

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ESTÂNCIA

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME DE ANDRADE LIMA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE CICLOS DE CARGA E DESCARGA EM VIGAS
ARMADAS COM GFRP UTILIZANDO A TEORIA DO DANO CONCENTRADO**

MONOGRAFIA

ESTÂNCIA/SE

2025

GUILHERME DE ANDRADE LIMA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE CICLOS DE CARGA E DESCARGA EM
VIGAS ARMADAS COM GFRP UTILIZANDO A TEORIA DO DANO
CONCENTRADO**

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

Orientador: Prof. Me. Adysson André
Fortuna De Souza

ESTÂNCIA

2025

L732a Lima, Guilherme de Andrade.
Análise da variação de ciclos de carga e descarga em vigas armadas com GFRP utilizando a teoria do dano concentrado. / Guilherme de Andrade Lima. - Estância, 2025.
57 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2025.

Orientador: Prof. Me. Adysson André Fortuna de Souza.

1. GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). 2. Carregamento cíclico. 3. Teoria do dano concentrado (TDC). 4. Concreto armado. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Souza, Adysson . III. Título.

CDU:624.011.75

GUILHERME DE ANDRADE LIMA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE CICLOS DE CARGA E DESCARGA EM VIGAS
ARMADAS COM GFRP UTILIZANDO A TEORIA DO DANO CONCENTRADO**

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

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

ADYSSON ANDRÉ FORTUNA DE SOUZA, M.e
Instituto Federal de Sergipe - IFS

GILBERTO MESSIAS DOS SANTOS JUNIOR, Esp.
Instituto Federal de Sergipe – IFS

NORA NEI JESICA OLIVEIRA SANTANA, M.a
Instituto Federal de Sergipe- IFS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, José André e Aline de Andrade, pelo apoio incondicional, pela paciência e por sempre acreditarem no meu potencial. Vocês foram e sempre serão minha maior fonte de inspiração.

À minha tia, Alice de Andrade, pelo carinho, suporte e por sempre estar presente nos momentos mais importantes da minha vida.

Ao meu orientador, Adysson André Fortuna de Souza, pela orientação, paciência, e por compartilhar seu vasto conhecimento, guiando-me com sabedoria em todas as etapas deste trabalho. Sua dedicação e incentivo foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos meus professores do curso de Engenharia Civil, que ao longo desses anos de graduação, contribuíram significativamente para a minha formação acadêmica e profissional. Cada ensinamento foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de curso, pela troca de ideias, pelas palavras de incentivo nos momentos de dificuldade e pelas risadas que tornaram essa caminhada mais leve.

Não poderia deixar de mencionar o Instituto Federal de Sergipe, campus Estância, e todos os profissionais envolvidos, que possibilitaram o acesso aos recursos e às informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O uso de concreto armado com barras metálicas é comum na construção civil brasileira, mas enfrenta problemas como a corrosão devido à penetração de íons cloreto e carbonatação, o que compromete a durabilidade das estruturas. Para superar esses desafios, a substituição das armaduras metálicas por materiais não metálicos, como as barras de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), surge como uma solução promissora. As barras de GFRP, possuem propriedades físico-químicas que, oferecem vantagens significativas, incluindo maior durabilidade, menor necessidade de manutenção, leveza e baixa condutividade térmica e elétrica. A tecnologia do FRP começou a ser aplicada na construção civil na década de 1980, visando a melhorar a longevidade das estruturas em ambientes agressivos, como áreas litorâneas e subterrâneas. Neste estudo, foram realizadas análises experimentais para avaliar o comportamento de vigas armadas com GFRP sob carregamento cíclico, utilizando a Teoria do Dano Concentrado (TDC) para modelar a evolução do dano estrutural. Os ensaios demonstraram que as vigas com menor taxa de armadura apresentaram maior evolução do dano ao longo dos ciclos, enquanto as vigas com maior taxa de armadura exibiram um crescimento mais gradual do dano. Além disso, os resultados indicaram que a resistência do concreto atingiu valores próximos aos esperados, com resistência característica em torno de 20 MPa. A partir da análise dos dados, foi possível estabelecer padrões de comportamento das vigas, contribuindo para futuras aplicações e otimizações no uso do GFRP como alternativa ao aço em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), Carregamento cíclico, Teoria do Dano Concentrado (TDC), concreto armado.

ABSTRACT

The use of reinforced concrete with metal bars is common in Brazilian civil construction but faces problems such as corrosion due to the penetration of chloride ions and carbonation, which compromise the durability of the structures. To overcome these challenges, the substitution of metal reinforcements with non-metallic materials, such as GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) bars, emerges as a promising solution. GFRP bars have physicochemical properties that offer significant advantages, including greater durability, less maintenance, lightness, and low thermal and electrical conductivity. The FRP technology began to be applied in civil construction in the 1980s, aiming to improve the longevity of structures in aggressive environments, such as coastal and underground areas. In this study, experimental analyses were performed to evaluate the behavior of GFRP-reinforced beams under cyclic loading, using the Concentrated Damage Theory (TDC) to model the evolution of structural damage. The tests demonstrated that beams with a lower reinforcement ratio showed a greater evolution of damage over the cycles, while beams with a higher reinforcement ratio exhibited a more gradual increase in damage. Furthermore, the results indicated that the concrete strength reached values close to the expected, with a characteristic strength around 20 MPa. From the data analysis, it was possible to establish behavior patterns for the beams, contributing to future applications and optimizations in the use of GFRP as an alternative to steel in reinforced concrete structures.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Interface entre a fibra e a matriz polimérica	17
Figura 02 – Superfície das barras de GFRP	19
Figura 03 – Diagrama tensão X deformação do aço e de alguns tipos de FRP	19
Figura 04 – Elemento de barra	25
Figura 05 – Gráfico força X deslocamento	26
Figura 06 – Gráfico momento X dano	26
Figura 07 – Processo de mistura do concreto	29
Figura 08 – Espaçadores plásticos	30
Figura 09 – Barras de GFRP	31
Figura 10 – Processo de cura dos corpos de prova cilíndrico	33
Figura 11 – Detalhamento das vigas	34
Figura 12 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos	35
Figura 13 – Processo de cura dos corpos de prova prismáticos	35
Figura 14 – Ensaio de flexão a três pontos	36
Figura 15 – Esquematização do ensaio de flexão a três pontos	37
Figura 16 – Ruptura do corpo de prova	40
Figura 17 – Corpo de prova antes da realização do ensaio	41
Figura 18 – Corpo de prova durante a realização do ensaio	41
Figura 19 – Gráfico completo do ensaio da viga V-02	42
Figura 20 – Gráfico com as retas de inclinação da via V-02	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos corpos de prova retangular prismático	32
Tabela 2 – Resultados do ensaio de compressão do concreto	37
Tabela 3 – Resultados do dano	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades do GFRP do fornecedor

31

LISTA DE ABREVISTURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CP	Cimento Portland
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Ultimo
FIB	Fédération Internationale du béton
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
IFS	Instituto Federal de Sergipe
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
TDC	Teoria do Dano Concentrado
UFS	Universidade Federal de Sergipe

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Dano
d_u	Dano último
d_i	Dano no nó i
E_{ib}	Rigidez à flexão da barra
GPa	Gigapascal
G^d_i	Taxa de liberação de energia
L_b	Comprimento da barra
M_i	Momento fletor no nó i
M_r	Momento de fissuração
M_{cr}	Momento de fissuração da primeira fissura visível
MPa	Megapascal
q	Acréscimo de Resistência à fissuração devido à presença de armadura
R_0	Resistência Inicial a fissuração
R^d_i	Resistência à fissuração
$Z(d)$	Nova Rigidez
Z_0	Rigidez Inicial
\emptyset	Diâmetro nominal das barras

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. JUSTIFICATIVA	15
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Objetivo geral	15
1.2.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO (GFRP)	17
2.2. PROPRIEDADES DO MATERIAL	18
2.2.1. Densidade	18
2.2.2. Geometria	18
2.2.4. Resistência à Compressão	20
2.2.5. Módulo de Elasticidade	20
2.2.6. Resistência ao Cisalhamento	21
2.2.7. Fadiga	21
2.2.8. Aderência ao Concreto	22
2.3. COMPORTAMENTO DA VIGA ARMADA COM GFRP	22
2.4. TEORIA DO DANO CONCENTRADO	24
3. METODOLOGIA	29
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	29
3.1.1. Concreto	29
3.1.2. Barras de GFRP	31
3.1.3. Características do Aço	33
3.2. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	33
3.3. ENSAIOS MECÂNICOS NAS VIGAS	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. MATERIAIS E MÉTODOS	Erro! Indicador não definido.
4.1.1. Resistência à compressão do concreto	39
4.1.2. Falha na tensão de ruptura	40
4.2. RESULTADOS DO ENSAIO CÍCLICO	43

5. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – Gráficos dos resultados	51

1. 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.

