

Análise experimental de vigas de concreto armado com vergalhão de fibra de vidro.

Emerson Figueiredo Leal¹, Luiz Fellipe Rossi de Aguiar², Gabriel de Freitas Mendonça Júnior³

Atraídos pelo objetivo de aumentar a durabilidade em estruturas de concreto e atender à demanda por soluções sustentáveis na construção civil, a aplicação de polímeros reforçados com fibra (FRP) destaca-se como uma alternativa viável. Entre os produtos fabricados com essa tecnologia, merecem destaque as barras de reforço para estruturas de concreto. Globalmente, essas barras são produzidas com fibras de vidro, carbono, aramida e, mais recentemente, basalto. No contexto brasileiro, essa tecnologia é relativamente recente, e de acordo com a literatura técnica, o processo de fabricação das barras desempenha um papel crucial em seu comportamento estrutural. Embora este estudo esteja em estágio inicial, proporciona uma visão detalhada dos comportamentos relacionados à relação momento-deformação e carga de flexão. Conforme previamente descrito na literatura, os testes indicam que o desempenho das armaduras de FRP é impactado pelo baixo módulo de elasticidade, pela configuração superficial da barra e pela aderência ao concreto. No entanto, os resultados mostram consistência e correspondem à previsão teórica. De maneira geral, pode-se afirmar que o uso de armaduras de FRP em vigas de concreto armado é viável, desde que os requisitos provenientes das características mecânicas dessas armaduras sejam considerados no projeto.

Palavras-chave: Pultrusão. Armadura não metálica. Tração por Flexão. Aderência.

Análise experimental de vigas de concreto armado com vergalhão de fibra de vidro.

Attracted by the goal of increasing durability in concrete structures and meeting the demand for sustainable solutions in civil construction, the application of fibre-reinforced polymers (FRP) stands out as a viable alternative. Among the products manufactured using this technology, reinforcement bars for concrete structures are worth mentioning. Globally, these bars are produced with glass, carbon, aramid and, more recently, basalt fibres. In the Brazilian context, this technology is relatively recent, and according to the technical literature, the manufacturing process of the bars plays a crucial role in their structural behaviour. Although this study is at an early stage, it provides a detailed overview of the behaviour related to the moment-deformation relationship and bending load. As previously described in the literature, the tests indicate that the performance of FRP reinforcement is impacted by the low modulus of elasticity, the surface configuration of the bar and the adhesion to the concrete. However, the results show consistency and correspond to the theoretical prediction. In general, it can be said that the use of FRP reinforcement in reinforced concrete beams is feasible, provided that the requirements arising from the mechanical characteristics of these reinforcements are taken into account in the design.

Keywords: Pultrusion. Non-metallic reinforcement. Tensile bending. Bonding

Autor para correspondência: Emerson Figueiredo Leal

E-mail:
lealemerson20@gmail.com

Declaração de Interesses:
Os autores certificam que não têm nenhum interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em conexão com o manuscrito

¹ Centro Universitário Integrado, Paraná, Brasil.

² Centro Universitário Integrado, Paraná, Brasil.

³ Centro Universitário Integrado, Paraná, Brasil.

INTRODUÇÃO

Este trabalho trata de uma investigação experimental que teve por objetivo estudar vigas de concreto armado em sua resistência a tração por flexão (armadura longitudinal e transversal) com barras não-metálicas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP).

A construção civil não é algo novo, desde a pré-história se tem aspectos que levam a conhecimento de que não era algo impossível, como empilhamento de pedras no estilo Dolmen já se faziam presentes, deixando claro que a humanidade estava destinada a, literalmente, grandes obras.

Ainda convém lembrar que os seres humanos passaram a utilizar pedra, madeira e barro para construir suas próprias casas.

Um detalhe interessante é que os Romanos foram alguns dos primeiros a utilizar o concreto, que nessa época era feito por uma mistura formada principalmente por cinzas vulcânicas, que após solidificada, permitia um resultado parecido com o cimento utilizado hoje (CARVALHO, 2008).

Em sua atualidade a construção civil teve uma alta evolução em vários aspectos, por exemplo, materiais, técnicas onde entra o conforto acústico e térmico, temos a parte estética, além de, segurança e qualidade da edificação. A evolução dos materiais utilizados nas edificações proporciona cada vez mais resistência e durabilidade, o uso de concreto moldado in loco nos proporciona uma usabilidade diversificada na hora da construção.

Em uma estrutura o concreto sozinho não possui resistência à tração suficiente para absorver os esforços solicitantes de uma edificação, por sua vez a armadura é essencial para realizar a resistência a esta força de tração no elemento estrutural.

Logo esta armadura é composta por vergalhões (barras com diversos tamanhos conforme sua utilização) sendo feitas por diversos materiais como por exemplo o aço carbono, a fibra de vidro, o basalto, a fibra de carbono entre outros, sendo representada como um esqueleto para minha estrutura, sendo presente em pilares, viga e lajes.

O concreto armado tem utilização em todos os tipos de obra, como edificações, obras de saneamento, pontes, estádios de futebol, usinas hidrelétricas, galpões, pisos industriais, rodovias, monumentos e afins (BOTELHO, 2011).

Atualmente, existe um vasto conhecimento sobre as propriedades destes materiais e seu comportamento ao longo do tempo, especialmente para estruturas expostas a meios fortemente agressivos como regiões litorâneas.

Diante das considerações expostas, torna-se evidente que um componente essencial na construção civil é o vergalhão, cuja aplicação se dá na constituição da

armadura do concreto armado, sua função primordial reside na resistência à tração em estruturas. desempenhando um papel fundamental em elementos como vigas, pilares e lajes, conforme destacado por BARRETO (2009).

Cabe salientar diversos materiais, como aço, fibra de carbono e fibra de vidro, podem constituir os vergalhões, conforme indicado por Scheffer et al. (2016)

À medida que se tornam opções cada vez mais atrativas, devido à sua durabilidade prolongada e resistência em áreas com exposição específica e adversidade ambiental, os compostos poliméricos têm sido extensivamente investigados e aplicados na indústria da construção civil.

Por meio desse estudo, foi realizada uma comparação entre uma viga com a armadura convencional de aço CA-50 e uma viga com armadura de fibra de vidro, ambas com a mesma bitola de material.

Para realizar essa análise, foi necessário confeccionar dois grupos de corpos de prova com as mesmas dimensões, sendo a única diferença o material de sua armadura. Com o auxílio de um equipamento específico para gerar os dados de sua resistência à tração com o rompimento do corpo de prova, os dados foram demonstrados na pesquisa, proporcionando uma análise conclusiva sobre o potencial desse material em relação ao aço.

Levando-se em conta o que foi observado, para concluir este estudo, todos os dados obtidos nos testes e estudos serão apresentados, a fim de determinar se esse material será ou não uma escolha viável para utilização, ou se ainda não é recomendável substituir o aço nas armaduras das vigas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Vergalhão de aço

Concreto armado é a estrutura que utiliza o concreto simples – uma mistura de agregados miúdos (areia), agregados graúdos, (brita), aglomerantes como cimento, e água, sendo constituído com uma armadura de aço em seu interior, possuindo resistência aos esforços de tração (PORTAL AEC WEB, 2013)

Segundo Bastos (2019) a armadura de aço que consiste no concreto armado é responsável para a resistência a tração, pois o concreto tem uma característica de ter uma baixa resistência a esta solicitação.

As nervuras presentes nos vergalhões, ilustradas na (FIGURA 1), desempenham uma função significativa na fabricação das armaduras do concreto armado, uma vez que promovem uma aderência mais eficiente entre o aço e o concreto. (NBR 7480, 2007).



