH = 13,6) foi a condição mais agressiva para os vergalhões de GFRP e que a elevação da temperatura acelerou sua degradação, o que provocou a perda da resistência à tração.

Em outro trabalho, Al-Salloum *et al.* (2013) realizaram testes em vergalhões de GFRP em algumas condições ambientais (água, água do mar e solução alcalina) na temperatura de 50°C durante 6, 12 e 18 meses. Para verificar o efeito da exposição destes ambientes nos vergalhões de GFRP, estes pesquisadores realizaram ensaios de tração ao término de cada período de exposição. Os resultados mostraram que a 50°C a água e a solução alcalina provocaram um efeito prejudicial significativo na resistência à tração nos vergalhões de GFRP, comparativamente à exposição à água do mar. As reduções na resistência à tração foram iguais a 11%, 18% e 24% após a exposição alcalina em períodos de 180, 365 e 540 dias, respectivamente, em comparação à resistência à tração original.

Sawpan (2016) investigou o efeito provocado pelo condicionamento alcalino e a temperatura a longo prazo nas propriedades físicas e mecânicas de vergalhões de GFRP. Estes vergalhões foram imersos em solução alcalina ($\text{pH} \cong 13$) durante 23 meses a 23°C e durante 24 meses a 60°C. Os resultados revelaram que após o condicionamento em solução alcalina, a resistência à tração dos vergalhões de GFRP foi reduzida em 6 e 26% quando expostas em temperaturas de 23°C e 60°C, respectivamente. A maior redução da resistência à tração a 60°C foi atribuída à grande quantidade de água absorvida, que provocou a degradação da interface fibras/matriz, reduzindo a eficiência de transferência de carga da matriz para as fibras.

Fergani *et al.* (2018) conduziram uma investigação para avaliar as propriedades

físicas e mecânicas de vergalhões de GFRP expostos a ambientes severos (água, água do mar e solução alcalina) na temperatura de 50°C, durante 42, 83 e 270 dias. Os resultados obtidos por estes pesquisadores revelaram uma redução da resistência à tração dos vergalhões de GFRP ocorreu devido a dois motivos: (i) dissociação entre as fibras de vidro e a matriz polimérica, o que reduziu a capacidade de transferência de tensão e; (ii) dissolução das fibras de vidro, resultando em uma redução local do número de fibras, interferindo negativamente na transferência de tensões.

Tu *et al.* (2020) estudaram a durabilidade de vergalhões de GFRP envelhecidas em solução salina e solução alcalina a temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C por 30, 60 e 90 dias, sendo tais vergalhões submetidos ao ensaio de tração após cada ciclo de envelhecimento. Foi observado que o ambiente alcalino foi o mais agressivo para os vergalhões de GFRP, sendo que a elevação da temperatura intensificou a degradação, obtendo-se redução na resistência à tração da ordem de 32%.

Recentemente, Lu *et al.* (2021) conduziram um programa experimental de forma a avaliar a interferência da exposição dos vergalhões de GFRP (produzidas com fibra de vidro E e resina éster vinílica) a soluções alcalinas com pH 7,1 e 12,7 em temperatura de 20°C durante 45, 90, 135 e 180 dias. Segundo os autores, foram observadas reduções da resistência à tração devido a degradação da matriz polimérica e consequente perda da capacidade de transferência de esforços, além de degradação localizada na superfície das fibras de vidro, sendo observadas reduções na resistência à tração de até 23% após 180 dias de envelhecimento em solução alcalina.

A Tabela 3 engloba, em ordem cronológica, diversos trabalhos envolvendo vergalhões de GFRP, destacando os efeitos da exposição ao ambiente alcalino nas propriedades físicas, químicas e mecânicas destes vergalhões.

Referên- cia	Fibra / Matriz	d _b (mm)	Condiciona- mento	Temp · (°C)	Período de exposição (dias)	Perda de re- sistência à tração (%)
Abbasi e Hogg (2005)	Vidro E/ po- liéster isof- tálica	12,7	Solução alcalina (pH=13)	60	30, 120, 240	5, 11, 22
	Vidro E/ Éster vinílica				30, 120	16, 20
Chen <i>et al.</i> (2007)	Vidro E/És- ter vinílica	9,5	Água	20, 40, 60	120 para 20°C, 70 para 40°C e 60°C	5, 3, 29
			Solução alcalina (pH=13,6)			14, 11, 36
			Solução alcalina (pH=12,7)			8, 8, 27
			Água do mar			3, 2, 26

Fonte: O autor.

Tabela 4 (*continuação*). Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.

Referên- cia	Fibra / Matriz	d _b (mm)	Condiciona- mento	Temp · (°C)	Período de exposição (dias)	Perda de re- sistência à tração (%)
Al- Salloum <i>et al.</i> (2013)	Vidro E/És- ter vinílica	12,0	Água	50	180, 360, 540	13, 22, 23
			Água do mar			4, 7, 9
			Solução al- calina			11, 18, 24
Sawpan (2016)	Vidro E- CR/Éster vi- nílica	14,0	Solução alcalina (pH $\cong$ 13,0)	23 e 60	690 para 23°C e 720 para 60°C	9, 26
Fergani <i>et al.</i> (2018)	Vidro E- CR/Éster vi- nílica	8,0	Solução alcalina (pH=12,7)	20, 40, 60	42, 83, 270	20°C (3, 5, 6) 40°C (9, 10, 16) 60°C (16,27, 36)
			Concreto			20°C (5, 8, 10) 40°C (5, 11, 26) 60°C (20,21, 31)
Tu <i>et al.</i> (2020)	Vidro E/Epóxi	9,2	Solução salina (pH=8,1)	23, 40, 60	30, 60 e 90	23°C (0, 1, 2) 40°C (3, 7, 10) 60°C (6, 9, 17)
			Solução alcalina (pH=13,4)			23°C (5, 7, 10) 40°C (10, 11, 15) 60°C (18,23, 32)

Lu <i>et al.</i> (2021)	Vidro E/És- ter vinílica	15,6	Solução alcalina (pH=7,1)	20	45, 90, 135, 180	5, 6, 9, 12
			Solução alcalina (pH=12,7)			16, 17, 19, 23

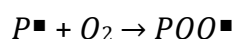
Fonte: O autor.