Segundo Tavares (2006), a substituição do aço pela armadura não metálica tem como principal objetivo o aumento da durabilidade e do desempenho estrutural ao longo da vida útil de estruturas expostas a substâncias agressivas e intempéries, onde são submetidas a condições propícias à corrosão e à formação de campos eletromagnéticos. Esse processo afeta diretamente a durabilidade das estruturas, exigindo manutenção mais frequente e onerosa. Em áreas litorâneas, onde a presença de sal é elevada, a corrosão se torna ainda mais acentuada, comprometendo a integridade das armaduras metálicas. Além disso, em obras subterrâneas, como metrô, as ondas eletromagnéticas podem acelerar o processo de degradação. Portanto, o estudo de alternativas que sejam inertes à corrosão, como as barras de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer – Polímero Reforçado com Fibra de Vidro), torna-se cada vez mais relevante, uma vez que esses materiais não sofrem os mesmos efeitos da oxidação, prolongando a vida útil das estruturas e diminuindo a necessidade de manutenção.

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).

Essa tecnologia ainda não é comum no Brasil, mas já vem sendo aplicada há algum tempo em países mais desenvolvidos. As barras de polímero reforçado com fibra de vidro, conhecidas como GFRP, necessitam de análise em relação ao seu desempenho e à influência na matriz cimentícia, especialmente porque suas propriedades diferem das barras metálicas (Cunha, 2019).

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).

Na TDC, são utilizados conceitos chaves como a tensão efetiva e a hipótese da equivalência de deformação. O processo de fissuração é descrito por uma variável de dano que varia entre 0 e 1, representando a severidade do dano na estrutura. As leis de evolução do dano, que são determinadas por análises experimentais, permitem descrever o comportamento das estruturas em resposta a carregamentos repetitivos ou extremos. (Flórez-López et al., 2015).

Esta teoria oferece uma simplificação da mecânica da fratura, proporcionando uma ferramenta eficaz para modelar comportamentos não lineares em estruturas reais. A TDC já foi aplicada com sucesso à modelagem de concreto armado, concreto simples e arcos de alvenaria, demonstrando sua eficácia em diversos contextos estruturais (Amorim, 2016).

O presente estudo visa aplicar a TDC ao concreto armado com barras de fibra de vidro (GFRP), uma área ainda pouco explorada. A abordagem proposta pretende fornecer uma análise detalhada da evolução do dano, contribuindo com novos

entendimentos sobre a aplicação da TDC em materiais e estruturas pouco investigados.

1.1. JUSTIFICATIVA

O estudo do comportamento do concreto armado com barras de polímero reforçadas com fibra de vidro (GFRP) é de grande importância na engenharia civil devido às suas propriedades promissoras como material de reforço. Entretanto, assim como no concreto armado convencional, o dano e a fissuração são questões críticas que precisam ser compreendidas para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. No caso do concreto armado convencional, a análise do dano e a previsão da fissuração são áreas bem estabelecidas e amplamente estudadas. No entanto, para as vigas armadas com GFRP, um material relativamente novo na prática da engenharia civil, ainda não existem métodos eficientes e bem definidos para prever a fissuração.

A ausência de métodos estabelecidos para a propagação da fissuração em carregamento cíclico em vigas armadas com GFRP destaca uma lacuna significativa na literatura e na prática da engenharia. Considerando que o GFRP é utilizado cada vez mais em projetos de engenharia devido à sua resistência e durabilidade, é crucial desenvolver e adaptar técnicas de análise de dano para este material específico.

Portanto, torna-se legítimo e necessário conduzir estudos focados no desenvolvimento de um mecanismo eficaz para prever a fissuração em vigas armadas com GFRP. Tal iniciativa não apenas contribuirá para o avanço do conhecimento técnico sobre o comportamento desse material, mas também promoverá a segurança e a eficiência das estruturas de engenharia que utilizam GFRP, garantindo que sejam projetadas e mantidas de acordo com os padrões mais elevados de desempenho e segurança.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Caracterizar a evolução do dano em vigas de concreto armadas com GFRP, a partir de carregamentos cíclicos de carga e descarga, fundamentando-se na teoria do dano concentrado para a análise dos resultados.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Verificar a semelhança estatística da evolução do dano entre vigas de concreto com mesma taxa de armadura de GFRP.
- Verificar qual o limite de dano nas vigas armadas com GFRP.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO (GFRP)

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).

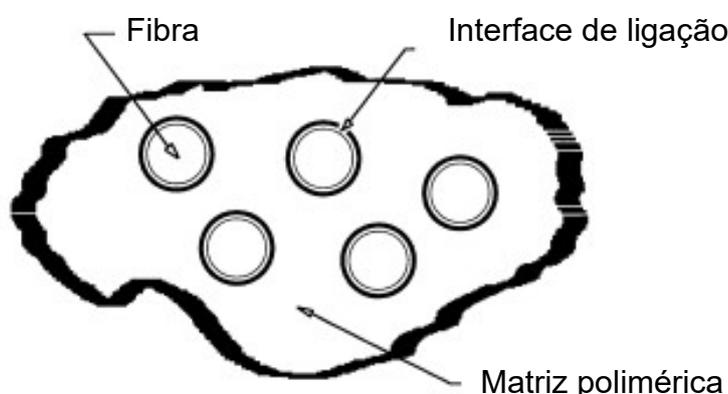


Figura 01. Interface entre a fibra e a matriz polimérica

Fonte: Adaptado ACI 440.1R-03

Segundo Tavares (2006), os fatores que influenciam significativamente o comportamento físico das barras de GFRP são constituídos pelas propriedades mecânicas, a orientação, o comprimento, a forma e a composição das fibras de vidro, das propriedades mecânicas da resina matriz e da aderência entre as fibras e a matriz polimérica.

O uso das barras reforçadas com fibra de vidro vem crescendo muito na última década. Esse aumento se deve à crescente busca por alternativas para a substituição do aço convencional na construção civil. As principais razões para essa busca dizem respeito à sustentabilidade, durabilidade, resistência e eficiência, além de poder ser utilizada em uma ampla variedade de aplicações na construção civil (Silva, 2023).

No Brasil conforme Dalfré e Mazzu (2020), os procedimentos para dimensionamento de estruturas armadas com barras de GFRP ainda não são

normatizadas, mas o material vem sendo aplicado em diversas áreas e de diversas formas, baseando-se basicamente em normas estrangeiras, como o ACI 440.1R (Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars) e a ACI 318 (Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary).

2.2. PROPRIEDADES DO MATERIAL

2.2.1. Densidade

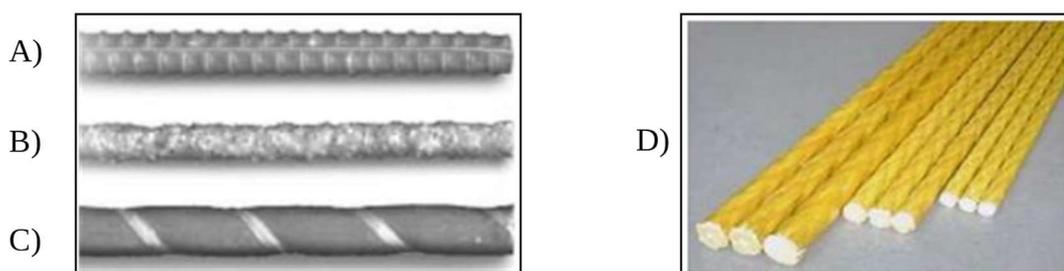
Segundo o ACI 440.1R-15, a densidade das barras de GFRP varia entre 1,2 e 2,1 g/cm³. Essa densidade é significativamente menor do que a do aço, que é de aproximadamente 7,9 g/cm³. Essa diferença faz com que o GFRP seja muito mais leve do que o aço, oferecendo vantagens em aplicações onde a redução de peso é crucial, como em estruturas que visam diminuir a carga permanente ou em situações de transporte e manuseio de materiais.

