



CAMPUS ARACAJU
COEC - COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
ALINE DE OLIVEIRA BARBOSA

VERGALHÕES DE FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO SOBRE DETERMINADAS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS

ARACAJU
2023

ALINE DE OLIVEIRA BARBOSA

VERGALHÕES DE FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO SOBRE DETERMINADAS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Instituto Federal de Sergipe como pré-
requisito para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Carla Cristina
Nascimento Santos Pereira

ARACAJU
2023

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Barbosa, Aline de Oliveira.

B238v Vergalhões de fibra de vidro: um estudo sobre determinadas características físicas, geométricas e mecânicas. / Aline de Oliveira Barbosa. – Aracaju, 2023.

72 f. : il.

Orientadora: Profª. Drª. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira. Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1. Vergalhão de GFRP. 2. Vergalhão de aço. 3. Resistência mecânica. 4. Resistência alcalina. I. Pereira, Carla Cristina Nascimento Santos. II. Título.

CDU 669.14

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia N° 256

**VERGALHÃO DE FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO SOBRE DETERMINADAS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS**

ALINE DE OLIVEIRA BARBOSA

Esta monografia foi apresentada às 10 h 15 do dia 13 de junho de 2023 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHARELA EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho da
Silva
(IFS – Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas Santos
(IFS – Campus Aracaju)


Prof. Dr. Carla Cristina Nascimento Santos
Pereira
(IFS – Campus Aracaju)
Orientador


Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

ALINE DE OLIVEIRA BARBOSA

VERGALHÕES DE FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO SOBRE DETERMINADAS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto
Federal de Sergipe como pré-
requisito para a obtenção do
grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Carla Cristina Nascimento Santos Pereira
Prof^a. Dra. do Instituto Federal de Sergipe

Euler Wagner Freitas Santos
Prof. MSc. do Instituto Federal de Sergipe

Marcilio Fabiano Goivinho da Silva
Prof. MSc. do Instituto Federal de Sergipe

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas experiências que tive, boas e ruins, que me levaram a ter disciplina e consciência sobre a minha força e dedicação, pois nuvens carregadas em meus olhos muitas vezes não permitiram enxergar a luz, mas a bondade do alto nunca me abandonou quando a vontade era de desistir. Iniciei o curso com 35 anos e estou concluindo com 42. Foi um grande desafio diante de olhares tortos e dificuldade na interação em meio a tantos adolescentes. Mas foi o que eu escolhi e não me arrependo pois estou em uma explosão de alegria por mais uma etapa concluída em minha vida, e que venham as próximas.

Agradeço aos meus familiares que me apoiaram e acreditam na minha vitória, em especial minha tia “Keka” que é o meu porto seguro, minha fortaleza e meu referencial de vida. Sinto um pesar por minha mãe não estar presente, em vida, para festejar junto com nossa família, mas sei que ela está feliz onde quer que esteja.

Aos meus colegas de trabalho, Ana Cléssia, Alan Santos, Dayvson Souza, Diná Faustino e Tiago Moura, que muitas vezes tiveram que me escutar em momentos de angústia, sei que não foi fácil para eles porque eu era muito repetitiva kkkkk. Agradeço também aos colegas e amigos que ajudaram diretamente no meu TCC, Danillo Sampaio, Elton Douglas, Érico Diego e Luciano Hora, e aos que me ajudaram no estágio, Tiago Moura e José Franco.

Aos professores que me inspiraram no sentido de fortalecer meu interesse e dedicação pelo curso, pois inicialmente me sentia bastante insegura. Me deparei com professores excelentes, muito capacitados e acessíveis, sei que ainda vou encontrá-los para tirar dúvidas.

A minha orientadora Prof^a. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira que aceitou a proposta de tema do nosso TCC que por sinal foi muito desafiadora. É uma professora com muita visão e que dá muita credibilidade às sugestões dos alunos.

Enfim, dedico esse trabalho a todos que me ajudaram direta ou indiretamente, torceram e estão efetivamente felizes por mim.

RESUMO

Tendo em vista as renovações tecnológicas na construção civil, a busca por materiais alternativos que visam aumentar a durabilidade das estruturas vem crescendo cada vez mais. É nesse cenário que surgem os estudos sobre os polímeros reforçados com fibras (FRPs - Fiber Reinforced Polymers). Nesse trabalho será apresentado o vergalhão de fibra de vidro (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymers), o qual se trata de um material composto por polímeros reforçados com fibra de vidro, e apresenta propriedades que podem substituir o aço ou reforçar as armaduras numa estrutura de concreto armado. Já existem normas orientadoras sobre a empregabilidade desse elemento estrutural em alguns Países como Estados Unidos e Canadá, porém no Brasil, essas normativas ainda não foram elaboradas. Para tanto, é necessário um aprofundamento nos estudos em relação ao comportamento desse material, e assim aplicá-lo de forma mais segura. Em termos de contribuição para esses estudos, o objetivo geral deste trabalho é encontrar e analisar as propriedades físicas, geométricas e mecânicas das barras GRFP, em comparação com barras de aço CA-50. Para tal finalidade foram realizados ensaios de caracterização física e geométrica de vergalhões de GFRP e de aço, de resistência à tração e de resistência alcalina de vergalhões de GFRP, por meio de amostras com diâmetros de 10mm e 12,5mm. Os resultados dos experimentos com as barras de fibra de vidro foram comparados com os das barras de aço, a fim de contribuir com as análises sobre o comportamento e a aplicação desse novo material nas armaduras de concreto armado.

Palavras-chave: Vergalhões de GFRP. Vergalhão de aço. Resistência mecânica. Resistência alcalina

ABSTRACT

In view of the technological renovations in civil construction, the search for alternative materials that aim to increase the durability of structures has been growing more and more. It is in this scenario that studies on fiber reinforced polymers (FRPs - Fiber Reinforced Polymers) arise. In this work, glass fiber rebar (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymers) will be presented, which is a material composed of polymers reinforced with glass fiber, and has properties that can replace steel or reinforce reinforcement in a steel structure. reinforced concrete. There are already guiding norms on the employability of this structural element in some countries such as the United States and Canada, but in Brazil, these norms have not yet been elaborated. Therefore, it is necessary to deepen the studies regarding the behavior of this material, and thus apply it more safely. In terms of contributing to these studies, the general objective of this work is to find and analyze the physical, geometric and mechanical properties of GRFP bars, in comparison with CA-50 steel bars. For this purpose, physical and geometric characterization tests of GFRP and steel rebars, tensile strength and alkaline resistance of GFRP rebars were carried out, using samples with diameters of 10mm and 12.5mm. The results of experiments with fiberglass bars were compared with those of steel bars, in order to contribute to the analysis of the behavior and application of this new material in reinforced concrete reinforcement.

Keywords: GFRP rebars. Steel rebar. Mechanical resistance. Alkaline resistance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Seção de uma barra de fibra.	15
Figura 2: Processo de Pultrusão das barras de GFRP.	17
Figura 3: Classificação das barras de FRP com base em seus constituintes e tipo de superfície.	17
Figura 4: Exemplos de barras de FRP de acordo com o acabamento superficial.	20
Figura 5: Gráficos tensão x deformação.	22
Figura 6: Exemplo de ancoragem nas extremidades da barra de fibra.	23
Figura 7: Conjunto para realização do ensaio de resistência ao cisalhamento horizontal de barras de GFRP.	24
Figura 8: Ponte Emma Park.	30
Figura 9: Paredão que protege a Rodovia Honoapiilani em Maui no Havaí.	31
Figura 10: Detalhe da camada de reforço com barras GFRP no fundo da viga.	31
Figura 11: Conjuntos de barras GFRP com 10mm e 12,5 mm de diâmetro para caracterização geométrica e física.	35
Figura 12: Conjuntos de barras de aço com 10mm e 12,5 mm de diâmetro para caracterização geométrica e física.	35
Figura 13: Verificação da altura das nervuras e espaçamento entre elas.	36
Figura 14: Configuração geométrica das barras de aço.	37
Figura 15: Conjunto formado por tubo de aço, ponteira e massa epóxi.	39
Figura 16: Suporte de madeira para montagem e alinhamento dos corpos de prova.	39
Figura 17: Ensaio de tração em vergalhões de fibra de vidro.	40
Figura 18: Corpo de prova com rompimento na resina durante o ensaio.	41
Figura 19: Corpo de prova com rompimento na extremidade da barra durante o ensaio.	41
Figura 20: Corpo de prova com rompimento no centro da barra durante o ensaio.	42
Figura 21: Corpo de prova com rompimento no centro da barra durante o ensaio.	42
Figura 22: Amostras de barras de GFRP preenchidas com resina epóxi.	43
Figura 23: Barras de GFRP imersas na solução alcalina.	51
Figura 24: Imagem microscópica da barra de 10 mm antes da imersão alcalina.	52
Figura 25: Imagem microscópica da barra de 10 mm após a imersão alcalina.	52
Figura 26: Imagem microscópica da barra de 12,5 mm antes da imersão alcalina.	53
Figura 27: Imagem microscópica da barra de 12,5 mm após a imersão alcalina.	53
Figura 28: Média dos resultados obtidos na caracterização física das barras para massa seca	54
Figura 29: Média dos resultados obtidos na caracterização física das barras para massa linear nominal	55
Figura 30: Média dos resultados obtidos na caracterização física das barras para densidade.	55
Figura 31: Médias dos resultados do ensaio de tração das barras GFRP comparadas com as de aço	58
Figura 32: Mediana dos resultados do ensaio de tração das barras GFRP comparadas com as de aço	58
Figura 33: Resistências Potenciais dos resultados do ensaio de tração das barras GFRP comparadas com as de aço.	59
Figura 34: Corpo de prova com desprendimento da nervura em relação a superfície.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das barras de GFRP conforme algumas propriedades.	18
Tabela 2: Requisitos para análise da área da seção transversal das barras GFRP.	20
Tabela 3: Requisitos para a altura das nervuras e o espaçamento entre elas.	21
Tabela 4: Variação máxima permitida para a massa nominal das barras de aço.	27
Tabela 5: Média das tensões máxima de tração das barras de aço.	28
Tabela 6: Propriedade das barras de GFRP apresentadas pelo fornecedor A.	33
Tabela 7: Propriedade das barras de GFRP apresentadas pelo fornecedor B.	34
Tabela 8: Resultados para os cálculos da densidade e massa linear nominal.	45
Tabela 9: Resultados para os cálculos da área da seção transversal e diâmetro efetivo.	46
Tabela 10: Resultados para o cálculo das nervuras.	47
Tabela 11: Resultados para os cálculos da massa linear nominal.	47
Tabela 12: Resultados para o cálculo da área da seção transversal e diâmetro efetivo.	48
Tabela 13: Resultados para o cálculo das nervuras.	48
Tabela 14: Resultados para verificação da resistência à tração das barras de GFRP.	49
Tabela 15: Resultados da massa das amostras antes do banho alcalino.	50
Tabela 16: Resultados da massa das amostras após o banho alcalino.	51
Tabela 17: Média dos resultados obtidos na caracterização geométrica das barras.	56
Tabela 18: Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência alcalina.	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS.....	14
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1.	HISTÓRICO SOBRE OS VERGALHÕES DE FRP	15
3.2.	PARTICULARIDADES DOS VERGALHÕES DE GFRP	16
3.2.1.	Composição.....	16
3.2.2.	Vantagens	17
3.2.3.	Método de fabricação	18
3.2.4.	Limitações	20
3.2.5.	Propriedades físicas e geométricas	21
3.2.6.	Propriedades mecânicas	23
3.2.7.	Durabilidade	26
3.3.	PARTICULARIDADES DOS VERGALHÕES DE AÇO	28
3.3.1.	Propriedades físicas e geométricas	28
3.3.2.	Propriedades mecânicas	29
3.3.3.	Durabilidade	30
3.4.	APLICAÇÃO DOS VERGALHÕES DE GFRP	31
3.5.	ESTUDOS REALIZADOS COM VERGALHÕES DE GFRP	33
4.	METODOLOGIA	35
4.1.	BARRAS DE GFRP E DE AÇO ENSAIADAS	35
4.2.	ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E GEOMÉTRICA DAS BARRAS	36
4.2.1.	Vergalhões de GFRP.....	38

4.2.2.	Vergalhões de aço	39
4.3.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS VERGALHÕES DE GFRP	40
4.3.1.	Corpo de prova considerados e desconsiderados	42
4.4.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA ALCALINA DOS VERGALHÕES GFRP	45
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
5.1.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	47
5.1.1.	Resultados para caracterização física e geométrica	47
5.1.1.1.	<i>Vergalhões de GFRP</i>	<i>47</i>
5.1.1.2.	<i>Vergalhões de aço</i>	<i>49</i>
5.1.2.	Resultados para caracterização mecânica das barras de GFRP	51
5.1.3.	Resultados do ensaio de resistência alcalina das barras GFRP	52
5.2.	DISCUSSÕES.....	56
6.	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE71	

1. INTRODUÇÃO

O aço é um dos materiais mais utilizado na construção civil no Brasil, principalmente quando se trata de armaduras em estruturas de concreto armado. Mas quando essa estrutura é exposta a ambientes agressivos, surgem problemas como a corrosão eletroquímica, e isso pode ocorrer devido a falhas de projeto e execução, falta de supervisão e manutenção, e falta de investigação quanto a agressividade da região na elaboração do projeto (MAZZÚ, 2020). Como exemplo desses ambientes têm-se as áreas industriais, regiões marítimas, locais com grande variação de temperatura, clima, nível de água e umidade. Devido a essa situação, Vares (2019) aponta a existência de estudos de materiais alternativos que possam substituir o aço ou reforçar as estruturas de concreto armado, e cita como um dos elementos desses estudos os Polímeros Reforçados com Fibras (FRPs - Fiber Reinforced Polymers) em forma de vergalhão.

Ao pesquisar trabalhos sobre esses materiais observou-se que os polímeros que mais se destacam são os reforçados com fibra de carbono (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymers), com fibra de basalto (BFRP - Basalt Fiber Reinforced Polymers), com fibra de aramida (AFRP - Aramid Fiber Reinforced Polymers) e com fibra de vidro (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymers). Esses últimos polímeros apresentam “alta resistência mecânica e boa resistência à agentes de agressividade ambiental, e são capazes de substituir as armaduras de aço em estruturas de concreto armado.” (MAZZÚ, 2020, pag.15).

Entre os mais pesquisados será apresentado neste estudo os polímeros reforçado com fibra de vidro (GFRP) em forma de vergalhão, com destaque para as suas características física, geométrica e mecânica, e para a sua durabilidade em ambientes alcalinos.

Vale destacar que apesar da busca por materiais alternativos que possam substituir o aço nas armaduras de concreto armado, o que se evidencia nos estudos sobre os vergalhões de GFRP, segundo Mazzú (2020), é que esse material também pode ser utilizado como reforço nessas estruturas, ou seja, a empregabilidade dessas barras pode ser mais viável como reforço nessas armaduras em combinação com o aço.

Para a verificação e análise das propriedades dos vergalhões de GFRP, citadas acima, serão realizados ensaios com amostras desse material e seus resultados serão comparados com os das barras em aço, já que o objetivo principal das barras de vidro é substituí-las. Para isso, serão utilizados estudos que ensaiaram barras de aço a fim de que os seus resultados sirvam como parâmetro para o comparativo em questão.

Embora haja insuficiência de pesquisas, cabe salientar que o tema é relevante tendo em vista a necessidade de aprofundamento dos estudos quanto as propriedades dos vergalhões de GFRP. E além disso, de acordo com Mazzú (2020), ainda não elaboraram normas brasileiras específicas. Sendo assim, é preciso verificar o comportamento e desempenho desses materiais para analisar a possibilidade de sua aplicação nas estruturas de concreto armado, de forma mais assertiva e segura.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é encontrar e analisar as propriedades físicas, geométricas e mecânicas das barras GRFP, em comparação com barras de aço CA-50.

