

As novas normas brasileiras para estruturas de concreto com barras de FRP

DANIEL C. T. CARDOSO - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-8171-7956> (dctcardoso@puc-rio.br) – PUC Rio
NÁDIA C. DA SILVA FORTI - PROF.^a - <https://orcid.org/0000-0001-9994-5546> (nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br) – PUC Campinas

RESUMO

AS BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS (FRP) TÊM SE CONSOLIDADO COMO UMA ALTERNATIVA INOVADORA ÀS TRADICIONAIS ARMADURAS DE AÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, DESTACANDO-SE PELA ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA, LEVEZA, TRANSPARÊNCIA ELETROMAGNÉTICA E NOTÁVEL RESISTÊNCIA À CORROSÃO. SEU USO É ESPECIALMENTE VANTAJOSO EM AMBIENTES AGRESSIVOS, ONDE A DURABILIDADE E A BAIXA MANUTENÇÃO SÃO REQUISITOS ESSENCIAIS. O MERCADO GLOBAL DE FRP TEM CRESCIDO EXPRESSIVAMENTE, IMPULSIONADO POR AVANÇOS NORMATIVOS COMO AS DIRETRIZES ACI-440.11-22 E AS RECÉM-PUBLICADAS ABNT NBR 17201 E ABNT NBR 17196, QUE ESTABELECEM CRITÉRIOS PARA ESPECIFICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E PROJETO ESTRUTURAL. ESTE ARTIGO APRESENTA UM PANORAMA DAS PRINCIPAIS DISPOSIÇÕES NORMATIVAS BRASILEIRAS, ENFATIZANDO A IMPORTÂNCIA DA PESQUISA CONTÍNUA PARA APRIMORAR O USO DO MATERIAL EM ENGENHARIA ESTRUTURAL. AS NOVAS NORMAS BRASILEIRAS REPRESENTAM UM PASSO SIGNIFICATIVO PARA A REGULAMENTAÇÃO DO FRP NO PAÍS, VIABILIZANDO SUA APLICAÇÃO EM PROJETOS INOVADORES E SUSTENTÁVEIS.

PALAVRAS-CHAVE: BARRAS DE FRP, PROJETO ESTRUTURAL, ESPECIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

As barras de polímero reforçado com fibras (FRP, do inglês *fiber-reinforced polymer*) para uso como armadura em estruturas de concreto vêm ganhando cada vez mais a atenção de engenheiros civis ao redor do mundo, em razão de suas vantagens frente às barras de aço convencional, como elevada resistência mecânica, leveza traduzida em facilidade de transporte e

manuseio, transparência eletromagnética e resistência à corrosão. Essas características fazem com que o concreto armado com barras de FRP se apresente como uma excelente alternativa em obras de infraestrutura localizadas em ambientes agressivos e com expectativa de baixa manutenção. Estudos recentes também têm apontado o uso de barras de FRP em concretos produzidos com água do mar e areia de praia como uma estratégia sustentável para superar desafios associados à escassez de areia de rio e água doce no mundo (HU, ZHANG e ZHANG, 2022).

As barras de FRP são materiais compostos obtidos a partir da combinação de fibras contínuas e uma matriz de polímero termofixo, i.e., que não pode ser remoldado após o endurecimento. As principais fibras utilizadas no processo são as de vidro, basalto, carbono e aramida, com maior destaque para as fibras de vidro, que possuem menor custo. Enquanto isso, as principais matrizes são as obtidas a partir de resinas éster vinílicas ou epóxi. As barras são produzidas por um processo automatizado denominado pultrusão, no qual as fibras contínuas são puxadas para um recipiente contendo a resina, e são impregnadas antes de passarem por um molde aquecido, onde ocorre a cura. Na saída do molde, as barras também recebem tratamento superficial, que normalmente consiste no enrolamento de um fio helicoidalmente ao redor da barra ou no revestimento com areia. Destaca-se ainda que, no caso de barras dobradas, o processo de dobra é realizado antes da cura da resina, para evitar danos às barras.