2.2.2. Geometria

A geometria das barras é uma propriedade muito importante para a aderência com a matriz cimentícia. Essa característica influencia diretamente como as barras interagem com o concreto, afetando a eficácia do reforço e a performance estrutural geral.

Os diâmetros da seção transversal e a geometria da barra dependem, tão somente, da tecnologia disponível nas indústrias produtoras. Em geral, as fábricas fornecem barras em diâmetros equivalentes aos encontrados comercialmente para as barras de aço. Como não é possível dar formato às barras após o processo de polimerização, o formato final das armaduras deve ser providenciado pela fábrica (Teixeira, 2018).

Devido ao seu processo de fabricação, as barras de GFRP possuem diferentes perfis superficiais. Os mais comuns são: superfície arenosa, filetes helicoidais e superfície enrolada. Entre esses, o perfil que mais se assemelha em relação ao aspecto visual às barras de aço é a que possui a superfície enrolada (Figura 02).



- A) Nervurado
- B) Revestido com areia
- C) Enrolado e Revestido com areia
- D) Trançado com fibra

Figura 02. Superfície das barras de GFRP.

Fonte: Teixeira (2018)

2.2.3. Resistência à Tração

Segundo o ACI 440.1R (2015), as barras de FRP, quando submetidas a carregamentos de tração, não apresentam comportamento dúctil (escoamento) antes da ruptura. O comportamento das barras consiste em uma relação de Tensão-deformação linearmente elástica possuindo ruptura abrupta, como é apresentado da Figura 03.

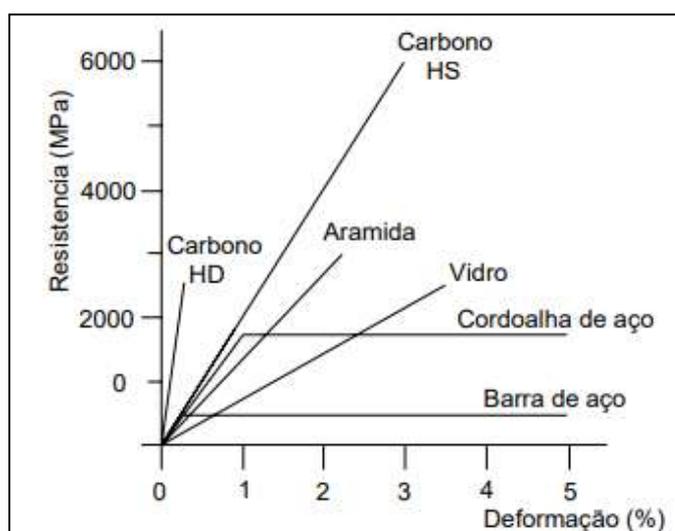


Figura 03. Diagrama tensão x deformação do aço e de alguns tipos de FRP.

Fonte: Couto (2007)

A resistência à tração de uma barra de FRP depende de vários fatores. Como a resina possui uma resistência significativamente menor que as fibras, a resistência dessas barras é definida, em grande parte, pela proporção entre o volume de fibras e o volume total da composição. As barras de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) para concreto armado comumente encontradas no mercado, por exemplo, têm uma resistência à tração variando de 400 a 1000 MPa em temperatura ambiente (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2021).

2.2.4. Resistência à Compressão

Cunha (2019) afirma que as barras de GFRP apresentam desempenho inferior sob compressão em comparação ao comportamento sob tração. O comportamento na ruptura é influenciado pelas características dos componentes do material, como as fibras e a resina, além da proporção volumétrica das fibras. A falha compressiva pode ser provocada por microflambagem das fibras, pela tração transversal da matriz devido ao efeito de Poisson, ou pelo cisalhamento da matriz.

O comportamento à compressão Longitudinal de barras de FRP também pode ser considerado linear elástico, com módulo de elasticidade igual ao de tração. Como a prevenção da flambagem das fibras é conferida pela matriz polimérica, as propriedades à compressão são mais dependentes da matriz. Como referência, pode-se assumir que as barras tenham resistência característica à compressão de 300 MPa, independentemente de sua classificação (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2021, p.23).

2.2.5. Módulo de Elasticidade

De acordo com Duarte (2022), o dimensionamento de estruturas de concreto armado utilizando barras de FRP apresenta semelhanças com o de estruturas armadas com barras de aço, buscando garantir tanto a segurança contra falhas quanto a adequação funcional por meio dos Estados Limites de Serviço (ELS) e último (ELU). No entanto, devido ao baixo módulo de elasticidade das barras de FRP, essas estruturas tendem a apresentar grandes deformações, o que frequentemente faz com que o Estado Limite de Serviço (ELS) se torne o fator determinante no projeto de estruturas com barras não metálicas.

Conforme o ACI 440.1R (2015), o módulo de elasticidade à tração das barras de GFRP é aproximadamente 75% inferior ao das barras de aço. Enquanto o módulo de elasticidade do aço é de 200 GPa, por outro lado, o da barra de GFRP fica em torno de 50 GPa.

Segundo o ACI 440.1R (2015), de maneira geral, a resistência à compressão das barras de GFRP é significativamente inferior à resistência à tração. O módulo de elasticidade à compressão para essas barras é aproximadamente 80% menor em comparação com o módulo à tração.

2.2.6. Resistência ao Cisalhamento

De acordo com Couto (2007), a resistência ao cisalhamento das barras de FRP é determinada pelas propriedades da matriz polimérica e pela distribuição e orientação das fibras, e em geral é baixa.

Uma orientação apresentada pelo ACI (American concrete institute), para aumentar a resistência transversal consiste em utilizar no compósito fibras adicionais não alinhadas com o eixo da barra. Essa abordagem pode ser alcançada trançando-se ou enrolando-se fibras ou, também, pela incorporação de mantas durante o processo de conformação das barras (Teixeira, 2018, apud ACI 440.1R, 2015).

2.2.7. Fadiga

Para Silva (2023), a falha por fadiga nas barras de FRP é causada pela degradação do material devido a repetidos carregamentos cíclicos. Essa deterioração se manifesta de várias formas, incluindo trincas na matriz, quebra das fibras e com início e crescimento da delaminação, tornando o processo de falha relativamente complexo.

Como afirma Curtis (2023), as barras de GFRP demonstram uma resistência à fadiga superior em comparação com outras barras de FRP. Em um estudo com um milhão de ciclos de carregamento, constatou-se que a resistência à fadiga é de 50% a 70% da resistência inicial e apresenta pouca sensibilidade a variações de umidade e altas temperaturas, exceto em casos onde a resina ou a interface sejam significativamente degradadas pelo ambiente.

Embora a verificação de danos nas barras de FRP por fadiga seja complexa devido aos diversos mecanismos de deterioração, como fissuração da matriz e ruptura das fibras, as barras de GFRP apresentam alta resistência à fadiga, suportando mais

de 4 milhões de ciclos de carregamento antes de iniciar a ruptura (Teixeira, 2018), enquanto o aço pode suportar entre 2 e 5 milhões de ciclos, dependendo das tensões aplicadas (Aaleti; Sritharan, 2009).

2.2.8. Aderência ao Concreto

Segundo Teixeira (2018), assim como outras propriedades mecânicas das barras de fibra de vidro, a aderência dessas barras é influenciada pela geometria da superfície, pelo processo de fabricação e pelas condições ambientais às quais a estrutura estará exposta, como por exemplo, altas variações de temperatura, exposição a raios ultravioletas e o contato direto com a água, fazendo com que o material se degrade rapidamente.

De acordo com Couto (2007), a solidariedade entre barras de armadura e o concreto é garantida pela existência de aderência entre os dois materiais. Na realidade, essa aderência é composta por diversas parcelas que decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação entre os dois materiais. Entre esses fenômenos, destacam-se a aderência por atrito, que resulta da interação superficial entre a barra e o concreto; a aderência mecânica, que se refere à capacidade do concreto de englobar as irregularidades da superfície da barra, criando uma ancoragem eficaz; a aderência devido ao confinamento do concreto, que ocorre quando o concreto ao redor da barra é comprimido, aumentando a força de aderência; e a aderência química, que envolve reações químicas entre a superfície da barra e os componentes do concreto, promovendo uma ligação mais forte e duradoura.