A partir da análise da Tabela 6 é possível verificar que o número de estudos existentes sobre a durabilidade dos vergalhões de GFRP envelhecidos no concreto, ainda é muito reduzido na comunidade científica. Este trabalho vem contribuir para a comunidade científica inovando o estudo da durabilidade de vergalhões de GFRP envelhecidos em diferentes tipos de concreto.

2.12 Efeito de elevada temperatura

Semelhante aos materiais de construção tradicionais como: aço, cerâmica, concreto e madeira, as propriedades dos vergalhões de GFRP são reduzidas quando expostas a elevadas temperaturas. Nestas condições, os vergalhões de GFRP podem sofrer alterações nas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, visto que a matriz polimérica pode sofrer degradação térmica reversível ou irreversível quando exposta a temperaturas elevadas, especialmente a partir da temperatura de transição vítrea (T_g) (KUTZ, 2013).

A estabilidade térmica provém do fato de as cadeias poliméricas serem formadas por átomos ligados covalentemente, com energia de dissociação na faixa entre 300 e 850 kJ.mol⁻¹ (DE PAOLI, 2008). Com a quebra das ligações químicas, haverá a produção de radicais livres que, na presença de oxigênio, poderão oxidar a matriz polimérica. Assim, a termoxidação da matriz polimérica é iniciada pela reação dos radicais livres ($P^\bullet$) com o oxigênio, para formar radicais peróxidos ($POO^\bullet$), conforme Equação 9 (MAXWELL *et al.*, 2005).



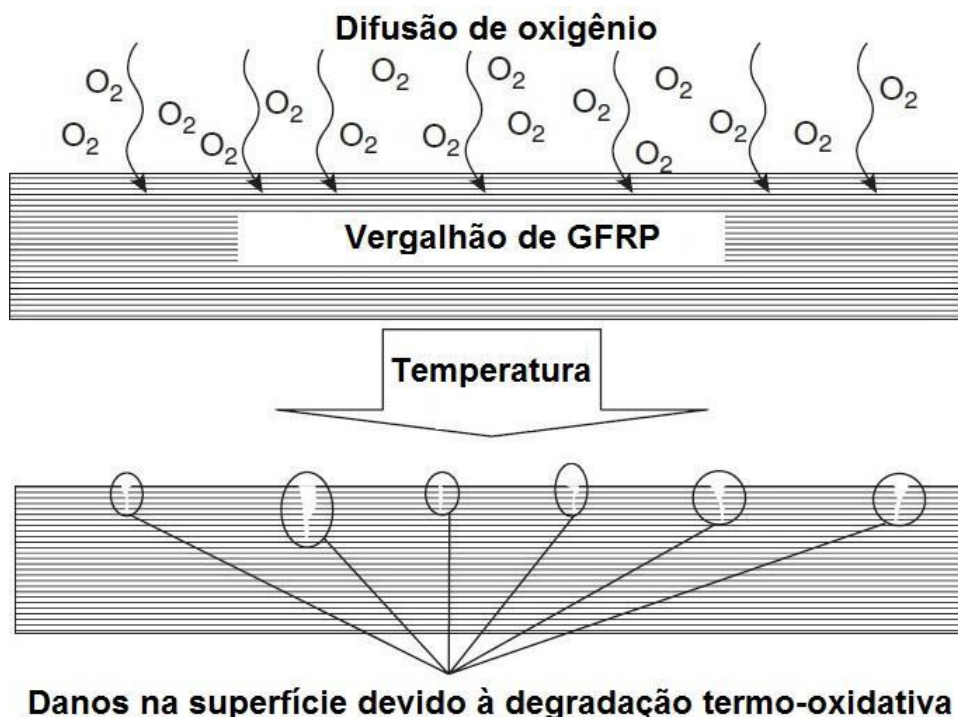
Equação 9

Uma vez formados, os radicais peróxidos sofrem novas reações que quebram as

cadeias poliméricas, resultando na degradação da matriz polimérica, com a formação de microtrincas na superfície, como apresentado na Figura 26. Essas microtrincas abrem caminhos para que o oxigênio continue penetrando no vergalhão de GFRP, resultando em oxidação nas camadas internas do vergalhão, que pode continuar até que o polímero seja completamente oxidado.

Com relação à temperatura, as fibras de vidro apresentam um comportamento relativamente estável, por apresentarem propriedades térmicas superiores à das matrizes poliméricas. Assim, continuam suportando carga na direção longitudinal até temperaturas próximas a 980°C (ROBERT e BENMOKRANE, 2010).

Figura 26. Representação esquemática da reação de termoxidação e consequentes danos à matriz polimérica, com a formação de microtrincas na superfície dos vergalhões de GFRP.



Fonte: Adaptado de MARTIN (2008).