FIGURA 1: vergalhão de aço com nervuras (Fonte: GERDAU, 2023)

FABRICAÇÃO VERGALHÃO DE AÇO

Segundo Peruzzi (2007), é descrita algumas características do Aço, como a alta resistência a tração, boa ductilidade e a tenacidade, é também um material considerado versátil devido uma possibilidade de aplicação em várias formas.

A norma NBR 7480; (2007), é estabelecido alguns requisitos para a fabricação das barras de aço, como suas espessuras e o modo que é fabricada as nervuras da barra.

É citado por Araújo (2015) que a laminação é um processo metalúrgico que consiste em dar formas para o aço, esse método consiste em aquecer a matéria prima que é o aço em placa ou barras, e consiste em passar entre dois cilindros, dando uma diminuição no produto e dando forma.

O processo de fabricação executada nas usinas siderúrgicas é explicado pela (FIGURA 2). Consiste em uma demonstração dos processos passados até chegar na parte do vergalhão.

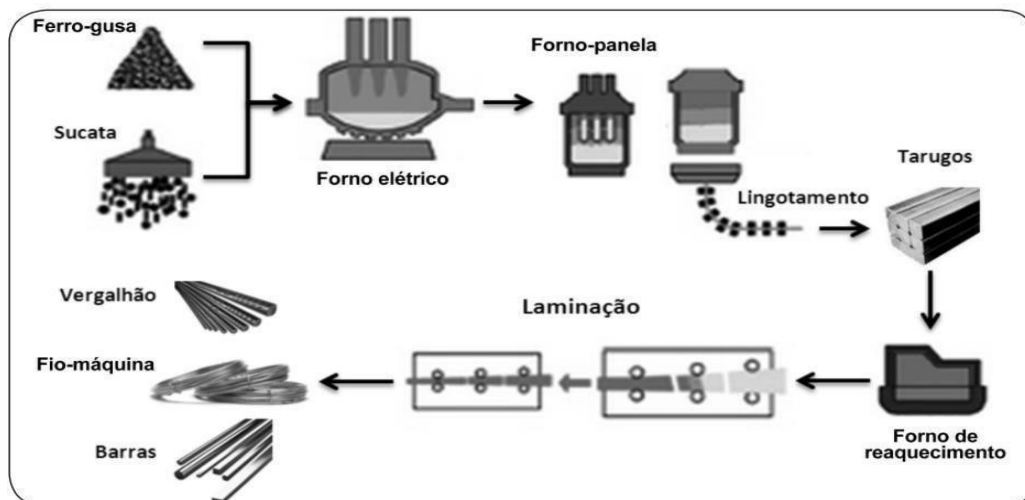


FIGURA 2: Processo das siderúrgicas para o vergalhão (Fonte: CARVALHO, MESQUITA E ARAÚJO, 2015.)

DIMENSIONAMENTO DE CONCRETO ARMADO COM AÇO

Segundo Araújo (2014), o concreto durante sua utilização deve apresentar e satisfazer suas qualidades de segurança, seu bom desempenho em serviço e a sua durabilidade. Contudo as normas brasileiras de dimensionamento visam trabalhar de forma que o concreto seja projetado para atender esses requisitos de segurança.

Logo as estruturas são responsáveis por assegurar certas ações importantes durante sua vida útil, portanto, devem apresentar segurança, conforto, estabilidade, sendo não apenas estrutural, mas também visual.

As normas NBR 6118:2023, ACI 318:2014, EUROCODE (1992 e 1994), são as mais utilizadas para o dimensionamento de estruturas de concreto armado utilizando em seus cálculos o método dos estados limites.

VERGALHÃO DE POLÍMERO DE FIBRA DE VIDRO

As barras de polímero reforçado com fibras são compostas por fibras contínuas (reforço) envoltas por resinas poliméricas (matriz). As fibras de reforço têm uma função estrutural, determinando a rigidez e resistência da barra na direção das fibras, enquanto a matriz polimérica é responsável pela aglutinação e proteção do sistema (*fib*, 2007).

Segundo Moura (2021) as fibras de vidros além de naturais e sintéticas, podem ser classificadas em três categorias, que são animais, vegetais e minerais, para a fabricação de vergalhões é utilizada a mineral sintética.

Moura (2021) cita que esse material vem ganhando mais aceitação na construção civil, pois tem uma excelente relação de preço e qualidade. As características físicas do vergalhão de fibra de vidro são parecidas com os vergalhões de aço, como mostra a (FIGURA 3).



FIGURA 3: vergalhão de fibra de vidro. (Fonte: Madareli casa e construção.)

MARTYNOVA e CEBULA (2018) apresentam que as fibras de vidro são classificadas conforme suas propriedades específicas, sendo elas, baixa condutividade elétrica, alta resistência, alta resistência química, alta elasticidade, alto teor de metais alcalinos, vidro de cal e sódio, baixa constante dielétrica, alta resistência aos álcalis e alta resistência em ambientes com ácidos.

Em complemento utilização de barras de FRP em elementos de concreto estrutural é crescente no segmento de materiais poliméricos, onde a redução do custo do material e a economia de trabalho para aplicação tornou a solução mais interessante frente à armadura de aço para os projetos da engenharia civil (SANTOS, G., 2014).

A ACI 440.1R (2015) apresenta algumas vantagens que devem ser consideradas na escolha de barras de FRP em substituição às armaduras de aço em estruturas de concreto armado:

a) Resistente à corrosão devido aos íons cloretos e ataques químicos, resultando em uma vida útil superior ao aço em ambientes marinhos e possibilitando um menor cobrimento de concreto;

- b) Dispensa a utilização de aditivos para reduzir a corrosão, apresentando maior tolerância a danos de manuseio do que aço revestido com epóxi;
- c) Resistência à tração superior ao aço;
- d) Baixo peso específico quando comparado com o aço;
- e) Alta resistência à fadiga.

As barras de FRP estão disponíveis comercialmente em diferentes tamanhos de bitola, conforme apresentado na (Tabela 1).

Nomenclatura das barras		Diâmetro nominal	Área (mm ²)
Padrão	Conversão métrica	(mm)	
N° 2	N° 6	6,4	31,6
N° 3	N° 10	9,5	71
N° 4	N° 13	12,7	129
N° 5	N° 16	15,9	199
N° 6	N° 19	19,1	284
N° 7	N° 22	22,5	387
N° 8	N° 25	25,4	510
N° 9	N° 29	28,7	645
N° 10	N° 32	32,3	819
N° 11	N° 36	35,8	1006

TABELA 1 – Diâmetro das barras de FRP (Fonte: ACI 440.1R, 2015).

FABRICAÇÃO DO VERGALHÃO DE POLÍMERO DE FIBRA DE VIDRO

Os vergalhões não possuem uma norma brasileira mais MOURA (2021) explica o processo de fabricação, que é através do método de pultrusão, que consiste em as fibras serem tensionadas por uma máquina em direção a uma cuba de impregnação, com isso uma resina líquida impregna nas fibras, e após isso é passada por um molde circular que irá dar forma ao vergalhão (FIGURA 4).

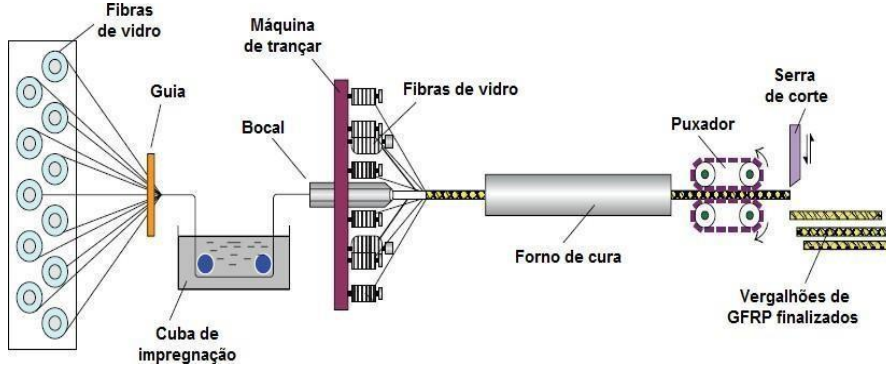


FIGURA 4: Fabricação do vergalhão de fibra de vidro. (Fonte: MOURA, 2021.)