Nos elementos estruturais em concreto armado submetido à flexão, a tensão de tração é transferida para a barra por meio da aderência entre o concreto e a barra. A aderência entre a barra de FRP e o concreto adjacente à barra é similar ao comportamento encontrado quando se utilizam barras de aço e dependem do tipo de barra de FRP, módulo de elasticidade, conformação superficial e forma da barra (ACI 440.1R, 2003).

2.3. COMPORTAMENTO DA VIGA ARMADA COM GFRP

Tavares (2006) realizou uma análise experimental comparativa entre o comportamento de vigas de concreto armado convencional e vigas armadas com

barras de GFRP, submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos. Os resultados revelaram que as vigas com barras de GFRP apresentaram deslocamentos superiores em comparação com as vigas de concreto armado convencional. Esse comportamento foi atribuído ao menor módulo de elasticidade do GFRP. Foi observado também que, devido a esse menor módulo de elasticidade, as vigas de GFRP necessitaram de uma área maior de armadura longitudinal e apresentaram rupturas mais bruscas.

Benmokrane *et al.* (2006) estudaram vigas de concreto armadas com barras de GFRP em comparação com as armadas com aço convencional, utilizando barras de dois fabricantes diferentes. Os resultados revelaram que, apesar de serem utilizados materiais de fabricantes distintos, o comportamento das barras de GFRP foi consistente. Contudo, as vigas com GFRP apresentaram desempenho inferior às vigas com aço, mostrando maiores fissuras e deformações. Além disso, as vigas com maior altura exibiram uma resistência 25% superior em comparação às vigas de menor altura, evidenciando a influência da altura na resistência das vigas.

Enquanto as vigas de concreto armado tendem a absorver melhor os ciclos de carga e descarga, devido à sua ductilidade e capacidade de deformação plástica (Benmokrane *et al.*, 2006), as vigas armadas com GFRP mostram-se mais propensas a falhas por fissuração prematura (Nanni; Dolan, 1993). O GFRP, por ser um material mais rígido, apresenta menor deformação elástica e não possui fase plástica significativa, o que pode limitar sua capacidade de redistribuir tensões em zonas de compressão e tração (ACI 440, 2006).

Um dos principais benefícios do GFRP é sua resistência à corrosão, o que o torna ideal para ambientes agressivos, como estruturas costeiras ou em contato com substâncias químicas corrosivas (Hollaway; Teng, 2008). As vigas armadas com aço, embora sejam mais previsíveis em termos de comportamento estrutural, exigem manutenção contínua, como proteção anticorrosiva, para garantir sua durabilidade ao longo do tempo (El-Maaddawy; Sherif, 2009).

Embora o GFRP ofereça vantagens como a leveza e a resistência à corrosão, seu comportamento sob cargas cíclicas e estáticas diferencia-se consideravelmente do aço, especialmente em termos de deformação e rigidez (Meier, 1995). A comparação entre esses dois materiais ressalta a importância de selecionar o tipo de armadura com base nas necessidades específicas de cada projeto, considerando

fatores como o ambiente de exposição, vida útil da estrutura e o tipo de carregamento a que será submetida (Machida, 1993).

2.4. TEORIA DO DANO CONCENTRADO

Com o desenvolvimento contínuo da Engenharia Civil, em que as construções apresentam formas mais esbeltas e geometrias complexas, além da utilização de materiais variados, a análise do comportamento não linear das estruturas torna-se indispensável. Embora o uso de modelos não lineares no dimensionamento seja mais desafiador e exija maior esforço computacional, essa abordagem é fundamental para garantir a segurança e eficácia de estruturas como edifícios altos, arcos ou outras que apresentam grandes deformações (Amorim, 2016).

Com base nos conceitos de mecânica da fratura, mecânica do dano contínuo e rótulas plásticas, Flórez-López (1993, 1995) desenvolveu modelos para estruturas de concreto armado. Seu trabalho serviu de referência para inúmeros estudos ao redor do mundo, esses avanços foram consolidados em um campo da mecânica estrutural conhecido como Teoria do Dano Concentrado (TDC).

Para a modelagem não linear de estruturas de concreto armado com base na Teoria do Dano Concentrado (TDC), considera-se que os fenômenos inelásticos estão concentrados nas rótulas plásticas situadas nas extremidades dos elementos estruturais. Dessa forma, o elemento é tratado como um pórtico com comportamento elástico linear, mas com duas rótulas inelásticas nas extremidades.

Embora a mecânica do dano contínuo e a mecânica da fratura não sejam ideias para aplicações práticas direta no campo da Engenharia Civil, seus princípios teóricos são amplamente sustentados pelos fundamentos da termodinâmica. Esses conceitos fornecem uma base robusta para a compreensão de fenômenos complexos que ocorrem em estruturas submetidas a esforços variados, auxiliando no desenvolvimento de modelos mais precisos e avançados (Amorim, 2016).

Para modelar não linearmente estruturas de concreto armado usando a teoria do dano concentrado, deve-se assumir que os fenômenos inelásticos ocorrem nas rótulas plásticas nas extremidades do elemento estrutural. O elemento é considerado um pórtico com comportamento elástico linear, mas com duas rótulas inelásticas, como mostrado na Figura 04.

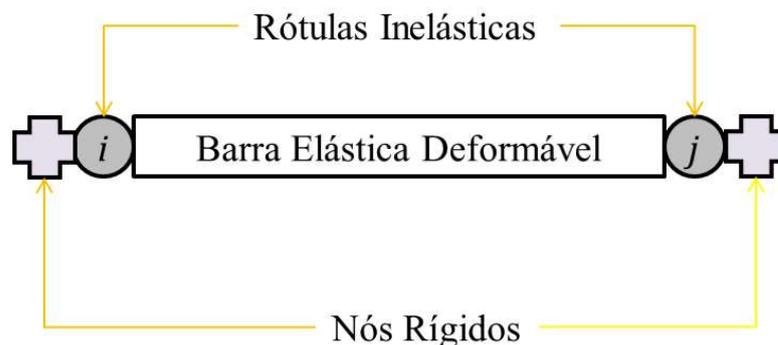


Figura 04. Elemento de barra.

Fonte: Souza (2019).

O dano é determinado experimentalmente comparando a rigidez inicial do elemento estrutural com a rigidez final após ciclos de carga e descarga. Inicialmente, aplica-se uma carga pequena para determinar a rigidez inicial Z_0 sem causar danos. Depois, a carga é aumentada até o nível desejado de dano, removida e reaplicada. A nova rigidez $Z(d)$ é calculada com base nos resultados da última carga e deslocamento. Com base nos resultados obtidos, o dano na peça é então calculado utilizando a Equação 1.

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

A evolução do dano em um elemento estrutural de concreto pode ser rastreada por meio de ciclos sucessivos de carga e descarga, permitindo uma análise detalhada do comportamento do material ao longo do tempo. Este processo é exemplificado no experimento realizado por Flórez-López *et al.* (2015), que demonstra como o dano se acumula progressivamente em resposta a carregamentos repetidos. Os resultados deste experimento, apresentados na Figura 05, fornecem uma visão abrangente de como o dano se desenvolve e se distribui no concreto, oferecendo informações valiosas para a compreensão e previsão da durabilidade e integridade estrutural.