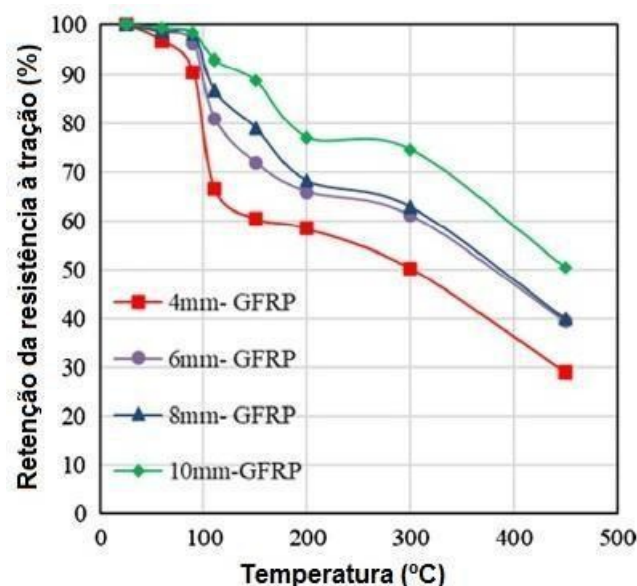
Wang *et al.* (2007) realizaram um estudo sobre o efeito da exposição de vergalhões de GFRP a elevadas temperaturas sobre a resistência à tração. Os autores relataram uma redução na resistência à tração dos vergalhões de GFRP com diâmetro de 12,7 mm quando submetidos às temperaturas de 100°C, 300°C, 400°C e 500°C, iguais a cerca de 23%, 45%, 64% e 91%, respectivamente, em comparação aos vergalhões analisados em temperatura ambiente (23°C).

Robert e Benmokrane (2010) estudaram a variação das propriedades mecânicas dos

vergalhões de GFRP submetidos a diferentes temperaturas (23°C a 315°C) e observaram uma redução significativa da resistência à tração a partir de temperaturas próximas às de transição vítrea (T_g) e de decomposição (T_d) da matriz polimérica. Os autores observaram uma perda de cerca de 47% na resistência à tração dos vergalhões submetidos à temperatura de 315°C.

Alsayed *et al.* (2012) investigaram o desempenho dos vergalhões de GFRP submetidos a 100°C, 200°C e 300°C, observando uma redução na resistência à tração de 9,4%, 19,8% e 21,8%, respectivamente. Ashrafi *et al.* (2017) realizaram uma pesquisa experimental na qual foi investigado o efeito da temperatura no desempenho de vergalhões de GFRP revestidos com areia nos diâmetros de 4, 6, 8, 10 mm. As temperaturas escolhidas para simular as condições de incêndio foram 25°C, 60°C, 90°C, 110°C, 150°C, 200°C, 300°C e 450°C. A relação entre a retenção da resistência à tração pela elevação da temperatura pode ser verificada na Figura 27.

Figura 27. Retenção da resistência à tração em função da temperatura de exposição e do diâmetro do vergalhão de GFRP.



Fonte: Adaptado de ASHRAFI *et al.* (2017).

As curvas de retenção da resistência à tração apresentadas na Figura 27 podem ser

separadas em quatro faixas de temperaturas. Na primeira, ocorreu a variação da temperatura ambiente até 90°C (temperaturas abaixo da T_g) para os vergalhões de GFRP ($T_g = 110^\circ\text{C}$). Nesta região, a mobilidade da cadeia molecular da matriz polimérica não foi alterada e, portanto, a resistência à tração final permaneceu quase estável. Isso demonstra que temperaturas abaixo da T_g não afetam significativamente a resistência à tração desses vergalhões.

A segunda região incluiu temperaturas entre 90°C e 150°C. Nesta região de temperatura, a resina polimérica diminui a sua rigidez ou amolece, com possibilidade de quebra das ligações moleculares e, conseqüentemente, redução da capacidade de transferência de tensões entre as fibras e a resina. Como resultado, houve uma redução considerável na resistência à tração. A terceira região inclui temperaturas entre 150°C e 300°C, abaixo da temperatura de decomposição da resina polimérica (T_d).

Nesta região, houve moderada diminuição da resistência à tração final em comparação com a segunda região, uma vez que as fibras de vidro mantiveram o carregamento na direção longitudinal (o dano nas fibras não foi significativo), mas a interface fi-bra/matriz foi danificada significativamente. A última região compreende temperaturas superiores a 300°C, onde elas estavam próximas da temperatura de decomposição da resina polimérica. Nesta região, a capacidade de carga das fibras diminuiu severamente em comparação com a terceira região.

De acordo com Ashrafi *et al.* (2017), os vergalhões de GFRP com maior diâmetro apresentaram melhor desempenho à tração a elevadas temperaturas do que aquelas com menor diâmetro, devido ao menor descolamento na interface fibra/matriz do núcleo nos vergalhões de GFRP com maior diâmetro, como resultado de uma força de confinamento mais alta aplicada pela massa externa do vergalhão em seu núcleo.

Rosa *et al.* (2019) investigaram o comportamento mecânico de vergalhões de GFRP com diâmetro de 10 mm, submetidas a temperaturas entre 50°C a 300°C. Os vergalhões ensaiados a 150°C e 300°C apresentaram reduções dos valores de resistência à tração iguais a 40% e 43%, respectivamente, em relação àquelas ensaiadas à temperatura ambiente. Esta redução na resistência à tração dos vergalhões de GFRP quando submetidas a elevadas temperaturas está relacionada, principalmente, à degradação da matriz polimérica e na interface fibra-matriz, que com o aumento da temperatura, tem sua capacidade de transferência de tensões às fibras de vidro reduzida.