RESISTÊNCIA DOS VERGALHÕES DE AÇO E FIBRA DE VIDRO NO CONCRETO

O estudo feito por Araújo (2017) foi realizado o ensaio de arrancamento direto em três tipos de vergalhões, sendo o de aço, fibra de vidro e fibras de carbono, com o intuito de verificar o comportamento de ligação entre os materiais e o concreto e obteve o resultado apresentado na (FIGURA 5). CFRP- vergalhão de carbono, GFRP- vergalhão de fibra de vidro.

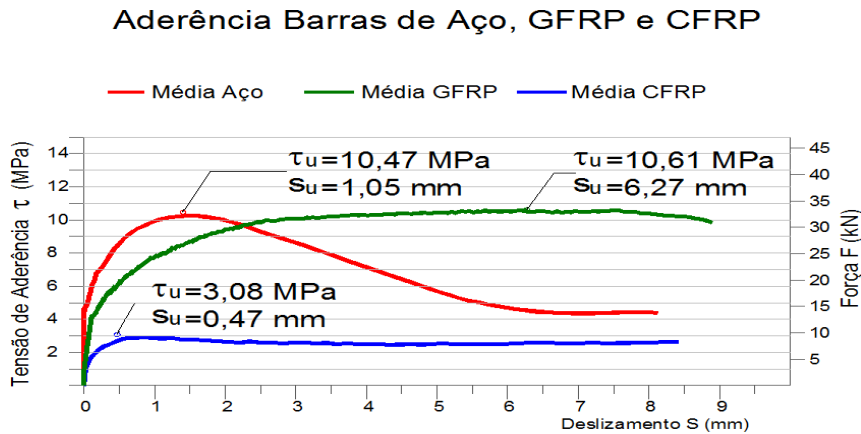


FIGURA 5: tensão de aderência/deslizamento (Fonte: ARAÚJO, 2017)

Araújo (2017) demonstra por seus ensaios que o vergalhão de fibra de vidro, tem alto valor de tensão máxima de aderência, porém o deslizamento de ruptura é muito maior do que os das barras de aço.

Os pesquisadores scheffer et.al (2016) utilizaram a NBR ISSO 6892-1, que determina os métodos de ensaios para tração para materiais metálicos, porem como não existe uma norma para ensaios em fibras de vidro utilizaram as mesmas especificações de aço para testes em fibra de vidro.

CP	Resistência à Ruptura – Aço (MPa)	Resistência à Ruptura – Fibra de Vidro (MPa)
1	654,0	753,4
2	663,9	553,8
3	648,8	973,6
4	655,9	913,5
5	653,7	915,3
6	-	635,7

TABELA 2: Resistencia ensaios de tração. (Fonte: SCHEFFER, 2016.)

Scheffer et.al (2016) com os ensaios realizados obtiveram os resultados apresentados na TABELA 2, os resultados dos ensaios do aço foram considerados consistentes, os de fibra oscilaram muito. Com os resultados é apresentado que a fibra de vidro é 1,5 vezes maior que o aço.

DIMENSIONAMENTO DO CONCRETO COM PRF

Segundo Ribeiro (2009), existem novos materiais que apresentam uma perspectiva promissora para utilização como armadura para o concreto armado sendo um deles o polímero reforçado por fibras (PRF). Mas sua metodologia de ser aprimorada em relação as duas características de armadura.

Entretanto o código ACI Committee 440 (2003), estabelece alguns detalhes importantes sobre o PRF, com parando com o Aço o PRF tem sue modulo de elasticidade e ductibilidade baixo (FIGURA 6).

Portanto o modulo de elasticidade de uma força em uma determinada estrutura armada aumenta em relação ao do PRF em relação ao modulo de elasticidade do aço, já sua baixa ductibilidade está relacionada ao modulo de ruptura.

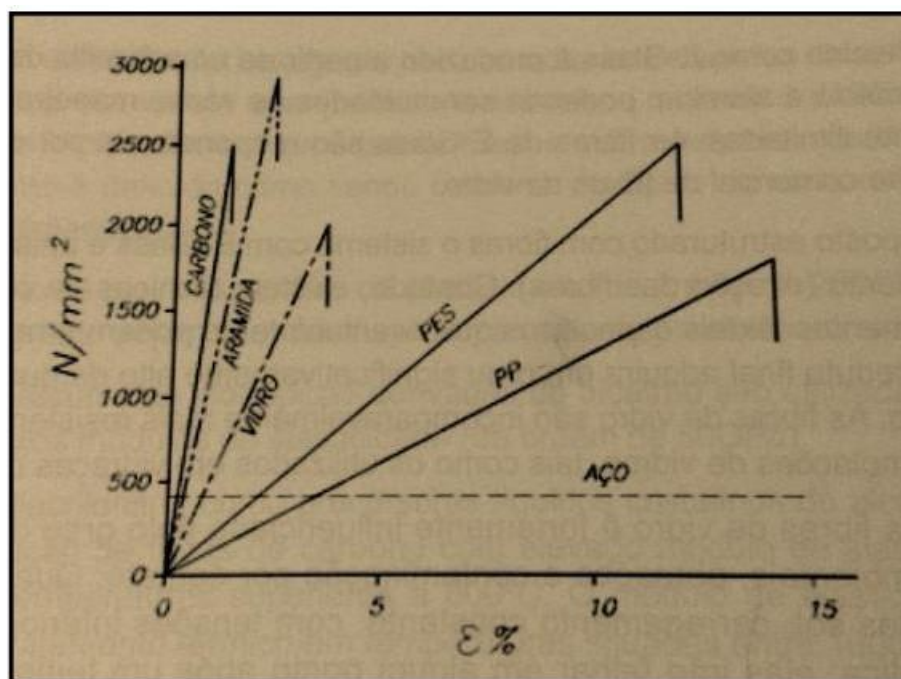


FIGURA 6: Diagrama tensão-deformação de plásticos para FRP (Fonte: MACHADO; MACHADO, 2015.)

MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO-CARBONO E A FIBRA DE VIDRO

Callister (2012) define que o módulo de elasticidade é a rigidez ou a resistência do material à deformação elástica. Quanto maior for este módulo de elasticidade mais rígido será o material e menor será a deformação elástica resultante de uma tensão.

ABNT NBR 8800 (2008), item 4.5.2.9, norma que regulamenta o aço estrutural, suas características mecânicas e de dimensionamento define para aços carbono um módulo de elasticidade $E=200$ Gpa, além de outras propriedades importantes.

Especificação	Teor de carbono %	Limite de escoamento f_y (MPa)	Resistência à ruptura f_u (MPa)
ABNT MR250	baixo	250	400
ASTM A7		240	370-500
ASTM A36	0,25-0,29	250 (36 ksi)	400-500
ASTM A307 (parafuso)	baixo	—	415
ASTM A325 (parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EN S235	baixo	235	360

TABELA 3: Propriedades Mecânicas de Aços-Carbono (Fonte: Estruturas de aço: dimensionamento prático, Pfeil, Walter)

Relatórios de teste em amostras contendo 55 a 60% de fração de volume de fibras contínuas de vidro em uma matriz de éster vinílico ou resina de poliéster isoftálica indicam um módulo de compressão de elasticidade de 5000 a 7000 ksi (35 a 48 GPa) (Wu 1990).