Apesar das vantagens, as barras de FRP também possuem características que

necessitam de atenção, como menor módulo de elasticidade, natureza frágil, menor resistência em regiões de dobras, impossibilidade de realização de dobras em campo e maior vulnerabilidade ao fogo e a altas temperaturas. Nesse último caso, é importante destacar que a matriz polimérica passa a apresentar comportamento borrachoso após a temperatura, no material, ultrapassar a temperatura de transição vítrea (T_g) - normalmente da ordem de 100 °C - e se degrada quando exposta a temperaturas da ordem de 300 °C a 350 °C. Adicionalmente, as barras também podem sofrer degradação ao longo da sua vida útil (FENG *et al.*, 2022) com perda de propriedades mecânicas, como:

- i) fotodegradação quando expostas à ação de raios UV durante o armazenamento;
- ii) degradação associada à absorção de água (hidrólise, plastificação e inchamento); e
- iii) degradação das fibras de vidro quando em contato com meio alcalino, por ocasião da interação dos íons hidroxila com o vidro, com quebra de ligações Si-O-Si e formação de grupos silanol.

O uso de estruturas de concreto com barras de FRP no mundo vem se difundindo rapidamente. Após a Segunda Guerra Mundial, na década de 1940, o uso de compostos de polímero reforçado com fibras cresceu significativamente na indústria, especialmente no setor aeroespacial, devido à sua combinação de alta resistência e leveza. Na década de 1960, esses materiais começaram a ser utilizados como reforço para estruturas de concreto. Projetos notáveis como uma estrutura de cúpula em Benghazi (1968) e a estrutura de cobertura no aeroporto de Dubai (1972) foram

construídas com GFRP (polímero reforçado com fibras de vidro) durante esse período. Os fabricantes de fibra e FRP começaram a se concentrar na redução de custos no final da década de 1980 e início da década de 1990, à medida que o segmento militar de defesa declinava (BAKIS *et al.* 2002). A lista de obras feitas com o material hoje inclui construções, tais como: tubulações, tanques de armazenamento subterrâneos, fachadas de edifícios, componentes arquitetônicos, decks de pontes e estruturas de contenção à beira-mar (KHODADADI *et al.*, 2024). Destaca-se ainda que o mercado global de barras de FRP foi avaliado em US\$ 654,5 milhões em 2022 e deve atingir US\$ 1,8 bilhão até 2032, crescendo a uma taxa anual composta (CAGR) de 10,6 % de 2023 a 2032 (RESEARCH AM, 2024).

Para garantir o uso seguro do material, normas para projeto e construção vêm sendo desenvolvidas no mundo, suportadas por um grande volume de pesquisas realizadas em instituições de renome. Dentre as normas mais recentes destacam-se a ASTM D8505/D8505M-23 e a ISO 10406-1:2015 para especificação das barras e ensaios de caracterização, e a ACI-440.11-22 e o Anexo R do Eurocode 2, voltados para o projeto estrutural. A norma canadense CSA S806:12 (R2021), uma das mais completas e modernas, engloba recomendações para projeto e ensaio em um único documento.

No Brasil, as principais aplicações do concreto com barras de FRP estavam vol-

tadas para *soft-eyes* em paredes diafragma na construção de linhas metroviárias e pequenas estruturas em ambientes industriais. A partir de 2018, no entanto, o cenário começou a mudar, com a entrada no país de barras de FRP importadas e com a construção de fábricas dedicadas à produção nacional. Desde então, as aplicações estruturais têm sido as mais diversas, mas com destaque para o uso em lajes de piso apoiadas sobre o solo. Com relação ao desenvolvimento de documentação orientativa, a primeira iniciativa no país foi a publicação, em 2021, das Práticas Recomendadas para Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP), fruto do trabalho do comitê conjunto ABECE/IBRACON CT303 (Uso de Materiais Não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras).

A partir de 2022, um passo maior foi dado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a instalação da Comissão de Estudo CE-002:124.026 e da Comissão Especial de Estudo CEE 193, que seriam responsáveis pela elaboração das Normas Brasileiras voltadas para especificações e caracterização, e projeto estrutural, respectivamente. Após quase três anos, as normas ABNT NBR 17196 (Projeto de Estruturas de Concreto com Barras de FRP) e ABNT NBR 17201 (Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto -

Partes 1 a 12) foram finalmente publicadas no começo de 2025. O presente artigo tem como objetivo apresentar um resumo das principais disposições das normas, bem como lançar luz sobre as necessidades de estudo e pesquisa.

