TÍTULO: ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DO VERGALHÃO DE FIBRA DE VIDRO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

PEREIRA, Natã S.[1]
CARVALHO, Richard C. [1]
SILVA, Marcelo[2]
Universidade São Francisco
nata.pereira@mail.usf.edu.br
richard.carvalho@mail.usf.edu.br

[1] Natã de Souza Pereira e Richard Clay de Carvalho, Alunos do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista
[2] Orientador Professor Mestre Marcelo da Silva, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

Resumo. Este estudo investigou a viabilidade do uso do vergalhão de fibra de vidro como alternativa de substituição do aço convencional em estruturas de concreto armado. O mesmo foi baseado em diversas referências bibliográficas nacionais, para analisar as propriedades físicas, químicas e mecânicas do vergalhão de fibra de vidro, bem como suas vantagens e desvantagens em relação ao aço, incluindo fatores como resistência à tração e resistência a agentes ambientais. Também comparou barras de aço CA-50 e barras de fibra de vidro, utilizando testes de tração na flexão para determinar qual material apresenta o melhor desempenho em condições convencionais. Tendo em conta os estudos e testes realizados, podemos afirmar que embora o reforço de fibra de vidro possa oferecer diversas vantagens como grande estabilidade, grande leveza e inovação, a sua implementação ainda enfrenta desafios como a necessidade de uma norma nacional que regulamente a sua produção, o seu dimensionamento e a sua execução. Além disso, o fato de não poder ser dobrado em obra acaba dificultando o seu uso.

Palavras-chave: Fibra de vidro; aço; concreto armado; tração na flexão.

1. Introdução

A construção civil é um setor que está em constante evolução, considerando a busca contínua por soluções que geram conforto, segurança e eficiência. Desde os tempos antigos, essa busca tem alavancado o avanço de materiais e técnicas, resultando em edificações cada vez mais resistentes e duráveis. Atualmente, o aço é o material mais utilizado no Brasil para a execução de estruturas de concreto armado, por se tratar de um material que apresenta boa resistência a tração, compressão e flexão. Entretanto, apesar da sua qualidade, o aço está ligado a diversas patologias. Nesse cenário, a introdução de novas tecnologias, como o uso de fibra de vidro em estruturas de concreto armado, representa uma alternativa promissora. Nos últimos anos, os vergalhões de fibra de vidro vêm conquistando espaço no mercado, oferecendo novas oportunidades para melhorar a produtividade e reduzir custos no setor. Essa

evolução ressalta a importância da pesquisa e do desenvolvimento de materiais que atendam às necessidades atuais da construção civil.

Com isso, foi realizado um estudo para analisar a viabilidade da substituição do aço pelo vergalhão de fibra de vidro, através de ensaios de tração na flexão em corpo de prova prismático, ensaio de tração do vergalhão e estudos científicos, para analisar o seu comportamento em estruturas de concreto armado.

Concreto armado: Conceito

Segundo Barbosa, (2005 *apud* CAVALCANTE *et al*. 2020) o concreto é formado por uma mistura de cimento, areia, água e agregados de diferentes tamanhos, sendo capaz de suportar tensões de compressão em uma estrutura. No entanto, sua resistência à tração é limitada. Para superar essa limitação, adicionam-se barras de aço que compõem a armadura da estrutura, permitindo que a combinação de concreto e armadura suporte tanto as tensões de compressão quanto as de tração. Assim, o termo “concreto armado” refere-se à junção desses dois materiais (concreto e barras de aço) que, ao trabalhar em conjunto, proporcionam estabilidade e segurança às construções..

Barbosa (2005, *apud* Cavalcante *et al.* 2020) descreve o concreto armado como a união entre o concreto simples e um material resistente à tração (revestido pelo concreto), de tal forma que ambos trabalham em conjunto para suportar as tensões aplicadas. Em outras palavras: Concreto armado = concreto simples + armadura + aderência.

De acordo com Neville (2013) O concreto é normalmente feito com agregados, cujas dimensões máximas variam de 10 mm a 50 mm, sendo 20 mm um valor comum. A distribuição dos tamanhos desses agregados é chamada de granulometria. Para concretos de menor qualidade, é possível utilizar agregados de jazidas com uma ampla variação de tamanhos, conhecidos como "bica corrida". No entanto, para concretos de melhor qualidade, a prática mais frequente é separar os agregados em duas partes, utilizando como critério principal a dimensão de 5 mm, correspondente à peneira ASTM N° 4. Isso estabelece a divisão entre agregados finos (areia) e agregados graúdos. Embora o termo "agregado" seja, por vezes, usado para se referir apenas aos agregados graúdos, essa denominação não é a mais correta. Em geral, considera-se que a areia tem uma dimensão mínima em torno de 0,07 mm ou um pouco menor.

> Tanto a forma quanto a textura superficial influenciam consideravelmente na resistência do concreto, em especial para concretos de alta resistência, sendo que a resistência à flexão é mais afetada que a resistência à compressão. Um agregado de textura mais áspera resulta em melhor aderência entre as partículas e a matriz de cimento. Da mesma forma, a maior área superficial de agregados mais angulosos resulta em maior aderência. Em geral, características de textura que não permitem a penetração da pasta na superfície das partículas não contribuem para uma boa aderência e, assim, agregados mais macios, porosos e com partículas mineralógicamente heterogêneas resultam em melhor aderência (NEVILLE, A M. 2013).

Bastos (2006) *apud* Helene e Andrade (2007) afirma que a tecnologia do concreto visa encontrar a proporção ideal entre seus diferentes componentes, de modo, a atender simultaneamente às propriedades exigidas (mecânicas, físicas e de durabilidade), além de garantir a trabalhabilidade necessária para permitir o transporte, lançamento e adensamento do concreto em cada tipo de aplicação. De modo geral, na construção de um elemento estrutural em concreto armado, as armaduras de aço são previamente posicionadas dentro da fôrma (molde), e em seguida o concreto fresco é lançado para preencher a fôrma e envolver as armaduras, e simultaneamente o adensamento vai sendo feito. Após a cura e o endurecimento do concreto, a fôrma é retirada e assim origina-se a peça de Concreto Armado. (BASTOS, 2006).

Concreto Armado: Histórico

Segundo Neville (2013) os antigos romanos foram, possivelmente, os primeiros a empregar um tipo de concreto (termo de origem latina) feito a partir de um cimento hidráulico, material que endurece quando entra em contato com a água. As propriedades desse material, como sua resistência à ação contínua da água sem sofrer alterações químicas, foram fundamentais para a popularização do concreto como material de construção. Após o declínio do uso do cimento romano, foi apenas em 1824 que Joseph Aspdin, um construtor de Leeds, patenteou o cimento moderno, conhecido como cimento Portland.

> A definição de cimento Portland em diversas normas adota esse conceito, incluindo o sulfato de cálcio adicionado após a queima. Atualmente, outros materiais também podem ser adicionados ou misturados. Esse cimento era preparado pelo aquecimento de uma mistura de argila finamente moída e calcário em um forno até a extinção do CO2, que ocorre em temperatura bastante inferior à necessária para a clinquerização. O protótipo do cimento moderno foi produzido em 1845 por Isaac Johnson ao calcinar uma mistura de argila e giz até a clinquerização, de modo que ocorressem as reações necessárias à formação de compostos de alta capacidade cimentante. (NEVILLE, A M. 2016)

De acordo com Bastos (2006) o "cimento armado" é considerado uma invenção francesa de 1849, tendo como primeiro objeto registrado na História um barco, criado pelo francês Joseph-Louis Lambot e apresentado oficialmente em 1855. O barco foi feito com malhas de fios finos de ferro, preenchidas com argamassa de cimento.

Segundo Bastos (2006) a primeira teoria realista e sólida sobre o dimensionamento de elementos em concreto armado foi apresentada por Edward Mörsch em 1902, um renomado engenheiro alemão e professor na Universidade de Stuttgart, Alemanha. Suas teorias, baseadas em experimentos, originaram as primeiras normas para o cálculo e construção de estruturas em concreto armado. A clássica treliça desenvolvida por Mörsch é considerada uma das maiores inovações nesse campo e, apesar de ter sido criada há mais de um século, ainda é amplamente aceita.

Vasconcelos (1985, *apud* Bastos 2006) afirma que o desenvolvimento do concreto armado no Brasil se deu no início de 1901, no Rio de Janeiro, com a construção de galerias de

água, seguido em 1904 pela construção de casas e sobrados. Em 1908, foi construída a primeira ponte com um vão de 9 metros. Em São Paulo, uma ponte de 28 metros foi erguida em 1910. O primeiro edifício em concreto armado na cidade foi construído em 1907, sendo um dos mais antigos do Brasil, com três pavimentos. A partir de 1924, a maior parte dos cálculos estruturais passou a ser realizada no Brasil, com destaque para o engenheiro Emílio Baumgart.

Aço na construção civil

No que se refere as normas apontadas por Bastos (2006), que regulamentam a produção, o dimensionamento e a execução dos vergalhões de aço utilizados em estruturas de Concreto Armado no Brasil, temos os padrões estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nelas pode-se verificar a NBR 7480, que se refere a características que os fios e as barras de aço devem ter, bem como, a NBR 6118, onde são descritos diversos aspectos que demonstram se este material se enquadra dentro dos fatores de normatização pré-estabelecidos. Ainda segundo este autor, o aço pode ser classificado como barras ou fios. As barras são vergalhões com diâmetro nominal de 5 mm ou mais, produzidos unicamente por laminação a quente. Já os fios são aços com diâmetro nominal de até 10 mm, fabricados por trefilação ou por processos equivalentes, como estiramento e laminação a frio.

O estudo apresentado por Ferraz (2003), aponta que a variedade nas composições químicas do aço resulta em diferentes propriedades mecânicas, como resistência, ductilidade e soldabilidade. Essas características podem ser ajustadas com a adição de elementos químicos específicos, permitindo a criação de aços apropriados para diversas aplicações. Assim, pode-se afirmar que o aço é um material homogêneo que oferece boa resistência à tração, compressão e flexão, sendo moldável por processos como laminação, forjamento e estampagem, além de permitir tratamentos térmicos e químicos.

> Aços Estruturais são vergalhões para reforço de concreto, barras, chapas e perfis para aplicações estruturais. São aqueles que são adequados para o uso em elementos que suportam cargas. Os principais requisitos para os aços destinados à aplicação estrutural são:
>
> · elevada tensão de escoamento para prevenir a deformação plástica generalizada;
>
> · elevada tenacidade para prevenir fratura rápida (frágil) e catastrófica;
>
> · boa soldabilidade para o mínimo de alterações das características do material na junta soldada;
>
> · boa formabilidade para o material ou a peça que necessitar receber trabalho mecânico;
>
> · custo reduzido. (FERRAZ, 2003).

Patologias do concreto armado

O termo “patologia”, é derivado do grego (*pathos* – doença, e *logia* – ciência, estudo) e significa “estudo da doença”. Na construção civil pode-se atribuir patologia aos estudos dos danos ocorridos em edificações. Essas patologias podem se manifestar de diversas formas:

trincas, fissuras, rachaduras, entre outras. Por ser encontrada em diversos aspectos, recebe o nome de manifestações patológicas. (ARIVABENE, 2015)

Segundo Cánovas (1988, *apud* Arivabene 2015) a patologia na engenharia é o campo que analisa os mecanismos, sintomas, causas e origens dos defeitos em construções. Em certos casos, o diagnóstico das patologias pode ser feito apenas por observação visual. No entanto, em situações mais complexas, é preciso analisar o projeto, investigar as cargas aplicadas à estrutura, examinar minuciosamente a execução da obra e até observar como a patologia responde a estímulos específicos. Assim, torna-se possível identificar a origem dos problemas e corrigi-los, evitando que se repitam.

Conforme aponta Arivabene (2015), pesquisas indicam que uma alta porcentagem dos problemas patológicos em edificações tem origem nas etapas de planejamento e projeto. Essas falhas tendem a ser mais severas do que aquelas relacionadas à qualidade dos materiais ou aos processos de construção. Isso ocorre devido à falta de investimento por parte dos proprietários, tanto públicos quanto privados, em projetos mais detalhados e bem elaborados. A busca por projetos mais "econômicos" frequentemente resulta em adaptações durante a execução e, posteriormente, em problemas funcionais e estruturais.

Um estudo feito por Helene e Pereira (2007, *apud* Arivabene 2015), ressalta que os problemas mais comuns e impactantes no concreto incluem eflorescências, fissuras, deformações excessivas, corrosão das armaduras, manchas no concreto aparente, falhas no aterro e na compactação, além de questões relacionadas à segregação dos componentes do concreto. Isso demonstra que, a busca por alternativas mais baratas, nem sempre acaba por ser a melhor opção, trazendo impactos diretos na qualidade, eficiência e resultado dessa estrutura, trazendo por vezes maior gasto financeiro, de tempo e resultando em patologias, tais quais, as descritas acima.

Nesse sentido, a corrosão de armaduras aparece como a terceira patologia de maior incidência nas estruturas de concreto conforme levantamento efetuado pelo GEHO em 52 províncias espanholas. Na análise de 844 casos a corrosão foi a causa de 15% do total de patologias encontradas, somente atras das fissuras (62%) e das deformações excessivas (22%). (HELENE, 1993)

> Helene (2002) define a corrosão das armaduras de concreto como um fenômeno de natureza eletroquímica que pode ser acelerado pela presença de agentes químicos externos ou internos ao concreto. No concreto armado, o aço encontra-se no interior de um meio altamente alcalino no qual estaria protegido do processo de corrosão devido à presença de uma película protetora de caráter passivo, explica Cascudo (1997). A alcalinidade no interior do concreto provém da fase líquida existente nos seus poros que contém hidroxilas oriundas da ionização dos hidróxidos de cálcio, sódio e potássio. Mesmo em idades avançadas o concreto continua propiciando um meio básico que protege a armadura do fenômeno da corrosão. (ARIVABENE, 2015)

De acordo com Cascudo (1997, *apud* Arivabene 2015), os principais fatores que provocam a corrosão das armaduras são a ação dos íons cloretos (corrosão localizada por pites), a redução do pH do aço (corrosão generalizada por carbonatação) e a corrosão localizada causada por tensões fraturantes. No caso de armaduras em concreto, os efeitos

degenerativos manifestam-se na forma de manchas superficiais causadas pelos produtos de corrosão, fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da secção resistente das armaduras com frequente seccionamento de estribos, redução e eventual perda de aderência das armaduras principais, ou seja, deteriorações que levam a um comprometimento da segurança estrutural. (HELENE, 1993)

Conforme descreve Helene (1993), as armaduras incorporadas nos elementos estruturais de concreto estão, em tese, protegidas contra a corrosão. Essa proteção é garantida tanto pela camada de concreto que cria uma barreira física contra a entrada de agentes externos, quanto pela proteção química proporcionada pela alta alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto.

Ainda segundo a autora, a quebra ou perda dessa proteção, mesmo que em áreas específicas, pode iniciar um processo de deterioração, que tende a ser progressivo e auto acelerado. Essa perda ocorre principalmente devido a carbonatação e a contaminação por cloretos no concreto que cobre a armadura. Além disso, fatores como fissuras, cargas cíclicas, execução inadequada, uso de materiais diferentes, ciclos de umidade e secagem, variações de temperatura e atmosferas agressivas também contribuem para a perda dessa proteção natural ou para a aceleração de um processo corrosivo já em andamento.

Vergalhão de fibra de vidro

MAZZÚ (2020 *apud* BERTOLINI 2021), destaca que o ambiente pode exercer uma influência progressiva sobre as estruturas de concreto armado, provocando diferentes tipos de danos. Esses danos podem ser de natureza física devido à variação de temperatura; química causados pelas substâncias presentes no meio ambiente; ou mecânica, em razão da abrasão ou das cargas aplicadas à estrutura. No caso de danos físicos, ocorre uma degradação direta do concreto, afetando tanto a pasta de cimento quanto os agregados, o que pode levar à corrosão das armaduras. Em outras situações, a corrosão das armaduras é provocada diretamente pelo ambiente, e o concreto é impactado posteriormente. A corrosão das armaduras é a causa mais comum de deterioração em estruturas de concreto armado.

> O uso de estruturas de concreto armado com barras de aço é recorrente na indústria da construção civil no Brasil. Entretanto, materiais alternativos são estudados devido à existência de problemas relacionados à utilização deste tradicional sistema construtivo, como a corrosão das armaduras metálicas, a exposição das estruturas a ambientes agressivos e a ambientes nos quais a neutralidade magnética é necessária. Dentre estes materiais, uma maior atenção é dada aos Polímeros Reforçados com Fibras (FRPs, *Fiber Reinforced Polymers*), que apresentam alta resistência mecânica e boa resistência a agentes de agressividade ambiental, materiais não metálicos capazes de substituir as armaduras de aço em estruturas de concreto armado. (MAZZÚ, 2020). Os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP), vidro (GFRP), aramida (AFRP) e basalto (BFRP) são os mais utilizados. (MAZZÚ, 2020)

Dado o exposto, Couto (2007) afirma que, as barras de polímero reforçado com fibra de vidro, GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), oferecem uma alternativa para a armadura

do concreto armado. Elas são compostas por um núcleo de fibras (minerais ou sintéticas) de alta resistência, embebidas em uma matriz polimérica (resina), e apresentam propriedades anisotrópicas, com maior resistência no sentido longitudinal do que no transversal.

Vergalhão de fibra de vidro: Produção

Conforme COUTO (2007), as barras de GFRP são fabricadas pelo processo de pultrusão. De acordo com BAKIS *et al*. (2002), para melhorar a aderência ao concreto, são aplicadas deformações superficiais nas barras antes de seu endurecimento, utilizando alguns métodos, como: o enrolamento de filamentos de fibra em forma de hélice ao longo da barra; a criação de entalhes ao longo de seu comprimento; o uso de um filme texturizado ao longo da barra, posteriormente removido; e a impregnação de agregados finos em sua superfície.

Figura 1 – Processo de Pultrusão das barras de FRP (TIGHIOUART *et al*., (1998 *apud* COUTO, 2007)

Vergalhão de fibra de vidro: Histórico

A utilização dos compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), se expandiu ao final da Segunda Guerra Mundial. Os compósitos de FRP foram utilizados na indústria eletrônica, aeroespacial e automobilística durante várias décadas, mas sua aplicação na engenharia civil, como armadura para o concreto armado, é relativamente recente (UMOTO *et al*., 2002)

Segundo BARTHOLOMEW, (1996* *apud* ACI 440 1R, 2003 *apud* Couto, 2007) na década de 1980, surgiu uma demanda por barras não metálicas na América do Norte, especialmente em construções hospitalares que requeriam materiais não condutores magnéticos. Como resultado, as barras de FRP passaram a ser uma solução ideal para esse tipo de edificação. Com o avanço dos estudos e a maior compreensão das propriedades dessas barras, outros tipos de construções começaram a adotar esse reforço, incluindo estruturas costeiras, pistas de aeroportos e laboratórios eletrônicos.

De acordo com ACI 440 R, (1996 *apud* Couto, 2007) durante os anos 90 nos Estados Unidos ocorreu um avanço no uso das estruturas não metálicas em pontes. Em 1991, foi publicado nos EUA o Código Normativo do Instituto Americano de Concreto (ACI), apresentando o Estado da Arte dos Compósitos de FRP. Em 2003, foi publicado o Código Normativo que prevê o dimensionamento de elementos estruturais em concreto armado com barras de FRP (ACI 440 1R, 2003), e em 2004, o Código Normativo contendo os

procedimentos de ensaio de estruturas em concreto armado com barras de FRP (ACI 440 3R, 2004 *apud* COUTO, 2007).

> No Brasil, alguns pesquisadores têm estudado o uso das barras de FRP como armadura para estruturas em concreto armado. Em 1998 foram publicados dois artigos no III Congresso de Engenharia Civil em Juiz de Fora – MG: Barras de Armação em FRP: Discussão de parâmetros para normalização (ALVES, A. B.; CASTRO, P. F, 1998.) e Comportamento de Vigas de Concreto de Alta Resistência com Armadura Não Metálica Tipo FRP (RAYOL, J. O.; MELO, G. S., 1998). E mais recentemente, em 2006, foi publicada uma dissertação de mestrado na Escola de Engenharia de São Carlos, cujo título é: "Análise Teórica e Experimental de Vigas de Concreto Armadas com Barras Não-Metálicas de GFRP" (TAVARES, 2006 *apud* COUTO, 2007).

Vergalhão de fibra de vidro: Propriedades mecânicas

Segundo ACI 440 1R (2003 *apud* COUTO, 2007) as propriedades mecânicas das barras de FRP variam consideravelmente de acordo com o tipo de resina e fibra, a orientação das fibras, os efeitos dimensionais e o controle de qualidade durante a fabricação. Além disso, assim como outros materiais estruturais, suas características mecânicas são influenciadas pelo tipo e duração da carga, além de fatores como temperatura e umidade.

A tabela a seguir, faz uma comparação das propriedades mecânicas das barras e cordoalhas de GFRP com as barras e cordoalhas de aço.

Figura 2: Comparação entre as propriedades das barras e cordoalhas de GFRP e de aço

	Barra de aço	*Cordoalha de aço*	*Barra de GFRP*	*Cordoalha de GFRP*
Resistência à tração (MPa)	483 - 690	1379 - 1862	517 - 1207	1379 - 1724
Tensão de escoamento (MPa)	276 - 414	1034 - 1396	NA*	NA*
Módulo de elasticidade (GPa)	200	186 - 200	41 - 55	48 - 62
Alongamento máximo (mm/mm)	> 0,10	> 0,04	0,035 - 0,050	0,030 - 0,045
Resistência à compressão (MPa)	276 - 414	NA	310 - 482	NA
Coeficiente de dilatação térmica ($10^{-6}/^{o}C$)	11,7	11,7	9,9	9,9
Massa específica (g/cm^3)	7,9	7,9	1,5 - 2,0	2,4

Fonte: Adaptado de ACI 440 R, 1996

Outras comparações podem ser visualizadas na Tabela 2, onde também vem a apresentação de parâmetros e benefícios dos dois materiais para produção dos vergalhões.

Figura 3: Outros parâmetros de comparação do Aço e o GFPR

Fonte: Mandarelli Casa e Construção (2022)**.**

Conforme descreve ACI 440 R (1996 *apud* COUTO, 2007), as propriedades mecânicas das barras de FRP são influenciadas por diversos fatores, como a duração e o histórico da carga, além da temperatura e umidade. Esses fatores estão interligados, o que torna difícil avaliar o impacto de cada um de forma isolada.

Segundo o mesmo estudo, a absorção excessiva de água nas barras de FRP pode levar a uma queda considerável na resistência e na rigidez. A resina, ao absorver água, pode causar o inchaço ou deformação das barras, tornando necessário considerar as condições climáticas em que esses materiais serão utilizados. Existem resinas que são resistentes à umidade, sendo indicadas para estruturas que permanecem em contato constante com água ou submetidas a ciclos de congelamento e descongelamento. Ainda de acordo com a autora, nos compósitos de FRP, o impacto de altas temperaturas é mais evidente na resina do que nas fibras, já que as resinas possuem altas concentrações de carbono e hidrogênio, substâncias inflamáveis.

Dado o exposto, a autora aponta que o concreto atua como uma barreira, protegendo as barras de FRP do contato direto com as chamas. No entanto, à medida que a temperatura interna do concreto aumenta, as propriedades das barras de FRP sofrem alterações significativas. Por isso, é importante que o usuário esteja ciente das características dessas barras e utilize resinas resistentes a altas temperaturas, quando for necessário.

> Para tanto, diferente das barras de aço, as barras de FRP não são afetadas pela deterioração eletroquímica, resistem à corrosão pelo efeito dos ácidos, sal, e materiais agressivos sob consideráveis mudanças de temperatura. Porém, as barras de GFRP podem se deteriorar em meio alcalino, daí a importância de resinas resistentes à alcalinidade para proteção das fibras de vidro. (COUTO, 2007)

Vergalhão de fibra de vidro: Vantagens e desvantagens

Uma das principais vantagens das armaduras de fibra de vidro é sua alta resistência à corrosão, tornando-as ideais para aplicações em ambientes agressivos, como edifícios costeiros ou estruturas subterrâneas (MARTINS, 2013 *apud* VIEIRA *et al*. 2023). Além disso, essas armaduras são leves e de fácil manuseio, o que as torna ideais para estruturas de grande

porte (SILVA, 2019 *apud* VIEIRA *et al*. 2023). Segundo o mesmo artigo, o GFRP é recomendado para estruturas expostas a ambientes corrosivos, agressivos com íons de cloreto ou substâncias químicas; projetos que buscam uma alternativa mais econômica em comparação ao aço inoxidável, ou em locais onde se deseja evitar a condutividade térmica.

De acordo com Gonçalves (2018, *apud* Vieira *et al*. 2023), outra vantagem é sua elevada resistência à fadiga, permitindo suportar cargas repetitivas ao longo do tempo sem sofrer deformações ou fraturas. Adicionalmente, as armaduras de fibra de vidro são altamente resistentes ao fogo, o que as torna uma opção atrativa para estruturas que necessitam de alta segurança contra incêndios (OLIVEIRA, 2015 *apud* VIEIRA *et al*. 2023)

Segundo a Norma Americana ACI 440.1R-15 (2015), caso ocorra a degradação das barras de fibra de vidro, o seu mecanismo de degradação não causa malefícios para a estrutura, ou seja, ele não se expande causando falha na estrutura. (VIEIRA *et al*. 2023) No entanto, Santos *et al*. (2022, *apud* Vieira *et al.* 2023) afirma que, há algumas desvantagens no uso de armaduras de fibra de vidro em estruturas de concreto armado. Uma delas é a ausência de uma norma brasileira específica para a aplicação de vergalhões de fibra de vidro em tais estruturas. Além disso, a mão de obra especializada para instalação e manuseio dessas armaduras pode ser limitada, o que pode ser um obstáculo para alguns projetos (OLIVEIRA, 2015 *apud* VIERIA *et al*. 2023)

Material e Métodos

Para a realização do estudo a fim de verificar a viabilidade do uso do vergalhão de fibra de vidro em estruturas de concreto armado, foi executado testes seguindo a norma NBR 121412:2010- Concreto– Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos; NBR 5739:1994 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos; NBR ISO 6892-1:2024 – Materiais metálicos – Ensaio de tração.

Materiais utilizados

Para a execução dos ensaios foram utilizados os seguintes materiais:

- Viga armada em aço CA-50 Ø8mm, com estribo Ø5mm de 17x07 a cada 13cm
- Viga armada em fibra de vidro Ø8mm, com estribo de 17x07 a cada 13cm
- Areia, cimento e brita (traço para 25 Mpa)
- Forma metálica
- Óleo desmoldante
- Martelo vibrador
- Betoneira

Figura 4: Viga armada em aço CA-50 Ø8mm, com estribo Ø5mm de 17x07 a cada 13cm (Fonte: Próprio autor)

Figura 5: Viga armada em fibra de vidro Ø8mm, com estribo de 17x07 a cada 13cm (Fonte: Próprio autor)

Figura 6: Agregados para execução do concreto (Fonte: Próprio autor)

Figura 7: Betoneira utilizada para produção do concreto (Fonte: Próprio autor)

Figura 8: Moldagem dos corpos de prova (Fonte: Próprio autor)

Figura 9: Desforma dos corpos de prova (Fonte: Próprio autor)

Ensaios

Para a realização dos testes foram moldados seis corpos de prova prismáticos seguindo a norma NBR 121412:2010, de dimensões 75x21x15cm, três com a armadura de aço e três com a armadura em fibra de vidro, durante o processo de molde, foi utilizado o vibrador para melhor adensamento do concreto. Para obter melhor o controle do concreto, foi feito o Slump

Test seguindo a NBR NM 67:1996, onde foi obtido um resultado de 12,6cm de abatimento. Com isso, foi moldado os corpos de prova cilíndricos para posterior rompimento, para certificar-se de que a resistência de 25Mpa fosse obtida.

Figura 10: Moldagem dos corpos de prova cilíndricos (Fonte: Próprio autor)

Figura 11: Moldagem dos corpos de prova prismáticos (Fonte: Próprio autor)

Após 72 horas foi realizada a desmoldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos, aos 43 dias eles foram levados a teste para determinação da resistência a tração na flexão e resistência a compressão para determinação da resistência do concreto.

Foram levados os corpos de prova prismáticos para a realização do ensaio seguindo a norma NBR 121412:2010, com distância entre a face do prisma e o eixo do apoio onde seria aplicado a força, igual a 23cm. Também foi encaminhado os corpos de prova cilíndricos para a máquina, para realização do ensaio de compressão, seguindo a norma NBR 5739:1994.

Figura 12: Posicionamento do corpo de prova para realização do ensaio (Fonte: Próprio autor)

Figura 13: Corpo de prova após o ensaio (Fonte: Próprio autor)

Figura 14: Corpos de prova desmoldados (Fonte: Próprio autor)

Figura 15: Posicionamento do vergalhão de fibra de vidro para realização do teste de tração (Fonte: Próprio autor)

Segundo a norma 121412:2010 A resistência à tração na flexão deve ser calculada de acordo com a seguinte equação: $f_{ct,f} = F.l/b.d^2$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de l, calcular a resistência à tração na flexão pela expressão: $f_{ct,f} = 3.F.a / b.d^2$

Onde:

- $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);
- F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);
- l é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);
- b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
- d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
- a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

Resultados e Discussão

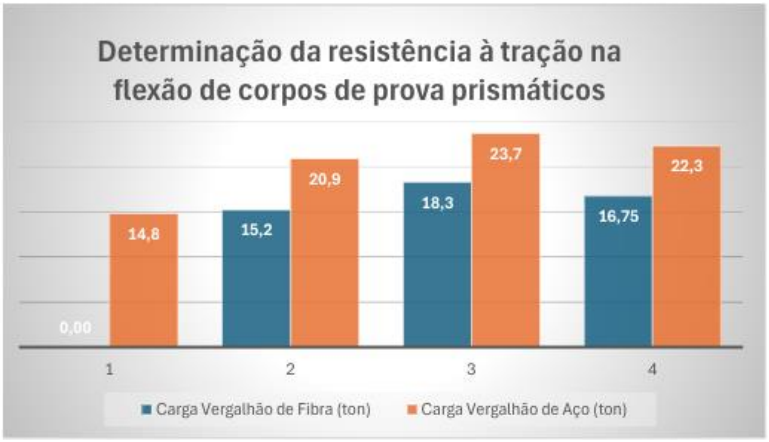
Após o rompimento dos corpos de prova prismáticos para a realização do ensaio de tração na flexão, seguindo a norma NBR 121412:2010, não se obteve o resultado desejado para o mesmo armado com vergalhão de fibra de vidro, tendo em vista que, apesar de apresentar propriedades mecânicas superior ao do vergalhão de aço, este, apresentou resultados com média de 24,89% inferior quando comparado ao corpo de prova prismático armado com aço CA-50, conforme apresentado na (Tabela 1) e (Gráfico 1) e esse resultado se deu devido ao estribo utilizado, pois o mesmo não oferece uma boa aderência da armadura e não suportou os esforços ao cisalhamento, ocorrendo a ruptura de forma precoce do prisma por causa do escorregamento da armadura.

Tabela 1 – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos

Vergalhão de fibra de vidro		**Vergalhão de aço**		
Corpo de prova	Carga (ton)	Corpo de prova	Carga (ton)	Porcentagem de comparação entre os vergalhões
1	0,00	1	14,8	100,00%
2	15,2	2	20,9	27,27%
3	18,3	3	23,7	22,78%
Média	16,75	Média	22,3	24,89%

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 1 – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos



Fonte: Próprio autor.

Figura 16: Corpo de prova prismático com armadura de fibra de vidro após o rompimento
(Fonte: Próprio autor)

Figura 17: Escorregamento do estribo
(Fonte: Próprio autor)

Figura 18: Corpo de prova prismático com armadura de aço após o rompimento
(Fonte: Próprio autor)

Figura 19: Corpo de prova prismático com armadura de aço após o rompimento
(Fonte: Próprio autor)

Figura 20: Pico de carga do corpo de prova Cilíndrico com armadura de aço
(Fonte: Próprio autor)

Figura 21: Pico de carga do corpo de prova Cilíndrico com armadura de fibra de vidro
(Fonte: Próprio autor)

Como pôde ser observado pelas imagens, os corpos de prova romperam num primeiro momento devido ao cisalhamento e depois por tração, ressaltando que os vergalhões de fibra de vidro demonstraram superioridade nesse quesito, visto que foi observado um pico de 18,3ton no momento da ruptura, mesmo apresentando um escorregamento da armadura, caso o material utilizado nos estribos oferecessem uma maior resistência e maior sustentação da armadura, poderia se obter um resultado superior ao prisma com armadura de aço.

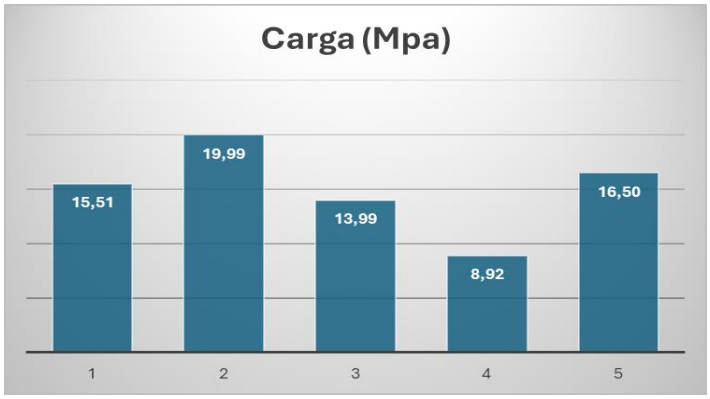
Para a comprovação da resistência do concreto, foram realizados ensaios de compressão, em quatro corpos de provas cilíndricos com o mesmo tempo de cura conforme a norma NBR 5739:1994, porém devido à não deixarmos os corpos de prova imersos na água para realização da cura, acabou ocasionando em resultados abaixo do esperado, com média de 16,5Mpa correspondentes a 34,01% abaixo do valor de referência (25Mpa), conforme apresentados na (Tabela2) e (Gráfico 2).

Tabela 2 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

Corpo de prova	Carga (Mpa)	Porcentagem em relação a referência (25Mpa)
1	15,51	37,96%
2	19,99	20,04%
3	13,99	44,04%
4	8,92	64,32%
Média	16,50	34,01%

Fonte: Próprio autor

Gráfico 2 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos



Fonte: Próprio autor

Figura 22: Corpo de prova cilíndrico após a realização do ensaio de compressão (Fonte: Próprio autor)

Figura 23: Maior resultado do teste de compressão (Fonte: Próprio autor)

Por último, foi realizado o ensaio de tração de acordo com a norma NBR ISO 6892-1:2024 nas barras de fibra de vidro, porém o ensaio utilizado não foi viável aos vergalhões, onde não foi possível obter resultados devido ao esmagamento e o escorregamento do vergalhão por conta de sua resina, não gerando a ruptura.

Figura 24: Escorregamento do vergalhão na tentativa de realizar o ensaio de tração
(Fonte: Próprio autor)

Figura 25: Esmagamento do vergalhão na tentativa de realizar o ensaio de tração
(Fonte: Próprio autor)

Conclusões

A partir deste estudo, pode-se concluir que, o vergalhão de fibra de vidro tem um grande potencial, apresentando boas propriedade físicas e químicas, sendo uma boa opção para construções em ambientes com elevada agressividade e propriedades mecânicas superiores quando comparado ao aço, tais como, maior leveza, maior resistência a tração, maior resistência a compressão, maior durabilidade embutido no concreto.

No entanto, apesar de apresentar melhores propriedades mecânicas, o vergalhão de polímero reforçado com fibra de vidro, quando submetido aos testes em estruturas de concreto armado, apresentou um resultado com média de 24,89% inferior, quando comparado ao prisma armado com aço, onde pôde ser observado algumas características que acarretaram nesse resultado, como, superfície e ranhuras lisas que causam uma má aderência do vergalhão com o concreto, modelo de estribo que não oferece uma boa sustentação do vergalhão causando escorregamento, necessitando assim de algumas adaptações, como, um novo estribo que não seja de material plástico e traga maior sustentação ao vergalhão evitando o escorregamento, superfície mais áspera que possibilite uma maior aderência ao concreto, para o seu uso estrutural.

Além disso, outras desvantagens apresentadas no vergalhão de polímero reforçado com fibra de vidro, é o fato de não poder ser dobrado em obra, necessitando de um equipamento específico para isso, dificultando o seu uso e a não existência de normas brasileiras que regulamentam a sua produção, o seu dimensionamento e a sua execução, oferecendo uma menor segurança e confiabilidade. Portanto, com base no estudo realizado, o vergalhão de fibra de vidro, é uma boa opção de substituição ao aço em estruturas de concreto armado, principalmente em locais com alto índice de agentes agressivos que aceleram a deterioração dessa estrutura, no entanto, ainda necessita de mais estudos e adaptações a serem realizadas no material, para que este, possa ter um melhor desempenho quando comparado aço, fazendo-se necessário um facilitador no que se refere ao manuseio desse material, além de ser essencial o estabelecimento de normas que abarcam suas características, podendo desta forma, ser utilizado com mais segurança e eficiência em seu uso estrutural.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer primeiramente a Deus, a nossa família e aos amigos pelo apoio até aqui. Um agradecimento especial ao professor orientador Marcelo da Silva e ao professor Adão por estarem presentes nas orientações e experimentos.

Referências Bibliográficas

ABNT. NBR 12142: Concreto– Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, RJ, 2010a. 1-4 p.

ARIVABENE, Antonio Cesar. Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso. Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia, v. 3, n. 10, p. 1-22, 2015. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50485637/antonio-cesar-arivabene-14121142-libre.pdf?1479847774=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPatologias_em_Estruturas_de_Concreto_Arm.pdf&Expires=1730498051&Signature=bqlVEsBCXyLVJZY0kuczPsM7QjaEYwfTFW555ymw484PueY0ZIRCEYLqMFX6eNReAE-FsLuTY93GeWB5ha26ar2OfsOf8SG6SoJg1JIr6TczRAFUkhojcDTvb6t9NcgZIkWRkt-pe8sKY0lfS0aiyjlg0XdUlbnIsYcaaYbL84mRvQI~mUEKXYlnyS8SNj8pZyCHS88HdDsH1~Nnb8lpCMkpfG2K9kmY-tC8qXoXfm1~vH55HlDrCq11W7aoh2zGo~MkIEeJ4KMIp~lyfPPZCDBcIZB7LER~eSf8nM~~mJMMdW0A0dKokVvAhLFWXil-mWTqKAltJweNMaU~8~UVxg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 09 de outubro de 2024

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Fundamentos do concreto armado. Bauru: Unesp, 2006. Disponível em: https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf. Acesso em: 03 de outubro de 2024

CAVALCANTE, Phelipe Apolinário et al. ESTUDO DAS PATOLOGIAS E SUAS CAUSAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DE OBRAS DE EDIFICAÇÕES. Epitaya E-books, v. 1, n. 15, p. 283-300, 2020. Disponível em: https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/109/74 acesso 07 out 2024

COUTO, Iara Andrade. Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. 2007. Tese de Doutorado. Master Dissertation. EESC. São Carlos. SP. Disponível em: http://sistemas.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2007ME_IaraAndradeCouto.pdf. Acesso em 24 de setembro de 2024.

DE OLIVEIRA BARBOSA, Aline; PEREIRA, Carla Cristina Nascimento Santos. VERGALHÕES DE FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO SOBRE DETERMINADAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS. Revista Contemporânea, v. 3, n. 10, p. 18731-18752, 2023.Disponível em:

https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/1806/1383%20 acesso em: 26 agosto. 2024.

FERRAZ, Henrique. O aço na construção civil. Revista eletrônica de ciências. São Paulo, n. 22, 2003. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56082035/O_ACO_NA_CONSTRUCAO_CIVIL-libre.pdf?1521256668=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DO_Aco_na_Construcao_Civil.pdf&Expires=1730498431&Signature=RPCWVhML2YMClf-eQya5lXMRAIUMNiThYIGOqgrp3pilU4rd7EYBfWejUrPvwo98r5Fc04fe72c6oKiVydjSr81dkaGsvK9jOuG5mffXoByhV5P-m3i4mfDOZ4rpLJ9djHmO3R~r0GKfGVSEPhlNfmh20DGgMMzDM2cqpCh4vx1l4YSbU0lOkYPrkK82AZJRrIsyvneQBCHnRJVs4cNEarXGOgntl-rlqneuRZv3783K1ZAb7HAH1JRIaPp5v-4ptueeQt3fJsbZdqz6UCuAJC6hpkpomogt1817lwfsZImZlLyXahQCTbEvQUi9-5udd0ePSlZrwZa6YR5PsrKy0A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso 03 out 2024

HELENE, PR do L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, v. 231, p. 14, 1993. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44536119/TD1Paulo_Helene-libre.pdf?1460120541=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDADE_DE_SAO_PAULO_ESCOLA_POLITEC.pdf&Expires=1730498099&Signature=YcmP0HtpmZQHiNYIPSQGsAFa5N3M7-4Cdwi-0d5wyopXuHl-1CPxC7mkCfJOdIPNrLSlJzeCLvkVqiEHOdd2JbPi6w~9R1CcdbnAqGShPQiVAAfZ0kreiLaDV2Is-uxYYbcthPMobVogIxFvw479S063iOgshRJFMielmabaKZ9ZzxIZYW~1Aeqjh8gIOi~mwd33MtiAb0i4ik6eKy1zGt-C6Xnvl2j4l94k6NzhNnKTjdgAVue8uQz~7zaCd7HrbWS-OP4cbDb~mPfSo2NclJcLUIx377mvd3-XBaFlcirwZJXBtbhU4oYDUwB1t42ZXgaSqnFaiaxmEwgsZKQD-g__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 09 de outubro de 2024

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 íons cloreto. 2020. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/12770/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20-%20Amanda%20Duarte%20Escobal%20Mazz%c3%ba.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 de setembro de 2024

MOURA, Ruan Carlos de Araújo et al. Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas. 2021. Disponível em:

https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/34934/1/Tese_Doutorado_Ruan_Moura_PPEC_Final.pdf Acesso: 26 agosto 2024.

NEVILLE, A M. Tecnologia do concreto. Porto Alegre: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788582600726. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600726/. Acesso em: 08 de setembro de 2024

NEVILLE, A M. Propriedades do concreto. Porto Alegre: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788582603666. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603666/. Acesso em: 08 de setembro de 2024

Vieira De Souza, B., Mendes da Silva, J. ., Bentes Moreira, K. C., & Carvalho Lopes, S. (2023). VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NO CONCRETO. Disponível em: https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/1645. acesso em 10 out 2024