Em relação aos objetivos específicos deste trabalho pode-se elencar:

- Caracterizar física e geometricamente as amostras de vergalhões de GFRP e de aço, considerando diâmetros de 10mm e 12,5mm;
- Verificar a resistência à tração das amostras de vergalhões de GFRP de 10mm e 12,5mm;
- Avaliar a durabilidade das amostras de vergalhões de GFRP, de 10mm e 12,5mm, em solução alcalina;
- Comparar os resultados dos ensaios de caracterização física e geométrica, de tração e de resistência alcalina das barras de GFRP com os das barras de aço.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. HISTÓRICO SOBRE OS VERGALHÕES DE FRP

Para Vares (2019) desde a Roma antiga que se busca aumentar a capacidade e a durabilidade das estruturas tendo em vista os novos usos das obras civis, mas, por falta de estudos experimentais mais aprofundados, os profissionais da área ainda se baseiam em técnicas fundadas em experiências empíricas. Ainda de acordo com a autora, dentre os materiais buscados para aumentar a capacidade e durabilidade das estruturas temos os polímeros reforçados com fibra (FRPs), materiais esses que devem ser estudados mais profundamente para que os mesmos, em forma de vergalhões, possam substituir ou auxiliar o aço nas armaduras estruturais de forma mais efetiva, e para isso devemos conhecer melhor seu comportamento em relação as deformações.

Os estudos com polímeros reforçados com fibra surgiram após a Segunda Guerra Mundial, época de avanços na indústria aeroespacial em que se exigia materiais resistentes, leves e baratos (CUNHA, 2019). Após algumas décadas observou-se a necessidade de buscar mais informações sobre os FRPs e documentá-las, pois, segundo Cunha (2019, p.19):

Em 1991, O American Concrete Institute (ACI) estabeleceu o Comitê 440 cuja missão era de desenvolver e documentar informações sobre polímeros impregnados com fibra – FRP. O primeiro produto deste comitê foi um relatório a respeito do estado da arte da utilização de armaduras de FRP para estruturas de concreto, o ACI 440R-96, cuja revisão mais recente é de 2007. Este mesmo comitê publicou, em 2001, a normativa ACI 440.1R-01, que prevê o dimensionamento de estruturas de concreto armadas com barras de FRP, cuja versão mais recente é de 2015 e, em 2004 publicou o código normativo ACI 440.3R-04, contendo os procedimentos para ensaio das barras de FRP, atualizado em 2012. Na Europa, o uso das barras de FRP começou na Alemanha, em 1986, com a construção de uma ponte rodoviária. [...] No Brasil, existem poucas pesquisas sobre o assunto e ausência de documentos normativos.

As barras de FRP ainda não são muito utilizadas em estruturas em concreto armado em comparação com o aço. De acordo com Mazzú (2020) os países que já desenvolveram normas para o dimensionamento de estruturas armadas com barras de FRP foram os Estados Unidos, Canadá e Japão, enquanto que o Brasil ainda não elaborou sua norma apesar de já demonstrar interesse, pois existe um grupo de

trabalho em conjunto com a ABECE/IBRACON para o desenvolvimento de uma recomendação nacional.

3.2. PARTICULARIDADES DOS VERGALHÕES DE GFRP

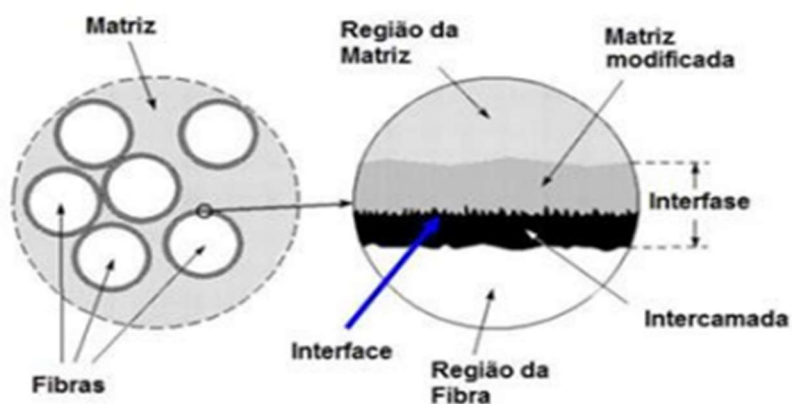
3.2.1. Composição

“Os compósitos de PRF consistem em dois constituintes principais: um constituinte de carga, ou seja, as fibras, e uma matriz polimérica (resina) utilizada como ligante e elemento de proteção das fibras.” (BERTON, 2019, pag. 16). Segundo Araújo (2017) a resina ou matriz polimérica de um compósito de FRP pode ser classificada como termorrígidas (termofixa), que são polímeros que não fundem após a reticulação, ou termoplástica, que são aqueles que fundem após a polimerização, ou seja, não desenvolvem reticulação e podem ser remodelados quando aquecidos. E em relação as fibras, o autor afirma que elas podem ser de vidro, carbono, aramida ou basalto. No caso dos vergalhões GFRP, cujas fibras são de vidro, Benmokrane *et al.* (2017) destaca que a resina (matriz polimérica) é termorrígida podendo ser epóxi, vinil éster e poliéster, com presença também de adições e aditivos.

Para Isis (2007) a escolha da matriz polimérica é de grande importância pois a mesma interfere de forma significativa nas propriedades mecânicas finais do material FRP. Em complemento a essa afirmação, Moura (2021) destaca que quando se trata dos vergalhões de GFRPs, os mesmos são compostos por uma combinação de fibras de vidro incorporadas a uma matriz através de uma interface onde ocorre a transferência de esforços mecânicos da matriz para as fibras e deve existir adequada compatibilidade química e física entre elas, pois caso isso não ocorra, pode acontecer o deslocamento físico que provavelmente surgem devido a mecanismos de degradação química na interface.

A figura 01 representa a seção de uma barra de fibra destacando a região da matriz polimérica, das fibras e da interface.

Figura 1: Seção de uma barra de fibra.



Fonte: Adaptado de RAY e RATHORE (2014) apud Moura (2021).

3.2.2. Vantagens

Ineia *et al.* (2021) apresenta algumas características positivas sobre os compósitos de fibra de vidro em barras:

- Trata-se de um material de fácil manejo, por possuir baixo peso específico, sendo necessário pouca manutenção durante o tempo de vida útil;
- São capazes de se adaptarem a fatores ambientais como corrosão e exposição à radiação ultravioleta, além de serem menos propensos a falhas por fadiga;
- Possuem alta resistência à tração, e não condutibilidade elétrica, térmica e magnética;
- Podem ser utilizados para otimização das infraestruturas em obras de engenharia tanto na fase de construção como restauração;
- Por possuírem leveza e durabilidade, podem ser utilizados na construção de estruturas como pontes, coberturas e edifícios.

Em relação a sustentabilidade, uma das premissas das barras de fibra de vidro é minimizar os impactos ambientais, bem como contornar as limitações e características físicas e químicas do aço (Ineia *et al.*, 2021). Quando o processo de fabricação e instalação ocorre de forma adequada os FRPs se configuram como um material durável e, portanto, sustentável em relação a sua aplicação nas estruturas de concreto, logo é importante conhecer as suas características mecânicas para que

as mesmas sejam potencializadas e melhor aproveitadas (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 440.9R, 2015). Além disso, a fabricação dos vergalhões de GFRP é mais sustentável que o aço, pois não é necessário a construção de barragens de rejeitos de minério de ferro (PAULA *et al.*, 2019).

3.2.3. Método de fabricação

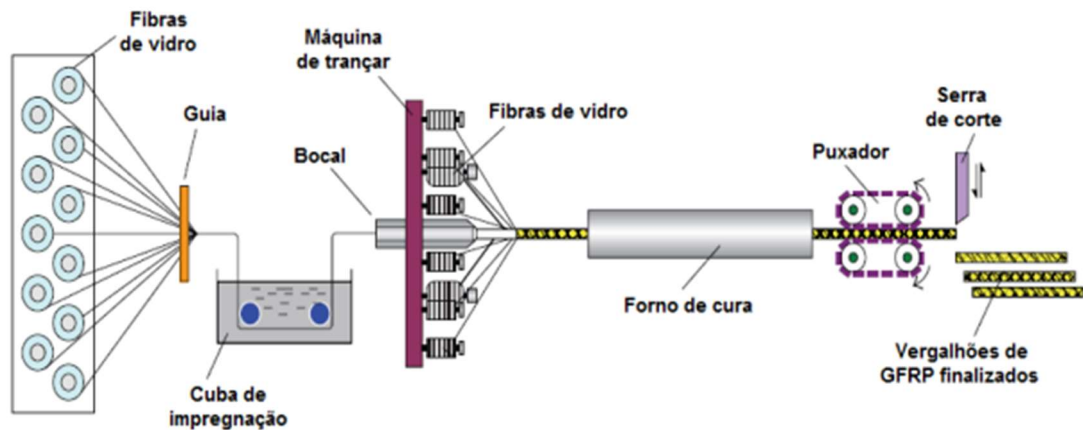
Os compósitos de FRP normalmente são fabricados através do processo de pultrusão que consiste em banhar as fibras em resina, tracioná-las unilateralmente e colocá-las em moldes para a cura (Cunha, 2019). Trata-se de um processo no qual as fibras são estiradas para uma área onde ocorre o banho de resina e em seguida são pré-moldadas no formato desejável para posterior aquecimento num molde de aço, e, por fim, o perfil pronto é puxado, resfriado e cortado (HENNEMANN; SILVA; SCHNEIDER, 2019). No caso dos vergalhões de fibra de vidro com nervuras helicoidais, ocorre a adição de fibras de vidro na sua superfície, e essa adição ocorre após o banho de resina e por um mecanismo giratório, para em seguida o material ser aquecido e depois cortado de acordo com o comprimento pretendido (SANTOS *et al.*, 2022).

Para Kersting (2004) algumas observações devem ser levadas em consideração quanto ao processo de pultrusão:

- Para evitar o emaranhamento, e nós nos fios, é indicado o uso de tubos vinílicos e cartões para uma melhor orientação das fibras;
- Deve-se controlar a temperatura de aquecimento da matriz, pois o excesso de calor pode gerar deficiência no produto como trincas, fissuras, redução da resistência à corrosão e das propriedades mecânicas;
- Deve-se permitir uma distância de três metros entre a saída da matriz e o dispositivo de estiramento, para que o processo de cura seja concluído a tempo, evitando que o perfil sofra danos externos;
- O corte do perfil deve ser realizado com serras especiais, de forma a permitir um corte tanto a seco quanto molhado.

A figura 02 apresenta uma ilustração do processo de pultrusão das barras de fibra de vidro.

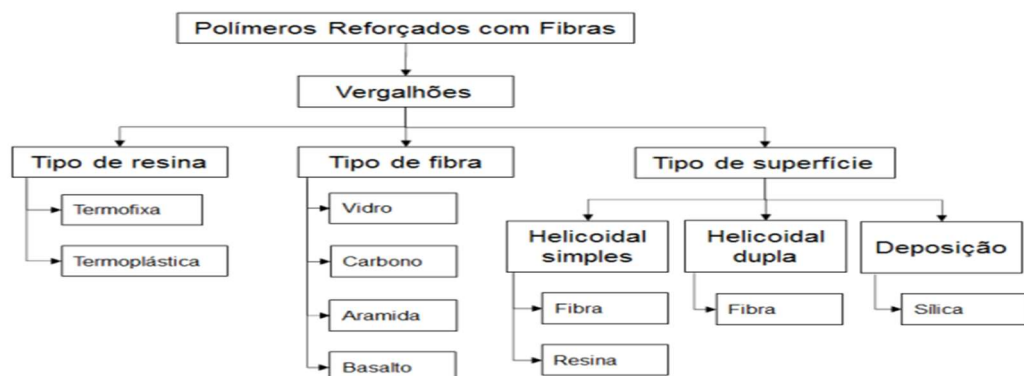
Figura 2: Processo de Pultrusão das barras de GFRP.



Fonte: Adaptado de YOU et al. (2015) apud Moura (2021).

Conforme a norma ASTM D7957 (2017) as barras de FRP são fabricadas em diâmetros que variam de 6,3 a 32,3 mm e classificadas de acordo com seus constituintes e tipo de superfície, como especificado na figura 03. A tabela 01 apresenta a classificação das barras de FRP de acordo com algumas propriedades. Nesse caso destaca-se a classificação das barras referentes aos diâmetros que serão analisados neste trabalho, ou seja, 10mm e 12,5mm.

Figura 3: Classificação das barras de FRP com base em seus constituintes e tipo de superfície.



Fonte: Adaptado da norma ASTM D7957 (2017) apud Moura (2021).

Tabela 1: Classificação das barras de GFRP conforme algumas propriedades.

PROPRIEDADES DOS VERGALHÕES	M10	M13
DIÂMETRO (mm)	9,5	12,7
ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (mm ²)	70,9	126,7
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	832,4	757,8

Fonte: Adaptado da norma ASTM D7957 (2017) apud Moura (2021).

3.2.4. Limitações

Para José (2013), apesar das barras de FRP possuírem leveza e alta resistência à corrosão e a tração, algumas características podem limitar sua aplicação, pois esses materiais não se comportam bem em relação à compressão; possuem baixa resistência ao cisalhamento (menor módulo de elasticidade em relação ao aço); possuem baixa resistência ao esforço cortante em vigas; e também apresentam um comportamento frágil, colapsando sem apresentar evidência de ruptura nas estruturas de concreto armado. Esses fatores acabam prejudicando na escolha desse material por parte dos projetistas estruturais.

Nesse sentido, Mazzú (2020) cita que alguns estudos propõem o uso das barras de FRP apenas como reforço estrutural, ou seja, essas barras podem reforçar estruturas de concreto armado já existente, sendo que devem ser evitadas quando se tratar de armaduras de compressão. Além disso, destaca que o dimensionamento para as armaduras com FRP é realizado seguindo os mesmos parâmetros para as barras em aço.

Quanto aos vergalhões de GFRP, Moura (2021, p.1) descreve:

Apesar das excelentes propriedades que apresentam, os vergalhões de GFRP não são imunes à degradação e podem ser afetados por [...] degradação química, térmica e/ou mecânica. Isso afeta a sua durabilidade e, mais especificamente, sua capacidade de manter seu desempenho estrutural em condições ambientais severas. [...] A vulnerabilidade dos polímeros orgânicos em elevadas temperaturas é provavelmente a maior desvantagem dos vergalhões de GFRP. Embora muitos exemplos de estruturas de concreto reforçado com vergalhões de GFRP estejam disponíveis em todo o mundo, elas são frequentemente estruturas para as quais o fogo não é uma condição de projeto significativa.

As limitações citadas acima em relação ao uso de vergalhões GFRP acaba por interferir mais ainda na escolha desse material na elaboração de projetos estruturais por parte dos profissionais, pois além da baixa resistência ao cisalhamento e

apresentar comportamento frágil, esses materiais apresentam baixa resistência à degradação química e vulnerabilidade em elevadas temperaturas. Sabe-se também que “a adoção de barras de GFRP é viável, porém, a sua utilização, em virtude da menor resistência de aderência quando comparada às barras de aço, requer maior comprimento de ancoragem para o adequado comportamento da estrutura.” (COUTO, 2007, p. 132).

“Uma outra particularidade destas barras é a dobra sua dobra, elas devem ser manufaturadas de forma pré-definida, conforme previsto em projeto, pois não se consegue dobrar em canteiro de obra.” (INEIA et al., 2021, p.246)

Ineia *et al.* (2021) afirma que na composição das barras de GFRP a fibra possui maior resistência que a resina, logo a fração volumétrica de fibras influencia na resistência à tração e rigidez das mesmas. Segundo o autor, outros fatores também afetam as características mecânicas dessas barras como: a taxa de cura, o controle de qualidade, o processo de fabricação e o diâmetro da seção transversal, pois uma barra de menor bitola possui maior resistência. Isso ocorre, segundo Moura (2021, p.55):

[...] devido ao movimento diferencial das fibras da superfície e as fibras do núcleo do vergalhão de GFRP, o que resulta em uma distribuição não uniforme de tensões normais através da sua seção transversal. A diferença entre essas tensões é maior em vergalhões de grande diâmetro, podendo causar redução na resistência à tração e ao cisalhamento interlaminar em comparação com os vergalhões de menor diâmetro.