2. ESPECIFICAÇÃO DAS BARRAS DE FRP E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

2.1 Escopo

A ABNT NBR 17201 estabelece os requisitos para barras de polímero reforçado com fibras contínuas (FRP), utilizadas em armadura de estruturas de concreto armado. As fibras, que devem ser de vidro (GFRP) ou basalto (BFRP), são embebidas em polímeros termorrígidos. Nessa versão publicada, as fibras de aramida e de carbono não são contempladas.

Para a resina da matriz polimérica, são permitidos polímeros termofixos de epóxi ou vinil éster, assegurando que o produto acabado atenda aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 17201. Durante os encontros do CEE 193, foi avaliada a possibilidade de utilização da matriz poliéster. No entanto, normas e orientações internacionais (D7957/D7957M; AFGC, 2023) e estudos nacionais (SANTOS *et al.*, 2025) indicam que esse tipo de matriz sofre degradação em ambientes alcalinos, comprometendo a manutenção da resistência ao longo

TABELA 1

PROPRIEDADES REQUERIDAS E MÉTODOS DE ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

Propriedades	Valores característicos das propriedades para barras de GFRP e BFRP	Método de ensaio
Áreas efetivas da seção transversal (mm ²)	Tabela 1 da ABNT NBR 17201-1	ABNT NBR 17201-2
Resistência à tração ^a (MPa)	≥ 800	ABNT NBR 17201-3
Módulo de elasticidade (GPa)	≥ 45	ABNT NBR 17201-3
Deformação específica à tração (%)	≥ 1,1	ABNT NBR 17201-3
Resistência ao esforço cortante (MPa)	≥ 150	ABNT NBR 17201-4
Resistência de aderência d'a barra ao concreto ^a (MPa)	≥ 12	ABNT NBR 17201-6
Resistência à tração em regiões de dobra ^a (MPa)	≥ 60% da resistência à tração mínima requerida para a barra	ABNT NBR 17201-7
Temperatura de transição vítrea (°C)	≥ 100	ABNT NBR 17201-8
Grau de cura (%)	≥ 95	ABNT NBR 17201-9
Absorção de água por saturação (%)	≤ 1,0	ABNT NBR 17201-11
Resistências à tração e de aderência ao concreto após exposição ao meio alcalino (MPa)	≥ 80 % da resistência à tração inicial	ABNT NBR 17201-12

^a O VALOR CARACTERÍSTICO FORNECIDO PELO FABRICANTE DEVE SER MENOR OU IGUAL À MÉDIA MENOS TRÊS DESVIOS-PADRÃO DAS AMOSTRAS ENSAIADAS DE ACORDO COM O MÉTODO ESPECIFICADO.

TABELA 2

CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E REQUISITOS MÍNIMOS PARA DURABILIDADE

Classe de agressividade ambiental	Descrição do ambiente	Requisitos mínimos
CAA-FRP-I (Fraca)	Estruturas em ambiente urbano ou rural sem contato permanente com água.	Fator $a/c \leq 0,60$; Concreto de classe mínima C20; Cobrimento mínimo de 30 mm para vigas e de 20 mm para lajes.
CAA-FRP-II (Moderada)	Estruturas em contato permanente com água com teor baixo a moderado de sulfatos, em ambiente marinho ou em contato permanente com água do mar, ou em contato com solo com concentração baixa a moderada de sulfatos.	Fator $a/c \leq 0,50$; Concreto de classe mínima C30; Cobrimento mínimo de 40 mm para vigas e lajes.
CAA-FRP-III (Forte)	Estruturas em contato permanente com água com alto teor de sulfatos, em contato com solo contaminado com produtos químicos ou com alta concentração de sulfatos, ou em ambientes quimicamente agressivos como tanques industriais	Fator $a/c \leq 0,40$; Concreto de classe mínima C45; Cobrimento mínimo de 55 mm para vigas e lajes.

dos anos. Além disso, essas barras devem conter um reforço contínuo mínimo de 75 % em relação à massa total e apresentar acabamento superficial adequado. Quanto ao formato, podem ter seção transversal contínua ou ser dobradas, conforme a necessidade de estribos e ancoragens.

A ABNT NBR 17201 é composta por 12 partes, abrangendo verificações que incluem propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Essas diretrizes são fundamentais para assegurar a qualidade e o desempenho do material em diversas aplicações. As propriedades requeridas e métodos de ensaio para caracterização do produto estão listados na Tabela 1.

