

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE GFRP

*Experimental tests with reinforced concrete beams with GFRP bars*

*Ensayos experimentales con vigas de hormigón armado con barras de GFRP*

**SANTOS, L. F. O.<sup>1</sup>; FORTI, N. C. S.<sup>2</sup>; CARDOSO, D. C. T.<sup>3</sup>**

### Resumo

As barras de polímero reforçado com fibras (FRP) são materiais compósitos formados pela união de fibras longas com uma matriz polimérica. Elas vêm sendo utilizadas, nas últimas décadas, como armadura para estruturas de concreto por apresentarem boas propriedades mecânicas, um baixo peso específico, características anticorrosivas e transparência eletromagnética. Contudo, esses materiais apresentam baixo módulo de elasticidade e comportamento elástico-linear até a ruptura. As recomendações internacionais e nacionais apresentam duas possibilidades de dimensionamento para estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP): falha por ruptura das barras ou falha por esmagamento do concreto. O primeiro caso ocorre como consequência do uso de uma baixa taxa de armadura, resultando em altas deformações e aberturas de fissuras em elementos fletidos, bem como colapso frágil. Diante disso, esse artigo tem como objetivo apresentar e analisar o comportamento a flexão de vigas armadas com barras de GFRP dimensionadas pelo critério de falha por tração na barra, fazendo uso da técnica de correlação digital de imagem (DIC) para análise do comportamento à fratura. O uso do DIC apresentou bons resultados, sendo consistentes com os observados experimentalmente. Resultados reforçam a recomendação pelo dimensionamento por esmagamento da região comprimida do concreto.

**Palavras-chave:** Concreto armado; Barras de GFRP; Flexão; Fissuração; Correlação de Imagem Digital.

<sup>1</sup>Graduado em Engenharia Civil na Pontífica Universidade Católica de Campinas.  orcid: [0000-0002-5590-6585](https://orcid.org/0000-0002-5590-6585) [luis.fos@puccampinas.edu.br](mailto:luis.fos@puccampinas.edu.br)

<sup>2</sup>Profa. Dra. na Pontífica Universidade Católica de Campinas.  orcid: [0000-0001-9994-5546](https://orcid.org/0000-0001-9994-5546) [nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br](mailto:nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br)

<sup>3</sup>Prof. Dr. na Pontífica Universidade Católica de Campinas.  orcid: [0000-0002-8171-7956](https://orcid.org/0000-0002-8171-7956) [dctcardoso@puc-rio.br](mailto:dctcardoso@puc-rio.br)

Data da Submissão:  
21novembro2023  
Data da Aprovação:  
10dezembro2023  
Data da Publicação:  
19fevereiro2024

COMO CITAR:

SANTOS, L. F. O.; FORTI, N. C. S.; CARDOSO, D. C. T.. ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE GFRP. Engenharia Urbana em Debate. São Carlos, V4, n2, 2023. <https://doi.org/10.14244/engurbdebate.v4i2.113>



## Abstract

Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars are composite materials. They are a combination of long fibers with a polymeric matrix. Over recent decades, they have been applied as reinforcement for concrete structures due to their good mechanical properties, low specific weight, corrosion resistance, and electromagnetic transparency. However, these materials exhibit a low Young's modulus and linear-elastic behavior until failure. International and national recommendations offer two possibilities for designing concrete structures reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars: failure due to bar rupture or failure due to concrete crushing. The first case occurs as a consequence of using a low reinforcement ratio, resulting in high deformations and crack openings, as well as brittle failure. In this context, this article aims to present and analyze the flexural behavior of beams reinforced with GFRP bars designed according to the bar tensile failure criterion. The Digital Image Correlation (DIC) technique was used to analyze the cracking behavior. The use of DIC yielded good results, consistent with those observed experimentally. The results enhance the recommendation for designing based on concrete crushing.

**Keywords:** Reinforced concrete; GFRP bars; Bending; Cracking; Digital Image Correlation

## Resumen

Las barras de polímero reforzado con fibras (FRP) representan materiales compuestos resultado de la combinación de fibras largas con una matriz polimérica. Durante las últimas décadas, se han destacado como elementos de refuerzo para estructuras de concreto debido a sus notables propiedades mecánicas, bajo peso específico, características anticorrosivas y transparencia electromagnética. Sin embargo, es importante señalar que estos materiales exhiben un módulo de elasticidad reducido y un comportamiento elástico-lineal. Las directrices tanto a nivel internacional como nacional presentan dos enfoques para el dimensionamiento de estructuras de concreto armado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (GFRP): el fallo debido a la ruptura de las barras o el fallo por aplastamiento del concreto. El primer escenario se manifiesta como resultado del uso de una tasa de armadura baja, lo que conlleva a deformaciones elevadas y la formación de grandes fisuras, así como un colapso frágil. En este contexto, el propósito central de este artículo es presentar y analizar el comportamiento a flexión de vigas armadas con barras de GFRP, dimensionadas de acuerdo con el criterio de fallo por tracción en la barra. Para llevar a cabo este análisis, se emplea la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) con el objetivo de realizar una evaluación detallada del comportamiento ante la fractura. Los resultados obtenidos mediante el uso de DIC son altamente satisfactorios y consistentes con las observaciones experimentales. Estos hallazgos refuerzan la recomendación de dimensionar considerando el aplastamiento en la región comprimida del concreto.