3.2.5. Propriedades físicas e geométricas

Quanto as propriedades físicas, os vergalhões de GFRP possuem uma densidade bem menor quando comparada a do aço, pois de acordo com Gonçalves, apud Moura (2021), essa densidade varia entre 1,25 e 2,10 g/cm³, o que torna o material leve, reduzindo os custos com transporte e facilitando o manuseio durante a armazenagem ou utilização no local da construção. Para a determinação da densidade e da massa seca e submersa, a norma utilizada será a ASTM D792 - 2020.

Quanto às propriedades geométricas dos vergalhões GFRP, os tipos de acabamento superficial podem ser: nervurada com fibra enrolada helicoidalmente, nervurada com fibra enrolada helicoidalmente e revestida com areia e nervurada com

conformação na resina (D'ANTINO et al. apud MOURA, 2021, pag. 13). A figura 04 apresenta os tipos de vergalhões FRP em relação ao acabamento superficial.

Figura 4: Exemplos de barras de FRP de acordo com o acabamento superficial.



Fonte: ACI 440.1R (2015).

Para determinação das propriedades geométricas quanto a área da seção transversal e o diâmetro efetivo das amostras serão utilizadas as normas ASTM D7205/D7205M – 06 (Revisada em 2016) e ASTM D7957/D7957M - 2017. Esta última apresenta requisitos, expressos na tabela 02, com valores mínimos e máximos de áreas de acordo com o diâmetro das barras de GFRP, que servirão como parâmetro na análise dos resultados obtidos nos ensaios de determinação da área da seção transversal dessas amostras.

Tabela 2: Requisitos para análise da área da seção transversal das barras GFRP.

DIMENSÕES NOMINAIS		LIMITES DE ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL	
Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	MAX (mm ²)	MIN (mm ²)
6,3	32	55	30
9,5	71	104	67
12,7	129	169	119
15,9	199	251	186
19,1	284	347	268

Fonte: adaptado da norma ASTM D7957/D7957M – 2017.

Em relação aos requisitos para a análise das medidas das nervuras para a caracterização geométrica das amostras, será utilizada a norma ASTM A615/A615M – 2004 (ASTM 7957, 2017). Esta norma apresenta uma tabela que determina os preceitos para a geometria das nervuras. A tabela 03 destaca os requisitos em relação à altura das nervuras e o espaçamento entre elas. As ilustrações, quanto a geometria em questão, serão apresentadas na metodologia.

Tabela 3: Requisitos para a altura das nervuras e o espaçamento entre elas.

DIMENSÕES NOMINAIS		REQUISITOS DE DEFORMAÇÃO	
Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Espaçamento máximo médio (mm)	Altura mínima média (mm)
9,5	71	6,7	0,38
12,5	129	8,9	0,51
15,9	199	11,1	0,71
19,1	284	13,3	0,97

Fonte: Adaptado da norma ASTM A615/A615M – 2004.

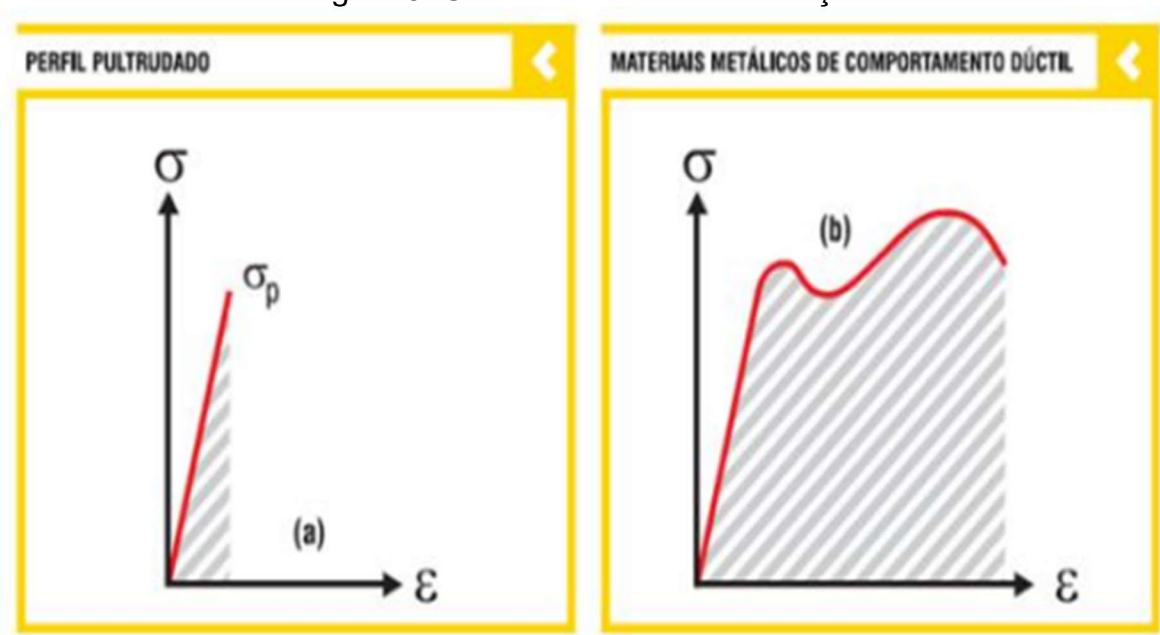
Serão adotados também os procedimentos apresentados em literaturas sobre o tema, que complementem, esclareçam e/ou facilitem os ensaios.

3.2.6. Propriedades mecânicas

Quanto às propriedades mecânicas das barras GFRP, tem-se a resistência à tração que, segundo Moura (2021), é regida pelas fibras de vidro, enquanto a resistência à compressão é regida pela matriz polimérica, o que leva esses vergalhões a apresentarem baixa resistência à compressão e alta resistência à tração. Além disso, de acordo com ACI 440.1R (ACI, 2015), as barras FRP alcançam a resistência última sem apresentar patamar de escoamento, indicando comportamento elástico linear e ruptura brusca, ou seja, apresentam comportamento frágil quando alcançam toda a sua capacidade de resistência. “Para as barras de fibra de vidro existe uma deformação máxima de 3%. Após ultrapassar esse valor, o material apresenta deformação plástica, com seu posterior rompimento” (VARES, 2019, Pag. 51).

Vares (2019) apresenta dois gráficos tensão x deformação (figura 05), um para materiais frágeis e outro para materiais dúcteis.

Figura 5: Gráficos tensão x deformação.



Fonte: Manual Técnico Stratus (2015) apud Vares (2019).

Será analisada neste trabalho a alta resistência à tração através de ensaios de amostras de barras de GFRP, e os seus resultados serão comparados com os das barras de aço obtidos nos experimentos do trabalho de Rezende (2017).

A norma ASTM D7205- 06 (Revisada em 2016) norteará a determinação da resistência à tração, descrevendo todo o ensaio e discorrendo sobre o método de ancoragem necessário aplicado nas extremidades do vergalhão em estudo. Essa ancoragem é recomendada pois essas barras não são resistentes ao cisalhamento, logo não suportariam a sua fixação nas garras do aparelho durante o ensaio sob carga de tração.

Os procedimentos da norma ASTM D7205- 06 (Revisada em 2016) devem ser obedecidos para evitar o escorregamento e desalinhamento da barra durante o ensaio, e garantir que o rompimento da amostra aconteça longe das extremidades. Por ser recomendada em várias pesquisas, essa norma é de grande importância, pois instrui o pesquisador a realizar um ensaio com resultados mais efetivos, garantindo assim a demonstração esperada sobre a alta resistência à tração das barras GFRP. Um exemplo de âncora é apresentado na figura 06.

Figura 6: Exemplo de ancoragem nas extremidades da barra de fibra.

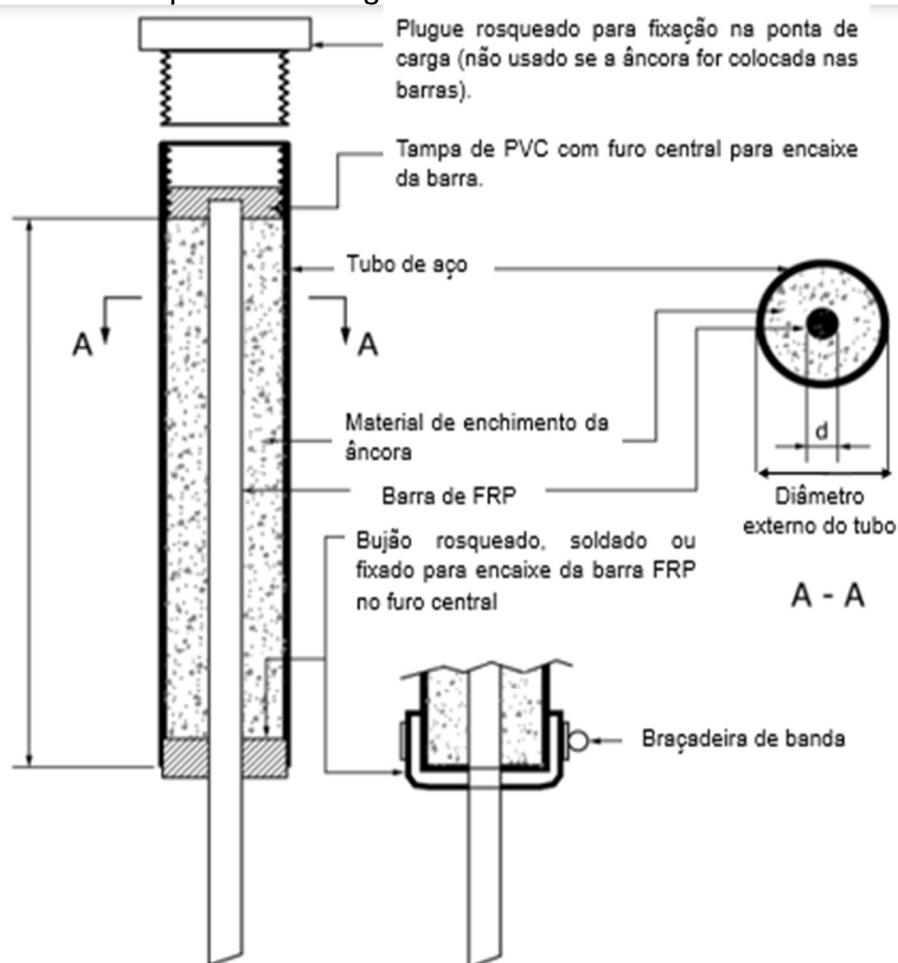
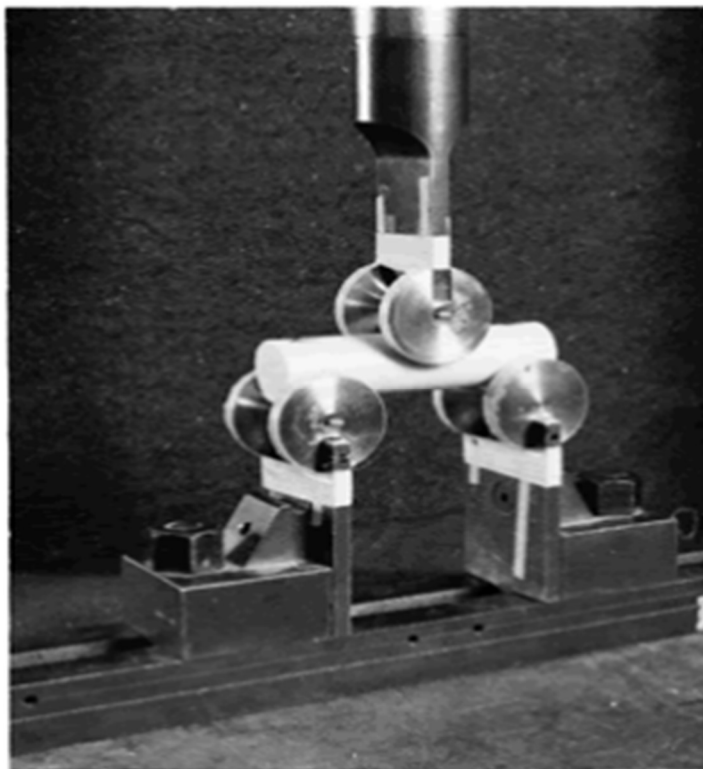


FIG. A1.1 Exemplo de detalhes da âncora

Fonte: ASTM D7205– 06 (Revisada em 2016).

Além da resistência à tração como propriedade mecânica, tem-se também a resistência ao cisalhamento das barras de GFRP. A norma ASTM D4475 (ASTM, 2016) descreve o método de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento horizontal em polímeros reforçados com fibra. Esse método consiste em acomodar a amostra sobre dois apoios, como mostra a figura 07, permitindo assim a flexão desse corpo de prova através de uma carga aplicada no ponto médio ao longo do vão de apoio. O corpo de prova é defletido até que ocorra uma ruptura por cisalhamento no plano médio da haste apoiada horizontalmente.

Figura 7: Conjunto para realização do ensaio de resistência ao cisalhamento horizontal de barras de GFRP.



Fonte: ASTM D4475 (ASTM, 2016).

Em seus ensaios, Moura (2021) detectou que a resistência ao cisalhamento das barras GFRP diminuem quando aumenta o seu diâmetro ou quando são imersas em solução alcalina combinada com altas temperaturas.

Não será possível realizar o ensaio de resistência ao cisalhamento neste estudo pois os laboratórios não possuem os acessórios especificados na norma.

3.2.7. Durabilidade

Quanto a durabilidade, segundo Moura (2021) os vergalhões de GFRP possuem resistência à corrosão eletroquímica, no entanto, a sua durabilidade e resistência mecânica podem ser reduzidas em ambientes alcalinos, em ambientes com elevadas temperaturas, em ciclos de gelo/degelo e em exposição à radiação ultravioleta. Ou seja, sofrem deterioração severas nesses ambientes, com formação de fissuras induzidas por hidrólise e descolamento na interface fibra/matriz, e essa degradação se inicia na matriz polimérica (MOURA, 2021). Ainda de acordo com o autor, a redução da durabilidade depende de fatores como o tipo de fibra e matriz, processo

de fabricação e ambientes de exposição, fazendo com que a avaliação da durabilidade das barras de GFRP nos elementos de concreto armado seja um trabalho complexo e multidimensional.

“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.*, apud Moura, 2018, pag. 19), ou seja, em consequência do aumento da alcalinidade “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.*, apud, Moura, 2021, pag. 21). Em ambientes alcalinos ocorre um rápido processo de deterioração que envolve perdas de força e peso das barras de GFRP (ARABI *et al.*, 2018).

Para o ensaio de determinação da durabilidade das barras GFRP em ambientes alcalinos será utilizada neste trabalho a norma ASTM D7705/D7705M - 12 (Revisada em 2019). Essa norma apresenta três procedimentos (A, B e C) que fornece os requisitos para a imersão de amostras em solução alcalina a temperatura de 60°C por um período de tempo, gerando assim uma degradação higrotérmica, ou seja, uma deterioração em condições de temperatura e umidade. Iremos utilizar o procedimento A porque trata-se de um método que não envolve aplicação de tração durante a imersão das amostras em solução alcalina, pois o nosso laboratório não tem suporte para tal metodologia.

De acordo com a norma, a solução alcalina deve ser uma composição representativa da água dos poros dentro do concreto de cimento Portland, e sugere uma composição com água da torneira e adição de hidróxidos para manter o nível de pH exigido.

A norma em questão orienta que a solução deve ter um valor de pH inicial de 12,6 a 13,0 e deve ser coberta antes e durante o ensaio para evitar a interação com o CO₂ atmosférico e assim impedir a evaporação. E deve também ser monitorada pelo menos a cada cinco dias e ajustada, se necessário, para manter o pH na faixa esperada, adicionando hidróxidos (para aumentar o pH) ou adicionando água (para diminuir o pH), na proporção das razões dadas para a solução inicial.

