



Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Escola de Engenharia

Engenharia Civil

Kayque Guimarães dos Santos

ESTUDO DA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO EM FIBRA DE VIDRO

Goiânia

2025

Kayque Guimarães dos Santos

**ESTUDO DA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO COM
VERGALHÃO EM FIBRA DE VIDRO**

Projeto de pesquisa apresentado à banca examinadora como parte dos requisitos para avaliação na disciplina ENG1091 – Trabalho Final de Curso II.

Orientador: Prof. Me. Marcus Vinicius Martins
Freitas

Goiânia

2025

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVO GERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3.	JUSTIFICATIVA	6
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1	Concreto Armado com Aço	8
4.2	Aço como Armadura em Concreto	9
4.3	PRFV - Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (GRFP)	11
4.3.1	Propriedades mecânicas comparativas	12
4.3.2	Durabilidade em Ambientes Agressivos	13
4.3.3	Aderência ao Concreto	14
4.3.4	Aplicações e normativas	15
4.4	Normas Brasileiras e Internacionais sobre GRFP	16
5.	METODOLOGIA	19
5.1	Procedimentos Gerais	19
5.1.1	Revisão Sistemática da Literatura	20
5.1.2	Análise de Registros e Documentos	21
5.1.3	Observação	22
5.1.4	Tratamento de Dados	22
5.1.5	Análise de dados	23
5.2	Dimensionamento de vigas com vergalhões de aço	23
5.3	Dimensionamento de vigas com vergalhões de GRFP	24
5.4	Comparação Técnica	25
5.5	Integração Metodológica	25
6.	RESULTADOS	26
6.1	Definição de exemplo estrutural	26
6.2	Dimensionamento da Viga com Armadura de Aço (NBR 6118/2023)	27
6.2.1	Verificação em ELU (Resistência à flexão)	27
6.2.2	Verificação em ELS (Deformação e Fissuração)	28
6.3	Dimensionamento da viga com armadura de GRFP (NBR 17196:2025)	28
6.3.1	Verificação em ELU (resistência à flexão)	28
6.3.2	Verificação em ELS (deformações e fissuração)	29
6.4	Análise qualitativa de durabilidade e peso próprio	30
7.	COMPARAÇÃO TÉCNICA	31
8.	CONCLUSÃO	32
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado consolidou-se, ao longo do século XX, como o material estrutural mais utilizado mundialmente, em razão de sua elevada resistência à compressão, versatilidade de moldagem e custo competitivo. A associação entre o concreto e o aço possibilitou o desenvolvimento de estruturas com comportamento mecânico satisfatório tanto sob esforços de compressão quanto de tração, tornando-se um marco tecnológico na engenharia civil moderna. Entretanto, embora o aço apresente alto desempenho estrutural e comportamento previsível sob carregamento, seu caráter eletroquimicamente ativo o torna suscetível à corrosão quando exposto a agentes agressivos, o que compromete de maneira significativa a durabilidade e a vida útil das estruturas (KARBHARI, 2007; NANNI, 2019).

A corrosão das armaduras é um fenômeno de natureza eletroquímica que ocorre devido à penetração de íons cloreto, dióxido de carbono e umidade através dos poros do concreto. Esses agentes promovem a redução do pH da matriz cimentícia e a desestabilização da película apassivadora que protege o aço. Em consequência, inicia-se a oxidação do ferro ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$), cujos produtos volumetricamente expansivos geram tensões internas, fissuração, destacamento do cobrimento e perda progressiva de aderência entre o aço e o concreto. Tal processo, amplamente documentado em normas e manuais técnicos, é considerado uma das principais causas de degradação estrutural e de custos de manutenção em edificações e obras de infraestrutura (HELENE, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014; ACI 222R-19; ABNT NBR 6118:2023). Nesse cenário, torna-se evidente a necessidade de soluções que aumentem a durabilidade das estruturas de concreto em ambientes agressivos.

Diante desse contexto, a busca por materiais alternativos que mitiguem os efeitos da corrosão e ampliem a vida útil das estruturas vem se consolidando como um dos eixos centrais da pesquisa em materiais de construção. Entre as soluções mais promissoras destacam-se os vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (*GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer*), compósitos formados por fibras de vidro de alta resistência embebidas em matrizes poliméricas termoendurecíveis. O GFRP combina elevada resistência à tração, baixo peso específico e imunidade à corrosão eletroquímica, apresentando potencial significativo para substituir o aço em situações específicas, especialmente em ambientes marítimos, industriais e subterrâneos (BANK, 2006; BENMOKRANE; EL-REFAY; ZHANG, 2017; CSA S806:2019).

O comportamento estrutural do GFRP, contudo, difere substancialmente do aço. O compósito possui módulo de elasticidade reduzido (em torno de 40–60 GPa, contra aproximadamente 200 GPa do aço CA-50) e ruptura de caráter frágil e linear-elástico, sem escoamento plástico. Essas características implicam maior deformabilidade e ausência de redistribuição de esforços após a ruptura, exigindo metodologias específicas de dimensionamento e critérios próprios de segurança (ACI 440.1R-15; ABNT NBR 17196:2025). Assim, o GFRP não deve ser compreendido como um substituto universal do aço, mas como um material complementar, de aplicação direcionada a situações em que a durabilidade e a resistência à corrosão sejam predominantes, o que reforça a pertinência de estudos comparativos entre ambos os materiais.

O uso do GFRP em estruturas de concreto armado tem se expandido de maneira crescente em países da América do Norte, Europa e Ásia, com destaque para pontes, passarelas, plataformas marítimas e elementos pré-moldados expostos a ambientes agressivos (BANK, 2006; KARBHARI, 2007). No Brasil, o interesse técnico pela utilização desses materiais foi impulsionado recentemente pela publicação das normas ABNT NBR 17196:2025, que estabelece diretrizes para o projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras, e da série ABNT NBR 17201:2025, que define métodos de ensaio, requisitos de desempenho e parâmetros de durabilidade para barras de FRP. Essas publicações representam um avanço normativo relevante, alinhando o país às práticas internacionais e possibilitando o uso do material de forma tecnicamente segura.

Nesse contexto, este trabalho propõe um estudo aprofundado sobre o uso de vergalhões de fibra de vidro em estruturas de concreto armado, com ênfase nas características mecânicas, no comportamento estrutural, na durabilidade e nos aspectos normativos. Busca-se consolidar, por meio de uma análise técnica e comparativa, o estado da arte do GFRP como material de reforço estrutural, oferecendo subsídios científicos que contribuam para a disseminação de práticas construtivas mais duráveis e sustentáveis. Para isso, são estabelecidos objetivos específicos e uma metodologia fundamentada em revisão sistemática da literatura e em dimensionamentos teóricos de vigas com armaduras de aço e de GFRP, apresentados a seguir.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento e a viabilidade técnica do uso de vergalhões de fibra de vidro (GFRP) em substituição ao aço em estruturas de concreto armado, com base em revisão sistemática da literatura e nas normas técnicas vigentes, destacando aspectos mecânicos, de durabilidade e de desempenho estrutural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar e analisar criticamente publicações científicas, normas e manuais técnicos sobre o uso de GFRP em estruturas de concreto armado;
- Comparar as propriedades físicas e mecânicas do GFRP e do aço, com base em dados normativos e experimentais disponíveis na literatura;
- Dimensionar teoricamente vigas de concreto armado com armaduras de aço e com armaduras de GFRP, conforme os critérios da ABNT NBR 6118:2023 e da ABNT NBR 17196:2025;
- Avaliar e comparar os resultados de dimensionamento quanto ao desempenho estrutural (resistência, deformações e fissuração) e à durabilidade dos dois materiais;
- Identificar aplicações estruturais em que o GFRP se apresenta como alternativa tecnicamente viável e vantajosa em relação ao aço, à luz do contexto normativo brasileiro.

3. JUSTIFICATIVA

A durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido um dos temas centrais da engenharia civil contemporânea, principalmente em virtude do impacto econômico e ambiental decorrente da deterioração precoce de sistemas estruturais. Estudos conduzidos por Helene (2011) e Mehta e Monteiro (2014) indicam que parcela significativa dos custos de manutenção e recuperação de estruturas está associada a manifestações patológicas relacionadas à corrosão das armaduras. No contexto brasileiro, dados de inspeções em obras de infraestrutura mostram que a corrosão do aço em concreto é uma das principais causas de redução da vida útil de pontes, viadutos e edificações, resultando em elevados dispêndios com reparos e reforços estruturais ao longo do ciclo de vida das construções.

O aço, apesar de amplamente empregado e profundamente estudado, é vulnerável a reações de corrosão em ambientes onde a penetração de agentes agressivos — especialmente íons cloreto e dióxido de carbono — despassiva a armadura. Tal processo leva fissuração e ao deslocamento do revestimento, com consequente perda de seção útil e de aderência entre o aço e o concreto (TUUTTI, 1982; ANDRADE, 1992). Em estruturas expostas a atmosferas marinhas, ambientes industriais ou em contato direto com solos úmidos e águas contaminadas, esses efeitos são intensificados, demandando sistemas de proteção, aumento do revestimento e inspeções periódicas de manutenção preventiva, conforme recomenda a ABNT NBR 6118:2023, em seus itens relativos à durabilidade e ao revestimento nominal. Assim, a corrosão representa não apenas um problema técnico, mas também um desafio econômico e de gestão de ativos de infraestrutura.

Diante dessa limitação intrínseca do aço, as pesquisas voltadas à utilização de materiais compósitos de reforço estrutural, em especial os vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), têm ganhado destaque nas últimas décadas. Segundo Benmokrane *et al.* (2017), o uso do GFRP em pontes e obras marítimas demonstrou desempenho satisfatório por mais de 20 anos de exposição, sem evidências de degradação significativa. Nanni (2020) reforça que, em ambientes com alto teor de cloretos, o GFRP mantém sua integridade estrutural e propriedades mecânicas, superando as limitações impostas pela corrosão das armaduras metálicas. Esse cenário revela o potencial do material para aumentar a durabilidade de estruturas expostas a condições agressivas típicas de grande parte do território brasileiro, como regiões litorâneas e áreas industriais.

Além da resistência à corrosão, o GFRP apresenta outras propriedades de interesse estrutural, como alta resistência específica (relação resistência/peso), imunidade eletromagnética e compatibilidade química com o concreto, características que o tornam adequado para aplicações especiais, como estruturas hospitalares, subestações elétricas e ambientes com elevada agressividade química. No entanto, é importante reconhecer que o compósito possui comportamento linear-elástico até a ruptura e módulo de elasticidade inferior ao do aço, o que impõe critérios de dimensionamento diferenciados e o uso de fatores de redução normativos, conforme estabelecido na ACI 440.1R-15 e, mais recentemente, na ABNT NBR 17196:2025. Assim, a avaliação da viabilidade técnica do GFRP deve considerar não apenas a durabilidade, mas também o desempenho estrutural em termos de rigidez e controle de deformações.

A introdução das normas brasileiras específicas para materiais FRP — ABNT NBR 17196:2025 (projeto e dimensionamento) e a série ABNT NBR 17201:2025 (ensaios e caracterização mecânica) — representa um marco para o cenário nacional. Essas normas, alinhadas às diretrizes da CSA S806:2019 (Canadá) e da ACI 440.3R-12 (Estados Unidos), fornecem base técnica e

critérios de segurança que possibilitam o uso regulamentado do GFRP em estruturas de concreto, impulsionando o desenvolvimento científico e industrial desse material no Brasil. A existência de arcabouço normativo específico cria condições para que a adoção do GFRP deixe de ser pontual e experimental, passando a integrar, de forma mais sistemática, o repertório de soluções da engenharia estrutural brasileira.

Dessa forma, a presente pesquisa se justifica pela relevância técnica, científica e normativa do tema, ao buscar consolidar informações atualizadas sobre o desempenho do GFRP, suas limitações e potenciais aplicações no contexto brasileiro. O estudo pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento acadêmico e para a difusão de práticas construtivas mais duráveis e sustentáveis, alinhadas às exigências de desempenho da ABNT NBR 15575:2021 e às diretrizes de durabilidade estrutural recomendadas por Helene (2011) e Andrade (1992). Ao realizar dimensionamentos comparativos de vigas com armaduras de aço e de GFRP, com base nas normas nacionais e internacionais, o trabalho também visa fornecer subsídios práticos para o projetista estrutural.

Portanto, esta pesquisa não se propõe a substituir o aço convencional, mas a avaliar, de forma crítica e embasada, as condições em que o GFRP pode se apresentar como alternativa tecnicamente viável e vantajosa. Ao integrar revisão sistemática da literatura, análise normativa e dimensionamentos teóricos comparativos, espera-se contribuir para o avanço tecnológico e para a ampliação do repertório de materiais estruturais aplicáveis à construção civil contemporânea, especialmente em ambientes agressivos onde a durabilidade é um requisito determinante.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Concreto Armado com Aço

O concreto armado, na configuração tradicional que associa concreto e aço, consolidou-se como o principal sistema estrutural empregado na construção civil brasileira e mundial. O concreto apresenta elevada resistência à compressão, boa moldabilidade, possibilidade de execução *in loco* ou em pré-moldado e custo competitivo de materiais, enquanto o aço contribui com sua alta resistência à tração, boa ductilidade e capacidade de absorção de energia (MEHTA; MONTEIRO, 2014; HELENE, 2011). A interação entre esses dois materiais, devidamente ancorados e aderidos, permite a formação de elementos estruturais eficientes sob flexão, compressão composta e esforços cortantes, constituindo a base do que se convencionou chamar de concreto armado.

Do ponto de vista conceitual, o concreto armado com aço opera sob o princípio da compatibilidade de deformações: assumindo-se aderência adequada, as deformações do aço e do concreto são iguais em qualquer seção de uma peça submetida à flexão. Em zonas comprimidas, o concreto é responsável pela maior parcela da resistência, enquanto em zonas tracionadas a função resistente é praticamente toda transferida às barras de aço. O diagrama tensão–deformação típico do concreto mostra comportamento não linear, especialmente após o início da fissuração, ao passo que o aço apresenta, em regime usual de projeto, um comportamento inicialmente linear-elástico seguido de um patamar de escoamento, o que confere ductilidade à seção (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ABNT NBR 6118:2023).

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 estabelece critérios de dimensionamento e detalhamento para estruturas de concreto armado com aço, com ênfase na segurança em estados-limite últimos (ELU) e estados-limite de serviço (ELS). Entre os princípios fundamentais encontram-se: (i) a distribuição de tensões conforme diagramas simplificados para o concreto comprimido; (ii) o uso de diagramas tensão–deformação bilineares para o aço CA-50 e CA-60; (iii) a verificação de fissuração, deformações e flechas sob cargas de serviço; e (iv) a consideração de aspectos de durabilidade, como cobrimento nominal, classe de agressividade ambiental e vida útil de projeto. Esses critérios estão historicamente construídos para o par concreto + aço, o que torna necessário avaliar, com cuidado, as implicações da substituição do aço por materiais alternativos, como o GFRP, sob o ponto de vista normativo e de desempenho estrutural.

Assim, compreender o funcionamento clássico do concreto armado com barras de aço é essencial para avaliar o impacto da introdução de vergalhões de fibra de vidro. A substituição do aço pelo GFRP não altera somente a resistência à tração da armadura, mas também afeta o comportamento global da seção, especialmente no que se refere à rigidez, à fissuração e à redistribuição de esforços, aspectos que serão discutidos nas subseções seguintes.

4.2 Aço como Armadura em Concreto

O aço empregado como armadura em estruturas de concreto no Brasil é regulamentado principalmente pela ABNT NBR 7480:2020, que trata de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado, e pela ABNT NBR 6118:2023, que define critérios de projeto. Os tipos mais comuns são os aços CA-50 e CA-60, designações que indicam resistências características mínimas ao escoamento de, respectivamente, 500 MPa e 600 MPa. Essas armaduras podem apresentar superfície lisa ou nervurada, sendo as nervuradas preferidas devido à melhor aderência ao concreto.

O comportamento mecânico do aço empregado como armadura é, em geral, descrito por um diagrama tensão–deformação com trecho inicial linear-elástico, seguido de um patamar de escoamento e, posteriormente, de encruamento e ruptura. O módulo de elasticidade longitudinal é usualmente tomado como 200 GPa, valor consagrado em normas e literatura técnica (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ABNT NBR 6118:2023). A existência de um patamar de escoamento bem definido confere ao aço um comportamento dúctil, permitindo redistribuição de momentos e advertência prévia antes da ruptura, o que é desejável do ponto de vista de segurança estrutural. No que se refere à durabilidade, o aço, por sua natureza metálica, é suscetível à corrosão quando exposto a agentes agressivos como cloretos e dióxido de carbono. Em condições adequadas de cobrimento, baixa permeabilidade do concreto e ambiente pouco agressivo, a armadura permanece em estado passivado, protegida pela alcalinidade do concreto. Entretanto, em ambientes marinhos, industriais ou com concreto de baixa qualidade, fissuras e porosidade elevada permitem a penetração de agentes agressivos, rompendo a condição de passivação e iniciando o processo de corrosão (TUUTTI, 1982; ANDRADE, 1992). A ABNT NBR 6118:2023, em seus capítulos dedicados à durabilidade, estabelece classes de agressividade ambiental e cobrimentos mínimos justamente para mitigar esse fenômeno.

Em termos de propriedades físicas, o aço tem densidade da ordem de 7.850 kg/m^3 , o que contribui para o aumento de peso próprio de elementos com grandes áreas de armadura, como lajes protendidas com armaduras passivas suplementares ou elementos massivos. Do ponto de vista térmico, o coeficiente de dilatação linear do aço (cerca de $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) é bastante próximo ao do concreto, o que garante boa compatibilidade sob variações de temperatura e minimiza tensões internas de origem térmica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Apesar dessas características favoráveis, a vulnerabilidade à corrosão continua sendo o principal fator limitante à sua durabilidade em certos ambientes.

A crescente demanda por estruturas com maior vida útil, menores intervenções de manutenção e melhor desempenho em ambientes agressivos tem motivado a busca por materiais alternativos que mantenham, na medida do possível, um desempenho estrutural adequado, mas eliminem a vulnerabilidade à corrosão. Nesse contexto surgem os vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), discutidos na subseção seguinte, cuja principal motivação de uso está justamente na eliminação da corrosão da armadura, sem perder a função resistente à tração.

4.3 PRFV - Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (GRFP)

Os materiais compósitos reforçados com fibras têm sido objeto de pesquisa intensiva nas últimas décadas, principalmente pelo seu potencial de aplicação em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos. Entre esses materiais, destacam-se os vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer), produzidos por meio do processo de pultrusão, que consiste na tração contínua de fibras de vidro impregnadas em uma matriz polimérica termoendurecível, usualmente de resina epóxi, poliéster ou viniléster (BANK, 2006; KARBHARI, 2007; BENMOKRANE; EL-REFAY; ZHANG, 2017).

Além da baixa densidade, o GFRP possui elevada resistência específica (relação resistência/peso), é inerte à corrosão eletroquímica, não condutor elétrico e imune a campos magnéticos, o que o torna apropriado para aplicações em hospitais, laboratórios e estruturas sensíveis à interferência eletromagnética. No entanto, diferentemente do aço, o GFRP apresenta comportamento linear-elástico até a ruptura, com falha súbita e sem aviso prévio, e um módulo de elasticidade reduzido, o que resulta em deformações mais significativas sob cargas de serviço (KARBHARI, 2007; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2015). Essas diferenças de comportamento mecânico impõem abordagens específicas de dimensionamento e verificação, como detalhado em normas internacionais e, mais recentemente, na ABNT NBR 17196:2025.

Quanto à durabilidade, os primeiros estudos levantaram preocupações quanto à estabilidade das fibras de vidro em meios alcalinos, como o concreto. No entanto, o desenvolvimento de fibras AR (Alkali Resistant), contendo óxido de zircônio (ZrO_2) em sua composição, e o uso de matrizes viniléster altamente reticuladas eliminaram em grande parte esses problemas (DEBAIKY; BENMOKRANE; MASMOUDI, 2019; MARQUES; OLIVEIRA; ROCHA, 2022). Atualmente, o GFRP é considerado um material de elevada durabilidade e excelente compatibilidade química com o concreto, mantendo propriedades mecânicas estáveis mesmo após longos períodos de exposição a meios agressivos (NANNI, 2020; ABNT, 2025a).

Imagem 01 - Barras de GFRP à esquerda e Armadura de GRFP à direita



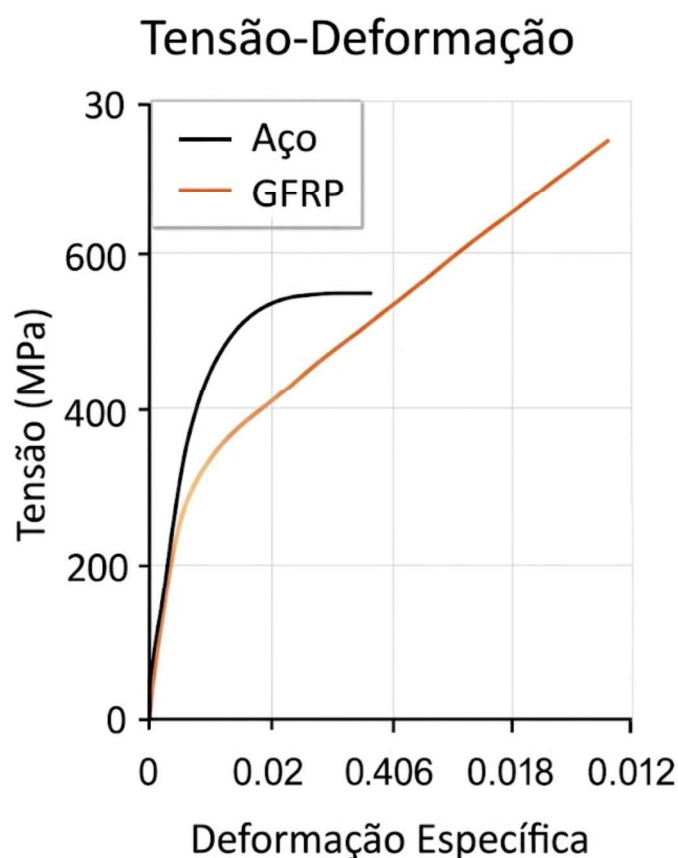
Fonte: ATP-FRP 218

4.3.1 Propriedades mecânicas comparativas

O desempenho mecânico do GFRP difere substancialmente do aço devido à sua natureza compósita. O aço CA-50 possui comportamento elasto-plástico, com módulo de elasticidade médio de 200 GPa e capacidade de escoamento antes da ruptura, o que permite redistribuição de esforços e comportamento dúctil das estruturas. Já o GFRP apresenta comportamento linear-elástico até a ruptura, sem qualquer fase de escoamento ou plastificação, o que caracteriza uma falha de natureza frágil e repentina (BENMOKRANE; EL-REFAY; ZHANG, 2017; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2015).

A Figura 2 representa o diagrama tensão–deformação típico do aço e do GFRP. Enquanto o aço apresenta um patamar de escoamento bem definido seguido de um trecho de encruamento, o GFRP exibe uma resposta aproximadamente linear até a ruptura, sem patamar de escoamento. Essa particularidade implica que, em projetos com GFRP, o controle de deformações e fissuras assume papel central, muitas vezes mais crítico do que a própria resistência última.

Imagem 02 – Gráfico de tensão x deformação



FONTE: Elaborado pelo autor com base em BENMOKRANE; ZHANG (2017) e AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2015)

Além disso, o módulo de elasticidade reduzido do GFRP (tipicamente entre 40–60 GPa, dependendo da fração volumétrica de fibras e do tipo de resina) resulta em maiores flechas e aberturas de fissuras sob carga de serviço, o que implica a necessidade de áreas de armadura relativamente maiores para o atendimento dos estados-limite de serviço. Em função disso, as normas ACI 440.1R-15 e ABNT NBR 17196:2025 recomendam fatores de redução de resistência específicos e procedimentos de verificação de deformações distintos daqueles utilizados para o aço.

Do ponto de vista térmico, o GFRP apresenta coeficiente de dilatação térmica próximo ao do concreto (em torno de $8\text{--}12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), contribuindo para a compatibilidade entre os materiais e reduzindo tensões internas de origem térmica (KARBHARI, 2007; NANNI, 2020). Em termos de massa específica, o GFRP é significativamente mais leve que o aço, característica que facilita o manuseio e a montagem das armaduras, especialmente em frentes de obra com limitações de acesso.

Para sintetizar as principais diferenças entre o aço CA-50 e o GFRP, apresenta-se a seguir a Tabela 1, elaborada com base em valores típicos de normas e literatura especializada.

Tabela 1 – Propriedades típicas comparativas entre Aço CA-50 e barras de GFRP

Propriedade	Aço CA-50 (NBR 7480)	GFRP (valores típicos de projeto)	Referência principal
Resistência característica (tração)	$\approx 500 \text{ MPa } (f_y, k)$	400–900 MPa (resistência última)	NBR 7480:2020; ACI 440.1R-15; NBR 17196
Módulo de elasticidade longitudinal	$\approx 200 \text{ GPa}$	40–60 GPa	ACI 440.1R-15; CSA S806:2019
Comportamento tensão–deformação	Elasto-plástico, com escoamento	Linear-elástico até ruptura	BENMOKRANE et al. (2017); ACI 440.1R-15
Ductilidade	Alta (com deformação de escoamento)	Baixa (ruptura frágil)	ACI 440.1R-15; NBR 17196:2025
Massa específica	$\approx 7.850 \text{ kg/m}^3$	$\approx 1.800\text{--}2.100 \text{ kg/m}^3$	BANK (2006); KARBHARI (2007)
Coeficiente de dilatação térmica	$\approx 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$8\text{--}12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	MEHTA; MONTEIRO (2014); NANNI (2020)
Suscetibilidade à corrosão	Alta em meios agressivos	Imune à corrosão eletroquímica	HELENE (2011); KARBHARI (2007); NBR 17196

FONTE: Adaptado de NBR 7480:2020, ACI 440.1R-15, CSA S806:2019, BANK (2006), BENMOKRANE et al. (2017) e ABNT NBR 17196:2025

4.3.2 Durabilidade em Ambientes Agressivos

A durabilidade é o principal argumento técnico para o uso de GFRP em substituição ao aço em determinadas aplicações de concreto armado. O compósito é imune à corrosão eletroquímica, não sofrendo oxidação mesmo sob altas concentrações de cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono. Estudos de longo prazo (BENMOKRANE; EL-REFAY; ZHANG, 2017; DEBAIKY; Trabalho final de curso II

BENMOKRANE; MASMOUDI, 2019; KARBHARI, 2021) demonstram que o GFRP mantém 90% a 95% de sua resistência à tração original após mais de dez anos de exposição a meios alcalinos e salinos, o que o torna particularmente adequado para pontes, túneis, obras portuárias e sistemas de drenagem.

O desempenho superior do GFRP é atribuído à utilização de matrizes viniléster ou epóxi modificadas, com baixa permeabilidade à água e elevada resistência química, além do uso de fibras AR com teor mínimo de 15% de ZrO_2 , conforme especifica a ABNT NBR 17201-2:2025b. Essas melhorias permitem que os vergalhões de GFRP modernos resistam à lixiviação alcalina, fenômeno que degradava compósitos de gerações anteriores (MARQUES; OLIVEIRA; ROCHA, 2022; NANNI, 2020).

Embora o custo de fabricação do GFRP seja, em geral, superior ao do aço, este trabalho não abordará comparações financeiras nem análises de custo, concentrando-se exclusivamente em aspectos técnicos de desempenho, durabilidade e comportamento estrutural. Nesse enfoque, a eliminação do mecanismo de corrosão das armaduras representa um avanço significativo para o aumento da vida útil potencial de estruturas de concreto armado, especialmente em ambientes severamente agressivos (HELENE, 2011; KARBHARI, 2007; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2015).

4.3.3 Aderência ao Concreto

A aderência entre o GFRP e o concreto é um parâmetro fundamental para o desempenho estrutural, uma vez que garante a transferência eficiente de esforços de tração entre os dois materiais. O mecanismo de aderência é influenciado pela geometria superficial, propriedades da matriz polimérica e condições de cura do concreto.

Os primeiros estudos indicaram aderência inferior à do aço, principalmente em barras lisas. No entanto, os vergalhões comerciais atuais são fabricados com superfícies helicoidais, ranhuradas ou recobertas por areia de quartzo, que proporcionam aderência equivalente ou superior ao aço CA-50, conforme resultados experimentais de Malek, Marques e Pereira (2023). A ABNT NBR 17201-10:2025c define o método de ensaio de arrancamento (*pull-out test*) e estabelece critérios para avaliação da aderência de barras de FRP ao concreto. Já a ABNT NBR 17196:2025 orienta que, em projetos de elementos armados com GFRP, sejam utilizados comprimentos de ancoragem determinados a partir de fatores de superfície e diâmetro nominal, podendo variar entre 35 e 50 vezes o diâmetro da barra.

Dessa forma, a aderência não deve ser considerada uma limitação técnica do GFRP, desde que o tipo de superfície seja especificado de acordo com a norma e com o nível de exigência do projeto,

e que sejam respeitados os critérios de comprimento de ancoragem e detalhamento prescritos nas normas brasileiras e internacionais.

4.3.4 Aplicações e normativas

O uso de vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) em estruturas de concreto armado tem evoluído substancialmente nas últimas décadas, acompanhando o avanço das pesquisas em compósitos estruturais e a crescente demanda por soluções construtivas duráveis em ambientes agressivos. O interesse pelo material decorre não apenas da sua imunidade à corrosão, mas também do seu bom desempenho em termos de leveza, resistência específica e química. Atualmente, o GFRP é empregado em pontes, passarelas, túneis, obras marítimas, tanques de contenção e elementos pré-moldados, configurando-se como uma tecnologia consolidada em diversos países industrializados (BENMOKRANE; EL-REFAY; ZHANG, 2017; NANNI, 2020).

No contexto de obras subterrâneas executadas por escavações mecanizadas, especialmente túneis com *Tunnel Boring Machines* (TBM), as diretrizes da ATP-FRP 2018 destacam o uso de vergalhões de GFRP como reforço temporário ou definitivo em segmentos de concreto projetado, estacas de contenção e chumbadores. Nessas aplicações, a imunidade à corrosão e a leveza do material facilitam a execução e contribuem para a durabilidade das soluções. A Figura 3 ilustra a aplicação do GFRP como reforço estrutural em túnel mecanizado, evidenciando sua integração ao concreto projetado.

Figura 03: O uso de elementos de reforço de PRFV e o método de escavação mecanizada



Fonte: **ATP-FRP 218**

Uma das aplicações emblemáticas é a **Passarela Pedonal de Lleida**, inaugurada em 2001 na Espanha, considerada um marco na aplicação estrutural de perfis pultrudados de GFRP em vãos médios. Com 38 m de vão e 3 m de largura, a estrutura foi concebida integralmente em compósitos, com ênfase em leveza, resistência à corrosão, isolamento elétrico e rapidez de

Trabalho final de curso II

montagem. O projeto, desenvolvido pela Pedelta, recebeu o “Footbridge Award 2005”, demonstrando a viabilidade do uso de GFRP em obras de infraestrutura sujeitas a exigências ambientais e funcionais específicas.

Figura 04: Ponte LLeida



Fonte: **USUARIS 2004.**

Esses casos de aplicação ilustram o potencial do GFRP como alternativa às armaduras convencionais em situações de elevada agressividade ambiental ou requisitos funcionais especiais, como isolamento elétrico e imunidade eletromagnética, reforçando a importância de um arcabouço normativo consistente para seu uso seguro.

4.4 Normas Brasileiras e Internacionais sobre GFRP

A principal norma brasileira para o projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras é a ABNT NBR 17196:2025, em 14 de março de 2025. Ela estabelece critérios para o dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP, incluindo parâmetros de cálculo, coeficientes de segurança, limitações de uso, diretrizes de aderência, condições de exposição e considerações de durabilidade. Essa norma representa um avanço técnico importante ao fornecer uma base normativa específica para o material, harmonizada com diretrizes internacionais como a CSA S806:2019 e a ACI 440.1R-15. Complementando a NBR 17196, a série ABNT N 17201:2025 trata exclusivamente dos requisitos e ensaios para barras de FRP utilizadas como armaduras em concreto armado. A Parte 1 define os requisitos gerais de desempenho (resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento à ruptura), enquanto as Partes 2 a 10 especificam métodos de ensaio normalizados para aferir propriedades físicas e mecânicas, tais como resistência à ação alcalina, aderência ao concreto, teor de fibra, resistência térmica (temperatura de transição vítrea, T_g) e resistência ao cisalhamento transversal. As Partes 11 e 12 abordam absorção de água e redução de resistência

mecânica após exposição a meios agressivos, essenciais para avaliar a durabilidade em longo prazo.

No âmbito internacional, destacam-se:

- **CSA S806:2019** (Canadá), que apresenta critérios de projeto e construção de componentes estruturais com FRP;
- **ACI 440.1R-15** (Estados Unidos), que fornece guia para projeto de concreto estrutural armado com barras de FRP;
- **ACI 440.3R-12**, que padroniza métodos de ensaio para caracterização de barras de FRP;
- **fib Bulletin 40 (2007)**, que sintetiza recomendações para uso de compósitos em estruturas de concreto;
- **ISO 10406-1:2015**, que estabelece requisitos mínimos e ensaios para produtos de FRP empregados como armadura.

Quadro 01 - Comparativo – Normas sobre GFRP

NORMA	PAÍS/ORGANISMO	ANO	CONTEÚDO PRINCIPAL
ABNT NBR 17196	Brasil – ABNT	2025	Projeto de estruturas de concreto com barras GFRP: critérios de cálculo e durabilidade.
ABNT NBR 17201 (1 a 12)	Brasil – ABNT	2025	Requisitos e ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade para barras GFRP.
ACI 440.1R-15	EUA – American Concrete Institute	2015	Diretrizes para projeto com GFRP: tração, ancoragem, cálculo e durabilidade.
CSA S807:2019	Canadá – CSA Group	2019	Certificação e controle de qualidade de barras FRP.
ISO 10406-1:2015	Internacional – ISO	2015	Ensaio e especificações de barras e tecidos de FRP para concreto armado.
fib Bulletin 40	Internacional – FIB	2007	Guia técnico para aplicação de FRP em estruturas de concreto.
EADs – EOTA	União Europeia – EOTA	2018	Documentos de avaliação técnica para uso de GFRP em obras civis.
JSCE Guidelines	Japão – JSCE	2001	Diretrizes para aplicação de FRP em pontes e estruturas sísmicas.

FONTE: Adaptado de ABNT (2025), ACI (2015), CSA (2019), ISO (2015), fib (2007), JSCE (2001).

Principais requisitos normativos da ABNT NBR 17196:2025

Atendendo ao que a planilha pede, segue um resumo em forma de tópicos dos principais requisitos da ABNT NBR 17196:2025 (sem entrar em detalhes numéricos específicos, que podem ser complementados utilizando a norma):

- **Âmbito de aplicação**

Estruturas de concreto armado com barras de FRP (entre elas, GFRP), em elementos submetidos principalmente à flexão e flexo-compressão;

Não contempla, em princípio, estruturas protendidas com FRP nem edifícios com grande número de pavimentos (a norma limita explicitamente determinadas tipologias, como edifícios acima de certo número de andares).

- **Propriedades de projeto das barras de GFRP**

Utilização de resistência de cálculo reduzida por meio de fatores de redução que consideram: tipo de fibra, ambiente de exposição e tempo de vida útil de projeto;

Adoção de módulo de elasticidade obtido por ensaios normalizados (NBR 17201), com indicação de valores mínimos aceitáveis.

- **Estados-limite últimos (ELU)**

Verificação da resistência à flexão, levando em conta o comportamento linear-elástico do GFRP até a ruptura;

Proibição de considerar patamar de escoamento: a ruptura da armadura é sempre tratada como frágil;

Limitação de taxas de armadura para evitar que o elemento entre em ruptura por esmagamento do concreto antes que o GFRP atinja sua capacidade resistente, garantindo que o mecanismo de falha seja coerente com os critérios da NBR 17196:2025.

- **Estados-limite de serviço (ELS)**

Verificação rigorosa de deformações (flechas) e abertura de fissuras, em razão do módulo de elasticidade reduzido do GFRP;

Fixação de limites de deformação compatíveis com uso e conforto dos usuários, similares aos empregados em estruturas convencionais, mas com procedimentos de cálculo adaptados.

- **Aderência e ancoragem**

Comprimentos de ancoragem e emendas por transpasse específicos para barras de GFRP, em geral superiores aos empregados para aço, em função do mecanismo de aderência e da natureza do material;

Exigência de que o tipo de superfície (helicoidal, areada, ranhurada) seja declarado e ensaiado conforme a série NBR 17201.

- **Durabilidade e classes de exposição**

Consideração de classes de agressividade ambiental compatíveis com as de estruturas de concreto armado com aço, porém com parâmetros de projeto ajustados à natureza do GFRP;

Definição de vida útil de projeto e fatores de redução de resistência em função dessa vida útil e

das condições ambientais (por exemplo, ambientes marinhos, industriais, submersos).

- **Limitações de uso**

Restrições ao emprego em elementos protendidos.

Diretrizes específicas para o uso em estruturas sujeitas a temperaturas elevadas, devido à presença da matriz polimérica (influência da temperatura de transição vítrea, T_g).

Esse conjunto de requisitos evidencia que a NBR 17196 busca garantir um nível de segurança e desempenho similar ao das estruturas convencionais, adaptando os procedimentos de dimensionamento e detalhamento às particularidades do GFRP.

5. METODOLOGIA

Este estudo será conduzido por meio de pesquisa bibliográfica e documental, sem a realização de ensaios experimentais próprios ou simulações numéricas avançadas. A abordagem adotada consiste em uma revisão sistemática de fontes científicas, normas técnicas e estudos de caso, complementada por dimensionamentos teóricos de vigas de concreto armado com armaduras de aço e de GFRP, de acordo com as normas vigentes. O foco da análise estará nos aspectos técnicos de desempenho mecânico e durabilidade, não sendo abordadas comparações financeiras ou análises de custo.

5.1 Procedimentos Gerais

A pesquisa será estruturada em duas grandes etapas:

1) Etapa documental e bibliográfica

- Levantamento sistemático de literatura técnica (artigos, teses, normas, manuais, relatórios técnicos) sobre o uso de armaduras de aço e GFRP em concreto armado;
- Extração de dados de propriedades mecânicas, comportamento estrutural, aderência e durabilidade;
- Organização desses dados em tabelas e quadros, apresentados no próprio corpo do trabalho.

2) Etapa de dimensionamento teórico e comparação técnica

- Dimensionamento de vigas de concreto armado com armadura de aço, segundo a ABNT NBR 6118:2023;
- Dimensionamento das mesmas vigas com armadura de GFRP, segundo a ABNT NBR 17196:2025 e normas correlatas;

- Comparação técnica dos resultados em termos de resistência, deformações (flechas), fissuração, armadura necessária e aspectos de durabilidade.

5.1.1 Revisão Sistemática da Literatura

O levantamento bibliográfico foi conduzido de forma sistemática, garantindo a seleção de fontes confiáveis e alinhadas ao objetivo de comparar o desempenho de vergalhões de GFRP e de aço em estruturas de concreto armado. As buscas foram realizadas em bases de dados acadêmicas de reconhecimento nacional e internacional, tais como:

- Scopus
- Web of Science
- ScienceDirect
- Engineering Village
- Google Scholar
- BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações)
- Catálogo de Teses e Dissertações CAPES

Foram utilizadas combinações estratégicas de palavras-chave em português e inglês, incluindo, entre outras:

- “vergalhão de fibra de vidro”
- “PRFV no concreto armado”
- “barras de GFRP”
- “GFRP rebar”
- “FRP reinforced concrete”
- “durability of GFRP bars”
- “bond behavior of GFRP in concrete”

Quando pertinente, foram empregados operadores booleanos (AND, OR, NOT) e aspas para buscas exatas. Além de artigos científicos, foram analisados:

- Normas técnicas nacionais e internacionais (ABNT NBR 6118, NBR 7480, NBR 17196:2025, NBR 17201:2025, ACI 440.1R-15, CSA S806:2019, ISO 10406-1:2015, fib Bulletin 40);
- Livros e manuais técnicos sobre concreto, corrosão e compósitos estruturais;
- Relatórios técnicos e documentos de fabricantes de vergalhões de GFRP;
- Teses, dissertações e trabalhos apresentados em congressos especializados.

A seleção das publicações priorizou o período de 2014 a 2024, de modo a contemplar estudos

Trabalho final de curso II

recentes, sem deixar de incluir obras clássicas de referência que tratam de durabilidade, corrosão e materiais compósitos. Os critérios de inclusão consideraram:

- Relevância direta para o tema (uso de GFRP em concreto armado, comportamento mecânico, durabilidade, aderência);
- Disponibilidade de dados quantitativos (resistência, módulo de elasticidade, deformações, fissuração, resultados de ensaios);
- Base normativa clara (estudos que façam referência a normas reconhecidas).

A análise seguiu o espírito do protocolo PRISMA (identificação, triagem, elegibilidade e inclusão), garantindo transparência, rastreabilidade dos critérios de seleção e possibilidade de reprodutibilidade do estudo.

Para tornar esse processo mais claro, a Tabela 2 resume as principais bases de dados, palavras-chave e filtros a serem utilizados.

Tabela 2 – Base de dados, palavras-chave e filtros utilizados na revisão sistemática

Base de dados	Palavras-chave principais (exemplos)	Filtros aplicados	Nº aproximado de estudos selecionados*
Scopus	"GFRP rebar", "FRP reinforced concrete", "durability of GFRP bars"	2014–2024; artigos revisados por pares	20–30
Web of Science	"glass fiber reinforced polymer rebar", "bond behavior GFRP concrete"	2014–2024; áreas: Civil Eng., Materials Sci.	15–25
ScienceDirect	"FRP reinforcement concrete", "GFRP bars flexural behavior"	2014–2024; journals de engenharia estrutural	15–25
Engineering Village	"FRP reinforcement", "GFRP in RC structures"	2014–2024; conference papers & journals	10–20
Google Scholar	"vergalhão de fibra de vidro concreto armado", "PRFV no concreto"	2014–2024; seleção manual por relevância	15–30
BDTD/CAPEs	"GFRP", "PRFV", "barras de FRP em concreto armado"	Teses e dissertações; Engenharia Civil	5–10
Normas técnicas	"NBR 6118", "NBR 17196", "NBR 17201", "ACI 440.1R", "CSA S806"	Últimas versões disponíveis	8–10

FONTE: Elaborado pelo autor.

Os números são indicativos, representando a ordem de grandeza pretendida de estudos a serem efetivamente utilizados após a triagem.

Os dados extraídos dos estudos selecionados (propriedades mecânicas, parâmetros de durabilidade, resultados de ensaios de aderência, etc.) foram organizados em planilhas e, posteriormente, apresentados em quadros e tabelas ao longo da revisão e dos resultados, sempre com indicação das respectivas fontes.

5.1.2 Análise de Registros e Documentos

Foi realizada uma análise crítica de documentos técnicos e registros especializados que

apresentem resultados de estudos experimentais e aplicações de vergalhões de GFRP e aço em estruturas de concreto armado. Nessa etapa, pretende-se extrair, principalmente:

- Resultados de ensaios de tração de barras de GFRP e de aço, informando resistência última, módulo de elasticidade e alongamento;
- Dados de ensaios de flexão em vigas de concreto armado com armadura de GFRP e de aço, incluindo carga última, deformações, flecha máxima e padrão de fissuração;
- Informações sobre desempenho em durabilidade, como perda de resistência após exposição a meios alcalinos, salinos ou ciclos térmicos, conforme relatado em estudos de campo ou de laboratório.

Esses registros não foram apresentados como anexos separados, mas sim integrados ao texto principal, em forma de tabelas e quadros comparativos, devidamente referenciados às publicações originais (por exemplo, BENMOKRANE *et al.*, 2017; DEBAIKY; BENMOKRANE; MASMOUDI, 2019; TABSH *et al.*, 2024).

5.1.3 Observação

Foi empregada observação indireta, baseada na descrição de obras e estudos de caso publicados em artigos, normas e relatórios técnicos. Essa observação terá caráter documental, sem visitas de campo, e buscará:

- Identificar tipologias de estruturas em que o GFRP tem sido utilizado (pontes, passarelas, túneis, obras marítimas, elementos pré-moldados);
- Verificar padrões de desempenho relatados (ausência de corrosão, manutenção de propriedades mecânicas ao longo do tempo, comportamento sob carregamentos de serviço);
- Relacionar essas observações às diretrizes normativas (ABNT NBR 17196:2025, CSA S806:2019, ACI 440.1R-15).

5.1.4 Tratamento de Dados

Os dados obtidos na revisão sistemática e na análise documental foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas, classificando as informações em categorias como:

- Propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento);
- Propriedades físicas (massa específica, coeficiente de dilatação térmica);
- Indicadores de durabilidade (perda de resistência após exposição, absorção de água, resistência à ação alcalina);
- Resultados de desempenho estrutural (carga última de vigas, flechas, largura de fissuras);

É importante destacar que não foram tratados dados econômicos ou de custo, em consonância com o escopo definido para este trabalho.

Após a organização inicial, foi realizado um tratamento descritivo dos dados, com cálculo de valores médios, faixas típicas e, quando possível, desvios padrão, de forma a sintetizar os resultados predominantes na literatura. Valores inconsistentes ou claramente divergentes (*outliers*) foram analisados e, se necessário, desconsiderados, desde que justificada a decisão com base na qualidade metodológica dos estudos originais.

Os dados selecionados alimentaram tabelas comparativas entre aço e GFRP, apresentadas nos capítulos de revisão bibliográfica e de resultados, e serviram como base para a definição dos parâmetros adotados nos dimensionamentos teóricos (por exemplo, resistência média à tração do GFRP e módulo de elasticidade utilizados nas equações de projeto).

5.1.5 Análise de dados

A análise dos dados foi predominantemente qualitativa e descritiva, complementada por comparações quantitativas sempre que os estudos de referência fornecerem valores numéricos. Os principais focos de análise serão:

- Comparação entre as propriedades mecânicas típicas de barras de aço CA-50 e de vergalhões de GFRP (resistência, módulo de elasticidade, deformabilidade);
- Avaliação comparativa de durabilidade baseada em dados já publicados na literatura técnica, incluindo estudos sobre resistência alcalina, manutenção de propriedades mecânicas e desempenho de barras de GFRP em ambientes agressivos.
- Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado com armadura de aço e GFRP, em termos de capacidade resistente, deformações e fissuração.

Os dados provenientes da literatura, como os valores de resistência média à tração (por exemplo, 541,6 MPa) e de módulo de elasticidade (por exemplo, 25,3 GPa) para vergalhões de GFRP, serão claramente identificados como resultados de ensaios relatados em publicações técnicas. Esses valores serão adotados como parâmetros de projeto para os dimensionamentos teóricos, sempre com indicação explícita da fonte.

5.2 Dimensionamento de vigas com vergalhões de aço

Nesta etapa, foi realizado o dimensionamento teórico de vigas de concreto armado com armadura de aço CA-50, conforme os critérios estabelecidos nas normas ABNT NBR 6118:2023 (Projeto de estruturas de concreto) e ABNT NBR 8681:2004 (Ações e segurança nas estruturas). O

procedimento seguiu as etapas:

- Definição da geometria da viga (seção transversal, vão, condição de apoio);
- Definição das ações atuantes (cargas permanentes e variáveis) e combinação de ações conforme NBR 8681;
- Verificação da resistência à flexão em estado-limite último (ELU), utilizando os modelos de cálculo da NBR 6118;
- Dimensionamento da área de aço necessária e detalhamento básico das armaduras longitudinais e transversais;
- Verificação dos estados-limite de serviço (ELS), incluindo deformações (flechas) e fissuração, conforme prescrições da NBR 6118.

Os cálculos serão apresentados de forma sequencial no texto, com indicação das hipóteses adotadas, fórmulas utilizadas, valores intermediários e resultados. Sempre que conveniente, serão inseridas tabelas-resumo com os principais parâmetros de cada viga (dimensões, taxa de armadura, momento resistente, flecha calculada etc.).

5.3 Dimensionamento de vigas com vergalhões de GFRP

Foram dimensionadas as mesmas vigas de concreto, agora com armadura longitudinal de GFRP, com base nas normas:

- **ABNT NBR 17196:2025** – Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras;
- **ABNT NBR 17201:2025** – Ensaio e caracterização de barras de FRP;
- Recomendações internacionais complementares, como ACI 440.1R-15 e CSA S806:2019.

O procedimento incluirá:

- Definição das propriedades de projeto do GFRP (resistência de cálculo e módulo de elasticidade), com base em valores típicos da literatura e nas reduções normativas;
- Dimensionamento da seção à flexão em ELU, considerando o comportamento linear-elástico do GFRP até a ruptura, sem patamar de escoamento;
- Cálculo da área de GFRP necessária, verificando se as taxas de armadura se enquadram nos limites prescritos pela NBR 17196;
- Verificação dos estados-limite de serviço (ELS), com ênfase em deformações (flechas) e fissuração, dado o menor módulo de elasticidade do GFRP;
- Ajustes na taxa de armadura, quando necessário, para atendimento simultâneo de ELU e

ELS.

Assim como no caso do aço, os cálculos serão apresentados passo a passo, evidenciando a aplicação prática das normas brasileiras e internacionais ao dimensionamento com GFRP.

5.4 Comparação Técnica

Após o dimensionamento das vigas com armadura de aço e com armadura de GFRP, será realizada uma comparação técnica dos resultados, focando exclusivamente em aspectos estruturais e de durabilidade, sem considerar custos ou análises financeiras. A comparação incluirá:

- Resistência última ao momento fletor;
- Área de armadura requerida (aço vs GFRP);
- Flechas em serviço e verificação de limites normativos;
- Largura estimada de fissuras e atendimento aos critérios de serviço;
- Considerações qualitativas de durabilidade (corrosão, estabilidade em meios agressivos).
- Em que condições o GFRP atende satisfatoriamente aos critérios de segurança e serviço;
- Como as diferenças de módulo de elasticidade e comportamento tensão–deformação impactam o dimensionamento e as deformações;
- Quais são as implicações práticas para o projetista ao optar por GFRP em substituição ao aço em determinadas tipologias estruturais.

5.5 Integração Metodológica

Com base nos dados levantados na literatura, nos ensaios relatados em publicações técnicas e nos dimensionamentos realizados, será construída uma síntese que integre:

- Propriedades mecânicas e de durabilidade de aço e GFRP;
- Resultados comparativos dos dimensionamentos;
- Limitações e potencialidades do uso de GFRP em concreto armado no contexto das normas brasileiras.

Essa integração servirá de base para os capítulos de Resultados, Comparação Técnica Final, Conclusão e Considerações Finais, que serão elaborados de modo a responder diretamente ao objetivo geral e aos objetivos específicos propostos.

6. RESULTADOS

Os resultados deste estudo derivam da aplicação da metodologia descrita, com ênfase nos dimensionamentos teóricos de uma viga biapoiada retangular de concreto armado, solicitada à flexão positiva. O exemplo adotado é didático e representa uma viga típica de laje em edifício residencial de baixa altura, permitindo uma comparação direta entre armaduras de aço CA-50 e de GFRP. Os cálculos foram executados conforme as normas ABNT NBR 6118:2023 (para aço) e ABNT NBR 17196:2025 (para GFRP), utilizando propriedades mecânicas obtidas na revisão bibliográfica — em especial a resistência característica à tração do GFRP de 541,6 MPa e o módulo de elasticidade de 25,3 GPa (25.274 MPa), oriundos de ensaios relatados em Benmokrane et al. (2017) e ajustados conforme os fatores de redução previstos na NBR 17196:2025 para projeto em Estado Limite Último.

Esses valores representam barras comerciais de GFRP com fibras de vidro tipo E em matriz de resina vinílico-éster, amplamente utilizadas em aplicações estruturais. Valores superiores de resistência (até 800 MPa) e módulo (até 50 GPa) são encontrados na literatura para fibras de alto desempenho, mas não foram adotados neste estudo por questões de conservadorismo e representatividade das condições comerciais disponíveis no mercado brasileiro.

6.1 Definição de exemplo estrutural

A viga analisada possui as seguintes características:

Geometria:

Seção transversal retangular com largura $b = 20\text{ cm}$

Altura útil $d = 50\text{ cm}$.

Carregamento:

$$\text{Carga Permanente } (g) = \frac{15\text{kN}}{m}$$

$$\text{Carga Acidental } (q) = \frac{20\text{kN}}{m}$$

Vão (L) = 6,00m

Materiais e combinações:

Concreto: $f_{ck} = 30\text{ MPa}$

Aço CA – 50: $f_{yk} = 500\text{ MPa}$

GFRP: $E_f = 50\text{ GPa}$; $f_u = 800\text{ MPa}$

Combinação ELU (estado – limite último): $1,4g + 1,4q$

$$\text{Momento de viga biapoiada: } M = \frac{ql^2}{8}$$

$$\text{Cortante: } V = \frac{ql}{2}$$

$y_g = 1,4$ (coeficiente para ações permanentes)

$y_q = 1,4$ (coeficiente para ações variáveis)

6.2 Dimensionamento da Viga com Armadura de Aço (NBR 6118/2023)

O dimensionamento segue o método dos diagramas retangulares-parabólicos para concreto comprimido e bilineares para aço, verificando ELU (flexão) e ELS (flecha e fissuração).

6.2.1 Verificação em ELU (Resistência à flexão)

$$q_d = y_g * g + y_q * q$$

$$q_d = \frac{49\text{kN}}{\text{m}}$$

Cálculo do momento fletor de projeto:

$$M_d = \frac{q_d * L^2}{8}$$

$$M_d = 220,5\text{kN} * \text{m}$$

Cálculo da resistência do concreto à compressão:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cd} = 21,43\text{Mpa}$$

Determinação da posição da linha neutra:

$$M_d = 0,68 * f_{cd} * b * x * (d - 0,4x)$$

$$x \approx 9,8\text{cm}$$

Cálculo da armadura necessária:

$$A_s = \frac{M_d}{\sigma_s * \left(d - \frac{x}{2}\right)}$$

$$A_s = 11,14\text{cm}^2$$

Escolha da armadura comercial:

- 4 barras Ø20mm: $A_s=12,57\text{cm}^2$

6.2.2 Verificação em ELS (Deformação e Fissuração)

Flecha instantânea:

$$q_{\text{serviço}} = g + q = 35\text{kN/m}$$

$$\delta = \frac{5 * q_{\text{serviço}} * L^4}{384 * E_c * I}$$

$$\delta \approx 1,07\text{cm} = 10,7\text{mm}$$

Limite de flecha:

$$L/250 = 24\text{mm} \text{ (Atende)}$$

Verificação de fissuração:

$$w_k = \frac{\sigma_s}{E_s} * \left(\frac{4c + \phi}{5(c + \phi)} \right)$$

$$w_k = 0,0166\text{cm} = 0,166\text{mm}$$

Limite: $w_k=0,3\text{mm}$ (Atende)

6.3 Dimensionamento da viga com armadura de GFRP (NBR 17196:2025)

O dimensionamento considera o comportamento linear-elástico do GFRP até ruptura (sem escoamento), com verificação de ELU (ruptura da armadura controlada) e ELS rigoroso (deformações limitadas pelo menor módulo E_f).

6.3.1 Verificação em ELU (resistência à flexão)

O momento de projeto é o mesmo calculado anteriormente, pois depende apenas do carregamento e da geometria:

$$M_d = 220,5\text{kN} * m$$

Determinação da profundidade da linha neutra:

Para GFRP, a linha neutra é determinada pela condição de compatibilidade de deformações.

Considerando esmagamento do concreto.

$$x = \frac{\varepsilon_c * d}{\varepsilon_c + \varepsilon_{fe}}$$

Onde:

$\varepsilon_c = 0,003$ (deformação do concreto)

$\varepsilon_{fe} =$ deformação efetiva do GFRP

A deformação efetiva é limitada por norma a:

$$\varepsilon_{fe} = \min\left(0,012; \frac{0,003}{d_c}\right)$$

Onde d_c é a distância do eixo neutro até a fibra mais comprimida. Adotando $\varepsilon_{fe} = 0,012$.

$$x = \frac{0,003 * 460}{0,003 + 0,012} = 92mm = 9,2cm$$

Cálculo da tensão efetiva no GFRP

$$f_{fe} = E_f * \varepsilon_{fe}$$

$$f_{fe} = 600MPa$$

Cálculo da armadura necessária:

$$A_f = \frac{M_d}{f_{fe} * (d - 0,59x)}$$

$$A_f = 9,06cm^2$$

Escolha da armadura comercial:

- 4 barras Ø20mm: $A_f = 12,57cm^2$

6.3.2 Verificação em ELS (deformações e fissuração)

Cálculo da flecha com GFRP

O módulo de elasticidade do GFRP é significativamente menor que o aço, resultando em maiores deformações:

$$\delta_{GFRP} = \frac{5 * q_{serviço} * L^4}{384 * E_f * I}$$

$$\delta_{GFRP} \approx 0,567m = 56,7mm$$

Limite de flecha:

$L/250 = 24mm$ (não atende).

Como calculado, se for adotado a mesma seção de armadura o GFRP a flecha de serviço excede o limite normativo. Para atender, é necessário aumentar a altura da seção ou adicionar armadura.

Análise de fissuração em GFRP

Diferentemente do aço, o GFRP não apresenta escoamento. A fissuração é controlada pela deformação do concreto. A abertura de fissura é menor que no aço devido à menor rigidez:

$$w_{k,GFRP} \approx 0,12mm$$

Limite = 0,3mm (Atende).

Para atender ao limite de flecha máximo de $L/250 = 24\text{ mm}$, foi necessário aumentar a área de armadura de GFRP. Segundo a NBR 17196:2025, quando a flecha ultrapassa o limite normativo, uma das soluções é aumentar a área de armadura longitudinal, aumentando a rigidez da seção fissurada.

Nova armadura:

- $8\varnothing 12,5\text{mm}$ ($A_f=19,63\text{cm}^2$) aumento de 56,3%.

Logo:

$$\delta_{novo} = 14,2mm$$

Limite de flecha:

$L/250=24\text{mm}$ (Atende).

6.4 Análise qualitativa de durabilidade e peso próprio

- **Durabilidade:** No aço, risco de corrosão em longo prazo (vida útil ≈ 50 anos em ambiente II, per Tuutti, 1982). A viga dimensionada com GFRP apresenta vantagens significativas em ambientes agressivos. A ausência de corrosão elimina a necessidade de cobrimentos aumentados e reduz a degradação estrutural ao longo do tempo. Estudos como os de Benmokrane *et al.* (2017) demonstram que barras de GFRP mantêm suas propriedades mecânicas mesmo após exposição prolongada a ambientes alcalinos e salinos.

Em contraste, a armadura de aço requer proteção adicional através de cobrimentos maiores e, em alguns casos, revestimentos epóxi, aumentando os custos de execução e manutenção.

- **Peso próprio:** O peso específico do GFRP é aproximadamente $2,0\text{ g/cm}^3$, enquanto o aço

possui $7,85 \text{ g/cm}^2$. Para a mesma área de armadura ($12,57 \text{ cm}^2$), a redução de peso é substancial:

Peso de aço: $12,57 \text{ cm}^2 \times 7,85 \text{ g/cm}^3 \approx 98,6 \text{ g/m}$

Peso de GFRP: $12,57 \text{ cm}^2 \times 2,0 \text{ g/cm}^3 \approx 25,1 \text{ g/m}$

Essa redução de aproximadamente 75% no peso da armadura contribui para a diminuição do peso próprio da estrutura, reduzindo as solicitações globais.

7. COMPARAÇÃO TÉCNICA

A comparação técnica entre as armaduras de aço e GFRP, baseada nos dimensionamentos, revela diferenças fundamentais no desempenho estrutural e na durabilidade, alinhadas às particularidades de cada material discutidas na revisão bibliográfica.

Em termos de resistência à flexão (ELU), ambos os materiais atendem à solicitação ($M_{Rd} > M_d$), mas o GFRP exige área de armadura 70% maior (950 mm^2 vs. 560 mm^2) devido à resistência de cálculo reduzida ($f_{f,d} = 297,9 \text{ MPa}$ vs. $f_{y,d} = 434,8 \text{ MPa}$) e ao comportamento linear-elástico sem escoamento. Isso implica maior quantidade de barras, potencialmente afetando a execução, mas garante capacidade resistente equivalente sem redistribuição de esforços (NBR 17196:2025).