Bar type	Yield strength f_y or tensile strength f_{tu} , ksi (MPa)	Modulus of elasticity, ksi (GPa)	ρ_b or ρ_{fb}
Steel	60 (414)	29,000 (200)	0.0335
GFRP	80 (552)	6000 (41.4)	0.0078
AFRP	170 (1172)	12,000 (82.7)	0.0035
CFRP	300 (2070)	22,000 (152)	0.0020

TABELA 4: Valores típicos para taxa de armadura (Fonte: ACI 440.1R-19)

METODOLOGIA

Inicialmente, foi conduzido uma revisão, englobando artigos acadêmicos, pesquisas científicas nacionais e internacionais, bem como livros de autores especializados e revistas especializadas nos materiais em questão. Essa revisão teve como objetivo obter informações relevantes e resultados que permitissem a análise e a comparação das propriedades dos vergalhões de fibra de vidro e de aço.

Na segunda parte do estudo, foram controlados ensaios utilizando uma viga de concreto armado com dimensões e diâmetros uniformes, sendo a única diferença o material utilizado para as armaduras. Foram confeccionados seis corpos de prova, sendo três deles com armaduras de aço e os outros três com armaduras de fibra de vidro. A seleção de três corpos de prova para cada material foi realizada com o objetivo de obter os resultados e calcular a média.

Esses corpos de prova tiveram dimensões de 60 cm de comprimento, base de 12 cm e altura de 14 cm, utilizando armaduras de aço e fibra de vidro com diâmetro de 8 mm conforme a norma NBR 14142, referente ao ensaio de tração por flexão (FIGURAS 09 e 12).

De acordo com a norma NBR 6118, a cura do concreto após a moldagem deve ocorrer por um período de 28 dias, em um ambiente úmido (FIGURA 16), a fim de evitar a perda de água. Nesse sentido, os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida, após esses dias passaram a ser retirados visando realizar os testes com o concreto em sua máxima resistência, exemplificado na ABNT NBR 6118, procedimento define que a resistência à compressão deve ser maior quando o concreto for exposto a atmosferas agressivas, tais como em ambientes marinhos e industriais.

Os testes serão realizados em uma prensa hidráulica (EMIC), na qual as duas extremidades da viga serão Bi-apoiadas, enquanto uma carga será aplicada no centro da viga até que tenha causado sua ruptura, sendo aplicada por deslocamento a uma velocidade de 0,06mm/minutos. A máquina fornecerá um valor de resistência em MPa, o qual será comparado entre as armaduras de aço e de fibra de vidro, permitindo determinar qual material apresenta maior vantagem em termos de desempenho, sendo ele resistência a tração até a ruptura e seu comportamento elástico.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A presente pesquisa emprega um método experimental que consiste na análise de um modelo estrutural por meio do ensaio de compressão de um compósito. Este processo categoriza-se em dois principais grupos: concreto armado com aço e concreto armado com fibra de vidro. A investigação contempla um total de seis corpos de prova, sendo três pertencentes ao grupo de concreto armado com aço (VA 01, VA 02 e VA 03) (FIGURA 07, lado direito) e os outros três ao grupo de concreto armado com fibra de vidro (VF 01, VF 02 e VF 03) (FIGURA 07, lado esquerdo).



FIGURA 07 - Corpo de prova em concreto armado (Fonte: Autor, 2023)

Inicialmente, foram determinadas dimensões equivalentes para todos os modelos, usando como parâmetro o vão limite que a máquina de ensaios alcançava, sendo este de 0,55 metros de distância entre os apoios. Além disso, foi necessário atender a capacidade de carga máxima de 300 KN existente no laboratório da universidade UTFPR em Campo Mourão – PR, logo a força foi aplicada por deslocamento em uma velocidade de 0,06 mm/min. Atendendo a estes requisitos, foram previstas vigas de 0,6 metros de comprimento, com 0,12 m de largura e 0,14 m de altura para a realização dos ensaios (FIGURA 08).

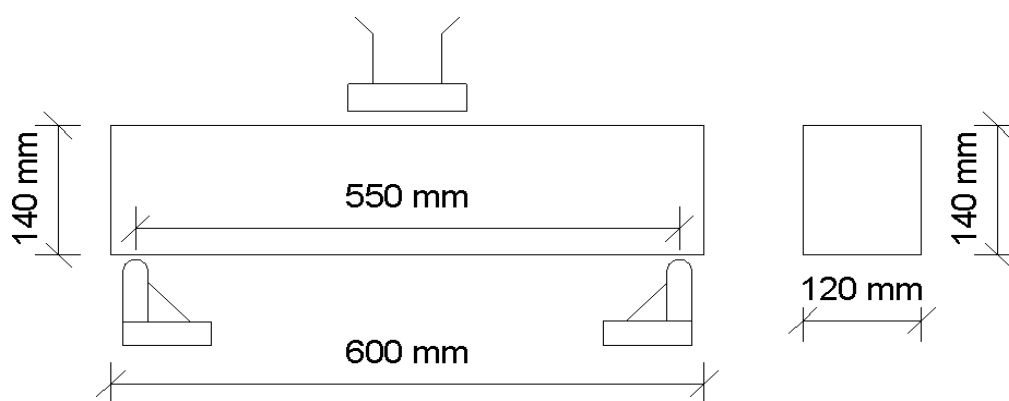


FIGURA 08 - Detalhamento do ensaio a compressão (Fonte: Autor - Software Revit, 2023)

DETALHAMENTO GRUPO 01

As vigas indicadas VA 01, VA 02 e VA 03 são estruturas construídas com barras de aço, apresentando as seguintes dimensões: 60 cm de largura, 12 cm de altura e 14 cm de espessura. A armadura longitudinal inferior é composta por duas barras de diâmetro 8 mm, utilizando aço CA-50. Quanto aos estribos, são quatro, cada um com diâmetro de 6,3 mm e confeccionados em aço CA50, espaçados a cada 17 cm. Por fim, a armadura longitudinal superior é constituída por duas barras de diâmetro de 8 mm, também fabricadas em aço CA-50.

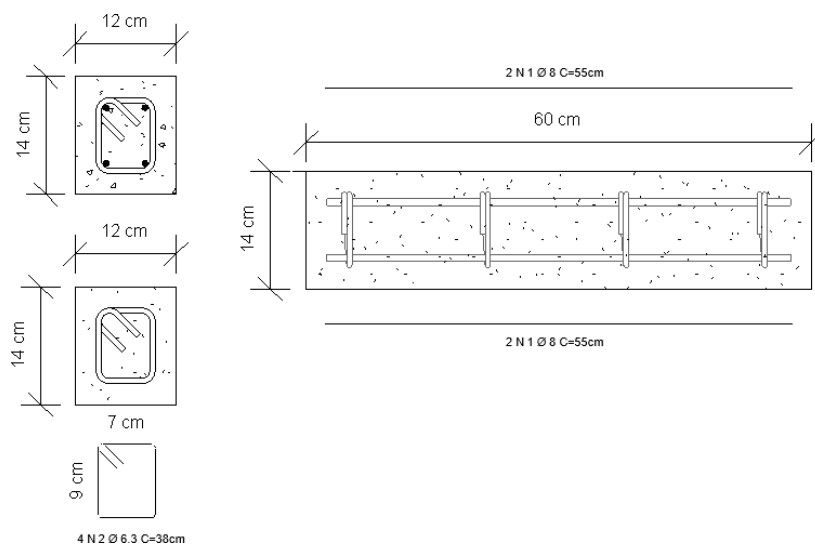


FIGURA 09 - Detalhamento das Vigas de concreto armado com aço (Fonte: Autor, 2023)



FIGURA 10 - Execução dos Estribos em aço (Fonte: Autor, 2023)



FIGURA 11 - Preparo das armaduras de aço, uso de solda para fixação dos Estribos (Fonte: Autor, 2023)

DETALHAMENTO GRUPO 02

As vigas identificadas como VF 01, VF 02 e VF 03 são estruturas constituídas por barras de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (GFRP) conforme (FIGURA 14). Apresentam as seguintes dimensões: 60 cm de largura, 12 cm de altura e 14 cm de espessura. A armadura longitudinal inferior é composta por duas barras de diâmetro 8 mm, utilizando GFRP (FIGURA 12). Os estribos, por sua vez, são quatro, cada um com diâmetro de 6,3 mm, também fabricados em GFRP, com espaçamento de 17 cm (FIGURA 13). Concluindo, a armadura longitudinal superior consiste em duas barras de diâmetro de 8 mm, fabricadas em GFRP.

