

# **ANÁLISE DO DANO EM VIGAS COM GFRP SOB CARGAS CÍCLICAS PELA TEORIA DO DANO CONCENTRADO**

GUILHERME DE ANDRADE LIMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENGº.CIVIL, SEINFRAH PREFEITURA DE ESTÂNCIA/SE, GuilhermeL1606@gmail.com;

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
6 a 9 de outubro de 2025

**RESUMO:** O concreto armado com barras metálicas, amplamente utilizado na construção civil brasileira, enfrenta sérios problemas de durabilidade devido à corrosão das armaduras. Como alternativa, este estudo investigou o uso de barras de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), material não metálico com propriedades que oferecem maior resistência à corrosão, leveza e baixa condutividade. Foram realizados ensaios experimentais em vigas submetidas a carregamentos cíclicos, com análise do dano estrutural baseada na Teoria do Dano Concentrado (TDC). Os resultados mostraram que vigas com menor taxa de armadura apresentaram maior acúmulo de dano, enquanto aquelas com maior taxa demonstraram comportamento mais estável. O concreto utilizado atingiu resistência característica de aproximadamente 20 MPa. A análise dos dados contribuiu para compreender o desempenho do GFRP e reforçou seu potencial como substituto ao aço em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), Carregamento cíclico, Teoria do Dano Concentrado (TDC), Concreto armado.

## **DAMAGE ANALYSIS IN GFRP-REINFORCED BEAMS UNDER CYCLIC LOADING BASED ON THE CONCENTRATED DAMAGE THEORY**

**ABSTRACT:** Reinforced concrete with metallic bars, widely used in Brazilian civil construction, faces serious durability issues due to reinforcement corrosion. As an alternative, this study investigated the use of GFRP bars (Glass Fiber Reinforced Polymer), a non-metallic material with properties that offer greater corrosion resistance, lightness, and low conductivity. Experimental tests were conducted on beams subjected to cyclic loading, with structural damage analysis based on the Concentrated Damage Theory (CDT). The results showed that beams with lower reinforcement ratios presented higher damage accumulation, while those with higher reinforcement ratios demonstrated more stable behavior. The concrete used reached a characteristic compressive strength of approximately 20 MPa. The data analysis contributed to understanding GFRP performance and reinforced its potential as a substitute for steel in reinforced concrete structures exposed to aggressive environments.

**KEYWORDS:** GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), Cyclic loading, Concentrated Damage Theory (TDC), Reinforced concrete.

## INTRODUÇÃO

O uso de estruturas de concreto armado com barras metálicas é amplamente difundido na indústria da construção civil no Brasil, sendo a principal escolha na maioria das obras realizadas no país. Contudo, essas estruturas convencionais enfrentam diversos problemas, especialmente relacionados à corrosão das armaduras provocada pela penetração de íons cloreto ou pela carbonatação, comprometendo a durabilidade e desempenho estrutural ao longo do tempo. Diante desse cenário, o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias tornam-se essenciais para minimizar esses problemas e garantir maior longevidade às construções.

A utilização do FRP (Fiber Reinforced Polymer – Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) data do final da Segunda Guerra Mundial, na década de 1940, sendo inicialmente aplicada principalmente nas indústrias aeroespacial e naval, em virtudes de suas propriedades (ACI 440-1R, 2015). Durante a Guerra Fria, os avanços nos estudos e na tecnologia proporcionaram um aumento significativo no uso desses materiais. No entanto, foi somente na década de 1960 que os FRPs começaram a ser considerados para uso como reforço em estruturas de concreto, já aplicação da armadura de FRP na construção civil foi no final da década de 1980, com o aumento da necessidade de manutenção em estruturas com barras de aço devido a problemas de corrosão (Tavares, 2006).

Dado o contexto apresentado, torna-se fundamental o estudo aprofundado das propriedades e do comportamento desse novo tipo de material, especialmente em relação à sua aplicação em diferentes condições estruturais como, por exemplo, em carregamentos cíclicos, que é um mecanismo comumente utilizado para analisar o comportamento à fadiga.

Para analisar este tipo de carregamento, uma alternativa viável é a teoria do Dano Concentrado (TDC), que representa uma abordagem avançada para analisar a deterioração e a capacidade de carga de estruturas, especialmente em elementos de concreto armado, quando expostos a danos localizados. Fundamentada em procedimentos da mecânica da fratura e da mecânica do dano clássico, a TDC aplica o conceito de rótulas plásticas para modelar o comportamento das estruturas sob diferentes condições de carga (Flórez-López, 1993, 1995).