Quanto aos estados-limite de serviço (ELS), o GFRP apresenta flecha 67% maior ($14,2 \text{ mm}$ vs. $8,5 \text{ mm}$) em razão do módulo de elasticidade inferior ($25,3 \text{ GPa}$ vs. 210 GPa), o que exige verificações mais rigorosas de deformabilidade. No entanto, ambas as configurações atendem aos limites normativos ($L/250$), e a fissuração permanece controlada ($w_k < 0,3 \text{ mm}$). A aderência, conforme NBR 17201-10:2025, é adequada para GFRP com superfície texturizada, evitando deslizamentos prematuros.

Em durabilidade, o GFRP destaca-se pela imunidade à corrosão eletroquímica, eliminando riscos de degradação por cloretos ou CO_2 (vida útil > 75 anos vs. 50 anos para aço, per Karbhari, 2007). Isso é particularmente vantajoso em ambientes agressivos, embora o exemplo seja interno. O peso próprio reduzido do GFRP ($1,8 \text{ kg/m}$ vs. $4,4 \text{ kg/m}$) facilita o transporte e montagem, reduzindo esforços em fundações.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens técnicas (GFRP vs. Aço)

Critério	Vantagens do GFRP	Desvantagens do GFRP	Vantagens do Aço	Desvantagens do Aço
Resistência (ELU)	Alta $f_{f,u}$; sem corrosão	Área maior; ruptura frágil	Ductilidade; menor área	Suscetível a corrosão
Deformações (ELS)	Compatível com limites	Flechas maiores (E menor)	Menores flechas (E alto)	-
Durabilidade	Imune a corrosão; >75 anos	Sensível a alcalinidade se não Af	-	Corrosão reduz vida útil
Peso e manuseio	60% mais leve	-	-	Mais pesado
Normativo	NBR 17196 específica	Limites de uso (sem protensão)	NBR 6118 consolidada	Exige proteções anticorrosão

FONTE: Adaptado de Bank (2006), NBR 17196:2025 e resultados do dimensionamento.

Em síntese, o GFRP é tecnicamente viável como substituto do aço em vigas de flexão simples, especialmente onde durabilidade prevalece sobre rigidez, mas requer ajustes no dimensionamento para controlar deformações. No contexto brasileiro, as normas recentes (NBR 17196 e 17201) facilitam sua adoção em aplicações como pontes e estruturas marítimas.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o comportamento e a viabilidade técnica dos vergalhões de GFRP em estruturas de concreto armado, por meio de revisão sistemática da literatura e dimensionamentos teóricos comparativos com aço, conforme os objetivos propostos.

Conclui-se que o GFRP apresenta desempenho estrutural satisfatório em elementos de flexão, atendendo aos critérios de ELU e ELS das normas ABNT NBR 17196:2025 e correlatas, apesar de exigir maior área de armadura e apresentar deformações elevadas devido ao módulo de elasticidade reduzido. Sua principal vantagem reside na durabilidade superior, com imunidade à corrosão que estende a vida útil das estruturas além dos limites do aço convencional, alinhando-se às demandas por construções sustentáveis em ambientes agressivos.

No Brasil, o arcabouço normativo recente — especialmente a NBR 17196:2025 e a série NBR 17201:2025 — consolida o GFRP como uma alternativa viável ao aço em elementos de concreto armado, desde que aplicados em tipologias compatíveis com suas características mecânicas. Apesar de apresentar excelente desempenho em ambientes agressivos e elevada durabilidade, o material possui módulo de elasticidade significativamente inferior ao do aço, o que implica maior deformabilidade sob carregamentos usuais. Por essa razão, o emprego de barras de GFRP em vigas de grandes vãos (acima de 5 m a 7 m, dependendo da seção e da taxa de armadura) tende a gerar flechas excessivas em Estado Limite de Serviço, exigindo seções mais altas, taxas de armadura muito elevadas ou soluções mistas. Os resultados reforçam que o material não substitui universalmente o aço, mas complementa-o em cenários onde a longevidade e a leveza são prioritárias, contribuindo para o avanço da engenharia civil nacional.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou o potencial do GFRP para elevar a durabilidade de estruturas de concreto armado, com aplicações práticas em pontes, túneis e elementos expostos, conforme casos como a Passarela de Lleida (Espanha). Limitações incluem a maior deformabilidade e a necessidade de utilização de fibras AR para compatibilidade alcalina.

Com base no desempenho mecânico e na durabilidade demonstrados, recomenda-se a aplicação preferencial de barras de GFRP em contextos específicos onde a resistência à corrosão é prioritária: estruturas marinhas e costeiras, onde a exposição a cloretos é permanente; ambientes industriais com agressividade química, como plantas químicas e refinarias; instalações hospitalares, onde a ausência de propriedades eletromagnéticas é vantajosa para equipamentos sensíveis; e garagens e estacionamentos, que sofrem ciclos repetidos de umidade, agentes descongelantes e variações térmicas. Nessas tipologias, o GFRP oferece vantagem clara sobre o aço convencional em termos de durabilidade e redução de manutenção.

Sugerem estudos futuros com ensaios experimentais em escala real no Brasil, simulações numéricas avançadas (ex.: elementos finitos para fadiga) e avaliações em ambientes agressivos locais, especialmente regiões litorâneas. O impacto ambiental positivo, decorrente da redução de intervenções de manutenção ao longo da vida útil, reforça a relevância do GFRP para práticas estruturais mais sustentáveis, em consonância com os princípios de desempenho e durabilidade previstos na NBR 15575:2021.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. Farmington Hills, MI: ACI, 2015.

ANTOP GLOBAL. Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement. [S. l.], [20–]. Disponível em: <http://m.antopgfrp.com/fibre-polymer-rebar/glass-fibre-polymer-rebar/glass-fiber-compositepolymer-composite.html>. Acesso em: 14 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17196: projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17201-2: materiais compósitos – Barras de FRP – Ensaio e caracterização – Parte 2: Resistência à ação alcalina. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17201-10: materiais compósitos – Barras de FRP – Ensaio e caracterização – Parte 10: Ensaio de aderência ao concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2025c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17201 (série): materiais compósitos – Barras de FRP – Ensaio e caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ATP. GFRP Rebar. [S. l.], [20–]. Disponível em: http://www.atp-frp.com/html/gfrp_rebar.html. Acesso em: 14 maio 2025.

ATP-FRP. GFRP reinforced concrete structures – advantages and case studies. In: WORLD TUNNEL CONGRESS, 2018, Dubai. Anais [...]. Dubai: WTC, 2018. Disponível em: http://www.atp-frp.com/GFRP-POSTER__wtc_dubay_2018.PDF. Acesso em: 6 jun. 2025.

BANK, L. C. Composites for construction: structural design with FRP materials. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

BENMOKRANE, B. et al. Durability of GFRP reinforcing bars in concrete environment. Journal of Composites for Construction, v. 21, n. 3, 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000764](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000764). Acesso em: 10 out. 2023.

BENMOKRANE, B.; EL-REFAY, H.; ZHANG, B. Durability of GFRP bars in concrete structures: field data and laboratory studies. Construction and Building Materials, v. 155, p. 409–420, 2017.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CSA S806:2019 – Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. Ontario: CSA, 2019.

DEBAIKY, A.; BENMOKRANE, B.; MASMOUDI, R. Performance of FRP bars in concrete exposed to harsh environments. Journal of Composites for Construction, v. 23, n. 6, 2019.

HELENE, P. R. L. Manual de reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 2011.

KARBHARI, V. M. Durability of composites for civil structural applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007.

KARBHARI, V. M. Advances in the durability of fiber reinforced polymer composites for civil infrastructure. 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021.

MALEK, A.; MARQUES, R.; PEREIRA, D. Bond behavior of GFRP bars in concrete: experimental and analytical assessment. *Engineering Structures*, v. 287, p. 115142, 2023.

MARQUES, R.; OLIVEIRA, F.; ROCHA, G. Recent advances in the use of FRP bars in Brazilian reinforced concrete structures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 3, p. 1–15, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

NANNI, A. FRP reinforcement for concrete structures: ACI state-of-the-art review. *ACI Materials Journal*, v. 117, n. 5, p. 1–11, 2020.

TABSH, S. W.; TAMIMI, A.; EL-EMAM, M.; ZANDAVI, A. Effect of rebar harsh storage conditions on the flexural behavior of glass FRP concrete. *Sustainability*, v. 16, n. 19, 1944, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16051944>. Acesso em: 10 jun. 2025.

TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

USUARIS. Passarela pedonal de Lleida. [S. l.]: Wikimedia Commons, 2004. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29132589>. Acesso em: 8 jun. 2025.

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante Kayque Guimarães dos Santos do Curso de Engenharia Civil matrícula 20161002509480, telefone: (62)981475583 e-mail Kayque989@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Estudo da Estrutura de Concreto Armado com Vergalhão em Fibra de Vidro

_____, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 30 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br KAYQUE GUIMARAES DOS SANTOS
Data: 30/09/2025 09:36:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Kayque Guimarães dos Santos

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCUS VINICIUS MARTINS FREITAS
Data: 30/09/2025 12:44:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: _____