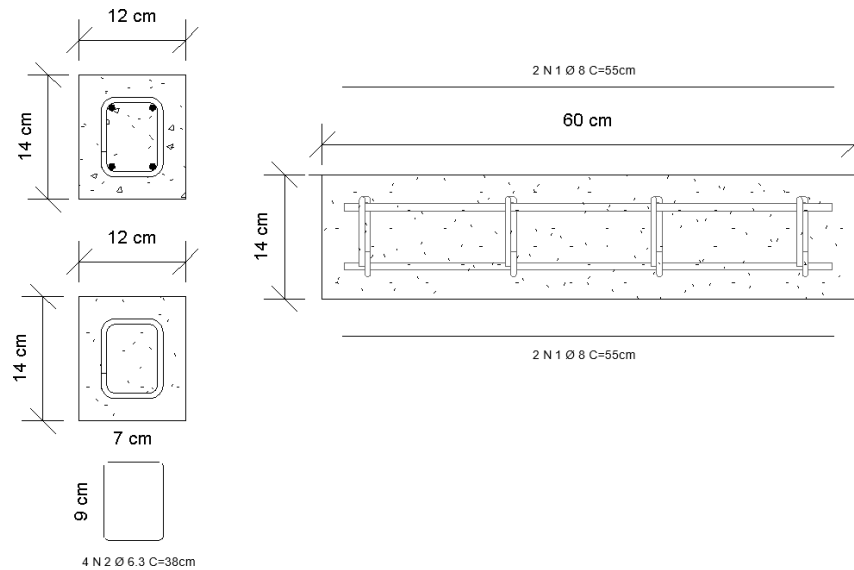


FIGURA 12 - Detalhamento das Vigas de concreto armado com GFRP (Fonte: Autor, 2023)



FIGURA 13 - Execução dos Estribos em GFRP (Fonte: Autor, 2023)



FIGURA 14 - Preparo das armaduras de GFRP, uso de abraçadeira Nylon para fixação dos Estribos (Fonte: Autor, 2023)

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Concreto

No processo de dosagem do concreto C25, adotou-se o cimento CP II E 32, especificamente o tipo Portland composto com escória de alto forno, conhecido como Ultra Forte. Como componente de agregado miúdo, optou-se pela utilização de areia fina, obtida em estabelecimentos locais de materiais de construção. O agregado graúdo selecionado foi a brita 1, adquirida também no comércio local. Por fim a água empregada na mistura.



FIGURA 15 - Preparo da dosagem do concreto C25 (Fonte: Autor, 2023)

Para a elaboração da dosagem do concreto, empregou-se uma lata de 20 litros, foram adicionadas à betoneira demonstrada na Figura 15 uma lata de cimento, três latas de brita, três latas de areia e meia lata de água.

Esta proporção na mistura do concreto, reconhecida nos métodos construtivos como 3 para 1, foram selecionadas devido à sua ampla utilização em empreendimentos de construção.

Os corpos de prova foram mantidos em um ambiente úmido submersos para garantir o processo de cura do concreto até a data do ensaio (FIGURA 16).



FIGURA 16 - Cura dos Corpos de provas submersos (Fonte: Autor, 2023)

FORMAS

Foram confeccionadas seis formas com folha de zinco, com dimensões internas iniciais de 140 x 600 x 120 mm (FIGURA 17). Por se tratar de fácil fixação, foi sugerida a utilização de encaixes para a sustentação do sistema de fechamento das formas com o uso de rebite, uma vez que estes danificam menos o material, além de serem mais práticos durante a execução da desformas dos corpos de provas (FIGURA 18).



FIGURA 17 - Execução das formas (Fonte: Autor, 2023)



FIGURA 18 - Desmoldando / armaduras prontas para concretagem (Fonte: Autor, 2023)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O propósito desse estudo é fornecer um resumo das análises de caracterização dos materiais, abrangendo tanto os ensaios realizados nas vigas confeccionadas com aço quanto aquelas confeccionadas com fibra de vidro.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste segmento, será exposto os variados resultados obtidos em cada viga, originados pelo ensaio de flexão de 3 pontos (FIGURA 19). Foram investigados parâmetros como flecha, deformação do composto (concreto armado), fissuração e modo de ruptura.

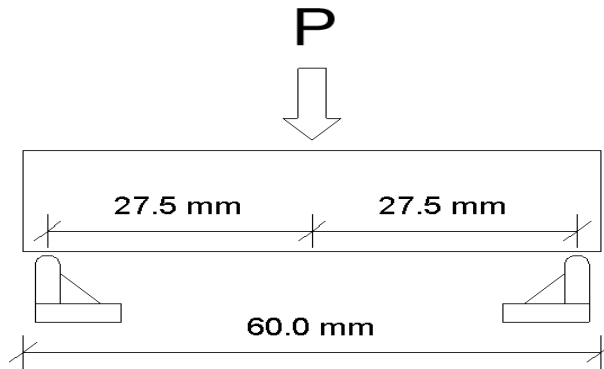


FIGURA 19 – Detalhe da carga aplicada. (Fonte: Autor, 2023)

ENSAIO DOS CORPOS DE PROVAS

O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade máxima de 300 KN. Para a execução do ensaio o primeiro corpo de prova a ser ensaiado foi com armadura convencional.



FIGURA 20 – Corpos de provas na EMIC, CA-50 (Fonte: Autor, Laboratório de Laboratório de Sistemas Estruturais UTFPR, 2023)

A velocidade de ensaio foi definida como 0,06 mm/min. Na (FIGURA 20) são observados os corpos de prova antes do ensaio no equipamento onde se situam os corpos de provas com armadura de aço, corpos de provas com armadura de fibra de vidro GFRP (FIGURA 21).



FIGURA 21 - Corpos de provas na EMIC, GFRP (Fonte: Autor, Laboratório de Laboratório de Sistemas Estruturais UTFPR, 2023)

CARGA E MODO DE RUPTURA

As Figuras 22 e 23 mostram os dois grupos de corpos de provas no momento de ruptura, ou seja, estado limite último (ELU), onde foi aplicada carga por deslocamento pelo equipamento.

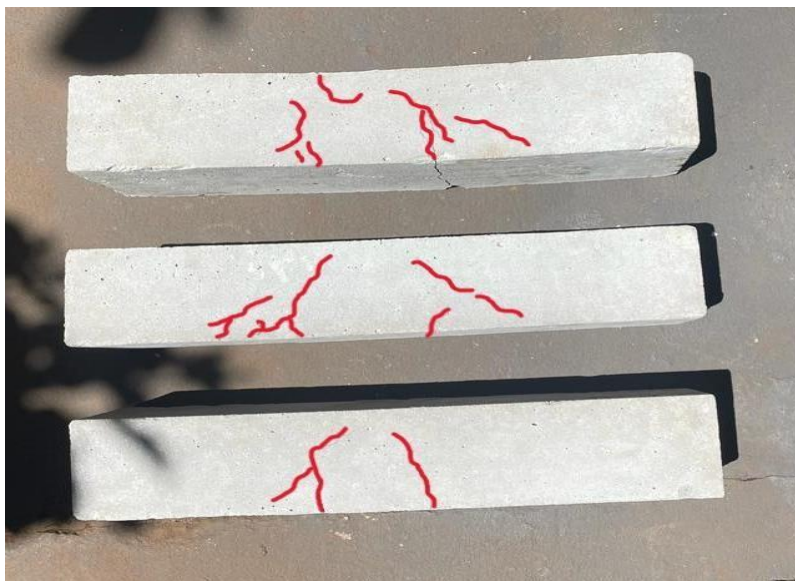


FIGURA 22 - Viga com armaduras de aço (Fonte: Autor, 2023)



FIGURA 23 - Viga com armaduras em GFRP (Fonte: Autor, 2023)

Tanto os corpos de provas com armadura convencional como os corpos de provas com armadura em GFRP apresentaram ruptura por cisalhamento, trincas com ângulo de 45° com início nos apoios e final na extremidade superior da viga ao centro de seu vão, onde foi aplicada a carga. Notando que nos corpos de provas com armaduras em GFRP uma nítida diferença nas trincas, sendo elas apenas em uma direção da viga. Além disso, apresentaram fissuras de flexão, ou seja, localizadas na extremidade inferior entre os apoios.

ANÁLISE DAS CARGAS APLICADAS

Os ensaios conduzidos nos corpos de prova mediante o uso da prensa hidráulica (EMIC) proporcionaram-nos resultados que foram expressos nos gráficos de 1 a 7, os quais representam a tensão e deformação dos referidos corpos de prova.

Os gráficos 1, 2 e 3 retratam os corpos de prova que incorporam armadura de aço, identificados pelas nomenclaturas "VA" para vergalhão de aço. Por sua vez, os gráficos 4, 5 e 6, utilizando a abreviação "VF" no gráfico, indicam corpos de prova com vergalhão de fibra de vidro.

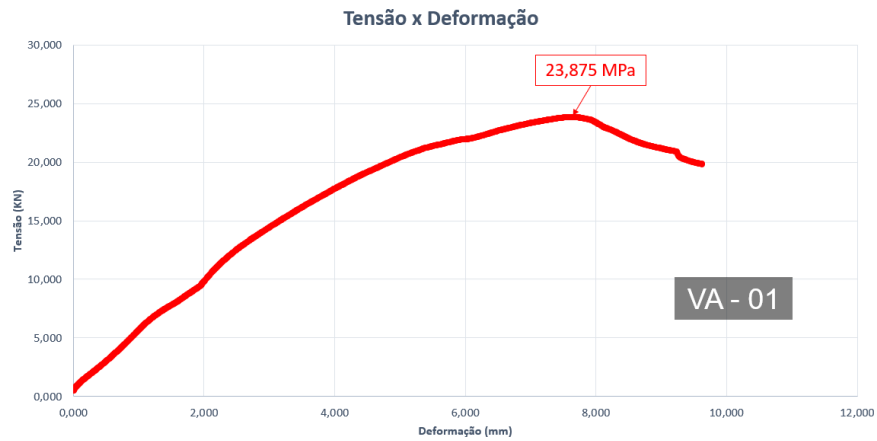


GRÁFICO 1 - Corpo de prova com armadura de aço 01 (Fonte: Autor, 2023)



GRÁFICO 2 - Corpo de prova com armadura de aço 02 (Fonte: Autor, 2023)

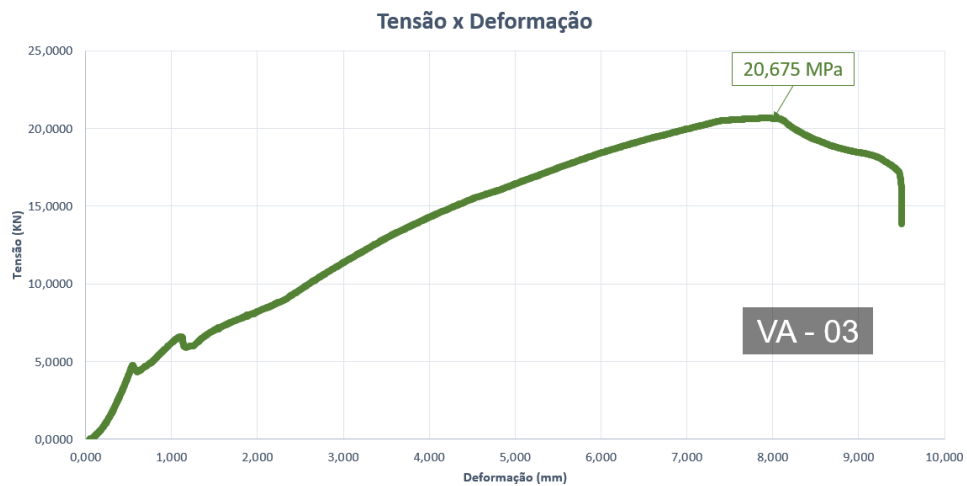


GRÁFICO 3 - Corpo de prova com armadura de aço 03 (Fonte: Autor, 2023)

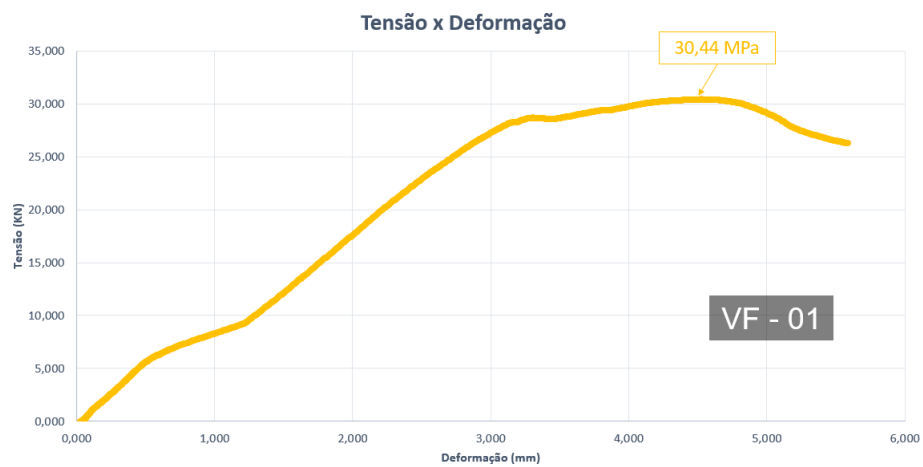


GRÁFICO 4 - Corpo de prova com armadura de GFRP 01 (Fonte: Autor, 2023)

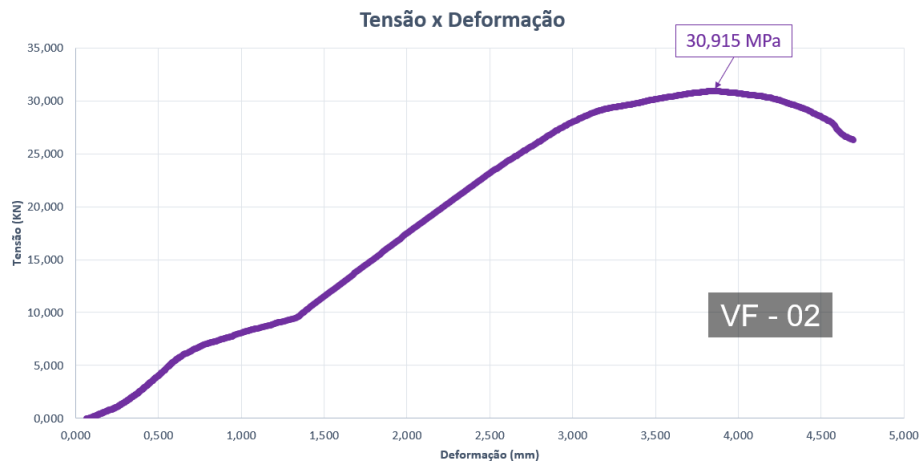


GRÁFICO 5 - Corpo de prova com armadura de GFRP 02 (Fonte: Autor, 2023)