Najafabadi *et al.* (2019) relataram que os vergalhões de GFRP (10 mm de diâmetro) protegido por uma camada de cobrimento de concreto de 20 mm experimentou uma

redução na resistência à tração de cerca de 13,4%, 23,2% e 33,2%, após exposição a temperaturas de 150°C, 300°C e 400°C, respectivamente.

A Tabela 7 engloba, em ordem cronológica, diversos trabalhos envolvendo vergalhões de GFRP, destacando os efeitos da exposição à elevadas temperaturas nas propriedades físicas, químicas e mecânicas destes vergalhões.

Referência	Fibra / Matriz	Diâmetro (mm)	Temp. (°C)	Perda de resistência à tração (%)
Wang <i>et al.</i> (2007)	Vidro E/Éster vinílica	9,5	20, 100, 200, 250, 350, 500	20°C: 0
				100°C: 5
				250°C: 29
				350°C: 58
				500°C: 84
Wang <i>et al.</i> (2007)	Vidro E/Éster vinílica	12,7	20, 100, 200, 250, 350, 500	20°C: 0
				100°C: 23
				200°C: 42
				300°C: 45
				400°C: 64
				500°C: 91
Robert e Benmokrane (2010)	Vidro E/Éster vinílica	12,7	25, 100, 150, 200, 250, 300, 325	25°C: 0
				100°C: 11
				150°C: 30
				200°C: 32
				250°C: 39
				325°C: 53
Alsayed <i>et al.</i> (2012)	Vidro E/Éster vinílica	12	23, 100, 200, 300	23°C: 0
				100°C: 9
				200°C: 20
				300°C: 22
Ashrafi <i>et al.</i> (2017)	Vidro / Epóxi	4, 6, 8, 10	25, 110, 150, 200, 300, 450	25°C: 0, 0, 0, 0
				110°C: 33, 19, 13, 7
				150°C: 39, 28, 21, 11
				200°C: 41, 34, 32, 23
				300°C: 50, 39, 37, 25
				450°C: 71, 61, 60, 50
Rosa <i>et al.</i> (2019)	Vidro ECR/Éster vinílica	10	50, 100, 150, 200, 250, 300	50°C: 11
				100°C: 35
				150°C: 40
				200°C: 42
				250°C: 41
				300°C: 43
Najafabadi <i>et al.</i> (2019)	Vidro E/Éster vinílica	10	150, 300, 450	150°C: 13
				300°C: 23
				450°C: 33

Fonte: O autor.

A Tabela 5 facilita uma análise comparativa entre os resultados das pesquisas, sendo possível observar que os vergalhões de GFRP são vulneráveis às temperaturas elevadas e perdem suas propriedades mecânicas nessas condições em um grau significativo. O número de estudos existentes sobre as propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP com cobrimento de concreto em elevadas temperaturas, ainda é muito reduzido na comunidade científica. Nesse sentido, este trabalho vem contribuir para a comunidade científica inovando o estudo da durabilidade de vergalhões de GFRP com cobrimento de concreto.

3 METODOLOGIA

Foi realizado o estudo de caso, tendo como principal visão a resistência à corrosão dos vergalhões de vidro e os vergalhões de aço. Os vergalhões e as barras foram expostos ao ambiente externo.

Os vergalhões de aço foram separadas da seguinte maneira;

- Sem tratamento algum;
- Recebeu tratamento de pintura como ARMATEC ZN (pintura anticorrosiva)
- Recebeu pintura com tinta epóxi;

Os vergalhões de fibra de vidro foram separadas da seguinte maneira;

- Sem tratamento algum;

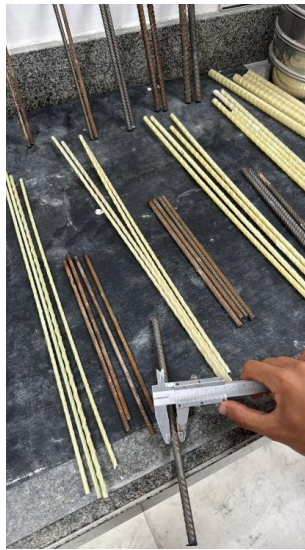
Passo 3.1.1 – Limpeza e medição da bitola inicial;

Figura 28: Medição de espessura dos vergalhões e barras



Fonte: próprio autor

Figura 29: Medição de espessura dos vergalhões e barras



Fonte: próprio autor

Figura 30: Preparando superfície para receber a pintura



Fonte: próprio autor

Figura 31: Barras de acos prontas para recebimento de pintura



Fonte: próprio autor

Tabela 7 - Medição inicial;

VERGALHOES ACO	INICIAL
ACO 13,5MM	13,5MM
ACO 10,5MM	10,5MM
ACO 8 MM	8MM
ACO 6,3MM	6,3MM
ACO 5MM	5MM
VERGALHOES FIBRA	INICIAL
VIDRO 16MM	16MM
VIDRO 10MM	10MM
VIDRO 8MM	7MM
VIDRO 6,3MM	5,5MM
VIDRO 4,8MM	4,8MM

Fonte: próprio autor

Passo 3.1.2 – Pintura e medição;

Figura 33: Preparação de tinta epóxi



Fonte: próprio autor

Figura 34: Pinta de barras com tinta epóxi



Fonte: próprio autor

Figura 35: Barras com tinta epóxi, crua e armateczn



Fonte: próprio autor

Figura 36; Esperua das barras com as demais tintas

VERGALHOES ACO	INICIAL	EPOXI INICIAL	ZN INICIAL
ACO 13,5MM	13,5MM		13,5MM
ACO 10,5MM	10,5MM	11MM	11MM
ACO 8 MM	8MM	8MM	8,2MM
ACO 6,3MM	6,3MM	7MM	6,3MM
ACO 5MM	5MM	5,5MM	5,1MM