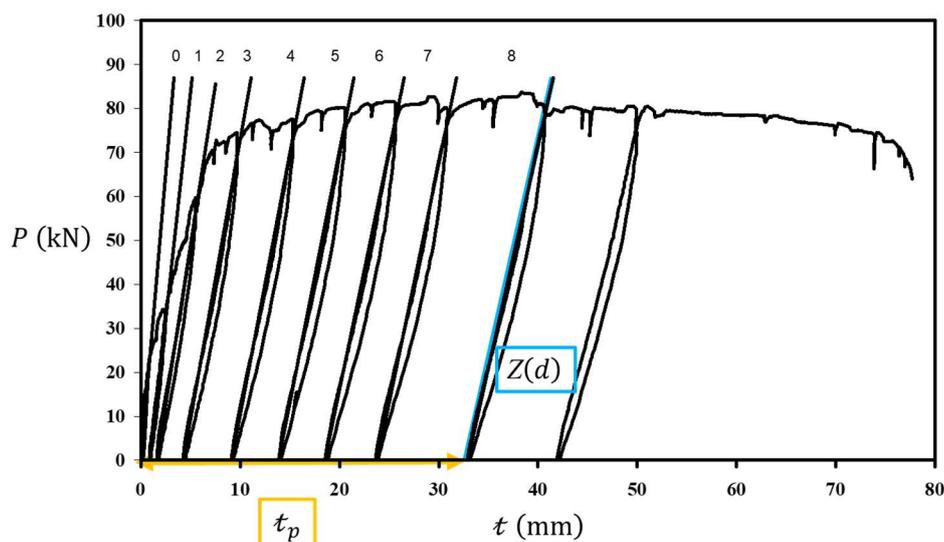


Figura 05. Gráfico força x deslocamento
 Fonte: Adaptado de Flórez-López *et al.* (2015).

O dano no concreto armado inicia-se logo após o momento de fissuração M_r , quando começam a aparecer as primeiras microfissuras na estrutura. À medida que o carregamento aumenta, o dano se intensifica progressivamente até atingir o valor máximo, conhecido como dano último D_u , que corresponde à ruptura da peça, e que pode chegar a valores próximos de 0,63 (Flórez-López *et al.*, 2015). A representação gráfica dessa evolução por meio de um gráfico "Momento versus Dano" permite visualizar com clareza o comportamento da estrutura sob carregamento, como exemplificado na Figura 06.

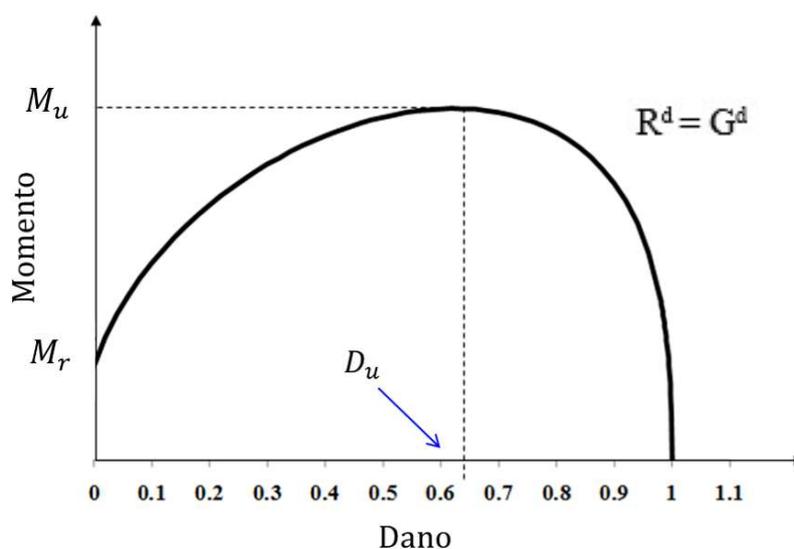


Figura 06. Gráfico momento x dano
 Fonte: Adaptado de Flórez-López *et al.* (2015)

Numericamente, esse gráfico pode ser obtido também através da expressão que relaciona a resistência à fissuração R_i^d e a taxa de liberação de energia G_i^d .

A equação que descreve a resistência à fissuração do elemento foi desenvolvida com base em estudos experimentais realizados por Flórez-López et al. (2015) e é apresentada pela Equação 2. Esses experimentos permitiram estabelecer uma relação matemática que define a resistência à fissuração, proporcionando uma compreensão mais precisa do comportamento estrutural do concreto armado sob diferentes níveis de dano e carregamento.

$$R_i^d(d) = R_0 + q \frac{\ln(1-d)}{1-d} \quad (2)$$

Nessa equação, q representa o aumento na resistência à fissuração devido à armadura, enquanto R_0 é a resistência inicial à fissuração, calculada pela Equação 3. Essa abordagem considera a contribuição da armadura para a resistência total do elemento.

$$R_0 = \frac{F^0 M_{cr}^2}{2} \quad (3)$$

O momento de fissuração, M_{cr} , ocorre quando o momento aplicado na rótula atinge o ponto em que se forma a primeira fissura visível. Já F^0 é definido pela Equação (4), representando um parâmetro importante para caracterizar o comportamento estrutural nesse estágio inicial de fissuração.

$$F^0 = \frac{L_b}{3EI_b} \quad (4)$$

“Onde L_b e EI_b são, respectivamente, o comprimento e a rigidez à flexão do elemento de barra b .”

A taxa de liberação de energia da rótula plástica, expressa em termos da variável de dano, pode ser calculada pela Equação 5.

$$G_i^d = \frac{L_b M_i^2}{6EI_b(1-d_i)^2} \quad (5)$$

“onde M_i e D_i são, respectivamente, o momento fletor e o dano no nó (i).”

Assim, considerando que $G_i^d = R_i^d$ a equação pode ser reescrita de acordo com a Equação 6, refletindo o equilíbrio entre a taxa de liberação de energia G^d e a

resistência à fissuração R^d . Isso permite uma simplificação na análise do comportamento da estrutura durante o processo de fissuração.

$$\frac{L_b M_i^2}{6Ei_b(1-d)^2} = R_0 + q \frac{\ln(1-d)}{1-d} \quad (6)$$

Admitindo que $d = d_u$ (dano máximo), temos que $M = M_u$ (momento último). Substituindo os valores de R_0 na Equação 6, chega-se à Equação 7, que descreve o comportamento do momento no estado de dano máximo, levando em consideração a resistência inicial à fissuração.

$$\frac{F^0 M_u^2}{2(1-d_u)^2} = \frac{F^0 M_f^2}{2} + q \frac{\ln(1-d_u)}{1-d_u} \quad (7)$$

Ao resolver o sistema formado pela Equação 7 e sua derivada (Equação 8), é possível determinar tanto o valor do parâmetro de encruamento (q) quanto o valor do dano último (D_u).

$$2(1 - d_u)R_0 + q[\ln(1 - d_u) + 1] = 0 \quad (8)$$

Após a determinação de todas as variáveis da Equação 7, torna-se possível identificar o valor de dano correspondente a cada momento atuante no elemento estrutural. Essa análise permite traçar a relação entre o aumento do momento e a progressão do dano, fornecendo uma visão mais detalhada do comportamento do material sob diferentes condições de carga.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia adotada, que abrange tanto a execução experimental quanto a análise dos resultados. A pesquisa foi conduzida em quatro etapas principais: caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova, realização dos ensaios de carregamento cíclico, e, por fim, o processamento dos dados e a análise dos resultados obtidos.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1. Concreto

O concreto utilizado no estudo foi dosado com um traço de 1:1,46:1,85:0,5 (cimento:areia:brita:água), buscando garantir uma composição adequada para os ensaios. Os materiais utilizados foram caracterizados, apresentando massas específicas de 2,65 g/cm³ para a areia, 2,61 g/cm³ para a brita basáltica e 3,14 g/cm³ para o cimento Portland CP II-F 32. A mistura do concreto foi realizada no laboratório de materiais do IFS, em uma betoneira móvel de 400 litros, como mostra a Figura 07. Para a dosagem dos materiais, foi necessária a utilização de uma balança de precisão com capacidade de 200 kg.



Figura 07. Processo de mistura do concreto.

Fonte: Autor (2025)

Para garantir o cobrimento, foram utilizados espaçadores plásticos de 25 mm na armadura (Figura 08). Além disso, com a finalidade de facilitar na etapa de desmolde das vigas, as formas de madeira passaram por aplicações de desmoldante. Para garantir o adensamento do concreto o operador realizou a compactação de maneira manual com a utilização de uma barra metálica aplicando 25 golpes por camada, sendo dividido em três, totalizando 75 golpes.



Figura 08. Espaçadores plástico.