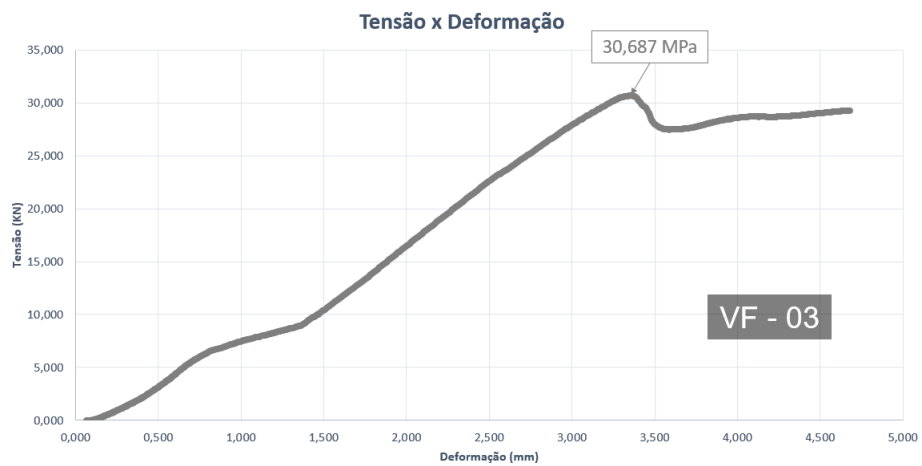


GRÁFICO 6 - Corpo de prova com armadura de GFRP 03 (Fonte: Autor, 2023)

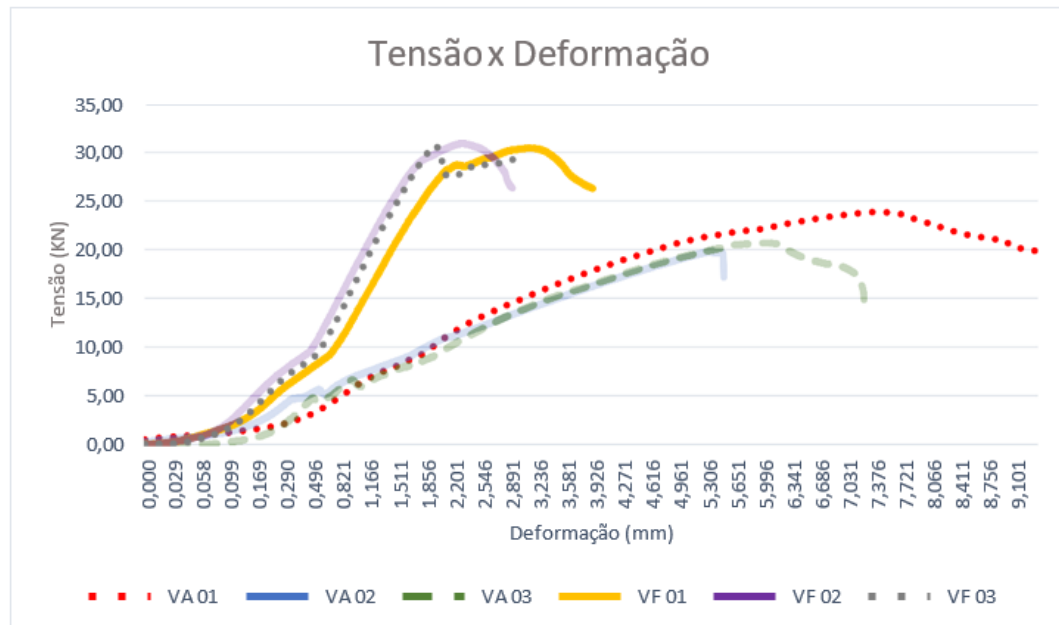


GRÁFICO 7 - Corpos de provas do de VA e VF (Fonte: Autor, 2023)

Vergalhão de Aço		
CP	Tensão (Mpa)	Deformação (mm)
VA 01	23,875	7,8
VA 02	19,87	7,2
Va 03	20,675	8
Média	21,473	7,67

Tabela 5 – Resultados dos CP’s com Vergalhão de aço (Fonte: Autor, 2023)

Vergalhão de Fibra de Vidro		
CP	Tensão (Mpa)	Deformação (mm)
VF 01	30,44	4,6
VF 02	30,915	3,8
VF 03	30,687	3,4
Média	30,681	3,933

Tabela 6 – Resultados dos CP's de Vergalhão de Fibra de Vidro (Fonte: Autor, 2023)

Os resultados do Gráfico 7, conforme representados por "VA" (vergalhão de aço) e "VF" (vergalhão de fibra de vidro), permitem concluir acerca dos ensaios realizados nos corpos de prova. Já as Tabelas 5 e 6, por sua vez, reflete a média resistência à tração dos CP's e sua deformação até a ruptura. Dessa maneira, é possível observar que os corpos de prova compostos com armadura de aço evidenciam uma resistência inferior àqueles compostos por fibra de vidro. Contudo, sua deformação até a ruptura é mais pronunciada.

Após a análise dos resultados, constatou-se que o comportamento dos corpos de prova VA 01, VA 02 e VA 03, contendo o composto de aço de liga de ferro e carbono revelou um comportamento plástico evidente, manifestando deformações que sinalizam sua iminente ruptura, especialmente pela formação de fissuras técnicas no centro do corpo de prova. Essas fissuras foram atribuídas ao alongamento das barras positivas, influenciando o surgimento de trincas verticais.

Em contraste, os VF 01, VF 02 e VF 03, compostos por vergalhão de fibra de vidro apresentaram uma resistência superior em comparação com os compostos de aço. No entanto, essas vigas não exibiram um comportamento plástico ideal para fins de segurança, diferentemente das vigas de aço, que revelaram deformações antes da ruptura. As fissuras no composto de fibra de vidro apresentavam uma distribuição distinta, localizando-se mais próximo ao apoio em um ângulo de 45°. Observe-se que a ruptura desses compostos poderia ter sido influenciada pelos esforços cortantes, nos quais os estribos desempenharam um papel crucial. Vale ressaltar que os estribos podem não seguiram um padrão semelhante aos vergalhões de fibra de vidro devido ao processo de moldagem in loco, em contraste com a produção industrializada mencionada neste estudo experimental.

Alguns autores, como BRUNA TEIXEIRA, (2018), corroboram esse comportamento, destacando a ruptura por cisalhamento nos corpos de prova de composto com fibra de vidro e a presença de fissuras a 45° próximo ao apoio da viga.

No que diz respeito à aderência dos vergalhões ao concreto, os vergalhões de aço atendidos sem problemas ao composto, enquanto os vergalhões de fibra de vidro revelaram desafios durante os ensaios de tração. A análise dos ensaios de tração indicou que, embora o vergalhão de aço tenha produzido resultados consistentes, o vergalhão de fibra de vidro tenha comprometido dificuldades de entrega à máquina de ensaio, resultando em escorregamentos que comprometeram a realização eficaz do estudo.

Essa observação também foi compartilhada por BRUNA TEIXEIRA (2018), que utilizou tubo PVC e Epóxi para a aderência nos ensaios de tração, encontrando desafios semelhantes com a proteção e a obtenção dos resultados desejados para a fibra de vidro.

Em termos de custo, é evidente uma distinção notável, uma vez que o valor da fibra de vidro é superior ao do aço. No entanto, essa disparidade é compensada por vantagens em outros aspectos, especialmente na agilidade de transporte. Enquanto o aço requer um caminhão devido às suas barras de 12 metros, a fibra de vidro, por outro lado, dispensa essa necessidade. Sua capacidade de ser enrolada em rolos semelhantes a cordas de até 100m permite que seja transportada por um carro comum. Isso não apenas simplifica o processo logístico, mas também destaca a flexibilidade inerente da fibra de vidro como uma característica distintiva em comparação com o aço.

CONCLUSÕES

A análise dos ensaios realizados proporcionou uma conclusão substancial no que tange às características distintivas entre a armadura de aço e a armadura de fibra de vidro. A pesquisa evidenciou comportamentos singulares nas vigas, abrangendo modalidades de ruptura, configurações de fissuras e resistências diferenciadas, conforme as F22 e 23, os Gráficos 01, 02, 03, 04, 05, 06 e 07, além das Tabelas 05 e 06, apresentados neste estudo.

Os resultados obtidos demonstram que mantendo proporções equivalentes, a armadura de fibra de vidro apresenta uma resistência superior quando comparada à sua contraparte em aço. Esta constatação, fundamentada nos dados adquiridos nos ensaios, confirma a potencialidade e a eficácia do uso de armaduras de fibra de vidro em estruturas de concreto armado.

Essa superioridade não apenas ressalta a importância da inovação na escolha de materiais na engenharia civil, mas também sugere perspectivas promissoras para a aplicação prática dessa tecnologia em projetos estruturais futuros. Assim, os resultados

deste estudo não apenas são sugeridos para o conhecimento científico, mas também oferecem diretrizes inovadoras para profissionais e pesquisadores no campo da construção civil em busca de alternativas mais eficientes e sustentáveis.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre vigas de concreto armadas com armaduras de diferentes materiais em futuras investigações, as seguintes sugestões são consideradas:

- Condução de um estudo comparativo envolvendo armaduras de materiais diferentes desses usados neste trabalho, como armaduras de aramidas e basalto, com o intuito de obter uma análise comparativa de suas respectivas resistências.
- Realizar uma análise comparativa de custos, examinando uma obra que emprega armaduras de fibra de vidro e armaduras de aço. O objetivo é avaliar a orientação financeira da construção com o uso de fibra de vidro, fornecendo uma análise aprofundada dos aspectos econômicos associados à escolha entre esses dois materiais na execução de estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BASTO, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do Concreto Armado**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/Acer/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/tcc%20escrevendo/pdfs/BASTOS,%20PAULO%20SERGIO%20BASTOS.pdf> Acesso em: 19 de maio 2023.
2. AÇOMAS, 2022. **Vergalhões lisos e nervurados: principais características**. Disponível em: <https://acomais.com.br/vergalhoes-lisos-e-nervurados/#:~:text=Vergalh%C3%B5es%20nervurados%3A%20proporcionam%20maior%20ader%C3%Aancia,indicados%20para%20a%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil>. Acesso em: 19 maio 2023.
3. TEIXEIRA, Bruna de Almeida Carvalho. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro um estudo experimental**. 2018. 181 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas; Geotecnia; Construção Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/11656> . Acesso em: 19 de maio 2023.
4. MOURA, Ruan Carlos de Araújo. **Análise da Durabilidade de Armaduras Poliméricas Reforçadas com Fibra de Vidro Submetidas ao Ambiente Alcalino e a Elevadas Temperaturas**. 2021. 176 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/34934/1/Tese_Doutorado_Ruan_Moura_PP_EC_Final.pdf . Acesso em: 20 maio 2023.
5. MARTYNOVA, E.; CEBULLA, H. **Glass Fibers**. In: MAHLTIG, B.; KYOSEV, Y. **Inorganic and Composite Fibers**, Elsevier, p. 131 – 163, 2018. Disponível em: <https://dokumen.pub/inorganic-and-composite-fibers-production-properties-and-applications-9780081022283-008102228x.html>. Acesso em: 20 de maio 2023
6. 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**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <http://patrimonio.uff.br/wp-content/uploads/sites/461/2021/09/ESTUDO-EXPERIMENTAL-DA-ADR%C3%AANCIA-ENTRE-O-CONCRETO-E-BARRAS-DE-A%C3%87O-DE-COMPOSITOS-DE-FIBRA-DE-VIDRO-E-COMPOSITOS-DE-FIBRAS-DE-CARBONO.pdf>. Acesso em 21 de maio 2023.
7. SCHEFFER, Daniel kashiwamura et al. **Avaliação de Resultados de Ensaios à Tração de Vergalhões de Fibra de Vidro e de Aço para o Uso no Grampeamento da Frente de Escavação de Túneis em Maciços Terrosos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 07., 2016, Belo Horizonte. Conferência. São Caetano do Sul: [S.N.], 2016. Disponível em:

- https://www.researchgate.net/publication/315834700_Avaliacao_de_Resultados_d_e_Ensaio_a_Tracao_de_Vergalhoes_de_Fibra_de_Vidro_e_de_Aco_para_o_Us_o_no_Grampeamento_da_Frente_de_Escavacao_de_Tuneis_em_Macicos_Terrosos. Acesso em 21 de maio 2023.
8. Wu, Wei-Pin, "**Propriedades termomecânicas de barras de plástico reforçado com fibra (FRP)**". (1991). *Teses de Pós-Graduação, Dissertações e Relatórios de Problemas*. 10052. Disponível em: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/10052/> Acesso em: 06 maio 2023
 9. Mallick, PK, 1988, **Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Marcell Dekker, Inc., Nova York**, 469 pp. Disponível em: https://ia803204.us.archive.org/24/items/IntroductionToBasicManufacturingProcessesAndWorkshopTechnology/Fibre_Reinforced_Composites.pdf Acesso em: 08 maio 2023
 10. PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2015. 355 p. Disponível em: <https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2016/02/estruturas-de-aco-dimensionamento-pratico.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023
 11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2008: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 609 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/default.aspx?O=1>. Acesso em: 01 março 2023
 12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142 – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/default.aspx?O=1>. Acesso em: 05 março 2023
 13. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R-19: Guide for the Design and Construction Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars**. Farmington Hills: Aci, 2015. 83 p. Disponível em: https://basaltfibers.com/wp-content/uploads/2021/05/Standart_ACI-4401R15.pdf. Acesso em: 09 abril 2023.
 14. CARVALHO, João Dirceu, **Um pouco sobre a história do concreto, Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, DEC, Universidade. Estadual de Maringá, PR**, 2008.
 15. MARCELLINO, Narbal. **Concreto armado é solução durável e econômica**. Portal AEC Web. Disponível em: http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-armadoe-solucao-duravel-e-economica_6993_0_1. Acesso em: 01 junho 2023.
 16. FIB. FÉDERATION INTERCIONALE DU BETÓN. **CEB/FIB Bulletin 40:FRP reinforcement in RC structures**. 2007.

17. SANTOS, G. S. **Aplicação de mantas de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) como reforço à punção em lajes lisas de concreto armado.** 2014. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
18. SCHEFFER, Daniel kashiwamura et al. **Avaliação de Resultados de Ensaios à Tração de Vergalhões de Fibra de Vidro e de Aço para o Uso no Grampeamento da Frente de Escavação de Túneis em Maciços Terrosos.** In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 07., 2016, Belo Horizonte.** Conferência. São Caetano do Sul: [S.N.], 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315834700_Avaliacao_de_Resultados_d_e_Ensaio_a_Tracao_de_Vergalhoes_de_Fibra_de_Vidro_e_de_Aco_para_o_Us_o_no_Grampeamento_da_Frente_de_Escavacao_de_Tuneis_em_Macicos_Terrosos. Acesso em: 12 agosto 2023.
19. BARRETO, Matheus de Faria e Oliveira. **Características Mecânicas de Vergalhões de Aço Auto-Revenido.** 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS837LJQ/1/disserta_o_matheus_de_faria_2009.pdf. Acesso em: 12 agosto 2023.
20. TEIXEIRA, Bruna de Almeida Carvalho. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro um estudo experimental.** 2018. 181 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas; Geotecnia; Construção Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/11656> . Acesso em: 19 de maio 2023.

Recebido: 10 de junho de 2024

Versão Final: 10 de junho de 2024

Aprovado: 14 de junho de 2024