## MATERIAL E MÉTODOS

O GFRP ou Polímero Reforçado com Fibra de Vidro, é um material compósito que consiste em fibras de vidro impregnadas em uma matriz de polímero como mostra a Figura 01. Essas fibras de vidro fornecem resistência e rigidez ao material, enquanto o polímero atua como uma matriz que transfere cargas entre as fibras e protege-as contra danos mecânicos e ambientais (Dalfré; Mazzu, 2020).

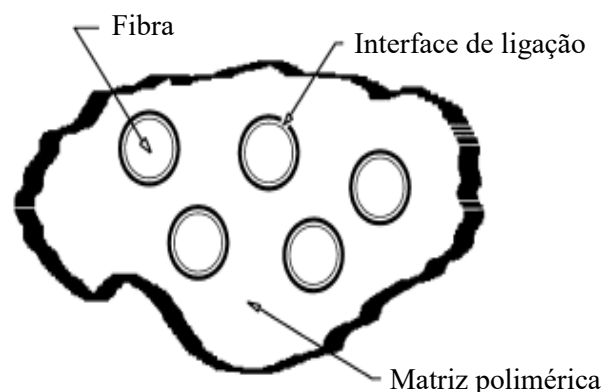


Figura 01. Interface entre a fibra e a matriz polimérica

Fonte: Adaptado ACI 440.1R-03

Este estudo experimental teve como objetivo analisar a evolução do dano em vigas de concreto armado com barras de GFRP submetidas a carregamentos cíclicos, utilizando como base a Teoria do Dano Concentrado (TDC). Para isso, foram moldadas doze vigas com dimensões de 60 cm de comprimento, 12 cm de largura e 22 cm de altura, respeitando as recomendações da ABNT para ensaios de flexão em elementos estruturais.

As vigas foram divididas em três grupos experimentais, variando-se apenas a quantidade de barras longitudinais de GFRP, mantendo constante a seção da peça. As barras de GFRP utilizadas, com diâmetro nominal de 8 mm, foram adquiridas por meio de fornecedor especializado, devido à baixa disponibilidade no mercado nacional. A resistência à tração fornecida pelo fabricante foi de aproximadamente 1000 MPa. A distribuição dos grupos foi feita da seguinte forma:

- **Grupo 1:** 4 barras (taxa de armadura de 0,0076);
- **Grupo 2:** 5 barras (taxa de armadura de 0,0095);
- **Grupo 3:** 6 barras (taxa de armadura de 0,0114).

A armadura transversal foi composta por estribos de aço CA-60 com 5 mm de diâmetro, espaçados a cada 7 cm ao longo do vão. Para garantir o cobrimento mínimo das armaduras e evitar o contato direto com o ambiente, foram utilizados espaçadores plásticos de 2,5 cm, conforme boas práticas executivas. As formas receberam desmoldante antes da concretagem, com o objetivo de facilitar o processo de desforma e garantir o acabamento superficial das peças.

O concreto empregado foi dosado com o traço 1:1,46:1,85:0,5 (cimento:areia:brita:água), utilizando cimento Portland composto CP II-F 32 da marca Poty, brita basáltica proveniente do município de Estância-SE e areia média lavada. Após o lançamento e adensamento manual com uso de soquete de madeira, as peças foram desmoldadas 24 horas após a concretagem e submetidas a cura alternada por 28 dias, sendo posteriormente armazenadas em ambiente coberto até o momento dos ensaios.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios demonstraram que a taxa de armadura influenciou significativamente a evolução do dano nas vigas ao longo dos ciclos de carga e descarga. As vigas com menor taxa de armadura (0,0076) apresentaram maiores níveis de dano acumulado, com perda mais acentuada de rigidez estrutural. Em contrapartida, as vigas com maior taxa (0,0114) mantiveram comportamento mais estável, com menor variação entre os ciclos e menor deformação residual.

A aplicação da Teoria do Dano Concentrado permitiu a modelagem da rigidez residual em cada ciclo e a quantificação da progressão do dano por meio da equação:

$$d = 1 - \frac{Z(d)}{Z_0}$$

Onde  $Z_0$  representa a rigidez inicial e  $Z(d)$  a rigidez no ciclo danificado. Os valores obtidos reforçam a eficiência da TDC para representar a degradação estrutural em elementos com GFRP, sendo possível observar uma tendência estatística de comportamento similar entre vigas com mesma taxa de armadura.

Além disso, observou-se que, à medida que o carregamento se aproximava do valor de ruptura, o desvio padrão entre os danos das vigas de cada grupo diminuía, indicando uma estabilização no modo de falha. Esse padrão sugere que a influência da taxa de armadura se manifesta de forma mais acentuada nos primeiros ciclos, sendo gradualmente reduzida conforme a estrutura se aproxima do colapso.

Esses resultados validam a viabilidade da aplicação do GFRP como armadura longitudinal, desde que seja realizado o dimensionamento adequado da taxa de armadura, e reforçam o potencial da TDC como ferramenta de análise para estruturas submetidas a ações repetitivas.

Importa ressaltar que, os resultados permitem comparar amostras com mesmas e diferentes taxas de armadura, analisando a influência da variação da rigidez residual, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado do dano.

VIGA	DANO (CICLO 1)	DANO (CICLO 2)	DANO (CICLO 3)	DANO (RUPTURA)
V-02	0,172	0,169	0,399	0,508
V-03	0,023	0,067	0,157	0,417
V-04	0,212	0,267	0,238	0,424
DESVIO PADRÃO	<b>0,081</b>	<b>0,082</b>	<b>0,101</b>	<b>0,041</b>
V-06	0,044	0,160	0,110	0,253
V-07	0,150	0,177	0,177	0,365
V-08	0,065	0,037	0,074	0,257
DESVIO PADRÃO	<b>0,046</b>	<b>0,062</b>	<b>0,043</b>	<b>0,052</b>
V-09	0,021	0,019	0,120	0,247
V-10	0,141	0,212	0,037	0,304
V-11	0,006	0,133	0,131	0,264
DESVIO PADRÃO	<b>0,06</b>	<b>0,079</b>	<b>0,042</b>	<b>0,024</b>

Fonte: Autor (2025)

A análise dos resultados obtidos nos ensaios cíclicos evidencia que a taxa de armadura influencia diretamente a progressão do dano estrutural nas vigas armadas com GFRP. As vigas com menor taxa de armadura, como V-02, V-03 e V-04, apresentaram maiores valores de dano na ruptura, sugerindo um processo mais acelerado de degradação ao longo dos ciclos de carga e descarga. Em especial, a V-02 demonstrou um aumento significativo no dano no terceiro ciclo, indicando uma transição para um regime de falha mais crítico.

Por outro lado, as vigas com maior taxa de armadura, como V-09, V-10 e V-11, apresentaram menores valores de dano final, o que sugere que a maior quantidade de barras de GFRP contribuiu para uma evolução mais controlada do dano. Isso reforça a importância do dimensionamento adequado da taxa de armadura para mitigar os efeitos da degradação sob carregamentos repetidos.

A análise estatística também revelou que o desvio padrão foi maior nos primeiros ciclos, indicando uma dispersão inicial na resposta das vigas ao carregamento. No entanto, na ruptura, o desvio padrão reduziu, mostrando que todas as vigas, independentemente da taxa de armadura, convergiram para um padrão mais previsível de falha. Esses resultados destacam a necessidade de estudos adicionais para otimizar o comportamento de vigas armadas com GFRP e aprimorar modelos de previsão da evolução do dano.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de vigas de concreto armado com barras de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) sob carregamentos cíclicos, focando na evolução do dano estrutural em função das variações nas taxas de armadura. Os resultados dos ensaios indicaram que as vigas com menor taxa de armadura apresentaram uma maior evolução do dano, enquanto as com maior taxa de armadura demonstraram um aumento mais gradual no dano, evidenciando o impacto direto da taxa de armadura na durabilidade e resistência das estruturas.

A aplicação da teoria do dano concentrado (TDC) foi essencial para entender a progressão do dano, uma vez que possibilitou uma análise detalhada do comportamento das vigas ao longo dos ciclos de carregamento. A escolha de trabalhar com os três últimos ciclos antes da ruptura proporcionou uma leitura mais precisa dos resultados, permitindo uma melhor visualização da evolução do dano ao longo do tempo.

Este estudo confirmou a viabilidade do uso de GFRP em concreto armado, destacando a necessidade de um controle adequado da taxa de armadura para garantir a durabilidade das estruturas. Contudo, os resultados também evidenciam a importância de mais estudos para otimizar os modelos de previsão da evolução do dano, levando em consideração diferentes taxas de armadura e outros fatores que possam influenciar o desempenho das vigas.

Portanto, as conclusões deste trabalho contribuem para o avanço no uso de materiais compósitos, como o GFRP, na engenharia civil, oferecendo perspectivas valiosas para a criação de soluções mais eficientes e duráveis no campo do concreto armado, além de apontar para futuras pesquisas que podem melhorar a aplicabilidade dessa tecnologia.

## REFERÊNCIAS

ACI 440.1R-15, A. C. I. **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.** 2015.

CIPOLLINA, A.; LÓPEZ-INOJOSA, A.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. **A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames.** *Computers & Structures*, v. 54, n. 6, p. 1112–1127, 1995.

DALFRÉ, G. e MAZZU, A. (2020). **Análise teórica do uso de armaduras não-metálicas de GFRP em vigas de concreto armado.** Universidade Estadual de Maringá, volume 1, P. 399 - 413.

TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP.** 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.