As Normas ABNT NBR 17201-5 - Determinação da resistência ao cisalhamento horizontal aparente pelo método de viga curta e ABNT NBR 17201-10 - Determinação do teor de fibra pelo método de combustão e do teor de aditivo mineral pelo método de ataque por ácido apresentam requisitos para propriedades requeridas e métodos de ensaio para controle do produto e declaração do fabricante.

As propriedades físicas, como o grau de cura e a temperatura de transição vítrea das matrizes poliméricas, desempenham um papel fundamental no desempenho das barras de FRP. A cura corresponde ao processo de endurecimento da resina da matriz polimérica, formando uma estrutura estável e resistente.

Um grau de cura adequado maximiza a resistência mecânica das barras e melhora a transferência de tensões entre as fibras de reforço. Além disso, a cura completa proporciona maior proteção contra agen-

tes químicos agressivos, como ambientes alcalinos, prevenindo a degradação ao longo do tempo. Resinas que não atingem o grau de cura ideal podem apresentar problemas como absorção excessiva de água, comprometendo sua durabilidade. A cura insuficiente pode resultar em microfissuras na resina, afetando a integridade estrutural do material. Já um processo de cura bem executado assegura estabilidade térmica e resistência à fluência, assegurando um desempenho adequado. Deficiências no grau de cura também podem reduzir a aderência das barras ao concreto, prejudicando a eficiência do reforço estrutural.

A temperatura de transição vítrea (T_g) é um parâmetro fundamental para as barras de FRP, pois define o limite térmico em que a matriz polimérica muda de um estado rígido e vítreo para um estado mais flexível e borrachoso. Esse fator impacta diretamente o desempenho estrutural e a durabilidade das barras. A temperatura de transição vítrea define os limites de uso seguro das barras de FRP, influenciando sua resistência mecânica, estabilidade térmica e vida útil.

3. PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM BARRAS DE FRP

3.1 Escopo

Considerando o horizonte limitado de trabalho e a necessidade de haver um documento consolidado com diretrizes e requisitos para um projeto seguro, o escopo da ABNT NBR 17196 foi limitado ao uso de barras de FRP de vidro ou basalto e polímero termofixo como armadura passiva em con-

cretos estruturais com ou sem fibras discretas até a classe C50, sozinhas ou em combinação com armaduras passivas metálicas para fins de ductilidade e comportamento em condições extremas. A norma não inclui previsões para casos em que a armadura de FRP esteja sujeita a temperaturas superiores a 80 °C, para estados-limites gerados por ações extremas como sismos, impactos, explosões e fogo, bem como para sistemas de lajes apoiadas diretamente sobre pilares ou de lajes nervuradas.

3.2 Diretrizes para Durabilidade das Estruturas

Visando à durabilidade das estruturas, a norma chama atenção para os cuidados necessários para evitar a degradação dos materiais constituintes. Para as barras de FRP, inclui a necessidade de comprovar a eficiência frente ao ataque alcalino, a manutenção das barras em condição abrigada de umidade e de ação UV durante o armazenamento e a necessidade de proteção térmica em ambientes com possibilidade de altas temperaturas. A norma também define classes de agressividade ambiental e requisitos em termos de classe mínima de resistência do concreto e cobrimento da armadura, conforme apresentado na Tabela 2.

3.3 Propriedades dos materiais e comportamento conjunto

Com relação às propriedades dos materiais consideradas em projeto, recomenda-se utilizar as normas ABNT NBR 6118 para obtenção das propriedades de

concreto e aço e a ABNT NBR 16935 para as propriedades do concreto com fibras. Para as barras de FRP, recomenda-se que, na ausência de ensaios, o comportamento seja assumido como linear elástico, com resistência à tração característica (f_{fk}) e módulo de elasticidade longitudinal (E_c) de 800 MPa e 45,8 GPa, respectivamente. Além disso, a resistência à compressão da barra é desprezada e, em regiões de dobras, a resistência característica (f_{fbk}) é reduzida conforme Equação 1 a seguir:

$$[1] \quad f_{fbk} = \left(\frac{0,05r_b}{\phi} + 0,3 \right) f_{fk}$$

Onde:

r_b é o raio interno de dobra e;
 ϕ é o diâmetro nominal da barra.