Fonte: Autor (2024)

a) Cimento utilizado

Para a execução do concreto, o cimento utilizado foi o CP II F 32 da marca Poty, a escolha do tipo de cimento utilizado não seguiu nenhum parâmetro para determinação, além da disponibilidade da região e o fato de ser o mais comumente utilizado nesse tipo de elemento, cujas propriedades adotadas serão fornecidas pelo fabricante.

b) Caracterização do agregado Miúdo

O agregado miúdo a ser utilizado é a areia lavada oriunda da região de Estância que é frequentemente encontrada em casas de materiais de construção locais, devido à sua disponibilidade e características adequadas para a construção civil. Os ensaios de caracterização a serem realizados seguiu todas as diretrizes da ABNT NBR 16916:2021 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água e ABNT NBR – 17054:2022 Agregados – Determinação da composição

granulométrica – Método de ensaio, garantindo a conformidade com os requisitos técnicos para a produção de concreto.

C) Caracterização do agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0, também obtida no comércio local. Os ensaios de caracterização foram realizados conforme a ABNT NBR 16917:2021 – Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.

d) Água

A água utilizada nos experimentos foi proveniente do SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto), concessionária responsável pelo abastecimento de água no município de Estância/SE.

3.1.2. Barras de GFRP

As armaduras das vigas utilizadas no estudo foram confeccionadas especificamente para esta pesquisa e possuem diâmetro de \varnothing 8,00 mm conforme a Figura 09. Elas foram adquiridas com recurso próprio em uma loja online, por falta de disponibilidade no mercado local. Isso evidencia o cuidado com a especificidade dos materiais para garantir a precisão dos ensaios e resultados.



Figura 09. Barras de GFRP.

Fonte: Autor (2024)

Pretendia-se realizar ensaio de tração nas barras de GFRP. No entanto, como não foi viável por limitações de equipamentos e do laboratório, foram adotados os valores de resistência fornecidos pelo fabricante. Essas informações estão ilustradas na Quadro 1.

Quadro 1. Propriedades do GFRP do fornecedor

Parâmetro	Vergalhão de fibra de vidro
Resistencia à tração (MPa)	1000
Peso metro Linear 8mm	0,080 kg
comprimento das Barras	Até 100 m
Durabilidade embutido no concreto	(+) 100 anos
Durabilidade embutido no concreto em classe de agressividade III e IV	(+) 100 anos
Resistência à corrosão	sim
Condutividade elétrica	não
Condutividade térmica	não
Cobrimento de concreto em classe de agressividade III e IV	20 mm

Fonte: Adaptado de Madareli, tabela de propriedades. Disponível em: <https://www.madareli.com.br>. Acesso em: 17 Setembro. 2024.

3.1.3. Características do Aço

Em relação à armadura transversal, foram utilizados estribos em barras de aço CA-60 nervuradas de diâmetro \varnothing 5,00 mm, com distribuição a cada 7,00 cm, resultando em 8 estribos por viga, levando em consideração que cada viga possui 60 cm de comprimento. O aço CA-60 possui uma resistência característica à tração de 600 MPa, limite de escoamento mínimo de 600 MPa e um módulo de elasticidade em torno de 210 GPa, garantindo elevada resistência mecânica.

3.2. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram elaboradas 12 amostras, os corpos de prova em formato de vigas foram separados em 3 grupos distintos e classificados conforme Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos corpos de prova retangular prismático.

Grupos	Nomenclatura	bw (cm) Base	hw (cm) Altura	L (cm) Comprimento	Taxa de armadura
Grupo 01	V 01, V 02 V 03, V 04	12	22	60	0,0076
Grupo 02	V 05, V 06 V 07, V 08	12	22	60	0,0095
Grupo 03	V 09, V 10 V 11, V 12	12	22	60	0,0114

Fonte: Autor (2024)

Também foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos para cada grupo conforme a ABNT NBR 5738:2015 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, para a realização de ensaio de resistência a compressão do concreto aos 28 dias conforme a recomendação da ABNT NBR 5739:2018 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, onde os mesmos permaneceram submersos em água potável para o processo de cura por 28 dias, como mostra a Figura 10.



Figura 10. Processo de cura dos corpos de prova cilíndrico.

Fonte: Autor (2025)

Foram confeccionadas quatro vigas com quatro barras de GFRP, quatro vigas com cinco barras, e quatro vigas com seis barras. Essa variação visa avaliar o impacto da quantidade de armadura no comportamento estrutural das vigas, seguindo rigorosamente todas as diretrizes normativas aplicáveis. A armadura longitudinal utilizada foi de estribos pré-fabricados de aço CA-60, com dimensões de 17x7 cm, sendo os mais comuns no mercado local (Figura 11).

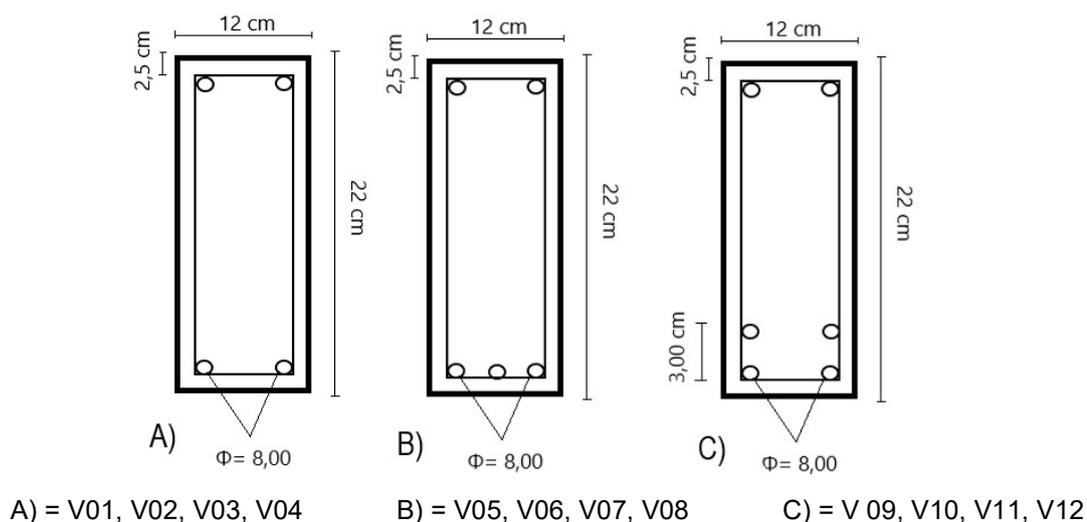


Figura 11. Detalhamento das Vigas.

Fonte: Autor (2024)

O procedimento de concretagem dos corpos de prova ocorreu da seguinte forma: as vigas foram moldadas seguindo as diretrizes da NBR 12655:2022 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Foram executadas três camadas, com 25 golpes em cada uma, para o adensamento do concreto. A utilização de espaçadores plásticos de 25 mm tem como finalidade garantir o cobrimento das armaduras. Após o desmolde, as vigas passaram por um processo de cura, que ocorreu com ciclos de molhagem em dias alternados até completar o período total de 28 dias, como pode ser observado nas Figuras 12 e 13.

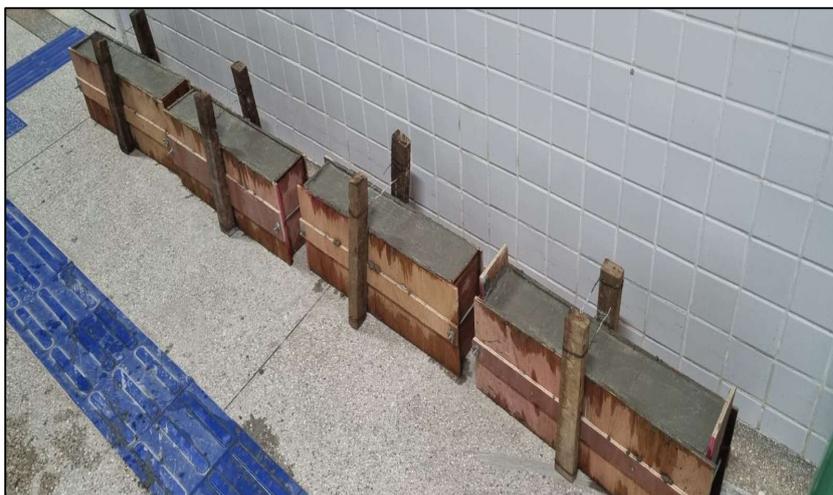


Figura 12. Moldagem dos corpos de prova prismáticos.