Fonte: próprio autor

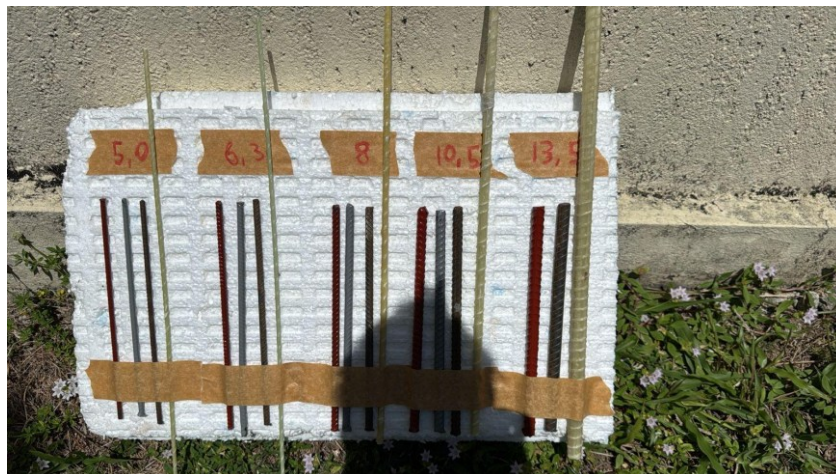
Passo 3.1.3 – Medição a cada 30 dias.

Figura 37: Barras de fibra de vidro e de aço



Fonte: próprio autor

Figura 38: Barras de fibra de vidro e de aço expostas



Fonte: próprio autor

Foi realizado o estudo de caso, tendo como principal visão a resistência à corrosão dos vergalhões de vidro e os vergalhões de aço. Foram submersas ao ácido clorídrico (2 mol/L).

Os vergalhões de aço foram separadas da seguinte maneira;

- Sem tratamento algum;
- Recebeu tratamento de pintura como ARMATEC ZN (pintura anticorrosiva)
- Recebeu pintura com tinta epóxi;

Os vergalhões de fibra de vidro foram separadas da seguinte maneira;

- Sem tratamento algum;

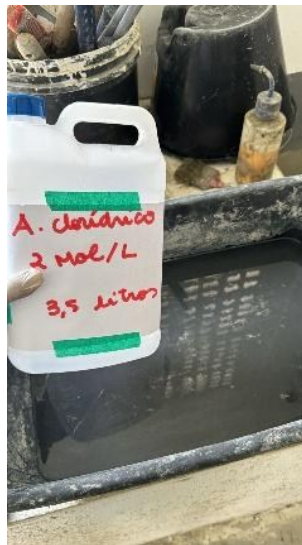
Passo 3.2.1 – Separação, Submersão e medição;

Figura 39: Separação das barras



Fonte: próprio autor

Figura 40: Ácido clorídrico para submersão das barras



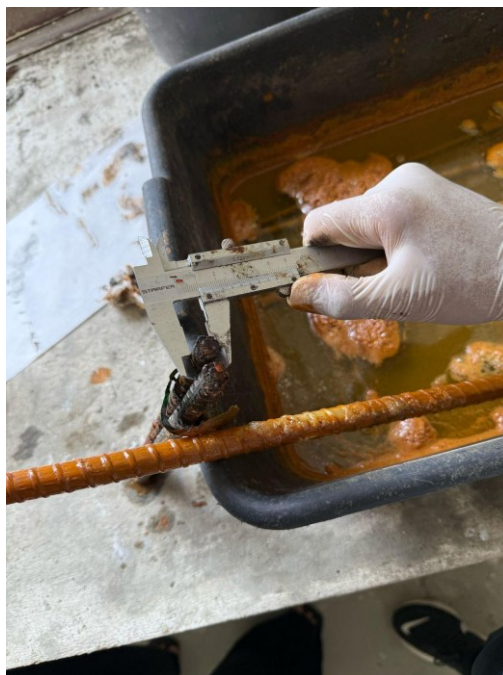
Fonte: próprio autor

Figura 41: Submersão das barras



Fonte: próprio autor

Figura 42: Medição das barras após submersão no ácido



Fonte: próprio autor

Figura 43: Medição das barras após submersão no ácido



Fonte: próprio autor

Foi realizado o estudo de caso, tendo como principal finalidade ver a resistência das barras de fibra de vidro expostas a altas temperaturas;

O estudo foi realizado da seguinte maneira;

- Separação das barras;
- Barras levadas a estufa – aferindo medições nas seguintes temperaturas, 350, 400, 450 graus;

Passo 3.3.1 – Separação e estufa de temperatura;

Figura 44: Separação das barras de fibra de vidro



Fonte: próprio autor

Figura 45: Medição da barra de fibra de vidro a 350 graus



Fonte: próprio autor

Figura 46: Medição da barra de fibra de vidro a 400 graus



Fonte: próprio autor

Figura 47:Medição da barra de fibra de vidro a 450 graus



Fonte: próprio autor

Foi realizado o estudo de caso, com a finalidade de ver a reação das barras de fibra de vidro em contato direto com a água e em contato com a água por meio de corpo de prova;

O estudo foi realizado da seguinte maneira;

- Separação e medição das barras;
- Expostas a água diretamente;
- Expostas a água por meio de corpo de provas de FCK20 e FCK40;

Passo 3.4.1; Separação

Figura 48: separação



Fonte: próprio autor

Passo 4.2 – Expostas diretamente a água;

Figura 49: Barras submersas na água



Fonte: próprio autor

Passo 3.4.3 – Confecção de corpo de provas FCK 20, FCK 40;

Figura 50: corpos de prova



Fonte: próprio autor

Passo 3.4.4; Corpos de provas expostos a água;

Figura 51: corpos de prova exposta a água



Fonte: próprio autor

Passo 3.4.5; Rompimento dos corpos de provas;

Figura 52: Quebra dos corpos de provas



Fonte: próprio autor

Figura 53: Quebra dos corpos de provas



Fonte: próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES;

No experimento 1.0, em que as barras e vergalhões foram expostos ao ambiente natural, pode-se obter alguns resultados;

Figura 54; Tabela com medições antes e após a pintura

VERGALHOES	SEM INICIAL	EPOXI INICIAL	ZN INICIAL	SEM FINAL	EPOXI FINAL	ZN FINAL
ACO 13,5MM	13,5MM		13,5MM	13MM		13,5MM
ACO 10,5MM	10,5MM	11MM	11MM	9,8MM	11MM	11MM
ACO 8 MM	8MM	8MM	8,2MM	7,2MM	8MM	8,2MM
ACO 6,3MM	6,3MM	7MM	6,3MM	6,0MM	7MM	6,3MM
ACO 5MM	5MM	5,5MM	5,1MM	4,7MM	5,5MM	5,1MM

Fonte: próprio autor

Nesta tabela foi analisado que os vergalhões de aço que receberam tratamento por meio de pintura foram não tiveram nenhuma perda de seção ou de característica, entretanto os vergalhões que não receberam o tratamento de pintura tiveram uma perda de seção considerável e oxidação;

Figura 55; Tabela com medições após a exposição

BARRAS	INICIAL	FINAL
VIDRO 16MM	16MM	16MM
VIDRO 10MM	10MM	10MM
VIDRO 8MM	7MM	7MM
VIDRO 6,3MM	5,5MM	5,5MM
VIDRO 4,8MM	4,8MM	4,8MM

Fonte: próprio autor

Nesta tabela foi analisado que as barras de fibra de vidro que não receberam tratamento de pintura ou de qualquer outro meio de proteção, elas não tiveram nenhuma perda de seção ou de característica;

No experimento 2.0, em que as barras e vergalhões foram expostos ao ambiente de ácido alcalino , pode-se obter alguns resultados;

Figura 56; Tabela com medições antes e apos a pintura

VERGALHOES	SEM INICIAL	EPOXI INICIAL	ZN INICIAL	SEM FINAL	EPOXI FINAL	ZN FINAL
ACO 13,5MM	13,5MM		13,5MM	11,5MM		12,8MM
ACO 10,5MM	10,5MM	11MM	11MM	8,5MM	10MM	10MM
ACO 8 MM	8MM	8MM	8,2MM	6,3MM	6,4MM	6,5MM
ACO 6,3MM	6,3MM	7MM	6,3MM	5,0MM	5,8MM	5,9MM
ACO 5MM	5MM	5,5MM	5,1MM	4,2MM	5,1MM	5,1MM

Fonte: próprio autor

Nessa tabela foi analisado que os vergalhões de aço, tanto os que receberam tratamento com pintura ou não, tiveram grande perda de seção e de propriedades, já as barras de fibra de vidro não tiveram nenhuma perda de propriedade de seção, somente alteração de coloração para vermelho.

No experimento 3.0, em que as barras de fibra de vidro foram expostas a altas temperaturas – 350 – 400 – 450;

BARRAS	350 graus	400 graus	450 graus
Característica	Pequena mudanca de coloracao Baixo amolecimento da barra	Grande mudanca de coloracao Amolecimento acentuado	Grande mudanca de coloracao Amolecimento muito acentuado Comecando a esfumacar

Fonte: próprio autor

Nessa tabela foi analisado que as barras de vidro que são submetidas a altas temperaturas (aproximadas a de um incêndio), sofreram grande alteração de propriedades, sendo elas de coloração, físicas e rigidez.

No experimento 4.0, as barras de fibra de fibra de vidro foram expostas a água, sendo de duas maneiras, a primeira de forma direta e a segunda por meio de corpo de provas;

Figura 57: Quebra dos corpos de provas



Fonte: próprio autor

Figura 58: Quebra dos corpos de provas



Fonte: próprio autor

De acordo com os experimentos, foi analisado que as barras de fibra de vidro não tiveram nenhuma perda de composição ou de seção, tanto em meio direto com a água quanto com corpo de prova.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho pode se concluir que de acordo com os estudos que as barras de fibra de vidro em comparação com as barras de aço: 3x mais resistente, 2x mais em conta, 2x menos resistente à compressão, tem menor deformação plástica e módulo de elasticidade, maior durabilidade, utiliza um menor volume de concreto, tem uma maior aplicação em obras marítimas, maior resistência ao fogo, tem utilização aprovada somente em pisos, radiers, vergas, contra vergas, muro, calçadas e fundo de elevador, diminui a resistência à tração em ambientes alcalinos e em altas temperatura, tem melhor utilização as barras de fibra de vidro compostas por matriz vinílica e epóxi, pior utilização em barras de fibra de vidro com matriz à base de poliéster, a barra de fibra de vidro não tem nervura com isso tem menor aderência ao concreto permitindo-se giro tendo um espaçamento menor, sendo mais leve por ter menor massa linear e menor densidade e que quanto maior o diâmetro maior resistência à tração e maior resistência à temperatura com visualização que a barra de fibra de vidro possui um comportamento elastico ate a ruptura com pequeno patamar de escoamento, nao podendo ser dobradas para grandes diâmetros, tendo um alongamento menor e um maior custo do que as barras de aco na construcao civil.

Concluimos que as barras de fibra de vidro não perderam durabilidade em relação a carbonatação, de cloretos, de ácido clorídrico, água, alta temperatura e alcalinidade, tendo assim uma maior durabilidade do que as barras de aço ca-50 e ca-60 utilizadas na construção civil, com resultados comprovados por ensaios realizados in loco e em laboratório.

REFERÊNCIAS

ABBASI, A.; HOGG, P. J. Durability of glass fibre reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution. **Journal of Composites for Construction**, v. 21, p. 1-12, 2017.

ACI COMMITTEE 440. *ACI 440R-07: Report on Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) Reinforcement for Concrete Structures*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2007.

AL-SALLOUM, Y. A.; ALMUSALLAM, T. H.; EL-GAMAL, S. M. A.; AL-SAH, M. A. Durability of GFRP rebars in concrete environment. **Journal of Composites for Construction**, v. 17, n. 3, p. 309-321, 2013.

ALSAYED, S. H.; AL-SALLOUM, Y. A.; ALMUSALLAM, T. H.; EL-GAMAL, S. M. A. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 5, p. 2265-2271, 2012.

ARABI, N.; MOLEZ, L.; RANGEARD, D. Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: Microstructural observations of degradation. **Periodica Polytechnical Civil Engineering**, v. 62, p. 1-8, 2018.

ARAUJO, A.; PAES, J. L. R.; VERÍSSIMO, G. de S. Sistemas de vedação em alvenaria para edifícios de estrutura metálica: detalhamento com base na prevenção de manifestações patológicas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 8, n. 2, p. 27-45, 2013. doi: 10.11606/gtp.v8i2.8096.

ASHRAFI, H. R.; BIGDELI, H. R.; GINUEZM, G. H. A. Tensile behavior of GFRP bars at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 601-613, 2017.

BANTHIA, N. *Fiber reinforced concrete*. Vancouver: University of British Columbia, 2009.

BEBER, A. J. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BEIRAL, Wervethon Vieira. *Aderência entre concreto e barras lisas de polímero reforçado com fibra de vidro*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campo dos Goytacazes, 2012.

CARNIO, M. A. Panorama das atividades, discussões e cronograma para o lançamento de práticas recomendadas sobre concreto reforçado com fibras pelo CT 303. **Concreto & Construções**, São Paulo, n. 87, 2017.

CARVALHO, A. Fibras de vidro. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo, 1993. **Anais [...]**. São Paulo: EPUSP, 1993.

CATEB, Lucas Carvalho. *Concreto com Armadura de Fibra de Vidro*. 2011. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Gestão e Tecnologia na Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://vdocuments.mx/reader/full/monografia-lucas-cateb-rev-lucas-carvalho-cateb-concreto-com-armadura>. Acesso em: 05 ago. 2021.

CERONI, F. et al. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 857–868, 2006.

CHEN, Y.; DAVALOS, J. F.; RAY, I.; KIM, H. Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. **Composites Structures**, v. 78, p. 101–111, 2007.

COUTO, Iara Andrade. *Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero*. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/D.18.2007.tde-01102007-085339. Acesso em: 05 mar. 2022.

D'ANTINO, T.; PISANI, M. A.; POGGI, C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 141, p. 123–136, 2018.

DALFRÉ, G. M.; MAZZU, D. E. A. Estudo do comportamento de vigas de concreto armadas a flexão com armaduras não-metálicas de GFRP. **Revista Tecnológica**, v. 29, n. 2, p. 398-414, 25 mar. 2020.

DE PAOLI, M. A. *Degradação e Estabilização de Polímeros*. [S.l.: s.n.], 2009. 286 p. *Nota: Seu texto cita (DE PAOLI, 2008). A referência fornecida é de 2009. Verifique qual ano e detalhes (editora, local) são os corretos para a obra que você efetivamente usou e citou.*

FARIAS, Cristian Espíndola; ANTUNES, Elaine Guglielmi Pavei. *Análise comparativa entre vigas de concreto armadas com aço e barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) submetidas à flexão*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Ciências, Engenharias e Tecnologias, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/7129>. Acesso em: 05 mar. 2022. (Nota: O ano da publicação/defesa parece ser 2018, embora o texto diga "2019" antes do título).

FERGANI, H.; BENEDETTI, M. D.; OLLER, C. M.; LYNSDALE, C.; GUADAGNINI, M. Durability and degradation mechanisms of GFRP reinforcement subjected to severe environments and sustained stress. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 637–648, 2018.

GONÇALVES, R. M. et al. *Segurança nas estruturas: teoria e exemplos*. São Carlos: SET/EESC/USP, 2005.

GONZALEZ, L. C.; LEEMING, M. B. *Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering*. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003.

GOUVEIA, Juan Carlos de Freitas. *A construção em betão armado com armaduras de GFRP e o seu benefício financeiro a longo prazo*. 2017. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Madeira, Funchal, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.13/1779>. Acesso em: 1 mar. 2022.

HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. *Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering*. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.

ISIS CANADA. *Design Manual No. 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*. Winnipeg, MB: ISIS Canada Corporation, 2007. (Nota: Ajustado para um formato mais comum para manuais de design de organizações)

KUTZ, M. (Ed.). *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2. ed. Oxford: William Andrew, 2013. 936 p.

LU, C.; YANG, Y.; HE, L. Mechanical, and durability properties of GFRP bars exposed to aggressive solution environments. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 28, p. 11–23, 2021.

MARTIN, R. *Ageing of Composites*. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. 544 p.

MATOS, G. C. *A eficácia da fibrina rica em plaquetas em exodontias de terceiros molares inferiores: uma revisão de literatura*. 2021. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Odontologia) - Faculdade de Farmácia, Odontologia e Enfermagem, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. *Nota: Seu texto cita (MATOS, 2021) em um contexto de FRP. Esta referência é sobre odontologia. Por favor, verifique se esta é a obra correta que você citou.*

MAXWELL, A. S.; BROUGHTON, W. R.; DEAN, G.; SIMS, G. D. *Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials*. Teddington: National Physical Laboratory, 2005. (NPL Report DEPC MPR, n.16). 84 p.

MAZZÚ, Amanda D. E. *Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto*. 2020. 190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

MELO, R. H.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V. Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 3, p. 234-250, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0019>.

MICELLI, F.; NANNI, A. Durability of FRP rods for concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 491–503, 2004.

MOURA, Ruan Carlos de Araújo. *Análise da Durabilidade de Armaduras Poliméricas Reforçadas com Fibra de Vidro Submetidas ao Ambiente Alcalino e a Elevadas Temperaturas*. 2021. 176 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

NAJAFABADI, E. P.; OSKOU EI, A. V.; KHANEGHAHI, M. H.; SHOA EI, P.; OZBAKKALOGLU, T. The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 1138–1152, 2019.

PERUZZI, A. P. *Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PERUZZI, A. P. *Estudo das alternativas de uso da fibra de vidro sem características álcali resistente em elementos construtivos de cimento Portland*. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

REIS, Vítor Leonel Freitas. *Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57492/1/000141985.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2021.

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. Behaviour of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures. **Journal Composites for Construction**, v. 14, p. 353-360, 2010.

ROBERTO, Marli B. Vergalhões de Fibra de Vidro. **Mais Dinâmica**, Santa Catarina, v. 36, p. 26-28, ago./set. 2019. (Nota: ABNT geralmente usa mês abreviado. ex: ago./set.)

ROSA, I. C.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R.; BARROS, J. A. O. Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations. **Composites Part B: Engineering**, v. 160, p. 329–340, 2019.

SAWPAN, M. A. Effect of Alkaline Conditioning and Temperature on the Properties of Glass Fiber Polymer Composite Rebar. **Polymer Composites**, v. 38, p. 96–104, 2016. (Nota: ABNT geralmente usa 2017 se o artigo foi publicado online em 2016 mas formalmente no volume de 2017, mas use o ano que consta na publicação).

SAWPAN, M. A.; MAMUN, A. A.; HOLDSWORTH, P. G. Long term durability of pultruded polymer composite rebar in concrete environment. **Materials and Design**, v. 57, p. 616–624, 2014.

SCHWARTZ, M. M. *Composite materials handbook*. New York: McGraw-Hill, 1984.

SOARES, Arthur P. F. et al. Corrosão em armaduras de concreto. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas (UNIT)**, Maceió, v. 3, n. 1, p. 177-188, nov. 2015. (Nota: Ajustei para um formato mais completo de artigo).

TAVARES, Danusa Haick. *Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP*. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/D.18.2006.tde-22062006-105650. Acesso em: 22 ago. 2021.

TELES, M. *Patologia do Betão*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. (Apontamentos de Patologia dos Materiais). Disponível em: <www.fe.up.pt>. Acesso em: 22 ago. 2021.

TU, J.; XIE, H.; GAO, K. Prediction of the long-term performance and durability of GFRP bars under the combined effect of a sustained load and severe environments. **Materials**, v. 13, p. 1–18, 2020.

VARES, R. S. *Estudo do reforço à flexão de vigas biapoiadas em concreto armado com barras de fibra de vidro*. 2019. 172 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

WANG, J.; GANGARAO, H.; LIANG, R.; LIU, W. Durability, and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review. **Journal of Reinforced Plastics & Composites**, v. 35, p. 1–33, 2016.

WANG, Y. C.; WONG, P. M. H.; KODUR, V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. **Composite Structures**, v. 80, p. 131–140, 2007.

WEITSMAN, Y. J. *Fluid effects in polymers and polymeric composites*. New York: Springer, 2012. (Mechanical Engineering Series).

WON, J. P.; YOON, Y. N.; HONG, B. T.; CHOI, T. J.; LEE, S. J. Durability characteristics of nano-GFRP composites reinforcing bars for concrete structures in moist and alkaline environments. **Composite Structures**, v. 94, p. 1236–1242, 2012.

YIN, X.; LIU, Y.; MIAO, Y.; XIAN, G. Water absorption, hydrothermal expansion, and thermomechanical properties of a vinylester resin for fiber-reinforced polymer composites subjected to water or alkaline solution immersion. **Polymers**, v. 11, p. 3–11, 2019.

ZHU, H. G.; LEUNG, C. K. L.; KIM, J. K.; LIU, M. Y. Degradation of glass fiber-reinforced plastic composites containing nano clay in alkaline environment. **Journal of Composite Materials**, v. 45, p. 2147–2156, 2011.

ANEXOS

file:///C:/Users/felip/Downloads/Diretrizes%20Técnicas%20Vergafibra%20Composite%20(1).pdf

file:///C:/Users/felip/Downloads/Diretrizes%20Técnicas%20Vergafibra%20Composite%20(1).pdf

Drive com todos os anexos para download.

https://drive.google.com/drive/folders/1O_q-VrWZ2WDUHUIRXaotLH8U4S1a-aPl?usp=drive_link