Através desse ensaio será possível verificar, após o banho em solução alcalina a uma determinada temperatura e período, a variação da massa e a aparência superficial das amostras. Para a análise da aparência das amostras antes e após o

banho alcalino, será comparado a condição da cor, da superfície e da mudança de forma.

3.3. PARTICULARIDADES DOS VERGALHÕES DE AÇO

3.3.1. Propriedades físicas e geométricas

No que se refere as características geométricas das barras de aço, existem algumas diferenças em comparação com as de GFRP, principalmente quanto as disposições das nervuras. De acordo com a norma ABNT NBR 7480:2007 as barras da categoria CA-50 devem seguir as seguintes configurações geométricas:

- Devem possuir nervuras transversais oblíquas;
- Os eixos das nervuras transversais oblíquas devem formar um ângulo entre 45° e 75° com a direção do eixo da barra;
- Possuir no mínimo duas nervuras longitudinais contínuas e diametralmente opostas, evitando assim o giro da barra dentro do concreto, exceto quando as nervuras transversais oblíquas estejam posicionadas de forma a impedir esse giro;
- Para diâmetros nominais maiores ou iguais a 10,0 mm, a altura das nervuras oblíquas deve ser igual ou superior a 4% do diâmetro nominal; enquanto que para os diâmetros menores que 10,0 mm, a altura deve ser igual ou maior a 2% do diâmetro nominal;
- O espaçamento médio das nervuras deve estar entre 50% e 80% do diâmetro nominal;
- A projeção das nervuras transversais oblíquas na seção transversal deve abranger no mínimo 85% do perímetro nominal da seção transversal.

Com relação a densidade do aço, em kg/m^3 , tem-se o valor fixo citado na norma ABNT NBR 7480/2007 que é de 7850 kg/m^3 . Quanto a massa real das barras de aço, no que se refere a propriedade física, essa mesma norma especifica que deve ser igual à sua massa linear nominal (kg/m), com tolerâncias de acordo com a tabela 04.

Tabela 4: Variação máxima permitida para a massa nominal das barras de aço.

DIÂMETRO NOMINAL (mm)	ÁREA DA SEÇÃO (m ²)	DENSIDADE (kg/m ³)	MASSA LINEAR NOMINAL (kg/m)	MÁX. VARIAÇÃO PERMITIDA PARA MASSA LINEAR NOMINAL
6,3	31,2 x 10 ⁻⁶	7850	0,245	± 7%
8,0	50,3 x 10 ⁻⁶	7850	0,395	± 7%
10,0	78,5 x 10 ⁻⁶	7850	0,617	± 6%
12,5	122,7 x 10 ⁻⁶	7850	0,963	± 6%
16,0	201,1 x 10 ⁻⁶	7850	1,578	± 5%
20,0	314,2 x 10 ⁻⁶	7850	2,466	± 5%
22,0	380,1 x 10 ⁻⁶	7850	2,984	± 4%

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 7480/2007.

A massa linear nominal é obtida pela equação (3) apresentada abaixo:

$$\text{Massa real} = M_l = A \times \rho \quad (3)$$

Onde:

ρ é a densidade do aço que corresponde ao valor fixo de 7850 kg/m³;

M_l é a massa linear nominal (kg/m);

A é a área da seção nominal (m²).

3.3.2. Propriedades mecânicas

Em relação as propriedades mecânicas das barras de aço, também se têm a resistência à tração, e as normas que descrevem esse método de ensaio são ABNT NBR ISO 6892:2022 e ABNT NBR ISO 1563.

A norma ABNT NBR 7480:2007 apresenta uma tabela (tabela B.3) que destaca, entre outras informações, os valores mínimos de tração para barras de aço destinadas a armaduras para concreto armado. No caso da categoria CA-50 a norma informa que a resistência característica de escoamento deve ser no mínimo 500 MPa e o limite de resistência de 1,08fy.

Como parâmetro para este trabalho, serão destacados os resultados dos ensaios de resistência à tração do aço realizados por Rezende (2017) e descritos na tabela 05. Serão considerados os valores referentes a marca ArcelorMitta utilizada no ensaio desse autor. Esses resultados serão comparados com os resultados encontrados nesse trabalho durante o ensaio de tração com barras GFRP.

Tabela 5: Média das tensões máxima de tração das barras de aço.

DIÂMETRO NOMINAL (mm)	MÉDIA DA TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO (MPa)	MEDIANA DA TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO (MPa)	RESISTÊNCIA POTENCIAL (MPa)
10	794,26	792,58	804,10
12,5	761,28	761,28	762,69

Fonte: Adaptado de Rezende (2017).

3.3.3. Durabilidade

Amorim (2010) aponta a carbonatação como uma das principais causas que prejudicam a durabilidade do concreto, ou seja, a carbonatação diminui o pH a níveis menores que 9,5 fazendo com que o concreto perca a camada protetora da armadura, gerando assim a corrosão da mesma.

Quanto ao emprego do aço nas armaduras do concreto armado, Amorim (2010, p.51) aponta a carbonatação como uma das principais causas que prejudicam a durabilidade do concreto e destaca que a carbonatação:

[...] ocorre quando o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com umidade existente no interior dos poros de concreto transformando o hidróxido de cálcio com pH elevado, em carbonato de cálcio que tem um pH mais neutro. O pH do concreto é alcalino, em torno de 12 a 13 e possui uma camada que protege as armaduras, com a reação do dióxido de cálcio e os elementos contidos na pasta de cimento, o pH do concreto abaixa deixando a camada passivadora que protege o aço vulnerável [...]. Com a perda da alcalinidade do concreto e a consequente despassivação da armadura, forma-se uma célula de corrosão. [...]. O cobrimento adequado das armaduras é fator importante para proteção contra corrosão, pois atua como barreira física e química. [...]. A barreira química é conseguida pela alcalinidade do concreto que forma uma película de proteção ao aço.

Sendo assim, a resistência em relação a ambientes alcalinos é diferente para os vergalhões de aço em comparação com os vergalhões de GFRP. No primeiro esse

ambiente é favorável para a sua proteção enquanto no segundo provoca a sua degradação com perda da sua resistência mecânica, variação do seu peso, entre outros prejuízos.

3.4. APLICAÇÃO DOS VERGALHÕES DE GFRP

Quanto a aplicação dos vergalhões de fibra de vidro, aqui no Brasil ainda é uma novidade. Sites de fabricantes de vergalhões de GFRP apresentam informações sobre os possíveis empregos dessas barras na construção civil. Segue abaixo algumas informações extraídas desses sites:

- Composite Group Brasil (empresa multinacional): de acordo com a empresa as barras de GFRP podem ser empregadas em pisos, contrapisos, obras costeiras e marítimas, túneis, indústrias químicas, pontes, rodovias e viadutos;
- CPB Concreto Projetado do Brasil: segundo a empresa essas barras podem ser empregadas em armaduras de concreto armado em locais sujeitos a corrosão intensa e maresia, reforço na frente de túneis para escavação mecanizada em segurança, estabilização de galerias pela aplicação radial de ancoragem e seu posterior alargamento por fresas, ancoragem sistemática e pregagem da frente de escavação;
- Korthfiber – de acordo com a empresa os vergalhões de fibra de vidro podem ser empregados em instalações médicas e científicas por ser um material não condutor e não magnético.

Estudos também investigam sobre as possibilidades de emprego das barras de GFRP na construção civil:

- Pesquisa realizada pelos autores França, Santos e Demétrio (2015) conclui que, devido a praticidade e agilidade que a leveza do material proporciona, é viável a utilização desses vergalhões como reforço em maciços terrosos através da técnica de grampeamento do solo, especialmente como contenção na frente de túneis, a exemplo das obras do novo Rodoanel;

- Pesquisa realizada pela autora Berton (2019) apresenta uma lista com algumas obras realizadas no Brasil, extraída do acervo de obras do fabricante STRATUS FRP, que utilizaram vergalhões de fibra de vidro: Metrô de Fortaleza, Metrô de São Paulo, nas Praças de pedágio na Rodovia Dom Pedro e nos Túneis do Rodoanel em São Paulo;
- O Guia para Projeto e Construção de Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibra – ACI 440.1R-15 (2015), apresenta algumas aplicações de barras de GFRP na construção civil a exemplo de tabuleiros de pontes e salas de hospital de ressonância magnética. O guia também cita algumas obras construídas nos Estados Unidos:
 - ✓ Ponte Emma Park, em Utah, construída em 2009; 3,9km de rodapés ferroviários em Miami, conectando a Estação Earlington Hrights ao Miami Intermodal Center pois as barras de fibra de vidro fornecem insolação elétrica no leito do trilho;
 - ✓ Paredão que protege a Rodovia Honoapiilani em Maui no Havaí, que precisou substituir as barras de aço por barras de GFRP em 2012;
 - ✓ Deck da ponte I-635 sobre a State Avenue, em Kansas City, no tapete superior e inferior dos painéis do convés usados na ponte.

As figuras 08 e 09 destacam duas obras realizadas nos Estados Unidos apontadas no Guia citado acima, que utilizaram vergalhões de GFRP.

Figura 8: Ponte Emma Park.



Fonte: ACI 440.1R-15 (2015).

Figura 9: Paredão que protege a Rodovia Honoapiilani em Maui no Havaí.



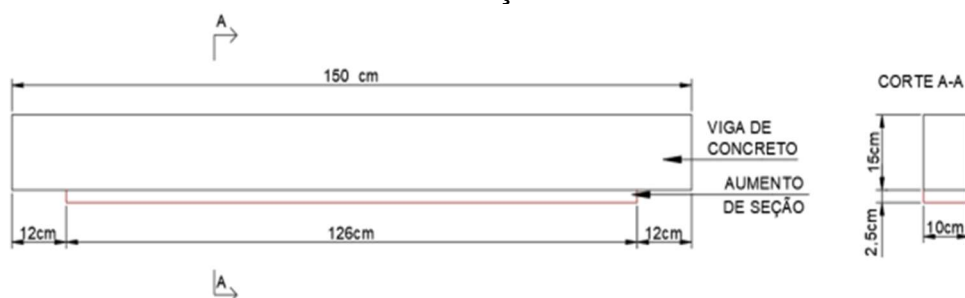
Fonte: ACI 440.1R-15 (2015).

3.5. ESTUDOS REALIZADOS COM VERGALHÕES DE GFRP

Moura (2021) realizou, com vergalhões de GFRP, ensaios de tração direta e de resistência alcalina com diferentes pHs, temperatura e períodos de exposição. No ensaio de tração direta o autor identificou uma redução da resistência à medida que o diâmetro da barra aumentava. No de resistência alcalina o autor verificou uma redução na resistência à tração e aumento da absorção de água à medida que aumenta o pH, a temperatura e o período de exposição.

Vares (2019, p.14) buscou em seus estudos verificar o aumento da capacidade estrutural das vigas reforçadas com barras de fibra de vidro. Para isso, foram executadas vigas com armaduras de aço e com um reforço na parte inferior contendo uma camada constituída com barras de GFRP e argamassa estrutural, de acordo com a figura 10.

Figura 10: Detalhe da camada de reforço com barras GFRP no fundo da viga.



Fonte: Vares (2019, p.63).

Foram ensaiadas vigas com e sem o reforço com barras de GFRP, e foi observado pela autora que as vigas com reforço apresentaram um bom desempenho nos ensaios de flexão, e esse desempenho aumenta à medida que aumenta o diâmetro das barras.

4. METODOLOGIA

Os ensaios de caracterização física e geométrica dos vergalhões de fibra de vidro e de aço foram realizados no laboratório de Materiais de Construção, bem como o ensaio de resistência à tração dos vergalhões de GFRP. O ensaio de resistência alcalina dos vergalhões GFRP ocorreu no laboratório de ciências da natureza. Ambos os laboratórios localizados no Instituto Federal de Sergipe, *campus* Aracaju. Para todos os ensaios descritos abaixo foram utilizadas as normas já citadas no referencial teórico.

4.1. BARRAS DE GFRP E DE AÇO ENSAIADAS

Os diâmetros dos vergalhões de fibra de vidro e de aço ensaiados foram de 10mm e 12,5mm. Os de fibra de vidro foram adquiridos por fornecedores diferentes, ou seja, no fornecedor A adquiriu-se as barras de 10mm e no fornecedor B adquiriu-se as barras de 12,5mm. As barras de aço utilizadas no ensaio de caracterização física e geométrica foram coletadas de sobras de obras. Não foi possível a aquisição desse material através dos fabricantes pois só forneciam em grandes quantidades. Os dados apresentados pelos fornecedores A e B quanto às propriedades física e mecânica das barras de GFRP estão descritos nas tabelas 06 e 07, respectivamente.

Tabela 6: Propriedade das barras de GFRP apresentadas pelo fornecedor A.

PARÂMETRO	VERGALHÃO DE AÇO	VERGALHÃO DE FIBRA DE VIDRO	BENEFÍCIOS
Resistência à tração (MPa)	500	1000	Mais forte
Peso metro linear (8mm)	0,395kg	0,080kg	Mais leve
Tamanho de barra	12m	Até 100m	Melhor aproveitamento
Durabilidade embutido no concreto	50 anos	(+) 100 anos	Mais durável
Durabilidade embutido no concreto em classe de agressividade III e IV	(+/-) 5 anos	(+) 100 anos	Mais durável
Resistência a corrosão	Não	Sim	Mais durável
Condutividade elétrica	Sim	Não	Sem riscos de acidentes
Condutividade térmica	Sim	Não	Não dissipa calor
Cobrimento de concreto em classe de agressividade III e IV	35mm a 45mm	20mm	Menor volume de concreto

Fonte: <https://www.madareli.com.br>.

Tabela 7: Propriedade das barras de GFRP apresentadas pelo fornecedor B.

PROPRIEDADES	AÇO	GFRP
Resistência à tração (MPa)	500	1000/915
Módulo de elasticidade E (MPa)	210	50/46
Resistência à compressão f_c (MPa)	390	330
Resistência ao cisalhamento f_v (MPa)	273	180
Tensão de aderência ao concreto (MPa)	-	13,25
Coefficiente de expansão térmica ($m^{\circ}C$)	12 $um/m^{\circ}C$	0,16 $um/m^{\circ}C$
Densidade (g/cm^3)	7,8	2,18
Durabilidade	+/- 5 anos	+/- 50 anos

Fonte: <https://www.meucompressor.com.br>.

4.2. ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E GEOMÉTRICA DAS BARRAS

Considerando as propriedades físicas e geométricas dos vergalhões de GFRP e de aço, foram realizados ensaios de amostras desses materiais com procedimentos para determinação da massa do material seco e submerso, comprimento, volume, altura das nervuras e o espaçamento entre nervuras. A massa seca serviu como base para o cálculo da densidade das barras de fibra de vidro e também serviu para identificar o seu percentual de leveza em comparação com a massa das barras de aço.

No que tange a massa linear nominal (kg/m), tanto para barras de GFRP quanto para as de aço, multiplicou-se a área da seção transversal efetiva pela densidade.

Nos experimentos para caracterização física e geométrica foram necessários 02 conjuntos de amostras tanto para as barras de GFRP como para as barras de aço, conjuntos esses representados nas figuras 11 e 12, respectivamente. As barras de GFRP estudadas nesse trabalho foram as nervuradas com fibra enrolada helicoidalmente.

Utilizou-se as amostras e equipamentos de acordo com o descrito abaixo:

- 05 amostras de barras de GFRP com 10 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento;
- 05 amostras de barras de GFRP com 12,5 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento;

- 05 amostras de barras de aço com 10 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento;
- 05 amostras de barras de aço com 12,5 mm de diâmetro de 150 mm de comprimento;
- Paquímetro para medir o comprimento exato das amostras, bem como a altura das nervuras e espaçamento entre elas;
- Balança eletrônica de precisão 0,01g para a pesagem das amostras secas;
- Balança hidrostática para pesagem das amostras submersas;
- Proveta gradual em 100mL para medição dos volumes das amostras.

Figura 11: Conjuntos de barras GFRP com 10mm e 12,5 mm de diâmetro para caracterização geométrica e física.



Fonte: Autora.

Figura 12: Conjuntos de barras de aço com 10mm e 12,5 mm de diâmetro para caracterização geométrica e física.



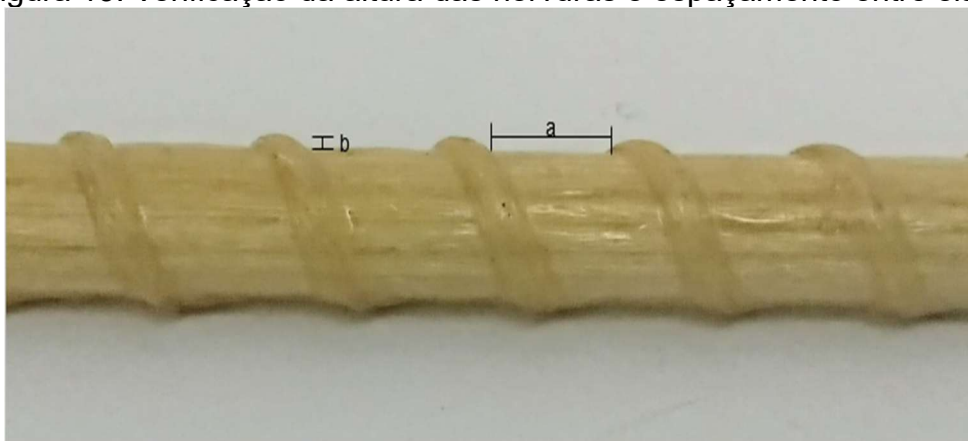
Fonte: Autora.

Com os valores obtidos nesses ensaios foi possível realizar o comparativo entre os resultados das barras de GFRP e das barras de aço.

4.2.1. Vergalhões de GFRP

Para a caracterização geométrica das barras de GFRP, a figura 13 destaca como procedeu-se a verificação da altura das nervuras (b) e espaçamento entre elas (a). Os valores adquiridos nessa caracterização serão analisados de acordo com os apresentados na norma.

Figura 13: Verificação da altura das nervuras e espaçamento entre elas.



Fonte: Autora.

Para o cálculo da área da seção transversal e do diâmetro efetivo das barras de GFRP foram utilizadas as equações (4) e (5), respectivamente, de acordo com as instruções das normas, bem como os procedimentos utilizados por Moura (2021):

- Área da seção transversal (A):

$$A = \text{Volume} / \text{Comprimento} \quad (4)$$

- Diâmetro efetivo (D):

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (5)$$

Para o cálculo da densidade das barras de GFRP, nos procedimentos para caracterização física desse material, foi utilizada a equação (6):

$$D^{23C} = sp\ gr\ 23/23^{\circ}C \times 997,5 \quad (6)$$

onde:

$$sp\ gr\ 23/23^{\circ}C = \text{densidade relativa} = \frac{a}{a-b};$$

a = massa seca ao ar, em g;

b = massa completamente submersa em água, em g;

997,5 = densidade da água a 23°C, em kg/m³;

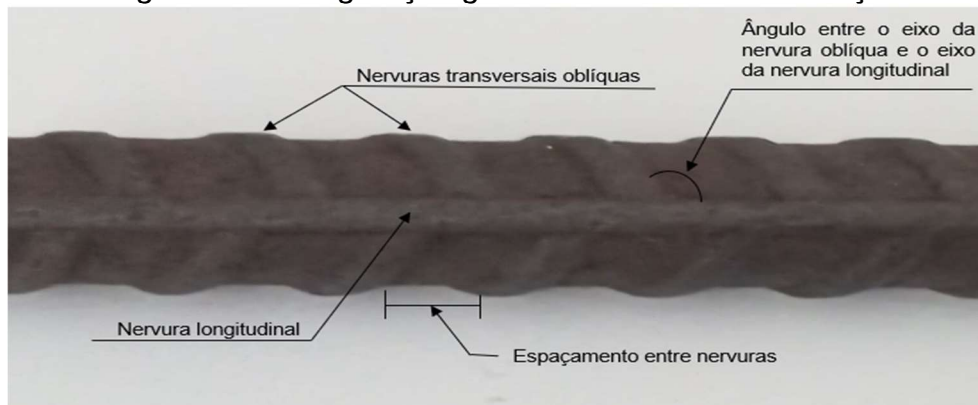
D^{23C} = densidade

O valor da densidade da água expresso na equação acima está presente na norma ASTM D792 - 2020.

4.2.2. Vergalhões de aço

Para a caracterização geométrica das barras de aço verificou-se as nervuras, ângulos e espaçamentos entre nervuras, regiões essas representadas na figura 14, para posterior análise quanto aos parâmetros apresentados em norma. E para o cálculo da área da seção transversal e do diâmetro utilizou-se o mesmo procedimento das barras de GFRP.

Figura 14: Configuração geométrica das barras de aço.



Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 7480:2007.

Em relação a densidade do aço, durante a caracterização física, utilizou-se o valor fixo de 7850 kg/m^3 , valor esse expresso na norma de especificação do aço para estruturas.

4.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS VERGALHÕES DE GFRP

No ensaio de resistência à tração das barras GFRP foi utilizado o método de ancoragem nas extremidades das amostras recomendado pela norma específica. Para essa ancoragem a norma sugere o uso de tubos de aço, e para o preenchimento entre tubo e barra indica a resina polimérica, argamassa expansiva ou resina com areia (1:1). Utilizou-se as amostras e equipamentos de acordo com o descrito abaixo:

- 05 amostras de barras de GFRP com 10 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento;
- 05 amostras de barras de GFRP com 12,5 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento;
- Tubos de aço carbono de 33,7mm de diâmetro, 2,65 mm de espessura e 30 mm de comprimento;
- Resina epóxi para enchimento entre a barra e o tubo;
- Ponteiras de 33,7 mm de diâmetro, tipo plugs, para fechamento dos tubos de aço;
- Suporte de madeira, tipo prateleira com furos centralizados, para alinhamento dos corpos de prova no momento do enchimento entre a barra e o tubo;
- Máquina de ensaio de tração Emic MUE 100.

Para o método de ancoragem foram cortados tubos de aço carbono e utilizadas as ponteiras para fechamento desses tubos. Foi utilizada também massa epóxi moldada no interior das ponteiras para ajudar na centralização das barras dentro dos tubos. Esse conjunto está representado na figura 15.

Figura 15: Conjunto formado por tubo de aço, ponteira e massa epóxi.



Fonte: Autora.

Quanto ao preenchimento entre tubo e barra, foram utilizados adesivos estruturais à base de resina epóxi (SIKADUR 32 e COMPOUND), e para a montagem e alinhamento dos corpos de prova construiu-se um suporte de madeira representado na figura 16.

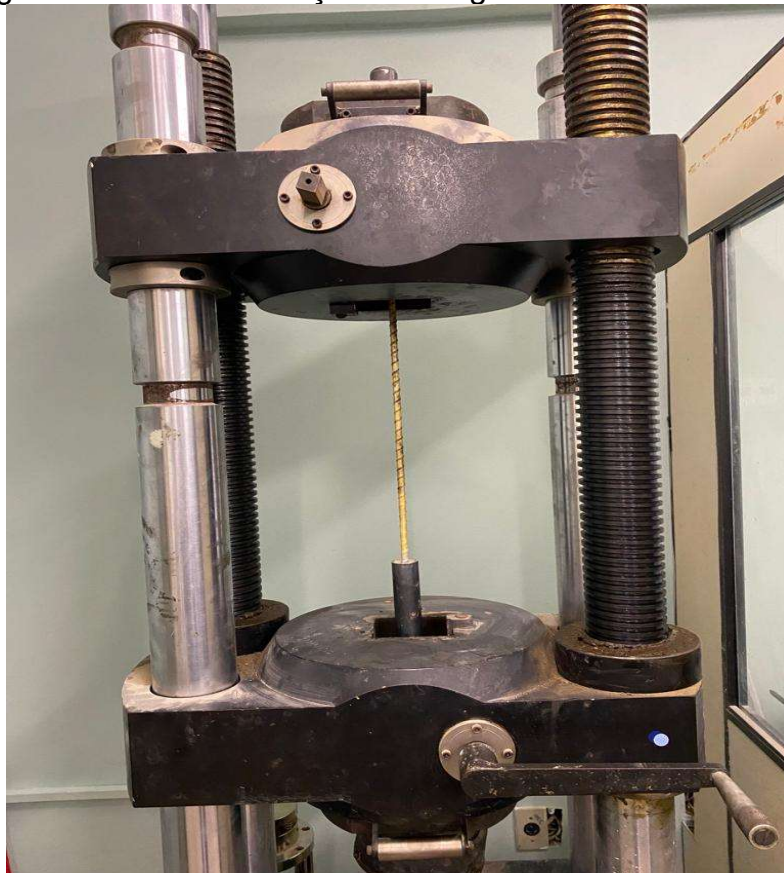
Figura 16: Suporte de madeira para montagem e alinhamento dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

A figura 17 destaca o ensaio de tração em vergalhões de fibra de vidro realizado em máquina de ensaios mecânicos-prensa MEU-100.

Figura 17: Ensaio de tração em vergalhões de fibra de vidro.



Fonte: Autora.

Os resultados de tensão encontrados nesse ensaio foram analisados e comparados com os resultados apresentados no trabalho de Rezende (2017).

4.3.1. Corpo de prova considerados e desconsiderados

Os corpos de prova desconsiderados foram os que romperam na resina ou nas extremidades. As figuras 18 e 19 representam o rompimento de corpo de prova que foram descartados, e as figuras 20 e 21 destacam o rompimento de corpo de prova que foram considerados para os cálculos da resistência média de tração.

Figura 18: Corpo de prova com rompimento na resina durante o ensaio.



Fonte: Autora.

Figura 19: Corpo de prova com rompimento na extremidade da barra durante o ensaio.



Fonte: Autora.

Figura 20: Corpo de prova com rompimento no centro da barra durante o ensaio.



Fonte: Autora.

Figura 21: Corpo de prova com rompimento no centro da barra durante o ensaio.



Fonte: Autora.

4.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA ALCALINA DOS VERGALHÕES GFRP

Nesse ensaio verificou-se a variação da massa após a imersão em solução alcalina por um período de 35 dias a uma temperatura de 60°C.

Para a variação da massa serão utilizadas as equações (1) e (2) apresentadas na norma:

$$M (\%) = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \text{ para o ganho de massa} \quad (1)$$

$$M (\%) = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100 \text{ para a perda de massa} \quad (2)$$

Onde:

M_0 = massa inicial da amostra, em g, antes da imersão em solução alcalina;

M_i = massa da amostra, em g, após imersão em solução alcalina.

Analizou-se também a aparência das amostras antes e após o banho alcalino para comparação da condição da cor, da superfície e da mudança de forma. Para isso, foi necessária a pesagem, e a aferição do aspecto físico e superficial das amostras através da verificação em microscópio digital, antes e após a imersão na solução.

Seguindo a instrução da norma, antes da imersão as amostras tiveram suas extremidades (região do corte) preenchidas com resina epóxi, como mostra a figura 22, para evitar a infiltração de solução através dos cortes.

Figura 22: Amostras de barras de GFRP preenchidas com resina epóxi.



Fonte: Autora.

Nesse experimento utilizou-se materiais e equipamentos de acordo com o descrito abaixo:

- 05 amostras de barras de FGRP com 10 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento;
- 05 amostras de barras de FGRP com 12,5 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento;
- Recipiente de plástico;
- Solução alcalina com a composição e pH sugeridos pela norma;
- Balança eletrônica de precisão 0,01g para a pesagem das amostras;
- Estufa.

A composição da solução alcalina sugerida pela norma e utilizada em nosso ensaio consiste em:

- 118,5 g de Ca(OH)_2 - (hidróxido de cálcio ou cal hidratada ou cal extinta);
- 0,9 g de NaOH – (hidróxido de sódio ou soda cáustica);
- 4,2 g de KOH – (hidróxido de potássio ou potassa cáustica);
- 1 litro de água da torneira.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1.1. Resultados para caracterização física e geométrica

Os resultados após a pesagem e medição das amostras das barras de GFRP e das barras de aço, para cada conjunto, estão descritos nas tabelas 08, 09, 10, 11, 12 e 13. Com essas informações foi possível encontrar as densidades, a massa linear nominal, as áreas das seções transversais, os diâmetros efetivos, as alturas das nervuras e o espaçamento entre as nervuras.

5.1.1.1. Vergalhões de GFRP

Tabela 8: Resultados para os cálculos da densidade e massa linear nominal.

VERGALHÕES GFRP DE 10mm						
Barras	Massa submersa (g)	Massa seca (g)	Densidade relativa (<i>sp gr</i> 23/23°C)	Massa linear nominal (kg/m)	Densidade da água a 23°C (Kg/m³)	Densidade (D^{23C}) (kg/m³)
Barra 01	9,23	18,42	2,004	0,129	997,5	1998,99
Barra 02	9,22	18,38	2,006	0,135	997,5	2000,98
Barra 03	9,33	18,66	2,000	0,129	997,5	1995,00
Barra 04	9,11	18,19	2,003	0,124	997,5	1997,99
Barra 05	9,22	18,41	2,003	0,121	997,5	1997,99
Média da massa seca		18,412	Média da massa linear nominal	0,128	Média da densidade	1998,190
VERGALHÕES DE GFRP DE 12,5mm						
Barras	Massa submersa (g)	Massa seca (g)	Densidade relativa (<i>sp gr</i> 23/23°C)	Massa linear nominal (kg/m)	Densidade da água a 23°C (Kg/m³)	Densidade (D^{23C}) (kg/m³)
Barra 01	18,43	37,25	1,979	0,265	997,5	1974,05
Barra 02	18,21	36,98	1,970	0,264	997,5	1965,07
Barra 03	18,32	37,20	1,970	0,263	997,5	1965,07
Barra 04	18,13	37,34	1,944	0,260	997,5	1939,14
Barra 05	18,32	37,19	1,971	0,264	997,5	1966,07
Média da massa seca		37,192	Média da massa linear nominal	0,263	Média da densidade	1961,880

Fonte: Autora.

A média das massas secas e das massas linear nominal foram maiores nas barras de GFRP de 12,5 mm de diâmetro, o que já era esperado pois a área da sua seção é maior que as de 10 mm. Devido a maior densidade relativa apresentada nos resultados, as barras de GFRP de 10 mm de diâmetro possuem maior média em relação a densidade quando comparada com a das barras de 12,5 mm. A densidade relativa, já descrita no item 4.2.1., corresponde a $(\frac{a}{a-b})$, onde (a) é a massa seca e (b) é a massa submersa.

Tabela 9: Resultados para os cálculos da área da seção transversal e diâmetro efetivo.

VERGALHÕES GFRP DE 10mm					
Barras	Massa (g)	Volume (mm³)	Comprimento (mm)	Área da seção (mm²)	Diâmetro efetivo (mm)
Barra 01	18,42	9700	149,82	64,744	9,079
Barra 02	18,38	10000	148,63	67,281	9,255
Barra 03	18,66	9800	150,89	64,948	9,094
Barra 04	18,19	9200	147,89	62,208	8,900
Barra 05	18,41	9000	148,97	60,415	8,771
MÉDIA DOS RESULTADOS				63,919	9,020
VARGALHÕES GFRP DE 12,5mm					
Barras	Massa (g)	Volume (mm³)	Comprimento (mm)	Área da seção (mm²)	Diâmetro efetivo (mm)
Barra 01	37,25	20000	149,12	134,120	13,068
Barra 02	36,98	19900	148,31	134,178	13,071
Barra 03	37,20	20000	149,66	133,636	13,058
Barra 04	37,34	20100	150,08	133,929	13,058
Barra 05	37,19	20000	148,90	134,318	13,077
MÉDIA DOS RESULTADOS				134,036	13,066

Fonte: Autora.

A diferença entre o diâmetro comercial e a média do diâmetro efetivo foi maior nas barras de GFRP de 10 mm em comparação com as de 12,5 mm.

Tabela 10: Resultados para o cálculo das nervuras.

VERGALHÕES GFRP DE 10mm									
a - Altura das nervuras (mm)					b - Espaçamento entre nervuras (mm)				
Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05
0,87	0,60	0,62	0,83	0,33	10,70	9,76	10,92	11,34	10,36
MÉDIA: 0,650 mm					MÉDIA: 10,620 mm				
VARGALHÕES GFRP DE 12,5mm									
a - Altura das nervuras (mm)					b - Espaçamento entre as nervuras (mm)				
Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05
1,00	0,53	1,20	0,54	1,02	19,27	18,41	19,61	21,93	20,20
MÉDIA: 0,860 mm					MÉDIA: 19,880 mm				

Fonte: Autora.

Os vergalhões de GFRP de 12,5 mm obtiveram maiores resultados, tanto na média das alturas das nervuras como na média dos espaçamentos entre elas, quando comparado com os de 10 mm.

5.1.1.2. Vergalhões de aço

Tabela 11: Resultados para os cálculos da massa linear nominal.

VERGALHÕES DE AÇO DE 10mm				VERGALHÕES DE AÇO DE 12,5mm			
Barras	Massa seca (g)	Densidade (Kg/m³)	Massa linear nominal (kg/m)	Barras	Massa seca (g)	Densidade (Kg/m³)	Massa linear nominal (kg/m)
Barra 01	89,33	7850	0,609	Barra 01	144,80	7850	0,981
Barra 02	90,47		0,628	Barra 02	142,61		0,974
Barra 03	90,50		0,618	Barra 03	142,94		0,994
Barra 04	89,53		0,633	Barra 04	141,76		0,977
Barra 05	89,82		0,630	Barra 05	143,89		0,999
Médias da massa seca	89,930	Média da massa linear nominal	0,627	Médias da massa seca	143,200	Média da massa linear nominal	0,985

Fonte: Autora.

Tabela 12: Resultados para o cálculo da área da seção transversal e diâmetro efetivo.

VERGALHÕES DE AÇO DE 10mm					
Barras	Massa (g)	Volume (mm ³)	Comprimento (mm)	Área da seção (mm ²)	Diâmetro efetivo (mm)
Barra 01	89,33	11500	148,10	77,650	9,943
Barra 02	90,47	12000	149,87	80,069	10,097
Barra 03	90,50	11800	149,81	78,766	10,014
Barra 04	89,53	12000	148,88	80,602	10,130
Barra 05	89,82	11900	148,30	80,243	10,108
MÉDIA DOS RESULTADOS				79,466	10,058
VARGALHÕES DE AÇO DE 12,5mm					
Barras	Massa (g)	Volume (mm ³)	Comprimento (mm)	Área da seção (mm ²)	Diâmetro efetivo (mm)
Barra 01	144,80	18700	149,68	124,933	12,612
Barra 02	142,61	18500	149,16	124,028	12,566
Barra 03	142,94	18800	148,49	126,608	12,696
Barra 04	141,76	18500	148,68	124,428	12,587
Barra 05	143,89	19000	149,25	127,303	12,731
MÉDIA DOS RESULTADOS				125,460	12,638

Fonte: Autora.

A diferença entre o diâmetro comercial e a média do diâmetro efetivo foi maior nas barras de aço de 12,5 mm em comparação com as de 10 mm.

Tabela 13: Resultados para o cálculo das nervuras.

VERGALHÕES DE AÇO DE 10mm									
Altura das nervuras (mm)					Espaçamento entre nervuras (mm)				
Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05
0,39	0,41	0,42	0,38	0,43	4,65	5,25	5,43	5,82	6,15
MÉDIA DAS ALTURA: 0,406mm					MÉDIA DOS ESPAÇAMENTOS: 5,460mm				

VERGALHÕES DE AÇO DE 12,5mm									
Altura das nervuras (mm)					Espaçamento entre as nervuras (mm)				
Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05
0,46	0,57	0,63	0,62	0,62	7,34	7,85	8,55	7,52	7,95
MÉDIA DAS ALTURAS: 0,580mm					MÉDIA DOS ESPAÇAMENTOS: 7,842mm				

Fonte: Autora.

Os vergalhões aço de 12,5 mm obtiveram maiores resultados, tanto na média das alturas das nervuras como na média dos espaçamentos entre elas, quando comparado com os de 10 mm.

5.1.2. Resultados para caracterização mecânica das barras de GFRP

Os resultados adquiridos durante os ensaios de resistência à tração das barras de GFRP, para cada conjunto, estão descritos na tabela 14. Com essas informações foi possível encontrar as tensões de resistência à tração dos corpos de prova.

Tabela 14: Resultados para verificação da resistência à tração das barras de GFRP.

DATA DO ENSAIO	DIÂMETRO NOMINAL (mm)	CORPOS DE PROVA	TIPO DE PREENCHIMENTO ENTRE TUBO E BARRA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	CORPOS DE PROVA DESCONSIDERADOS
20/10/2020	10	CP 01	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Sikadur 32	656,39	X
		CP 02	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Sikadur 32	528,39	X
		CP 03	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Sikadur 32	805,82	
10/11/2022	12,5	CP 01	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	9,71	X
		CP 02	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	1008,05	
		CP 03	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	944,29	
29/11/2022	10	CP 01	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	725,12	X
		CP 02	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	892,84	
		CP 03	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	795,10	
		CP 04	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	842,39	
		CP 05	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	981,74	

	DIÂMETRO NOMINAL (mm)	CORPOS DE PROVA	TIPO DE PREENCHIMENTO ENTRE TUBO E BARRA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	CORPOS DE PROVA DESCONSIDERADOS
	12,5	CP 06	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	1045,98	
		CP 07	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	976,57	
		CP 08	Adesivo estrutural à base de resina epóxi – Compound	1020,56	
MÉDIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS BARRAS DE 10 mm (MPa) =					863,578
MÉDIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS BARRAS DE 12.5 (MPa mm) =					999,090

Fonte: Autora.

Quanto aos corpos de prova desconsiderados, o tipo de resina pode ter contribuído nos resultados, pois possivelmente a resistência da resina (Sikadur 32) foi inferior ao da barra ensaiada.

5.1.3. Resultados do ensaio de resistência alcalina das barras GFRP

Os resultados adquiridos durante os ensaios de resistência alcalina das barras de GFRP, para cada conjunto, estão descritos nas tabelas 15 e 16. Com essas informações foi possível encontrar a variação da massa, bem como a análise quanto a condição da cor, da superfície e da mudança de forma das amostras após o banho em solução alcalina.

Tabela 15: Resultados da massa das amostras antes do banho alcalino.

VERGALHÕES GFRP DE 10 mm		VERGALHÕES GFRP DE 12,5 mm	
Barras	Massa (g)	Barras	Massa (g)
Barra 01	19,51	Barra 01	36,44
Barra 02	19,52	Barra 02	36,58
Barra 03	19,78	Barra 03	36,90
Barra 04	19,65	Barra 04	36,51
Barra 05	19,49	Barra 05	36,71
Média da massa (g)	19,590	Média da massa (g)	36,628

Fonte: Autora.

Tabela 16: Resultados da massa das amostras após o banho alcalino.

VERGALHÕES GFRP DE 10 mm		VERGALHÕES GFRP DE 12,5 mm	
Barras	Massa (g)	Barras	Massa (g)
Barra 01	19,16	Barra 01	36,32
Barra 02	19,22	Barra 02	36,35
Barra 03	19,52	Barra 03	36,54
Barra 04	19,37	Barra 04	36,38
Barra 05	19,09	Barra 05	36,21
Média da massa (g)	19,272	Média da massa (g)	36,360

Fonte: Autora.

Tanto as barras de GFRP de 10 mm de diâmetro como as de 12,5 mm tiveram redução na média da sua massa após o banho alcalino, sendo que as de 10 mm essa redução foi maior. A figura 23 destaca as barras de GFRP imersas na solução alcalina após 35 dias na estufa a 60°C.

Figura 23: Barras de GFRP imersas na solução alcalina.



Fonte: Autora.

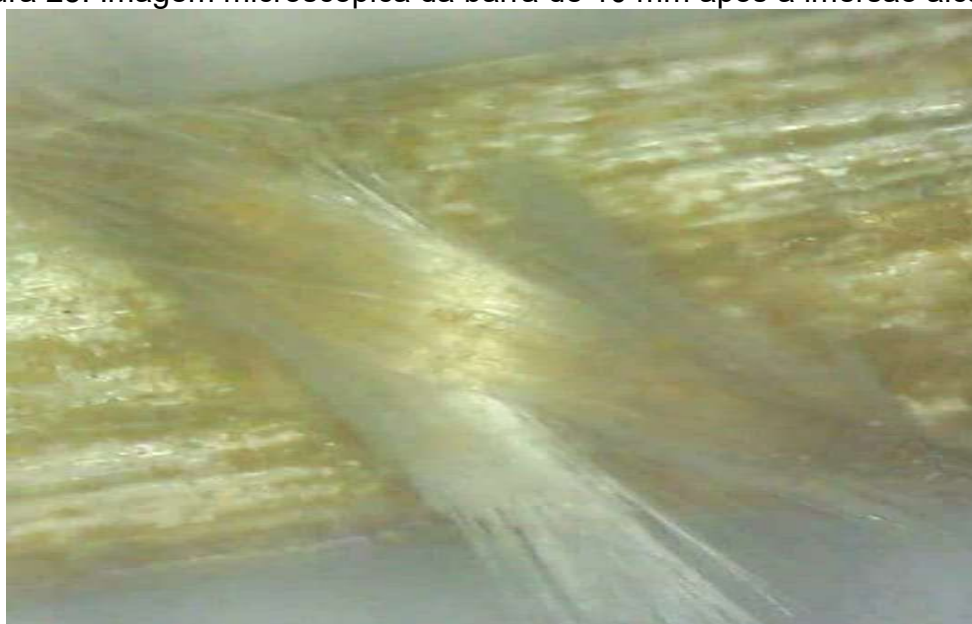
Para a aferição do aspecto físico e superficial das amostras foram capturadas imagens através do microscópio digital portátil, com ampliação de 40x. As figuras 24 e 25 representam as barras de 10 mm de diâmetro antes e após imersão em solução alcalina, respectivamente, e as figuras 26 e 27 representam as barras de 12,5 mm de diâmetro antes e após imersão em solução alcalina, respectivamente.

Figura 24: Imagem microscópica da barra de 10 mm antes da imersão alcalina.



Fonte: Autora.

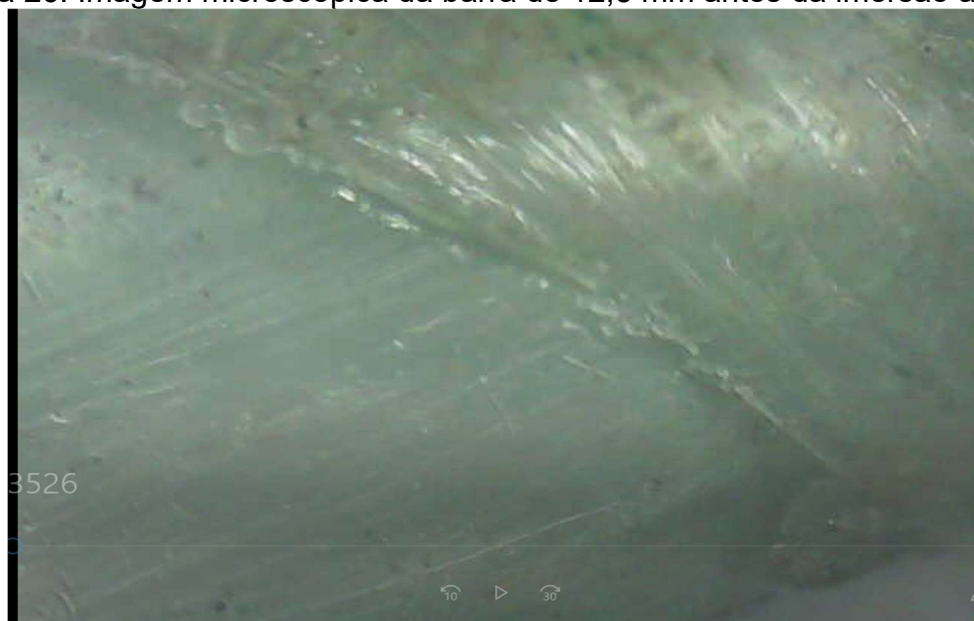
Figura 25: Imagem microscópica da barra de 10 mm após a imersão alcalina.



Fonte: Autora.

Verificou-se mudança da cor na superfície dos vergalhões de GFRP com 10 mm de diâmetro e a degradação das fibras principalmente nas nervuras.

Figura 26: Imagem microscópica da barra de 12,5 mm antes da imersão alcalina.



Fonte: Autora.

Figura 27: Imagem microscópica da barra de 12,5 mm após a imersão alcalina.



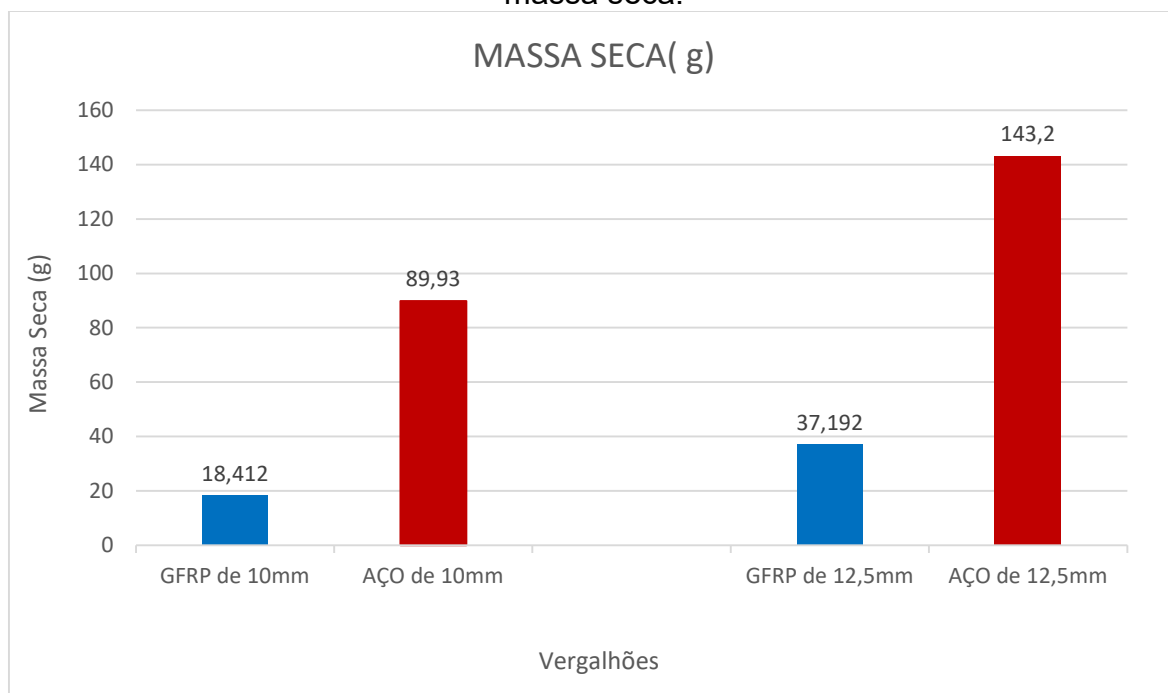
Fonte: Autora.

Observou-se pouca mudança na cor na superfície dos vergalhões de GFRP com 12,5 mm de diâmetro e o início de uma pequena degradação das fibras apenas nas nervuras.

5.2. DISCUSSÕES

Para facilitar as análises e comparativos quanto a caracterização física, geométrica e mecânica dos vergalhões de GFRP e de aço ensaiados, seguem as figuras 28, 29, 30, 31, 32 e 33, e tabelas 17 e 18, com as médias dos resultados obtidos. E para o ensaio de resistência alcalina dos vergalhões de GFRP segue tabela 18 com a média dos resultados e com o percentual de perda de massa após imersão em solução alcalina.

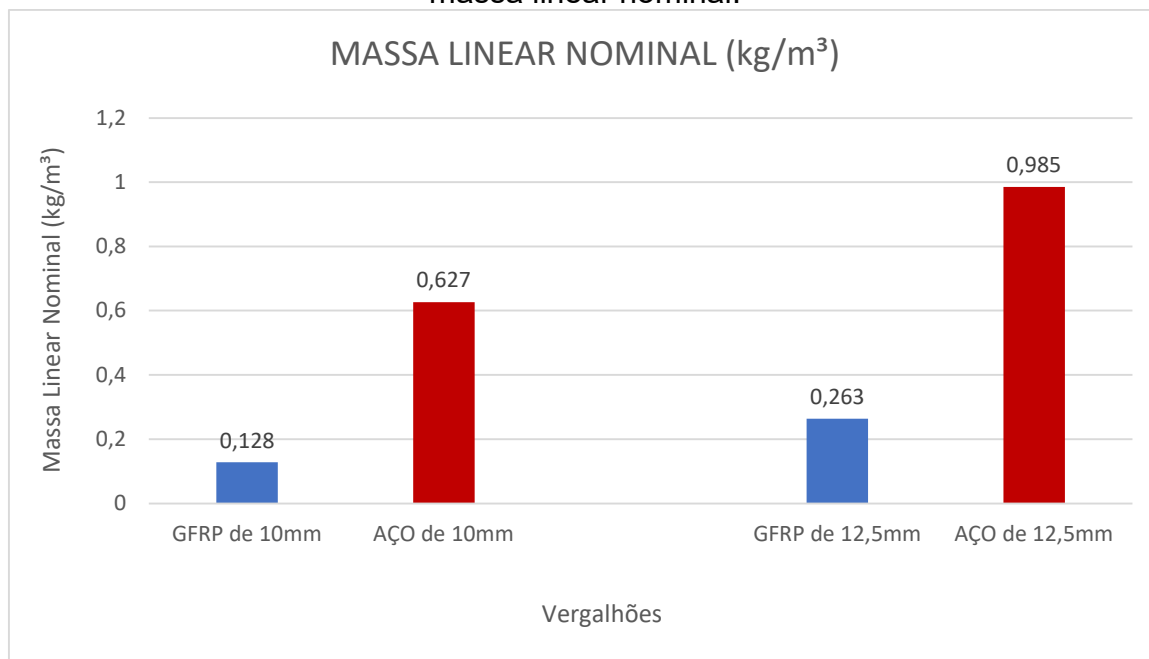
Figura 28: Média dos resultados obtidos na caracterização física das barras para massa seca.



Fonte: Autora.

De acordo com o gráfico acima, a massa seca das barras de GFRP é bem menor quando equiparada com a do aço, com redução de 79,526% e 74,028% para os de 10mm e 12,5mm de diâmetro, respectivamente.

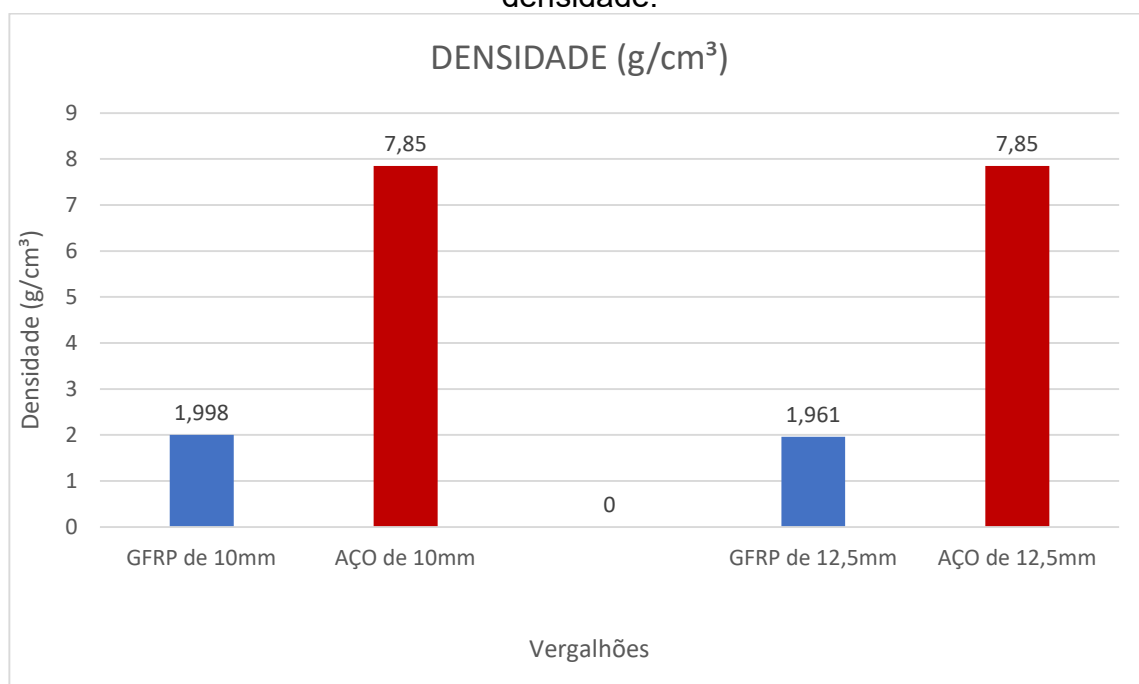
Figura 29: Média dos resultados obtidos na caracterização física das barras para massa linear nominal.



Fonte: Autora.

Observou-se no gráfico da figura 34 que a massa linear nominal das barras de aço é bem superior à das barras de GFRP, e encontra-se dentro do limite de variação de $\pm 6\%$, estipulado na norma ABNT NBR 7480/2007 e apresentado na tabela 4.

Figura 30: Média dos resultados obtidos na caracterização física das barras para densidade.



Fonte: Autora.

Em relação ao gráfico acima, observou-se que a densidade dos vergalhões de GFRP ensaiados, tanto para os 10mm e 12,5mm de diâmetro, encontra-se dentro do intervalo de 1,25 e 2,10 g/cm³ apresentado por Gonçalves apud Moura (2021), e é bem menor quando comparada com a do aço que é de 7,850g/cm³, valor esse apresentado na norma ABNT NBR 7480/2007.

Diante desses resultados constatou-se a leveza dos vergalhões de GFRP quando comparados com os vergalhões de aço, o que já era esperado de acordo com as informações apresentadas nas referências deste trabalho.

Tabela 17: Média dos resultados obtidos na caracterização geométrica das barras.

CARACTERIZAÇÃO	VERGALHÕES GFRP DE 10 mm	VERGALHÕES GFRP DE 12,5 mm	VERGALHÕES AÇO DE 10 mm	VERGALHÕES AÇO DE 12,5 mm
Área da seção (mm ²)	63,919	134,036	79,466	125,460
Diâmetro efetivo (mm)	9,020	13,066	10,058	12,638
Altura das nervuras (mm)	0,650	0,860	0,406	0,580
% da altura em relação ao diâmetro	-	-	4,037	4,589
Espaçamento entre nervuras (mm)	10,620	19,880	5,460	7,842
% do espaçamento em relação ao diâmetro	-	-	54,285	62,051

Fonte: Autora.

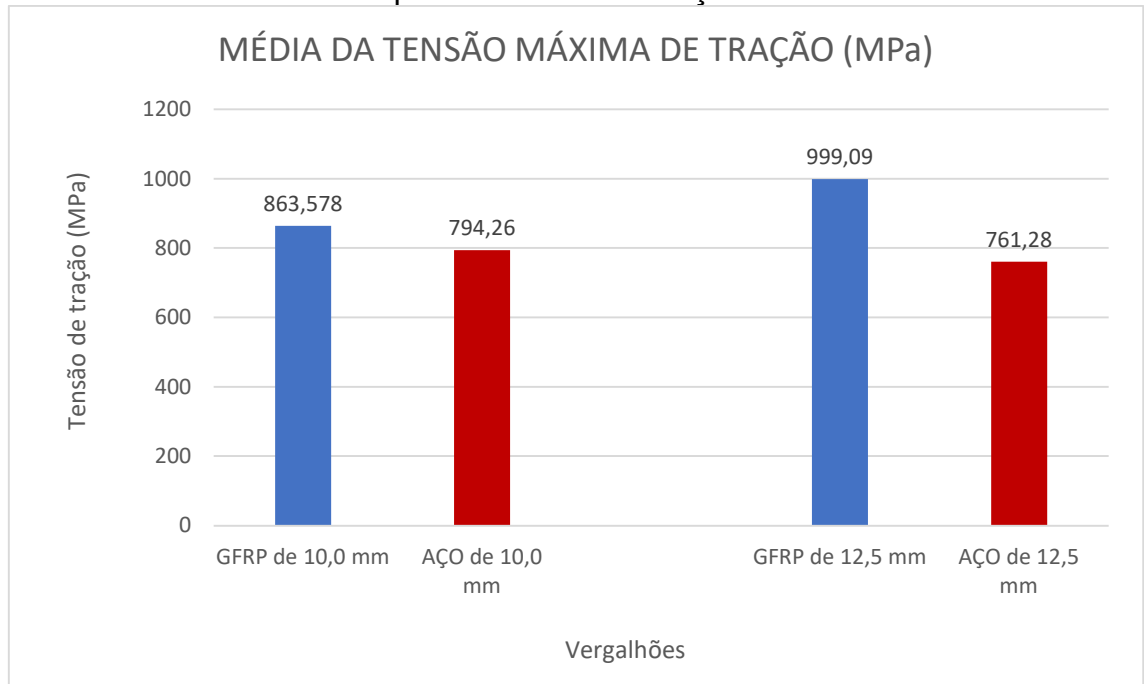
Na caracterização geométrica apresentada na tabela acima, a média das áreas da seção correspondentes aos vergalhões de GFRP de 10mm estão abaixo do limite mínimo, já os de 12,5mm estão dentro dos limites máximo e mínimos estipulados pela norma ASTM D7957/D7957M – 2017 e apresentados na tabela 2. Em relação ao diâmetro efetivo, os resultados referentes as barras de GFRP de 10mm apontaram uma redução de 9,80% do diâmetro nominal apresentado pelo fornecedor A, já as de 12,5mm apontaram um acréscimo de 4,53% do apresentado pelo fornecedor B. A diferença entre os diâmetros comerciais e efetivos ocorreram, provavelmente, devido à falta de controle no processo de fabricação desses vergalhões.

No dimensionamento da altura das nervuras os vergalhões de GFRP, tanto os de 10mm como os de 12,5mm de diâmetro, apresentaram resultados dentro do requisito mínimo da norma ASTM A615/A615M – 2004, requisitos esses apresentados na tabela 3. No que diz respeito ao espaçamento entre nervuras, as barras de GFRP, tanto de 10mm e 12,5mm de diâmetro, estão em desacordo com a norma citada, com 58,507% e 128,506% acima do máximo recomendado, respectivamente.

Nas amostras de vergalhões de aço ensaiadas observou-se que as configurações geométricas seguiram a norma ABNT NBR 7480:2007, ou seja, constatou-se a presença das nervuras transversais oblíquas e seu ângulo em relação ao eixo, a existência mínima de duas nervuras longitudinais que impedem o giro da barra no concreto, o percentual da altura em relação ao diâmetro que foi superior a 4%, e o espaçamento médio das nervuras ficou entre 50% e 80% do diâmetro nominal, tudo dentro do estabelecido na norma.

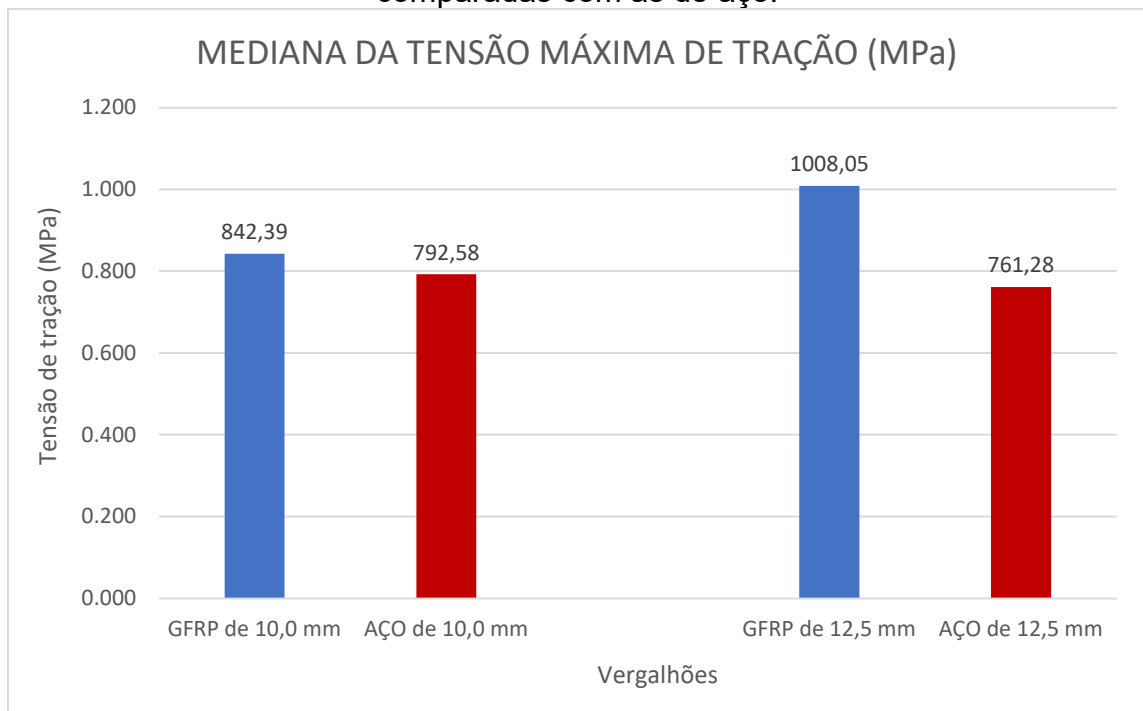
Diante das informações acima percebeu-se que os vergalhões de GFRP de 10mm, em comparação com os de 12,5mm, apresentaram mais resultados em desacordo com as normas e com as informações apresentadas pelo fornecedor. Em comparação com as de aço as barras de GFRP não possuem nervuras longitudinais que ajudam a dificultar o giro da barra dentro do concreto, as nervuras existentes são apenas as que formam um espiral ao longo do eixo longitudinal, e além disso o espaçamento entre nervuras é bem superior ao constatado na barra de aço.

Figura 31: Médias dos resultados do ensaio de tração das barras GFRP comparadas com as de aço.



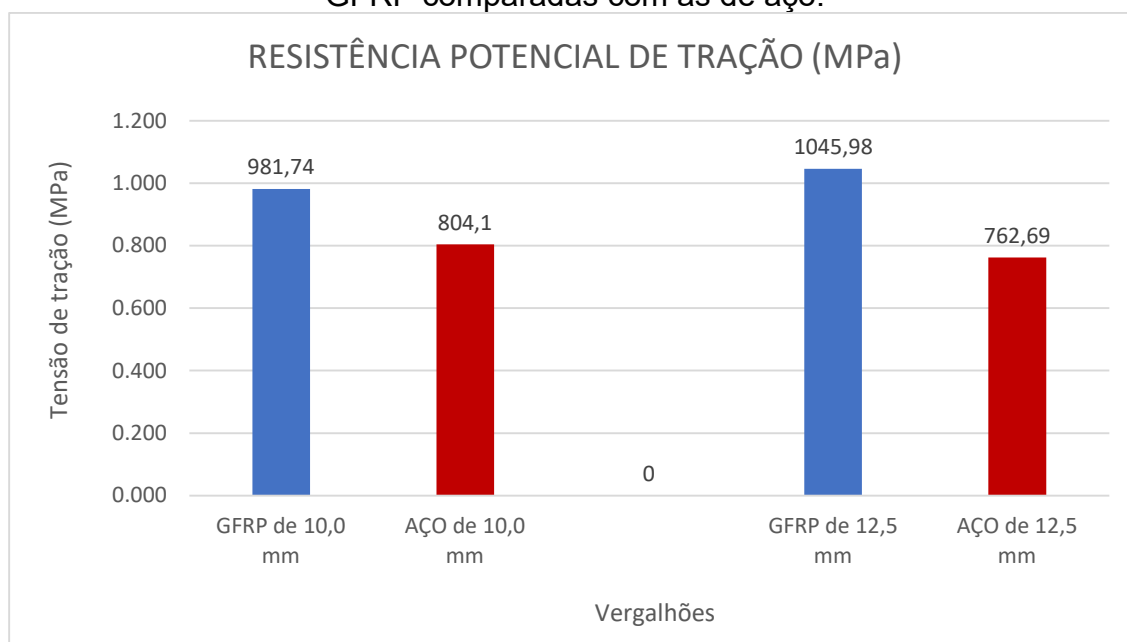
Fonte: Autora.

Figura 32: Mediana dos resultados do ensaio de tração das barras GFRP comparadas com as de aço.



Fonte: Autora.

Figura 33: Resistências Potenciais dos resultados do ensaio de tração das barras GFRP comparadas com as de aço.



Fonte: Autora.

Para realização do comparativo entre as barras de GFRP e de aço foram destacados os resultados dos ensaios de resistência à tração do aço realizados por Rezende (2017), já descritos na tabela 05 do item 3.3.2.

Observou-se no ensaio de tração das barras de GFRP que a resistência subiu quando aumentou o diâmetro, o que diverge dos resultados encontrados em trabalhos de autores pesquisados que apontam que a resistência diminui quando aumenta o diâmetro das barras. Além disso, a média do valor referente as barras de GFRP de 10mm nesse ensaio foi inferior ao apresentado pelo fornecedor A, que é de 1.000 MPa, enquanto as de 12,5mm atingiu um valor bem aproximado do apresentado pelo fornecedor B.

Como ressaltado no item 3.2.4 do referencial teórico, as diferentes tensões normais nas fibras da superfície e nas fibras do núcleo resultam em uma distribuição não uniforme através de sua seção transversal, e essa diferença é maior à medida que aumenta o diâmetro dos vergalhões de GFRP, o que pode ocasionar redução da resistência mecânica. Nesse item 3.2.4 também é descrito que outros fatores podem afetar a resistência à tração dos vergalhões de fibra de vidro como a fração volumétrica de fibras na composição, taxa de cura, controle de qualidade e processo de fabricação.

Considerando os fatores citados acima, a divergência nos resultados da resistência à tração dos vergalhões de GFRP de 10 mm pode ter ocorrido devido a problemas na composição e/ou no processo de fabricação dessas barras ensaiadas. Para reforçar essa hipótese os vergalhões de fibra de vidro de 10mm apresentou, durante o ensaio de caracterização geométrica, mais resultados em desacordo com as normas e com as informações do fornecedor. E além disso, durante o ensaio de tração dessas barras observou-se, em alguns casos, baixa aderência das nervuras em relação a superfície, situação essa apresentada na figura 34.

Figura 34: Corpo de prova com desprendimento da nervura em relação a superfície.



Fonte: Autora.

Em suma, constatou-se, diante das discussões acima, que a resistência à tração dos vergalhões de fibra de vidro foi maior que a dos vergalhões de aço, tanto para os diâmetros de 10mm como os de 12,5mm, o que já era esperado. Foi verificado também que as barras de GFRP de 10mm ensaiada apresentaram menor resistência à tração quando comparada com resultados de ensaios realizados por outros autores para esse mesmo diâmetro. Essa divergência provavelmente foi devido à falta de controle e qualidade na composição e no processo de fabricação dos vergalhões analisados. O vergalhão de fibra de vidro de 12,5mm foi o que apresentou melhor resultado do ensaio de resistência à tração.

Tabela 18: Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência alcalina.

VERGALHÃO	MASSA ANTES DA IMERSÃO EM BANHO ALCALINO (g)	MASSA APÓS A IMERSÃO EM BANHO ALCALINO (g)	% DE PERDA DE MASSA
GFRP de 10mm	19,590	19,272	1,623
GFRP de 12,5mm	36,628	36,360	0,732

Fonte: Autora.

Como esperado, verificou-se uma variação de massa dos vergalhões de GFRP após a imersão em solução alcalina a uma temperatura de 60°C e por um período de 35 dias. Com a perda de massa ocasionada pela exposição nesse ambiente alcalino, as propriedades físicas das amostras foram afetadas, o que já era esperado, pois de acordo com o item 3.2.7 do referencial teórico, em ambientes alcalinos ocorre um rápido processo de deterioração das barras de GFRP que envolve perdas de força e peso das barras. E essa deterioração, como ressaltado por Moura (2021) no item 3.5 do referencial teórico, aumenta à medida que aumenta o pH, a temperatura e o período de exposição nesse tipo de ambiente.

Quanto à aferição do aspecto físico e superficial das amostras, verificou-se mudança da cor na superfície dos vergalhões de GFRP, sendo que nos de 10 mm de diâmetro a mudança foi mais plausível. Observou-se que a degradação das fibras na superfície, principalmente nas nervuras, foi maior nas barras GFRP de 10mm de diâmetro.

No que diz respeito aos vergalhões de aço a resistência em ambientes alcalinos é diferente, pois esse ambiente é favorável para a sua proteção. Como ressaltado no item 3.3.3 do referencial teórico, essa proteção é prejudicada com o surgimento da carbonatação que torna o pH menor que o alcalino, fazendo com que o concreto perca a camada protetora da armadura gerando assim a corrosão da mesma.

Diante das informações acima constatou-se a degradação dos vergalhões de GFRP em ambiente alcalino, fato esse constatado pela perda de massa após a imersão na solução alcalina, o que pode afetar suas propriedades físicas e mecânicas. Além disso, as barras de 10mm, em comparação com os de 12,5mm, apresentaram

mais resultados negativos nesse ensaio, ou seja, apresentaram maior percentual de perda de massa e maiores mudanças no aspecto físico e superficial em relação a degradação das fibras na superfície, principalmente nas nervuras.

6. CONCLUSÃO

Os ensaios de caracterização física, geométrica e mecânica, bem como o ensaio de resistência alcalina, foram satisfatórios no sentido de possibilitar a verificação e análise de determinadas propriedades das barras de GRFP. Através desses ensaios foi possível realizar o comparativo de seus resultados com os das barras de aço CA-50. Os resultados foram validados por serem semelhantes, em sua grande maioria, com os estabelecidos nas normas e com os experimentos de outros pesquisadores estudados, o que tornou possível a análise das propriedades das amostras de forma mais confiável. Os resultados em desacordo ocorreram, provavelmente, devido à falta de controle e qualidade na composição e no processo de fabricação desses vergalhões. Vale destacar que a avaliação da durabilidade das barras de GFRP é um trabalho complexo já que envolve uma análise mais profunda de sua composição pois a mesma influencia na sua resistência mecânica, informação esta destacada no item 3.2.4 do referencial teórico.

Mediante o comparativo dos vergalhões de GFRP com os de aço, tem-se as seguintes conclusões:

- Percebeu-se na caracterização geométrica que os vergalhões de aço possuem maior número de nervuras e menor espaçamento entre elas, o que contribui na aderência e dificulta o giro da barra dentro do concreto. As nervuras existentes nas barras de GFRP são apenas as que formam um espiral ao longo do eixo longitudinal. Nesse caso, para uma análise mais assertiva, seria necessário um estudo comparativo entre ambas as barras em relação a sua aderência no concreto;
- Constatou-se a leveza dos vergalhões de GFRP o que reduz os custos de transporte e facilita o manuseio;
- Evidenciou-se a alta resistência à tração das barras de fibra de vidro;
- Foi verificada a degradação dos vergalhões de GFRP em ambiente alcalino devido a perda de massa após a imersão na solução alcalina, fato esse que pode afetar as propriedades físicas e mecânicas dessas barras. Este ensaio foi realizado na temperatura de 60°C, o que pode ter intensificado o processo de deterioração, pois à medida que eleva a temperatura aumenta a degradação, como já ressaltado no item 3.5 do referencial teórico. Já nos vergalhões de aço o

ambiente alcalino é favorável para a sua proteção, pois forma uma camada protetora na armadura protegendo-a da corrosão;

- Os vergalhões de GFRP se configuram como um material durável e a sua fabricação é mais sustentável que o aço, pois de acordo com Paula *et al.* (2019) não é necessário a construção de barragens de rejeitos de minério de ferro.

Através deste estudo observou-se que as barras de GFRP podem ser uma alternativa para compor as armaduras das estruturas na construção civil. No entanto, de acordo com suas limitações, nota-se que é mais viável o seu emprego como reforço das armaduras nas estruturas de concreto armado em combinação com o aço, com exceção das de compressão. Portanto, para uma substituição total do aço nessas armaduras, de forma segura, é preciso mais pesquisas e um melhoramento na composição desses vergalhões, e com isso aprimorar suas propriedades e seu comportamento mecânico, principalmente em relação ao seu comportamento frágil e ao seu baixo módulo de elasticidade. Com o aperfeiçoamento desse material, acredita-se que a sua credibilidade possa aumentar e com isso incentivar a regularização da sua aplicação no Brasil através da elaboração de normas específicas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7205/D7205M: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars**, West Conshohocken, 2016.

_____. **ASTM A 615/A 615M: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon Steel Bars for Concrete Reinforcement**, West Conshohocken, 2004.

_____. **ASTM D7957: Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement**, West Conshohocken, USA, 2017.

_____. **ASTM D 792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement**, West Conshohocken, USA, 2020.

_____. **ASTM D4475: Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods by the Short-Beam Method**, West Conshohocken, USA, 2016.

_____. **ASTM D7705/D7705M: Standard Test Method of Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction**, West Conshohocken, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). (1996) **ACI COMMITTEE 440.R. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures**. 1996.

_____. (2015) **ACI COMMITTEE 440.1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars**. 2015.

_____. (2015) **ACI COMMITTEE 440.9R. Guide to Accelerated Conditioning Protocols for Durability Assessment of Internal and External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement**. 2015.

_____. (2004) **ACI COMMITTEE 440.3R. Guide test methods for fiber-reinforced polymer (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures**. 2004.

AMORIM, Anderson Anacleto de. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparente**. Monografia para obtenção de titulação de Especialista em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2010. 74p.

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

ARAÚJO, Marcos León. **Estudo Experimental da Aderência entre o Concreto e Barras de Aço, de Compósito de Fibras de Vidro e de Compósito de Fibras de Carbono**. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. 97p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.

BENMOKRANE, B.; MANALO, A.; BOUHET, J. C.; MOHAMED, K.; ROBERT, M. **Effects of diameter on the durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution**. Journal of Composites for Construction, v. 21, p. 1 – 12, 2017.

BERTON, Kauana Moraes. **Investigação teórico-experimental de vigas armadas com barras de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) submetidas à flexão**. Trabalho de conclusão de curso para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS: 2019. 63p.

COMPOSITE GROUP BRASIL. Site da Composite. 2022. **Verga fibra: em quais tipos de obra ele pode ser aplicado**. 2022. Disponível em: <https://compositogroup.com.br/blog/verga-fibra-em-quais-tipos-de-obras-ele-pode-ser-aplicado/>. Acesso em 01 de setembro de 2022.

COUTO, Iara Andrade. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. Dissertação para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. 141p.

PB CONCRETO PROJETADO DO BRASIL. Site da CPB. **Vergalhão de fibra de vidro**. Disponível em: <http://www.concretoprojetado.com.br/?s=vergalh%C3%A3o+de+fibra+de+vidro>. Acesso em 01 de setembro de 2022.

CUNHA, Déborah Rebouças da. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto**. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2019. 111p.

FRANÇA, Maria Julia Ibidi Limongi; SANTOS, Gustavo Pagliari Valério dos; DEMÉTRIO, Leonardo. **Aplicação de vergalhões de fibra de vidro no grampeamento da frente de escavação de túneis em maciços terrosos**. 15º Congresso Nacional de Iniciação Científica/SEMESP. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Ribeirão Preto, 2015.

HENNEMENN, Mirella Brenner; SILVA, Cristiano Rossi da; SCHNEIDER, Eduardo Luís. Processo de fabricação por pultrusão e as aplicações no design de produto. **Revista Tecnologia e Tendências**. Universidade Feevale. Novo Hamburgo, a. 10,

n. 1. 2019. Disponível em: file:///C:/Users/aline/Downloads/1501-Texto%20do%20artigo-5566-1-10-20190311%20(1).pdf. Acesso em 01 de setembro de 2022.

INEIA, Adriano. et al. Barras de fibra de vidro, uma alternativa inovadora e suas potencialidades: revisão bibliográfica. **Revista-Lógica**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia e Arquitetura - FEAR, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil. Santa Cruz do Sul, v. 25, n. 2, p. 243-251, jul./dez. 2021. Disponível em: file:///C:/Users/aline/Downloads/16214-Texto%20do%20Artigo-72627-1-10-20210822%20(2).pdf. Acesso em 01 de setembro de 2022.

ISIS, Canada. **Design 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers**. Canada, 2007.

JOSÉ, Roberto Nuno de Freitas. **Automatização do dimensionamento de elementos estruturais em Betão armado com GFRP**. Dissertação para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Universidade da Madeira, Portugal, 2013. 117p.

KERSTING, Daniel de Freitas. **Avaliação de Resinas Epóxi para Fabricação de Materiais Compósitos pelo Processo de Pultrusão**. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais/PPGEM, Porto Alegre. 2004. 102p.

KORTHFIBER. Site da Korthfiber. Alexandre. 2021. **Vergalhões de fibra de vidro é o futuro em obras estruturais**. Disponível em: <https://korthfiber.com/vergalhoes-de-fibra-de-vidro-e-o-futuro-em-obras-estruturais/>. Acesso em 01 de setembro de 2022.

MADARELI. Site da Madareli. **Vergalhão de Fibra para Coluna Pilar 3/8" 10mm Barra 3 metros**. Disponível em: <https://www.madareli.com.br/casa-e-construcao/vergalhao-de-fibra-para-montantes-pilar-coluna-38-10mm-3-metros>. Acesso em: 01 de setembro de 2022.

MAZZÚ, Amanda Duarte Escobal. **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de ions cloreto**. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. 190p.

MEUCOMPRESSOR. Site do Meucompressor. **Vergalhão De Fibra De Vidro Gfrp Barra de 12 mts Topfiber**. Disponível em: <https://www.meucompressor.com.br/tubulacao-ppr/topfiber-vergalhao/vergalhao-de-fibra-de-vidro-gfrp-barra-de-12-mts-topfiber>. Acesso em 01 de setembro de 2022.

MOURA, Ruan Carlos de Araújo. **Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas**. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. 146p.

PAULA, Anilton Rosário de; MELO, Anderson Altaíde Melo de; REIS, Wandermília Pereira Rangel dos. **VI-249 - Ensaio de abrasão do vergalhão de fibras de vidro: comportamento químico diante da chuva ácida e água do mar.** 30º Congresso ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Juiz de Fora/MG, 2019. 4p.

REZENDE. Bruno Augusto Rocha. **Análise comparativa do desempenho de barras de aço ca-50 destinadas à produção de concreto armado em Aracaju.** Trabalho de conclusão de curso para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Instituto Federal de Sergipe. Aracaju, 2017. 69p.

SANTOS, Diego Brenner Freire; ALMEIDA, Igor Gabriel da Silva; CRUZ, Cláudia Patrícia Torres. **Estudo Comparativo Entre os Vergalhões de Aço e Polímero Reforçado com Fibra de Vidro.** Artigo para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Potiguar. 2022. 16p.

REZENDE. Bruno Augusto Rocha. **Análise comparativa do desempenho de barras de aço ca-50 destinadas à produção de concreto armado em Aracaju.** Trabalho de conclusão de curso para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Instituto Federal de Sergipe. Aracaju, 2017. 69p