Fonte: Autor (2025)

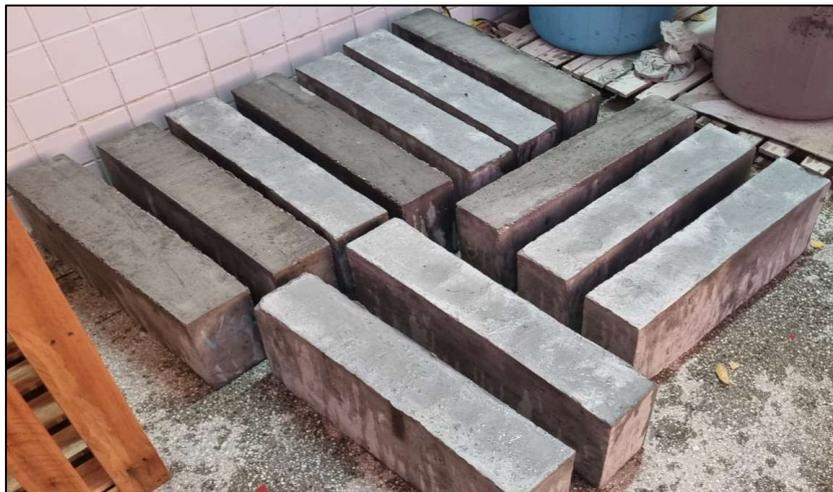


Figura 13. Processo de cura dos corpos de prova prismáticos.

Fonte: Autor (2025)

3.3. ENSAIOS MECÂNICOS NAS VIGAS

Inicialmente, estavam previstas a realização de ensaios com 12 vigas, sendo 4 corpos de prova para cada tipo de armadura. No entanto, durante as tentativas iniciais de realizar os ensaios no IFS (Instituto Federal de Sergipe), surgiram dificuldades técnicas que impossibilitaram a execução adequada dos testes com os três primeiros corpos de prova. Devido à falta de equipamentos específicos e à impossibilidade de realizar os testes nas condições desejadas, a análise foi realizada com 9 vigas, que foram então ensaiadas nas instalações da UFS (Universidade Federal de Sergipe), onde os recursos necessários estavam disponíveis para a condução dos testes (Figura 14). Esse ajuste no número de vigas ensaiadas não comprometeu a validade dos resultados.



Figura 14. Ensaio de Flexão a três pontos

Fonte: Autor (2025)

Esta etapa consiste na realização dos ensaios de carregamento cíclico. As vigas foram submetidas a ciclos de carga e descarga controlados, o que proporcionou uma obtenção de resultados mais precisos acerca da deformação e deslocamento do elemento estrutural, permitindo observar a evolução do dano e o comportamento das barras de GFRP sob condições de serviço simuladas. O ensaio foi conduzido em 6 ciclos, com cargas chegando em 10 kN, 25 kN, 40 kN, 55 kN e 70 kN, sendo o último ciclo realizado até a ruptura das vigas. A esquematização do ensaio está apresentada na Figura 15.

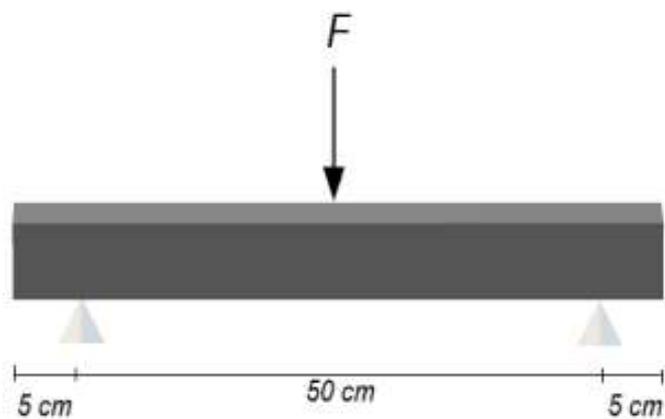


Figura 15. Esquematização do ensaio de flexão a três pontos

Fonte: Autor (2024)

Em seguida, após a realização dos ensaios a etapa foi dedicada à análise e ao processamento dos dados obtidos. Nessa fase, foram interpretados os resultados, além do uso de gráficos para a comparação de resultados com os de outros autores, tendo como objetivo validar as hipóteses do estudo e formular conclusões relevantes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1.1. Resistência à compressão do concreto

Os ensaios de compressão foram realizados nos 9 corpos de prova cilíndricos de concreto, possuindo 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, devidamente retificados antes da realização dos ensaios para garantir superfícies planas e paralelas, conforme a ABNT NBR 5739. Os corpos de prova foram divididos em três grupos. No Grupo 1 (CP 01, CP 02 e CP 03), a resistência média à compressão foi de 21,00 MPa, com valores variando entre 19,19 MPa e 22,17 MPa. No Grupo 2 (CP 04, CP 05 e CP 06), observou-se a menor resistência média, de 16,43 MPa, com valores entre 16,13 MPa e 16,92 MPa, indicando um desempenho inferior em relação aos demais. Já no Grupo 3 (CP 07, CP 08 e CP 09), obteve-se a maior resistência média, de 22,42 MPa, com valores variando entre 22,02 MPa e 23,07 MPa (Tabela 2). A diferença nos resultados entre os grupos pode estar associada a fatores como variações no traço do concreto, cura ou compactação, sendo essencial uma análise mais detalhada para identificar as causas dessas discrepâncias. No entanto, de modo geral, os valores obtidos demonstram que a resistência do concreto esteve dentro de um intervalo adequado para aplicações em estruturas de concreto armado, sendo que, segundo a NBR 6118:2014 – Projeto de Estruturas de Concreto, o f_{ck} mínimo para fins estruturais é de 20 MPa, exceto no caso do Grupo 2, que apresentou uma resistência ligeiramente inferior.

Tabela 2. Resultados do ensaio de compressão do concreto.

Grupo	Corpo de prova ensaiado	Resistência à compressão (Mpa)
Grupo 01	CP 01	21,64
Grupo 01	CP 02	19,19
Grupo 01	CP 03	22,17
Grupo 02	CP 04	16,23
Grupo 02	CP 05	16,92
Grupo 02	CP 06	16,13
Grupo 03	CP 07	22,02
Grupo 03	CP 08	23,07
Grupo 03	CP 09	22,18

Fonte: Autor (2025)

Devido à quantidade limitada de formas disponíveis para a moldagem das vigas, a concretagem foi realizada em três etapas distintas, com cada grupo de corpos de prova representando um dia diferente de concretagem. Essa divisão foi necessária para garantir a produção dos corpos de prova dentro das condições e limitações do processo. Cada grupo foi, portanto, submetido a variações possíveis nas condições de produção, como o controle do traço, a temperatura ambiente e os procedimentos de cura. Dessa forma, os resultados obtidos nos ensaios de compressão podem refletir diferenças no desempenho do concreto, resultantes das especificidades de cada etapa de concretagem, o que enfatiza a importância de um controle rigoroso durante todo o processo de fabricação dos corpos de prova.

4.1.2. Falha na tensão de ruptura

A análise da falha na tensão de ruptura das vigas armadas com GFRP foi realizada com base nos ensaios de carregamento cíclico, onde foram observadas as deformações progressivas até a ruptura final das vigas. Durante os ensaios, as vigas foram submetidas a ciclos de carga, com a tensão aumentando gradualmente até atingir o ponto de ruptura. A falha foi identificada quando as vigas não conseguiram

suportar a carga aplicada, resultando em fissurações significativas e, eventualmente, a ruptura total da estrutura, como mostra a Figura 16.



Figura 16. Ruptura do corpo de prova

Fonte: Autor (2025)

As Figuras 17 e 18 ilustram os corpos de prova antes e depois da falha, mostrando as áreas críticas de fissuração e a propagação do dano durante os ciclos de carga. Essas observações são cruciais para entender como as barras de GFRP se comportam sob tensões elevadas e como o material responde ao carregamento cíclico.