A ABNT NBR 17196 também apresenta disposições para uso conjunto dos materiais, como expressões para cálculo da resistência de aderência, f_{bd} , (Equação 2) e do comprimento de ancoragem necessário, $l_{b,nec}$ (Equação 3). Essas expressões sofreram adaptações com relação à forma daquelas constantes em normas internacionais, para maior semelhança com as diretrizes utilizadas para estruturas de concreto armado convencional. A norma também apresenta disposições com relação ao raio mínimo do raio de dobra ($\geq 3\phi$) e ao comprimento do trecho reto ($\geq 12\phi$) em regiões de ancoragem de barras dobradas e estribos, além de previsões para emenda de barras por traspasse ($\geq 1,3$ x comprimento de ancoragem básico, 300 mm ou 20ϕ) e para armadura transversal em regiões de ancoragem e emendas.

$$[2] \quad f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctd}$$

$$[3] \quad l_{b,nec} = \alpha l_b \frac{A_{f,calc}}{A_{f,ef}} \geq 12\phi \text{ ou } 200 \text{ mm}$$

Na Equação 2, f_{ctd} é a resistência à tração de cálculo do concreto e η_1 , η_2 , η_3 e η_4 são coeficientes que levam em consideração o tipo de revestimento ($\eta_1=1,5$ para revestimento de areia ou 1,3 para barras com fios enrolados), a posição da barra no concreto ($\eta_2=1,0$ para boa aderência ou 0,7 para má aderência), o diâmetro ($\eta_3=1,0$ para $\phi \leq 20$ mm ou 0,8 caso contrário) e o tipo de material ($\eta_4=1,0$ para barras com fibras de basalto e vidro). Já na Equação 3, $\alpha=1,0$ para barras sem gancho e 0,7 para barras com gancho, $A_{f,calc}/A_{f,ef}$ é a

razão entre as áreas de armadura de FRP necessária e a efetivamente adotada e l_b é o comprimento de ancoragem básico, dado conforme Equação 4, onde σ_{fd} é a resistência à tração de cálculo da barra, considerando ou não a presença de dobra, conforme a necessidade.

$$[4] \quad l_b = \frac{\phi \sigma_{fd}}{4 f_{bd}}$$

3.4 Estados-limites, ações e resistências

O projeto de estruturas de concreto com barras de FRP é baseado no método dos estados-limites, tal qual ocorre na ABNT NBR 6118 para estruturas de concreto convencionais. Em geral, as ações e as combinações a serem consideradas são aquelas que constam na ABNT NBR 8681. Entretanto, de forma a considerar a reduzida ductilidade do material e as consequências de uma possível ruptura frágil, recomenda-se que os coeficientes de ponderação das ações (coeficientes de majoração) no estado-limite último (ELU) sejam multiplicados por um coeficiente de ajustamento $\gamma_{n1}=1,1$.

Com relação às resistências de cálculo, por conveniência, foram mantidos os coeficientes de ponderação das ações (coeficientes redutores) para concreto e aço especificados na ABNT NBR 6118. Já, para o FRP, a resistência de cálculo pode ser obtida de forma genérica por meio da Equação 5, onde o coeficiente γ_{FRP} - adotado como 1,3 para combinações normais de ações - foi calibrado de modo que o índice de confiabilidade estrutural fosse superior a 3,5 e C_E é um coeficiente de redução ambiental tomado como 0,85.

$$[5] \quad f_d = C_E \frac{f_k}{\gamma_{FRP}}$$

3.5 Limites para dimensões, deslocamentos e aberturas de fissuras

Considerando a maior flexibilidade das estruturas de concreto com barras de FRP, as dimensões mínimas dos elementos são iguais ou superiores àquelas requeridas pela ABNT NBR 6118 para estruturas de concreto ar-

mado convencional: 15 cm para largura de vigas, 19 cm para pilares (sem possibilidade de dimensões inferiores) e 10 cm ou 12 cm para lajes, sendo o valor mais alto prescrito para lajes em balanço ou suportando veículos. A ABNT NBR 17196 requer ainda o uso de coeficiente ajustador para lajes em balanço, bem como limitações geométricas em regiões de furos. Por fim, os deslocamentos-limites seguem as disposições da ABNT NBR 6118 e as aberturas de fissura limites são estabelecidas de acordo com a classe de agressividade ambiental: 0,7 mm para CAA-FRP-I, 0,6 mm para CAA-FRP-II e 0,5 mm para CAA-FRP-III.

3.6 Análise estrutural, instabilidade e análise de 2ª ordem

Um dos grandes desafios na análise de estruturas de concreto com barras de FRP é a ausência de ductilidade, restringindo a possibilidade de análises plástica e linear com redistribuição. A análise linear sem redistribuição pode ser realizada considerando-se a seção bruta dos elementos estruturais, tal qual ocorre na ACI-440.11-22. No entanto, como a distribuição de esforços pode ser influenciada pela fissuração, a ABNT NBR 17196 oferece como alternativa a obtenção dos esforços a partir de análise utilizando a distribuição de rigidez fissurada dos elementos estruturais.

Embora reconheça as limitações associadas ao comportamento frágil do material, a ABNT NBR 17196 propõe uma abordagem interessante, conferir ductilidade às estruturas: i) por meio da incorporação de fibras discretas no concreto; ii) por meio da utilização de armadura que produza confinamento do concreto sob compressão; e iii) por meio da combinação com armaduras metálicas. Nos dois primeiros casos, a estratégia resulta em maior deformação do concreto sob compressão, incrementando ductilidade em elementos superarmados.

Na análise global de 2ª ordem das estruturas, a ABNT NBR 17196 propõe o uso do método do coeficiente γ_2 , também disponível na ABNT NBR 6118, e recomenda considerar os efeitos apenas quando eles superarem 10% dos efeitos de 1ª ordem. Reconhecendo a menor

rigidez dos elementos de concreto com barras de FRP, recomenda-se que as rigidezes de pilares e vigas/lajes sejam reduzidas a 0,40 e 0,15 de seus valores de rigidez não fissurada, respectivamente. Finalmente, os efeitos de 2ª ordem locais devem ser considerados para pilares com esbeltez superior a 35, sendo 50 a maior esbeltez tolerada. Os métodos geral e do pilar-padrão com rigidez aproximada podem ser utilizados para obtenção dos efeitos locais de 2ª ordem. Os efeitos da fluência devem ser considerados a partir de redução no momento de inércia equivalente.

3.7 Dimensionamento de vigas e pilares no estado-limite último (ELU)

Para elementos lineares sujeitos a solicitações normais de flexão composta, a verificação estrutural pode ser realizada com auxílio da construção de diagramas de interação obtidos a partir de análise seccional, considerando as hipóteses usuais de seções planas, compatibilidade de deformações e tensões obtidas a partir dos diagramas tensão-deformação dos materiais, bem como desprezando-se as contribuições do concreto tracionado e das barras de FRP comprimidas. Além disso, as simplificações associadas ao bloco retangular de tensões de compressão podem ser adotadas para o caso de seções transversais retangulares.

No caso de vigas sujeitas à flexão simples, o momento resistente de cálculo é determinado em função da taxa de armadura, $\rho_f = A_f/(bd)$, onde A_f é a área de armadura tracionada na seção transversal, d é a altura útil e b é a largura da viga, em comparação com a taxa balanceada, ρ_{fb} , que é aquela para a qual acontece a transição entre os modos de falha por ruptura da armadura e por esmagamento do concreto, dada pela Equação 6:

$$[6] \quad \rho_{fb} = \lambda \alpha_c \eta_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fd}}$$

Onde:

$\lambda = 0,8$ é o fator de profundidade do bloco retangular de compressão;

$\alpha_c \eta_c f_{cd}$ é a resistência à compressão adotada

para o concreto conforme ABNT NBR 6118; f_{fd} é a resistência à tração de cálculo do FRP, determinada conforme Equação 5; ϵ_{cu} é a deformação limite à compressão do concreto na flexão e; E é o momento resistente de cálculo computado como:

$$[7] \quad M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f (d - \lambda x / 2)$$

Onde:

x é a profundidade da linha neutra (Equação 8) e;

σ_{fd} é a tensão nominal a ser considerada na barra (Equação 9).

$$[8] \quad x = \begin{cases} \frac{f_{fd} A_f}{\lambda \alpha_c \eta_c f_{cd} b}, & \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \frac{1}{2b} \frac{\epsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c \eta_c f_{cd}} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c \eta_c f_{cd}}{\epsilon_{cu} A_f E_f} b d} \right), & \rho_f > \rho_{fb} \end{cases}$$

$$[9] \quad \sigma_{fd} = \begin{cases} f_{fd}, & \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \frac{b \lambda x \alpha_c \eta_c f_{cd}}{A_f}, & \rho_f > \rho_{fb} \end{cases}$$

Para o dimensionamento à força cortante, a verificação no ELU se dá para duas condições:

- esmagamento da diagonal comprimida; e
- ruptura das armaduras transversais tracionadas. Para o primeiro caso, a verificação é realizada de forma análoga ao concreto armado convencional, conforme ABNT NBR 6118.

No segundo caso, os modelos disponíveis na literatura e em normas internacionais são variados, como o modelo baseado na teoria do campo de compressão modificado da CSA S806:12 (R2021) e o modelo de treliça com contribuição adicional dos mecanismos complementares do concreto da ACI-440.11-22. A proposta da ABNT NBR 17196 segue este último e a verificação deve ser feita conforme Equação 10.

$$[10] \quad V_{sd} \leq V_c + V_f = 0,6 f_{ctd} b x_{II} + 0,9 d f_{fvd} \left(\frac{A_{ft}}{s} \right)$$

Onde:

V_{sd} é o cortante solicitante de cálculo;

V_c é a parcela de contribuição dos mecanismos do concreto;

V_f é a parcela de contribuição da armadura transversal;

x_{II} é a profundidade da linha neutra no estágio II;

A_{ft}/s é a área de armadura transversal por unidade de comprimento da viga e;

f_{fvd} é a resistência nominal do estribo, computada conforme Equação 5, mas limitada a 0,5 % E_f/γ_{FRP} .

Nota-se que a ABNT NBR 17196 considera diagonais a 45° e assume que as tensões nas barras da armadura interceptadas pela armadura sejam iguais. Além disso, para levar em consideração as consequências da maior flexibilidade da armadura, como maiores aberturas de fissura com redução de engrenamento dos agregados e menor contribuição de efeito de pino, a parcela de contribuição do concreto é inferior àquela adotada para concreto armado convencional.

A ABNT NBR 17196 também apresenta requisitos para dimensionamento à torção e para solicitações combinadas, bem como orienta para que as tensões na armadura no estágio II para combinação quase permanente de ações não superem $CEffk/3,0$, para evitar ruptura por fluência da armadura. Além disso, a ABNT NBR 17196 propõe armaduras longitudinais e transversais mínimas para os elementos estruturais.

3.8 Verificações no estado-limite de serviço (ELS)

As principais verificações em serviço apresentadas na ABNT NBR 17196 são referentes ao estado-limite de deformação excessiva e ao estado-limite de fissuração. Para o estado-limite de deformação excessiva, adota-se a formulação de Bischoff and Gross (2011) para cálculo do momento de inércia efetivo (Equação 11), que apresenta melhores resultados do que os obtidos pela expressão de Branson tradicionalmente adotada em concreto armado.

$$[11] \quad I_e = \frac{I_{II}}{1 - \gamma \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{II}}{I_c} \right)} \leq I_c$$

Onde:

M_a é o momento solicitante na seção crítica do trecho considerado;

I_c e I_{II} são os momentos de inércia da seção bruta e no estágio II, respectivamente;

$\gamma = 1,7 - 0,7(M_r/M_a)$ e;

$M_r = f_{ctk,inf} l_c / y_t$ é o momento de fissuração, com $f_{ctk,inf}$ e y_t seguindo as mesmas definições da ABNT NBR 6118.

Destaca-se que a expressão de M_r leva a um momento de fissuração menor do que aquele adotado para o concreto armado convencional, reproduzindo o fenômeno observado em ensaios. Finalmente, a flecha diferida é determinada seguindo-se os requisitos da ABNT NBR 6118, mas desprezando-se a contribuição de armaduras comprimidas de FRP.

Para o estado-limite de fissuração, a abertura de fissura característica pode ser obtida conforme Equação 12, onde: c_{nom} é o cobrimento nominal da armadura, f_{ctm} e E_{cs} são a resistência à tração média e o módulo de deformação secante do concreto, ρ_{ef} é a taxa de armadura efetiva, σ_f é a tensão de tração na armadura de FRP determinada no estágio II e τ_b é a tensão de aderência nominal, que pode ser tomada como $1,8 f_{bd}$. A ABNT NBR 17196 permite ainda considerar a contribuição das fibras no controle da fissuração por meio da substituição de f_{ctm} por $(f_{ctm} - f_{ctr})$, onde f_{ctr} corresponde à resistência residual à tração do concreto com fibras para uma abertura CMOD (*crack mouth opening displacement*) de 0,5 mm (ABNT NBR 16938).

[12]

$$w_k = \frac{2}{E_f} \left[1,5c_{nom} + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm} \phi}{\tau_b \rho_{ef}} \right] \left[\sigma_f - \frac{1}{2} \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left(1 + \frac{E_f}{E_{cs}} \rho_{ef} \right) \right] \geq 0$$

3.9 Outros tópicos

A ABNT NBR 17196 aborda ainda outros tópicos importantes para o projeto estrutural, de forma resumida destacados a seguir:

- ▶ Dimensionamento no ELU e verificações no ELS de lajes: seguem critérios para vigas, com exceção de aspectos como armadura secundária e critérios para dimensionamento quanto à força cortante sem armadura transversal, onde uma expressão semelhante àquela que consta na ABNT NBR 6118 é utilizada;
- ▶ Detalhamento de armaduras em vigas, pilares e lajes: requisitos como espaçamentos entre barras das armaduras longitudinal e transversal, estribos para prevenir flambagem de barras de FRP, disposição da armadura longitudinal para cobertura do diagrama de força de tração decalado em vigas, ancoragem nos apoios extremos e intermediários, armadura de pele e armaduras para suspensão em apoios indiretos e para ligações mesa-alma em vigas;
- ▶ Dimensionamento de elementos especiais: introduz diretrizes para uso do método das bielas e tirantes para projeto de estruturas de concreto com barras de FRP, incluindo reorientações de trajetórias permitidas, expressão para determinação da área de tirantes e dimensões das bielas para as verificações quanto ao esmagamento;
- ▶ Verificação aos estados-limites asso-

ciados a ações dinâmicas e cíclicas: diretrizes para verificações quanto à vibração excessiva, ressonância e fadiga.

4. CONCLUSÕES

Ao longo do presente artigo foram apresentadas algumas diretrizes e requisitos propostos nas recém-publicadas Normas ABNT NBR 17201 e ABNT NBR 17196, respectivamente voltadas para especificação/caracterização de barras de FRP e para o projeto de estruturas de concreto com armaduras de FRP. As duas normas foram desenvolvidas considerando-se o estado da arte e as disposições das principais normas internacionais, mas com adaptações para o contexto brasileiro. No entanto, há de se reconhecer que, embora modernas, há diversos aspectos que ainda podem ser melhorados e incorporados e que serão objeto de revisão futura, como o uso de telas e barras de transferência, o comportamento em situação de incêndio e o uso de armaduras ativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IBRACON, à ABECE e à ABNT por todo o apoio durante o desenvolvimento das ABNT NBR 17196 e ABNT NBR 17201, bem como às empresas e aos participantes das Comissões de Estudo, que se mantiveram ativamente engajados e forneceram contribuições valiosas para a construção das normas publicadas. Os autores agradecem ainda às agências de fomento nacionais e estaduais pelo apoio concedido. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hu X, Xiao J, Zhang K, Zhang Q. The state-of-the-art study on durability of FRP reinforced concrete with seawater and sea sand. *J Build Eng* 2022;51:104294. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104294>.
- [2] Feng G, Zhu D, Guo S, Rahman MZ, Jin Z, Shi C. A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions. *Cem Concr Compos* 2022;134:104758. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104758>.
- [3] Bakis CE, Bank LC, Brown VL, Cosenza E, Davalos JF, Lesko JJ, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction — State-of-the-Art Review. *J Compos Constr* 2002;6:73–87. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)).
- [4] Khodadadi N, Roghani H, Harati E, Mirdarsoltany M, De Caso F, Nanni A. Fiber-reinforced polymer (FRP) in concrete: A comprehensive survey. *Constr Build Mater* 2024;432:136634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136634>.
- [5] Research AM. Fiber Reinforced Polymer Composite Rebar (FRP Rebar) Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Fiber Type, by Resin Type, by Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast. 2024.
- [6] AFGC. Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures. 2023.
- [7] Santos LFO, da Silva Forti NC, Cardoso DCT, dos Santos NV, Pimentel LL, de Avila Jacintho AEPG. Hydrothermal aging of polyester-based GFRP bars in alkaline environment. *Mater Struct* 2025;58:106. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02629-6>.
- [8] Bischoff PH, Gross SP. Design Approach for Calculating Deflection of FRP-Reinforced Concrete. *J Compos Constr* 2011;15:490–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000195](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000195).