**Palabras clave:** Hormigón Armado; Barras de GFRP; Flexiones; Fisuraciones; Correlación de Imágenes Digitales.

## 1 INTRODUÇÃO

Levantamentos a respeito de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado realizados ao redor do mundo apontam que a corrosão das armaduras de aço é uma das causas mais comuns de deterioração (BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011). Neste cenário, a durabilidade de estruturas de concreto armado é uma grande preocupação para a infraestrutura urbana, que busca soluções para maior longevidade das estruturas de concreto e com baixa necessidade de manutenção. As barras de polímero reforçado com fibras (FRP, do inglês *fiber-reinforced polymer*) têm sido utilizadas como um novo material de reforço para essas estruturas, substituindo ou utilizando em conjunto à armadura tradicional (CAI; PAN; ZHOU, 2017).

As barras de FRP são materiais anisotrópicos, ou seja, suas propriedades mecânicas diferem conforme a direção analisada, sendo formadas basicamente pela combinação de fibras e resina por um processo de pultrusão. Enquanto as fibras atuam conferindo rigidez e resistência mecânica, a matriz polimérica atua unindo as fibras, distribuindo os esforços mecânicos entre elas e protegendo-as contra impactos e danos devido a variadas condições ambientais (ACI 440.1R, 2015; BENMOKRANE et al., 2015).

Os compósitos de polímero reforçado com fibras já foram aplicados com sucesso em diferentes tipos de obras, como: tubulações, tanques de armazenamento subterrâneos, fachadas de edifícios, componentes arquitetônicos, decks de pontes, estruturas de contenção a beira mar, dentre outras (ACI 440.9R, 2015). O uso de materiais compósitos poliméricos na construção civil, como armadura para estruturas de concreto, traz benefícios estruturais e econômicos para as construções. Esses materiais apresentam uma alta relação rigidez/peso e resistência/peso, além de serem resistentes a fadiga e a degradação corrosiva (OU et al., 2016). Entretanto, barras de FRP apresentam ruptura frágil, perda de resistência em regiões dobradas, altas deformações decorrentes do baixo módulo de elasticidade quando comparado ao aço, e suas propriedades podem ser afetadas por condições de temperatura, umidade, exposição a raios ultravioletas e exposição a ambientes alcalinos (IBRACON, 2021).

As vigas de concreto armado com barras de FRP são geralmente projetadas para falhar por

esmagamento da região comprimida do concreto, contudo projetos por ruptura por tração da barra são aceitos desde que atendam os critérios de resistência e estados limites de serviço. A falha por ruptura à tração da barra é caracterizada como brusca, dado o comportamento frágil das barras de FRP. Apesar da esperada baixa capacidade de redistribuição de esforços nessas condições, o aviso prévio do colapso se dá pela formação de largas e extensas fissuras (ABDELKARIM et al., 2019; ACI 440.1R, 2015).

Devido ao melhor controle de fissuração e, como descrito na ACI 440.1R (2015), por exibir um comportamento levemente inelástico antes da ruptura, o dimensionamento dominado pela compressão do concreto é majoritariamente recomendado. Procurando explicar o comportamento observado em vigas cuja falha é dominada pela tração da barra, este trabalho, utilizando vigas dimensionadas para falhar por ruptura à tração da armadura, buscou estudar e analisar o efeito do baixo módulo de elasticidade das barras no comportamento à flexão de vigas armadas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP, do inglês *glass fiber-reinforced polymer*). Para auxiliar na análise, a técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC do inglês *Digital Image Correlation*) foi utilizada, promovendo melhor entendimento do comportamento observado.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo analisar e explicar o comportamento à flexão de vigas sub armadas com barras de GFRP. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- explicar o comportamento estrutural observado experimentalmente, justificando as diferenças observadas para vigas com falha por compressão do concreto reportadas na literatura;

- analisar a fissuração das vigas por meio da correlação de imagem digital e relacionar com o comportamento observado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE GFRP

Barras de GFRP foram utilizadas para reforço das vigas de concreto. As barras possuem diâmetro efetivo de 5,95 mm e uma área efetiva de 27,8 mm<sup>2</sup>, se enquadrando nos limites impostos pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). O teor de fibra das barras de GFRP foi determinado conforme o Anexo A7 da norma ASTM D3171 (2022), com fração em massa de 79,29%.

As barras foram caracterizadas mecanicamente por meio de ensaios de tração, para determinação da

resistência à tração e do módulo de elasticidade. As seguintes dimensões foram utilizadas para os corpos de prova: comprimento livre de 500 mm, comprimento de ancoragem de 250 mm e comprimento total de 1000 mm. As barras foram ancoradas utilizando tubos de aço Schedule 40 para evitar seu esmagamento junto às extremidades durante os ensaios e os tubos foram preenchidos com argamassa expansiva na proporção de 1500 g de água para 5000 g do material para garantir a aderência.

Para realização dos ensaios de tração, as barras foram instrumentadas com um extensômetro, modelo EEGL-10 N.203201 de base variável e deslocamento de 12,5 mm, posicionado no centro do comprimento livre da barra. Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica, modelo EMIC DL 30000F. O extensômetro foi retirado antes da ruptura do material para evitar danos ao equipamento. A Figura 1 mostra a configuração de ensaio utilizada e uma barra pós ensaio de tração, onde é possível verificar a falha dentro do comprimento livre.

Figura 1 – Configuração e ensaio de tração



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Para cálculo da resistência à tração foi utilizada a Equação 1. uma deformação de 0,003 mm/mm.

$$\sigma_u = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

onde:

$\sigma_u$  = Resistência à tração da barra,

$P_{max}$  = Força máxima resistida pela barra,

$A$  = Área efetiva.

Para cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a Equação 2. A faixa para determinação do módulo de elasticidade foi definida com o ponto inicial sendo uma deformação de 0,001 mm/mm e o ponto final com

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

onde:

$E$  = Modulo de elasticidade da barra,

$\Delta\sigma$  = Diferença da tensão de tração aplicada entre os pontos de deformação definidos,

$\Delta\varepsilon$  = Diferença na deformação obtida entre os pontos de deformação inicial e final da faixa definida.

O ensaio de caracterização mecânica da barra resultou nos parâmetros mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de propriedades mecânicas das barras de GFRP

Propriedades	Valor	Unidade	COV (%)
Resistência à tração ( $f_{u,frp}$ )	1126,51	MPa	4,63
Módulo de elasticidade ( $E_{frp}$ )	48,65	GPa	1,13

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

### 3.2.1 TRAÇO E GRANULOMETRIA

O concreto para moldagem das vigas teve seu traço definido por meio do método IPT/EPUSP para uma resistência à compressão desejada aos 28 dias de 35 MPa. O traço unitário em massa que foi utilizado para confecção do concreto é 1:2,35:2,85:0,64, com consumo de cimento CPV ARI de 360,57 kg/m<sup>3</sup>.

A granulometria dos agregados utilizados foi definida conforme as

normatizações nacionais NBR 7211 (2022) e NBR 17054 (2022). O agregado miúdo utilizado possuía dimensão máxima de 2,36 mm e seu módulo de finura é de 2,68. O agregado graúdo possuía dimensão máxima de 19 mm e seu módulo de finura era de 6,41, estando entre os limites especificados por norma para brita 0 e brita 1.

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

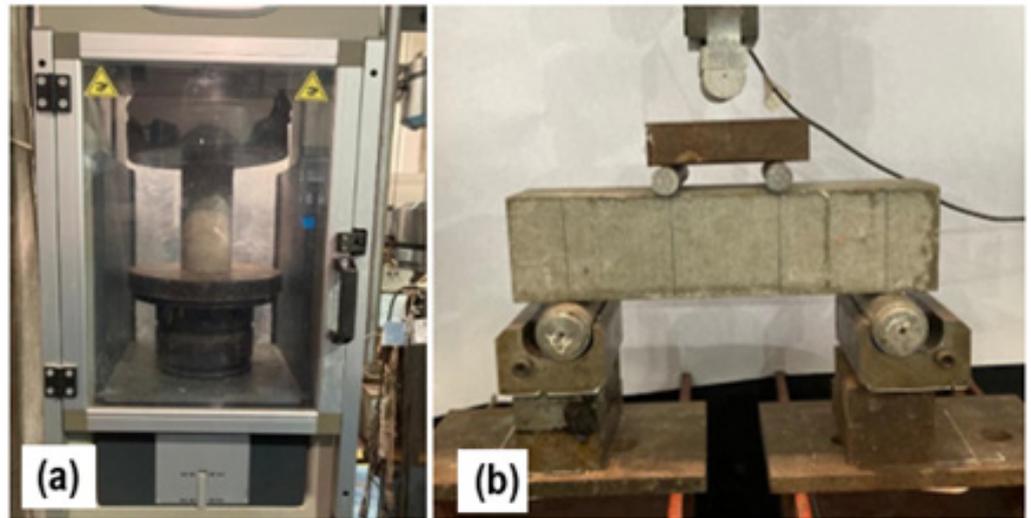
O concreto no estado endurecido foi caracterizado por ensaios para definição do módulo de elasticidade, resistência à compressão simples e tração na flexão, conforme as normas NBR 8522-1 (2021), NBR 5739 (2018) e NBR 12142 (2010), respectivamente.

Os ensaios para definição da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto foram realizados em máquina de ensaio

de compressão da Controls modelo 50-C46Z00 com capacidade de carga de 2000 kN a uma taxa de 0,3 MPa/s. Já os de tração na flexão foram realizados em equipamento de flexão com atuador hidráulico MTS modelo 204.63 com capacidade de carga de 100 kN. A Figura 2 mostra a configuração destes ensaios.

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do concreto.

Figura 2 – Ensaios de caracterização do concreto (a) compressão (b) tração na flexão



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 2 – Tabela de propriedades mecânicas do concreto.

Propriedades	Valor	Unidade	COV (%)
Resistência à compressão	35,49	MPa	6,27
Módulo de elasticidade	35,79	GPa	5,73
Resistência à tração na flexão	3,94	MPa	7,94

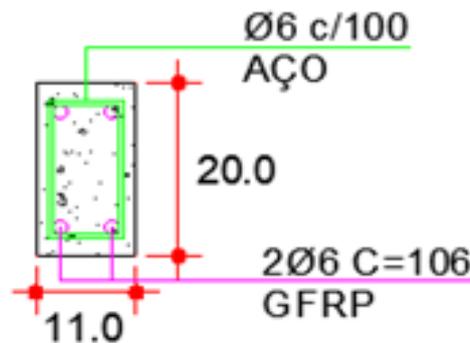
Fonte: elaborada pelo autor (2023).

### 3.3 VIGAS ARMADAS COM BARRAS DE GFRP

Três vigas armadas com barras de GFRP foram utilizadas para análise do comportamento à flexão. As vigas possuíam dimensão de 110x200x1100 mm (base x altura x comprimento) e foram armadas longitudinalmente com duas barras de GFRP de 6 mm de diâmetro nominal e transversalmente com

estribos de aço de 6,3 mm de diâmetro nominal, espaçados de 10 cm. Foram utilizados porta estribos de 6 mm de diâmetro nominal na parte superior da viga. O cobrimento utilizado foi de 2 cm. A Figura 3 mostra o esquema de armação das vigas.

Figura 3 – Esquema de armação das vigas (dimensões em cm)



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O dimensionamento dessas barras seguiu as orientações da ACI 440.1R (2015) para vigas cujo critério de falha é dominado pela ruptura por tração da barra, ou seja, quando a taxa de armadura é inferior a taxa de armadura balanceada ( $\rho \leq \rho_{fb}$ ). A taxa de armadura balanceada é a taxa na qual ocorreriam, simultaneamente, a ruptura da barra e o esmagamento do concreto. A região até 1,4 vezes  $\rho_{fb}$  é descrita pela normatização como uma região de transição entre os modos de ruptura, dada a variabilidade de resistência à compressão média do concreto.

A taxa de armadura balanceada foi de 0,245% e a taxa de armadura utilizada

de 0,286%. A taxa de armadura foi aproximadamente igual a taxa balanceada, o que pode gerar uma falha dominada pelo esmagamento do concreto ou pela ruptura da barra. Não foi considerado qualquer fator de majoração ou minoração de carga e resistência e a deformação última do concreto utilizada foi igual a 0,30%. O dimensionamento da viga resultou em um momento resistente nominal de 10,58 kNm.

Após o dimensionamento, as vigas foram concretadas utilizando o traço 1:2,35:2,85:0,64 e curadas em câmara úmida durante 28 dias. Após a cura, as vigas foram ensaiadas à flexão de três pontos e foram realizadas análises de DIC.

O ensaio de flexão a três pontos foi realizado para uma viga biapoiada com vão livre de 1 metro e um transdutor de deslocamento (LVDT) de 50 mm posicionado no ponto médio da viga para medição da flecha. A Figura 4

mostra a configuração do ensaio realizado. O ensaio foi conduzido em prensa hidráulica, modelo MTS 204.63 com capacidade para 100 kN, a uma velocidade de 0,04 mm/s.

Figura 4 – Configuração do ensaio de flexão à três pontos



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

As imagens, para análises DIC, foram adquiridas a uma velocidade de 1 foto por segundo. O programa GOM Correlate (2022) foi utilizado para o processamento das imagens. O método de Correlação de Imagem Digital (DIC) foi utilizado para coleta de dados de abertura de fissuras. A configuração para coleta de imagens para análise DIC é feita a partir de um foco de iluminação e uma câmera (2D-DIC) direcionadas para uma região central pintada em branco fosco e pontos pretos. A Figura 5 mostra a configuração utilizada para coleta das imagens.

A técnica de correlação de imagem digital é feita a partir da discretização dos pixels das imagens utilizadas, ou seja, cada pixel é associado a uma posição  $(x, y)$  e um valor de intensidade,  $f(x, y)$ , em uma análise de duas dimensões. A intensidade de cada pixel é definida com base em uma escala, por exemplo, numa escala monocromática representada por 8 bits existem 28 combinações possíveis de cores (preto, 0, à branco, 255) (BELEZA, 2017). Deste modo, garantir a heterogeneidade/aleatoriedade de pontos pretos é de grande importância para uma boa análise.

Figura 5 – Configuração para coleta de imagens para análise DIC

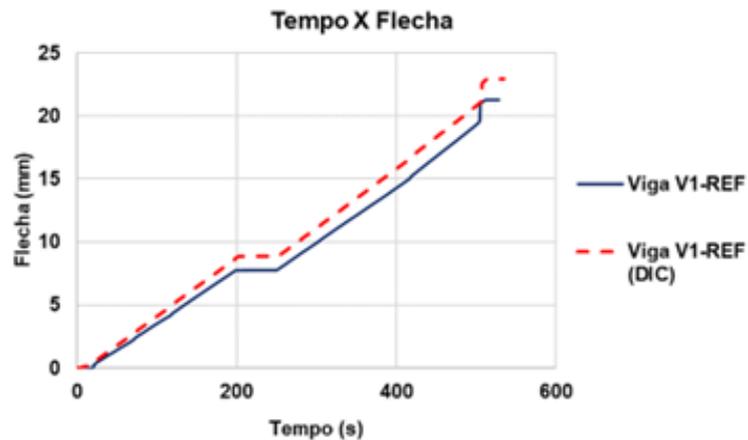


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

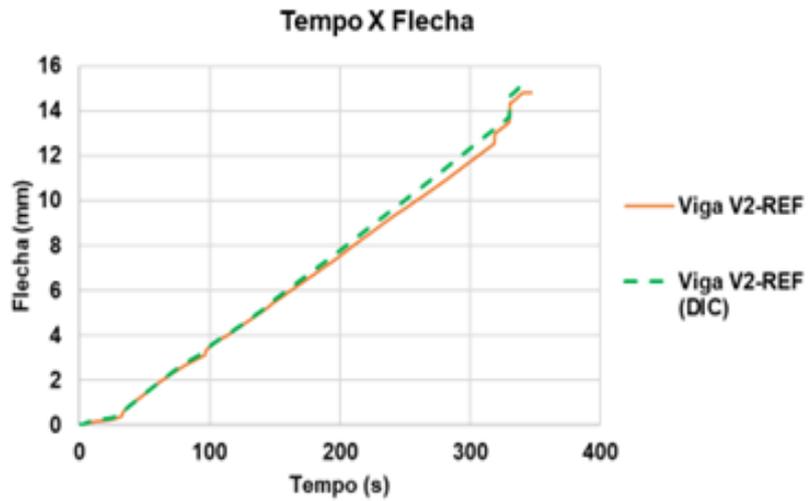
Para validação dos resultados obtidos na análise DIC, curvas de Flecha versus Tempo foram plotadas para dados do DIC e dados obtidos com o transdutor de deslocamento. Foi observada grande similaridade entre as duas curvas, o que permite a coleta e análise de outras informações dos resultados do DIC, como a abertura de fissuras. As Figuras 6 a 8 mostram as curvas, na qual o pontilhado representa as curvas com os dados do DIC e as curvas com linha contínua, os dados medidos com o transdutor.

Figura 6 – Curvas Flecha versus Tempo – Viga V1



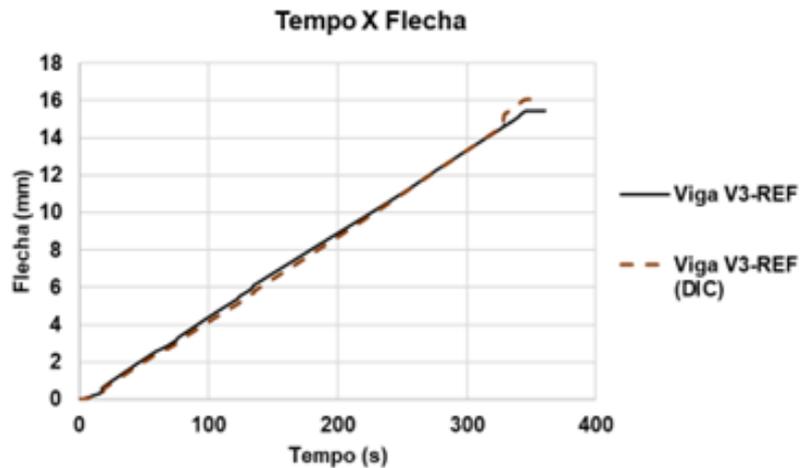
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 7 – Curvas Flecha versus Tempo – Viga V2



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

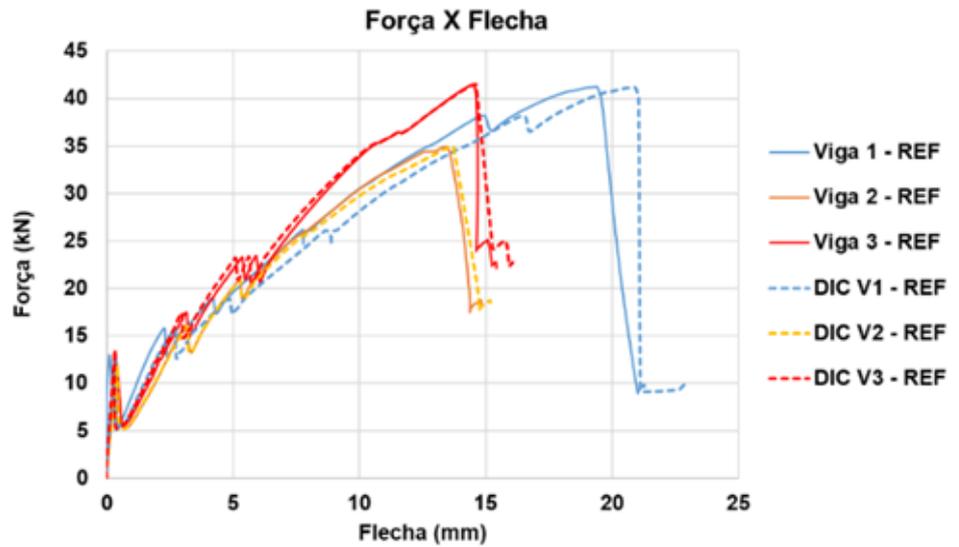
Figura 8 – Curvas Flecha versus Tempo – Viga V3



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A boa correlação entre as curvas apresentadas possibilitou uma dupla análise do comportamento da curva Força versus Flecha. Como mostrado na Figura 9, foi observada uma boa convergência para as vigas V2 e V3. Entretanto, isso não foi observado para a viga V1, tendo sido obtidas flechas ligeiramente maiores com o DIC.

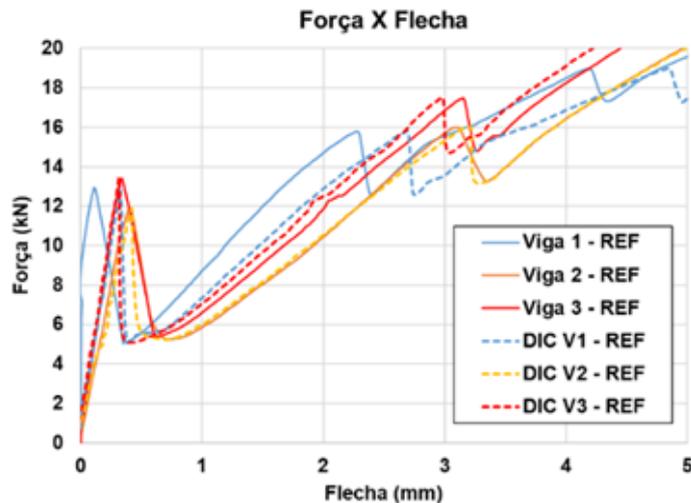
Figura 9 – Curvas Força versus Flecha – DIC e Experimental



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Onão ajustada da curva da viga V1 ocorre devido a uma pequena diferença no comportamento inicial, mostrada na Figura 10. Como pode ser observado, a medição experimental de flecha não foi realizada até aproximadamente 9 kN para a viga V1, o que permite concluir que isso ocorreu devido a leitura inicial do LVDT. Devido a boa correlação para as outras vigas, os dados de flecha obtidos com o DIC para a viga V1 foram utilizados nas análises.

Figura 10 – Ajuste inicial das curvas Força versus Flecha – DIC e Experimental



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Foi observado que todas as vigas falharam por tração na barra, conforme o dimensionamento realizado. Os ensaios de flexão a três pontos apresentaram resultados consistentes com os calculados analiticamente, em termos de momento último. A viga foi projetada para falhar com um momento e força máxima de aproximadamente 10,58 kN.m e 42,33 kN, respectivamente.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos, demonstrando a proximidade do cálculo analítico em comparação com os resultados experimentais, 7,31% para o valor médio e 17,42% para máxima diferença dentre as amostras. Em relação à flecha máxima (no pico de carga), as vigas V2 e V3 apresentaram valores semelhantes, contudo, a viga V1 apresentou maior capacidade de deformação, que será discutida posteriormente.

Tabela 3 – Resultados na ruptura dos ensaios de flexão a três pontos

<b>Parâmetros</b>	<b>Força</b>	<b>Momento</b>	<b>Flecha</b>
<b>Vigas / Unidades</b>	<b>(kN)</b>	<b>(kN.m)</b>	<b>(mm)</b>
<b>V1 - REF</b>	41,22	10,31	19,41
<b>V2 - REF</b>	34,96	8,74	13,45
<b>V3 - REF</b>	41,52	10,38	14,51
<b>Média</b>	39,24	9,81	15,79

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

O comportamento a flexão das três vigas se mostrou muito semelhante até o carregamento de 25 kN (aproximadamente 64% da força média experimental), como mostrado na curva Força versus Flecha na Figura 9. Os gráficos apresentam uma primeira fase linear (mais bem destacado na Figura 10), onde o concreto é o principal responsável por resistir as tensões de tração na qual o elemento está sendo exigido. No momento da fissuração, há uma grande queda na força resistida e, a partir deste ponto, a curva volta a ascender, mas com rigidez reduzida, como consequência da participação apenas da armadura na transferência de forças de tração.

A Tabela 4 exhibe os momentos de fissuração obtidos experimentalmente, sendo estes coletados por meio da análise DIC, ou seja, observando a primeira imagem em que a fissura começa a se formar. São comparados os momentos observados com o calculado por meio da ACI 440.1R (2015), na qual observam-se valores próximos, o que possibilita uma boa caracterização do instante em que a barra começa a contribuir na resistência aos esforços de tração. Além disso, a partir do momento de fissuração médio, calcula-se uma força de fissuração média de 12,64 kN, confirmando a afirmação anterior, visto que a força de fissuração média é, aproximadamente, o ponto onde as curvas apresentam o primeiro descarregamento.

Tabela 4 – Momentos de fissuração

<b>Vigas / Unidades</b>	<b>DIC</b>	<b>ACI 440.1R - 15</b>
	(kN.m)	(kN.m)
<b>V1 - REF</b>	3,18	2,69
<b>V2 - REF</b>	2,96	
<b>V3 - REF</b>	3,35	
<b>Média</b>	3,16	

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

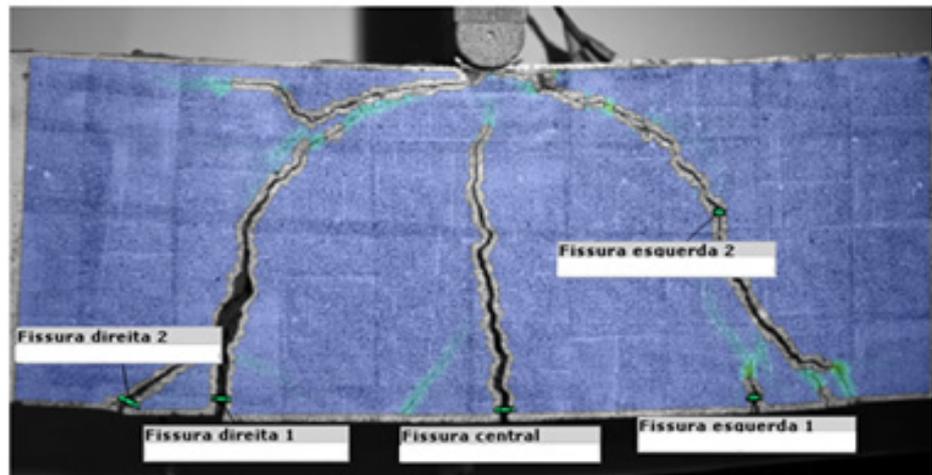
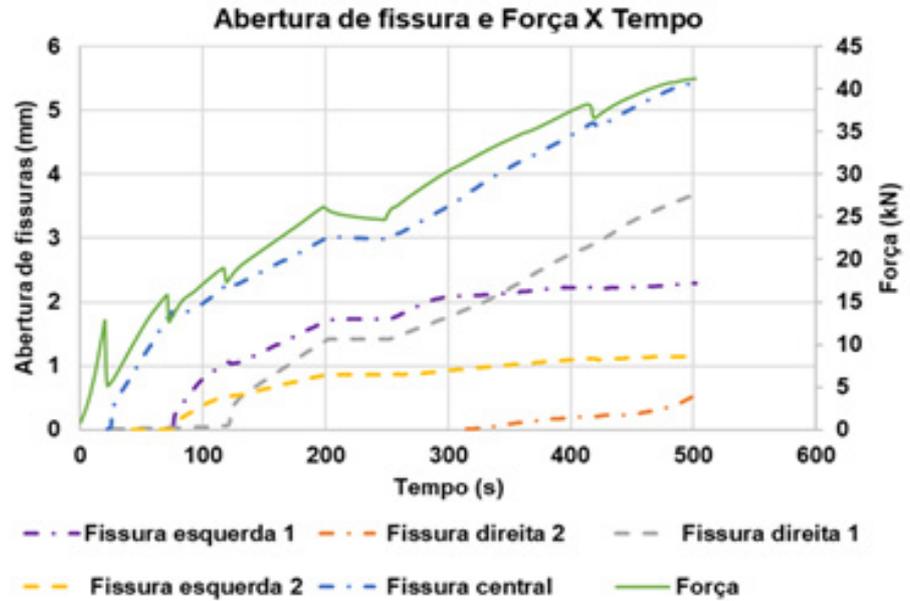
Fugiyama (2022) e Alsayed (1998) realizaram ensaios de flexão à quatro pontos em vigas armadas com barras de polímero reforçado com fibras de basalto (BFRP) e com barras de GFRP, respectivamente, e dimensionadas para falhar por esmagamento da região comprimida do concreto, não observando queda de carga na curva Força versus Flecha. Alsayed (1998) estudou, também, o comportamento a flexão de vigas com relação taxa de armadura por taxa de armadura balanceada iguais à 0,64 e 0,90 e com vigas armadas com aço com relação de 0,68. O autor observou o mesmo comportamento, onde as curvas de Força versus Flecha das vigas armadas com GFRP apresentaram uma queda logo após a carga de fissuração. Isso não foi observado para a viga armada com aço. Desta forma, a queda de carga observada em seu estudo foi atribuída ao baixo módulo de elasticidade das barras de GFRP.

A diferença observada no comportamento a flexão, dentre os métodos de dimensionamento, pode

ser justificada pela taxa de armadura utilizada. Em taxas maiores, para rompimento por esmagamento do concreto, a maior relação  $\rho/\rho_{fb}$  compensa fatores que influenciam na queda de carga observada, como a aderência barra-concreto e/ou o baixo módulo de elasticidade da armadura, a partir do melhor controle de fissuração e deflexão.

Por meio da análise DIC foi possível observar a relação entre o surgimento ou evolução de uma fissura com o comportamento a flexão obtido. O surgimento e/ou evolução de uma fissura caracteriza o comportamento a flexão, visto que, no momento da fissuração, a viga reduz sua rigidez e diminui, momentaneamente, a carga resistida. Como pode ser observado na Figura 11, o início da evolução da fissura central coincide com a primeira queda de carga observada na curva de Força versus Tempo, e o mesmo comportamento é observado no início da evolução das fissuras seguintes. O mesmo comportamento foi observado para as outras vigas apresentadas neste estudo.

Figura 11 – Comparação da fissuração e força resistida (Viga V1) e identificação das fissuras



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Com o uso do DIC, curvas de Força versus Abertura de Fissura foram plotadas, conforme a Figura 12. As curvas representam a abertura da fissura central de cada viga (que primeiro se desenvolveu), como mostrado na Figura 13. As regiões onde

é observado um “nó” representam a queda de carga observada na curva Força versus Deslocamento. As vigas apresentaram valores semelhantes de abertura de fissura, conforme o esperado.

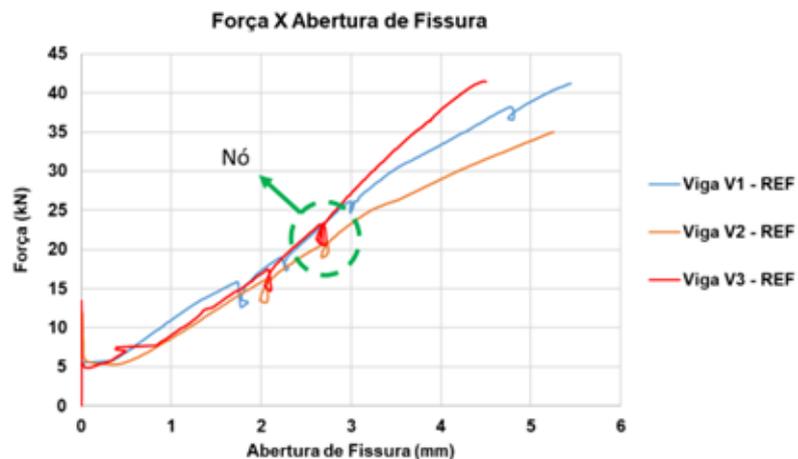
Integrando cada uma das curvas mostradas na Figura 12 observamos um indicativo da quantidade de trabalho realizado antes da ruptura da viga. Os valores obtidos para as Vigas V1, V2 e V3 foram, respectivamente, 127 N.m, 104 N.m e 94 N.m, aproximadamente. A Viga V1 apresentou maior valor, o que justifica a maior flecha observada para um mesmo nível de força máxima em comparação com a Viga V3, além disso, ela apresenta fissuração mais destacada, como pode ser visualizado na Figura 13.

A ACI 440.1R (2015) descreve que, devido à rigidez variável e ao comportamento elástico e frágil das barras de FRP, as flechas apresentadas por elementos

reforçados com esses materiais são mais sensíveis a variáveis, como a resistência à compressão média do concreto e a aderência barra-concreto, quando comparadas com elementos reforçados com aço. Essa explicação justifica os resultados semelhantes de flecha para as vigas V2 e V3, mesmo em níveis de força diferentes.

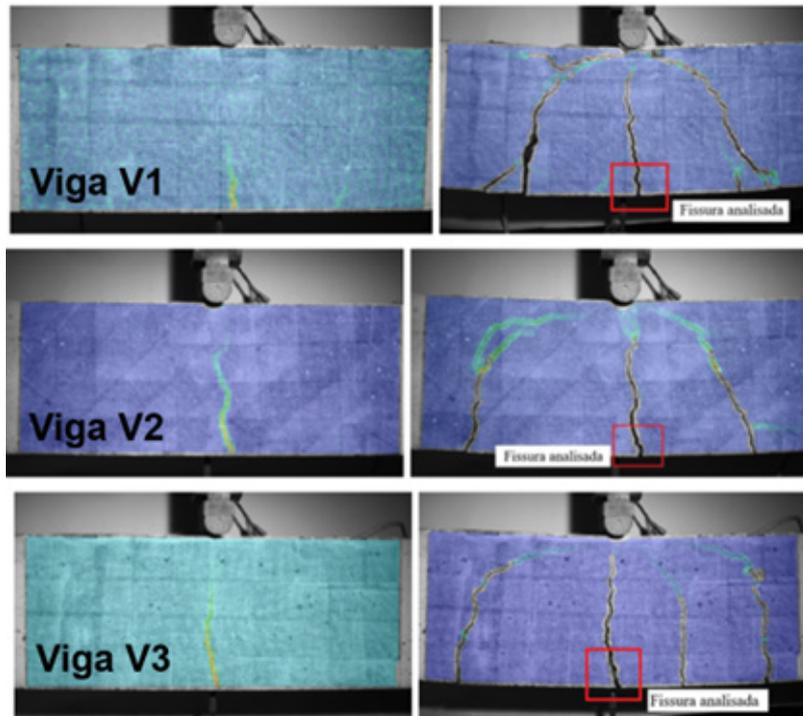
Como somente a fissura central foi analisada neste estudo, um cálculo considerando todas as fissuras, possivelmente, mostraria maiores valores para a viga V3 em relação a viga V2, que pode ser observado pela Figura 13, onde as vigas V2 e V3 apresentam fissuração semelhante, contudo a viga V3 mostra quatro fissuras verticais e a viga V2, três.

Figura 12 – Curvas Força máxima versus Abertura de Fissura



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 13 – Fissuras analisadas para cálculo da energia de fratura (Vigas V1, V2 e V3)



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

## 5 CONCLUSÕES

Algumas conclusões podem ser feitas a partir dos resultados e análises apresentadas:

- O dimensionamento das vigas utilizando a ACI 440.1R (2015) apresentou valores condizentes, em termos de momento nominal, com os resultados experimentais analisados.
- O uso do DIC como técnica para auxiliar nas análises se mostrou de grande utilidade, com a coleta de dados e análise de informações que não foram possíveis no campo experimental. Foi possível correlacionar a fissuração da viga com o comportamento a flexão observado.
- As vigas, dimensionadas pelo critério de ruptura por tração na

barra, apresentaram comportamento Força versus Flecha não constante, demonstrando quedas de carga conforme o surgimento ou evolução das fissuras. Sendo condizente com o observado por outros autores. Esse comportamento é influenciado por diferentes fatores, como o baixo módulo de elasticidade das barras de GFRP e a aderência barra-concreto.

- O dimensionamento de vigas armadas com barras de polímero reforçadas com fibra utilizando como critério de falha a ruptura por tração na barra se mostrou consistente entre amostras até um nível de resistência. O que possibilita estabelecer níveis de trabalhabilidade para elementos de concreto cujo modo de ruptura é dominado pela barra.

- O dimensionamento para ruptura dominada por tração da barra mostra altos valores de flecha e abertura de fissura, o que dificulta o atendimento a critérios de estados limites de serviço. Além disso, apesar da falha apresentar avisos, com a formação de fissuras, ela se mostra frágil, o que reforça a recomendação de normatizações para o dimensionamento de estruturas cuja falha é dominada pela compressão do concreto.

Como sugestão para trabalhos futuros, um estudo comparativo utilizando vigas dimensionadas pelos dois métodos e utilizando diferentes configurações de amadura é de grande contribuição. Além disso, para complementar as análises realizadas, comparar as flechas obtidas com os cálculos analíticos é de grande importância para o aprimoramento das equações atuais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKARIM, O. I.; AHMED, E. A.; MOHAMED, H. M.; BENMOKRANE, B. *Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars*. 2019. 282–296 f. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.024>.

ALSAYED, S. H. *Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars*. 1998. 1–11 f. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00061-9).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 440.1R - Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. 2015a. Farmington Hills, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 440.9R - Guide to accelerated conditioning protocols for durability assessment of internal and external fiber-reinforce polymers (FRP) reinforcement*. 2015b. Farmington Hills, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D3171 - Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. 2022. West Conshohocken, 2022. <https://doi.org/10.1520/D3171-22>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. 2018. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos*. 2022a. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão*. 2021. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. 2010. Rio de Janeiro, 2010.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio*. 2022b. Rio de Janeiro, 2022.
- BASTIDAS-ARTEAGA, E.; CHATEAUNEUF, A.; SÁNCHEZ-SILVA, M.; BRESSOLETTE, Ph.; SCHOEFS, F. *A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete*. 2011. 720–730 f. 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.008>.
- BELEZA, S. C. A. *Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem*. 2017. 1–101 f. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/27685>.
- BENMOKRANE, B.; ELGABBAS, F.; AHMED, E. A.; COUSIN, P.; M.ASCE. *Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars*. 2015. 2015. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000564](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000564).
- CAI, J.; PAN, J.; ZHOU, X. *Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beams*. 2017. 423–430 f. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.087>.
- FUGIYAMA, M. M. *ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRA DE BASALTO E FIBRAS DESCONTÍNUAS*. 2022. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS, Campinas, 2022. Disponível em: <http://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/handle/123456789/16487>. Acessado em: 10 dez. 2023.
- IBRACON. *CT 303 - Comitê IBRACON/ABECE: Uso de Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras - Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP)*. 2021. Brasil, 2021.
- OU, Y.; ZHU, D.; ZHANG, H.; HUANG, L.; YAO, Y.; LI, G.; MOBASHER, B. *Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures*. 2016. 196 f. 2016. <https://doi.org/10.3390/polym8050196>.