Figura 17. Corpo de prova antes da realização do ensaio
Fonte: Autor (2025)



Figura 18. Corpo de prova durante a realização do ensaio
Fonte: Autor (2025)

4.2. RESULTADOS DO ENSAIO CÍCLICO

O resultado dos ciclos de carregamento mostrou-se sobreposto, conforme ilustrado na Figura 19, o que dificultou a visualização e análise detalhada dos dados. Por essa razão, optou-se por utilizar apenas os três últimos ciclos anteriores à ruptura das vigas, visando uma melhor clareza na leitura dos resultados (Figura 20). Além disso, para os cálculos, o primeiro ciclo de cada corpo de prova foi individualizado para determinar o valor de E_0 , proporcionando um parâmetro inicial mais preciso para a análise do comportamento das vigas sob carga.

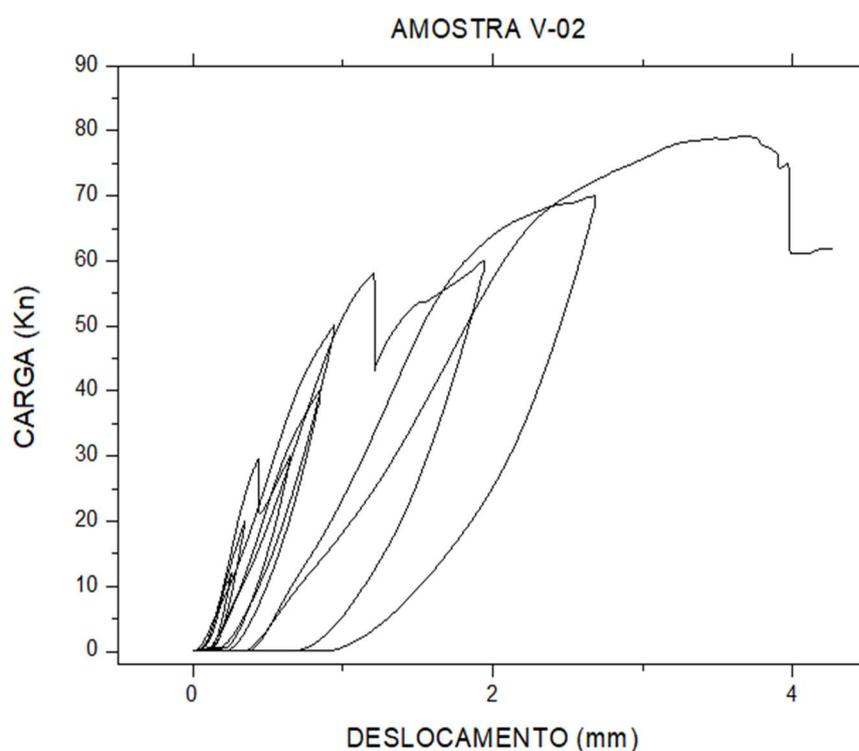


Figura 19. Gráfico completo do ensaio da Viga v-02

Fonte: Autor (2025)

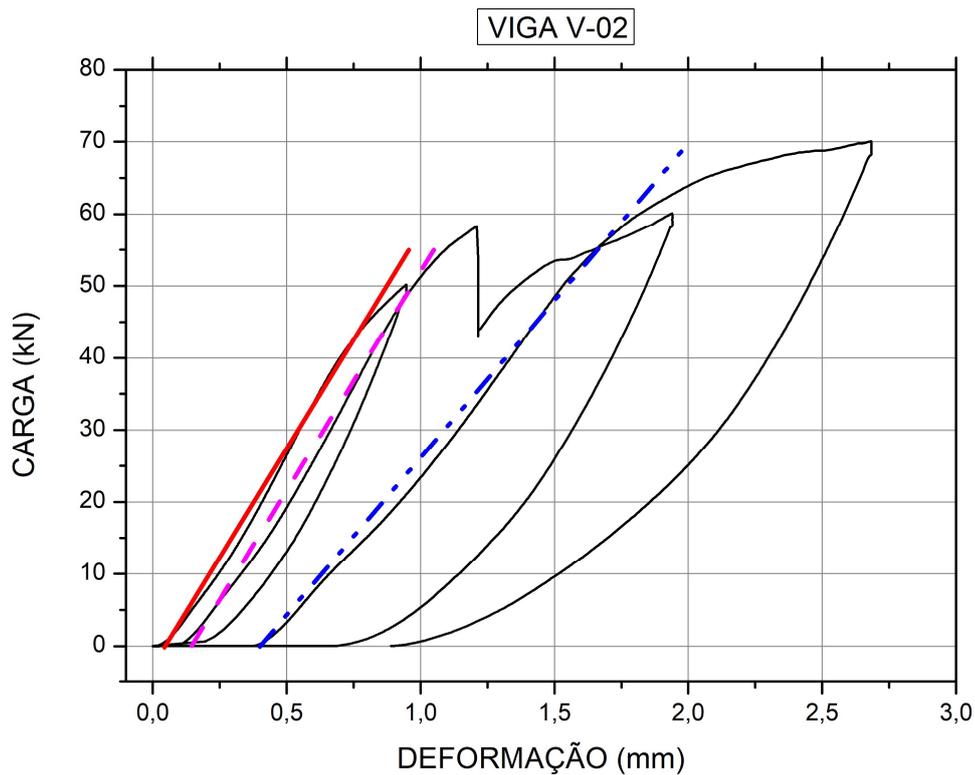


Figura 20. Gráfico com as retas de inclinação da Viga v-02

Fonte: Autor (2025)

A partir das informações apresentadas na Figura 19, é possível determinar o valor do dano nos ciclos por meio da Equação 1.

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

Além disso, 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 3.

Tabela 3. 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	0,081	0,082	0,101	0,041
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	0,046	0,062	0,043	0,052
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	0,06	0,079	0,042	0,024

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.

5. 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 440R, 1996, A.C.I. **State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures**. 1996.

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

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete**. ACI Committee 318. Detroit, 1995.

AALETI, S.; SRITHARAN, S. **A simplified analysis method for characterizing unbonded post-tensioned precast wall systems**. Engineering Structures, v. 31, p. 2966-2975, 1 dez. 2009. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.07.024.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.1R:2015: **Guide for the design and construction of concrete with FRP bars**. ACI Committee 440, 2015.

AMORIM, D. L. N. d. F. **On the lumped damage mechanics for nonlinear structural analyses: new developments and applications**. Tese (Doutorado) — São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O.; MASMOUDI, R. **Glass fiber reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures**. Construction and Building Materials, 1995.

CAN/CSA STANDARDS S806-12. **Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers**. 2012.

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.

COUTO, I. A. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CUNHA, D. R. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CURTIS, P. T. **The Fatigue Behavior of Fibrous Composite Materials**. *Journal of Strain Analysis*, v. 24, n. 4, p. 235-244. 1989.(DOI:<https://doi.org/10.1243/03093247V244235>).

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.

DUARTE, I. O. **Estudo do comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto com fibras sintéticas armadas com barras de polímero reforçado com fibra de vidro e basalto**. 2022. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

EL-MAADDAWY, T.; SHERIF, S. **FRP composites for restraining corrosion of steel in concrete structures**. *Composites Part B: Engineering*, v. 40, n. 7, p. 601–611, 2009.

FEBRES, R.; INGLESSIS, P.; FLÓREZ-LÓPEZ J. **Modeling of local buckling in tubular steel frames subjected to cyclic loading**. *Computers & Structures*, v. 81, 2003.

FLÓREZ-LÓPEZ, J.; MARANTE, M. E.; PICÓN, R. **Fracture and damage mechanics for structural engineering of frames: state-of-the-art industrial applications**. Hershey: IGN Global, 2015.

HOLLAWAY, L. C.; TENG, J. G. (Eds.). **Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites**. CRC Press, 2008.

MACHIDA, A. **State of the art report on the use of FRP for structures: proceedings of the Second International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2)**. Ghent: Japan Concrete Institute, 1993...

MEIER, U. **Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites**. *Construction and Building Materials*, v. 9, n. 6, p. 341–351, 1995.

NANNI, A.; DOLAN, C. W. (Ed.). **Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures**. American Concrete Institute, 1993. (P. 138).

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.

TEIXEIRA, B. A. C. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro: um estudo experimental**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SILVA, R. E. **Otimização de vigas de concreto armadas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) utilizando Algoritmos genéticos**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS