

Dimensionamento de vigas de concreto armado com barras de FRP segundo a **Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e ACI 440.1R (2015)**

AMANDA D. E. MAZZÚ – DOUT. – <https://orcid.org/0000-0001-9383-3260> (amandadescobal@hotmail.com);

GLÁUCIA M. DALFRÉ – PROF.^a. DRA. – <https://orcid.org/0000-0003-3623-5103> | **UFSCar**

EDNA POSSAN – PROF.^a. DRA. – <http://orcid.org/0000-0002-3022-7420> | **UNILA**

RESUMO

NOS ÚLTIMOS ANOS TEM CRESCIDO NO BRASIL O INTERESSE NA PESQUISA E UTILIZAÇÃO DE ARMADURA DE FRP (*FIBER REINFORCED POLYMER* – POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS) EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, TENDO EM VISTA SUAS VANTAGENS COM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À CORROSÃO APRESENTADA POR ESTE MATERIAL. RECENTEMENTE FOI PUBLICADA A PRIMEIRA RECOMENDAÇÃO NACIONAL PARA O USO DESTE MATERIAL COMO ARMADURA E ENCONTRAM-SE EM DESENVOLVIMENTO NORMAS ABNT PARA ORIENTAR O PROJETO DE ESTRUTURAS COM ARMADURA DE FRP E A CARACTERIZAÇÃO DESTE TIPO DE MATERIAL. ASSIM, ESTE TRABALHO TEM COMO OBJETIVO APRESENTAR A METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS À FLEXÃO COM ARMADURA DE GFRP (*GLASS FIBER REINFORCED POLYMER* – POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO) COM O USO DA PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021) E DA NORMA AMERICANA ACI 440.1R (2015), POSTERIORMENTE COMPARANDO OS RESULTADOS TEÓRICOS A RESULTADOS EXPERIMENTALMENTE OBTIDOS. FOI POSSÍVEL CONCLUIR QUE OS MODELOS UTILIZADOS PREVIRAM COM ACERTO O MODO DE RUÍNA OBTIDO EXPERIMENTALMENTE E PERMITIRAM O DIMENSIONAMENTO SEGURO DAS VIGAS ANALISADAS.

PALAVRAS-CHAVE: *FIBER REINFORCED POLYMERS*, CONCRETO, VIGAS, DIMENSIONAMENTO, NORMA.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas encontrados devido à corrosão das armaduras metálicas das estruturas de concreto armado impulsionaram o estudo e o uso das armaduras não metálicas de FRP (*Fiber Reinforced Polymers*)

– Polímeros Reforçados com Fibras) nas últimas décadas (MOOLAEI; SHARBATDAR; KHEYRODDIN, 2021).

O FRP é um material compósito obtido pela junção de dois materiais quimicamente distintos, sendo um material de reforço (fibras) envolvido por uma matriz polimérica (resina), visando à obtenção de propriedades físicas e mecânicas particularmente desejadas (PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE, 2021). Dalfré, Mazzú e Ferreira (2021) indicam que os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*), aramida (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*) e basalto (BFRP – *Basalt Fiber Reinforced Polymer*) são os mais comumente utilizados.

As diferenças nas propriedades mecânicas das barras de FRP em relação ao aço convencional implicam alterações no comportamento mecânico já bastante conhecido de estruturas de concreto com armadura de aço. Segundo Mazzú (2020), é necessário que os procedimentos de dimensionamento sejam adaptados às propriedades da armadura não metálica de FRP.

De acordo com o ACI 440.1R (2015), ao contrário das barras de aço convencional, as barras de FRP não apresentam escoamento, atingindo a resistência última com comportamento elástico linear e apresentando ruptura frágil. Assim, o escoamento das barras não pode ser levado em consideração para o dimensionamento de um elemento com armadu-

ra de FRP e, conforme Dalfré, Ferreira e Mazzú (2020), a melhor situação de dimensionamento passa a ser a ruína por esmagamento do concreto na fibra mais comprimida, uma vez que se obtém pequena ductilidade pelo desenvolvimento do comportamento plástico do concreto antes da ruptura.

Já existem há alguns anos normas para o dimensionamento de estruturas com barras de FRP nos Estados Unidos, Canadá, Japão, Europa e Rússia. No Brasil, recentemente foi lançada a primeira Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) para estruturas de concreto armado com barras de FRP e normas Brasileiras encontram-se em processo de desenvolvimento na ABNT com o objetivo de normalizar a caracterização e o projeto de estruturas com este material, propiciando a difusão e aplicação da técnica com segurança.

Na inexistência de norma técnica, a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) é o documento referência para o dimensionamento de vigas de concreto armado à flexão com barras de GFRP, cuja metodologia é apresentada neste artigo. Também são comparados resultados experimentais obtidos pelo ensaio de vigas em escala real, com armadura longitudinal positiva de GFRP, com os resultados teóricos estimados com base na metodologia apresentada neste trabalho e na metodologia de cálculo americana do ACI 440.1R (2015), que se encontra detalhada no trabalho de Dalfré, Ferreira e Mazzú (2020), publicado na edição 98 da CONCRETO & Construções.

2. PROCEDIMENTOS PARA O DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS SEGUNDO A PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021)

Segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), para elementos lineares submetidos à flexão, como no caso de vigas, o dimensionamento deve ser realizado considerando-se as seguintes hipóteses:

- as seções permanecem planas após a flexão;
- o diagrama retangular equivalente de tensões no concreto é dado de acordo com as disposições da ABNT NBR 6118 (2014);
- a resistência à tração do concreto é desprezada;
- as tensões na armadura de FRP são proporcionais às deformações, considerando-se comportamento elástico linear até a ruptura;
- aderência perfeita entre a armadura e o concreto.

A Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) adota o dimensionamento realizado com base nos Estados Limites Último (ELU) e de Serviço (ELS), de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR 6118 (2014). Desta forma, os valores característicos das resistências dos materiais devem ser minorados por fatores de redução para a obtenção dos valores de cálculo, tal como apresentado nas Equações 1 a 3.

$$[1] \quad f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$[2] \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

$$[3] \quad f_{fd} = C_E \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_m}$$

Onde:

f_{cd} = resistência à compressão de cálculo do concreto (MPa);

f_{yd} = resistência ao escoamento de cálculo do aço (MPa);

f_{fd} = resistência à tração de cálculo do FRP (MPa);

f_{ck} = resistência à compressão característica do concreto (MPa);

f_{yk} = resistência ao escoamento característica do aço (MPa);

f_{fk} = resistência à tração característica do FRP (MPa);

γ_c = fator de redução da resistência do concreto;

γ_s = fator de redução da resistência do aço;

γ_m = fator de redução da resistência do FRP e;

C_E = fator de redução ambiental do FRP.

Os valores dos fatores de redução da resistência do concreto e do aço podem ser obtidos a partir das recomendações da ABNT NBR 6118 (2014) e são tomados iguais a 1,4 e 1,15, respectivamente. Com relação aos fatores de redução da resistência do FRP e de redução ambiental, estes são apresentados pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) em função do tipo de combinação de ações e do tipo de FRP utilizado, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. As combinações de ações para ELU (Estado Limite Último) e ELS (Estado Limite de Serviço) devem ser consideradas de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).

Para garantir a segurança da estrutura, esta deve atender ao ELU no todo e para suas partes durante sua vida útil. Desta forma, a condição apresentada na Equação 4 deve ser atendida, ou seja, os esforços solicitantes de cálculo obtidos para as situações mais desfavoráveis que podem ocorrer ao longo da vida útil da estrutura (incluindo a fase construtiva) devem ser menores do que a resistência de cálculo.

$$[4] \quad S_d \leq R_d$$

Onde:

S_d = esforços solicitantes de cálculo e;

R_d = resistência de cálculo.

Segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), apesar de ser similar ao dimensionamento de estruturas de concreto com armadura de aço, o dimensionamento de estruturas com barras de FRP deve ser feito considerando-se o comportamento frágil deste material. Assim, dois possíveis modos de ruptura são considerados, sendo um baseado na ruína pelo esmagamento do concreto e outro baseado na ruína pela ruptura da barra. O modo de ruína que governa o comportamento do elemento depende da taxa de armadura longitudinal presente na seção e a taxa de armadura balanceada, a qual é definida como a taxa de armadura fictícia para a qual se observa a transição entre os modos de ruína

TABELA 1

FATOR DE REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA DE BARRAS DE FRP EM FUNÇÃO DO TIPO DE COMBINAÇÃO DE AÇÕES CONSIDERADO

Combinação	γ_m
ELU normal	1,30
ELU especial ou de construção	1,20
ELU excepcional	1,20
ELU fadiga	1,20
ELS	1,00

FONTE: PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021)

(Equações 5 e 6).

$$[5] \quad \rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}$$

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

Onde:

ρ_f = taxa de armadura;

ρ_{fb} = taxa de armadura balanceada;

A_f = área de armadura longitudinal de FRP (mm²);

b = largura da seção (mm);

d = altura útil (mm);

λ = parâmetro que determina a altura do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto comprimido;

α_c = parâmetro que determina a tensão equivalente no concreto comprimido;

E_f = módulo de elasticidade do FRP (GPa) e;

ϵ_{cu} = deformação última de compressão no concreto (%). Os valores de λ , α_c e ϵ_{cu} podem ser obtidos a partir das recomendações da ABNT NBR 6118 (2014), sendo $\lambda = 0,8$, $\alpha_c = 0,85$ e $\epsilon_{cu} = 3,5\%$ para concretos com f_{ck} menor ou igual a 50 MPa.

TABELA 2

FATOR DE REDUÇÃO AMBIENTAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE FRP E EXPOSIÇÃO AMBIENTAL

Condição de exposição	Material	CE
Interior e sem contato com o solo	AFRP	0,9
	CFRP	1,0
	GFRP/BFRP	0,8
Exterior ou em contato com o solo	AFRP	0,8
	CFRP	0,9
	GFRP/BFRP	0,7

FONTE: PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021)

2.1 Ruína governada pela ruptura da armadura longitudinal de FRP

Caso , o modo de ruína que governa o comportamento do elemento é a ruptura da armadura longitudinal de FRP tracionada e os diagramas de deformações e tensões podem ser obtidos tal como apresentado na Figura 1. Utilizando-se a compatibilidade de deformações e fazendo-se o equilíbrio da seção transversal, é possível calcular a profundidade da linha neutra pela Equação 7. O momento resistente da seção transversal pode ser calculado utilizando-se a Equação 8.

$$[7] \quad x = \frac{f_{fd} \cdot A_f}{\lambda \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b}$$

$$[8] \quad M_{Rd} = f_{fd} \cdot A_f \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

Onde:

x = profundidade da linha neutra (mm) e;
 M_{Rd} = momento resistente de cálculo da seção transversal (N·mm).

2.2 Ruína governada pelo esmagamento do concreto

Caso $\rho_f > \rho_{fb}$, o modo de ruína que governa o comportamento do elemento é o esmagamento do concreto comprimido. A Figura 2 apresenta os diagramas de deformações e tensões para este tipo de ruína, por meio dos quais pode ser obtida a profundidade da linha neutra, conforme a Equação 9, fazendo-se o equilíbrio da seção com o uso da compatibilidade de

deformações. Assim, o momento resistente pode ser calculado pela Equação 10, podendo-se calcular a tensão instalada na armadura de FRP por meio da Equação 11.

$$[9] \quad x = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \frac{\epsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f}{\lambda \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{\lambda \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\epsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f} \cdot b \cdot d} \right)$$

$$[10] \quad M_{Rd} = \sigma_{fd} \cdot A_f \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$$

$$[11] \quad \sigma_{fd} = \frac{x \cdot b \cdot \alpha_c \cdot \lambda \cdot f_{cd}}{A_f}$$

Onde:

σ_{fd} = tensão instalada na armadura de FRP (MPa).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Mazzú (2020) conduziu um estudo experimental que buscou avaliar o comportamento mecânico e a durabilidade de vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto. Para o presente trabalho, foram selecionados os resultados experimentais obtidos por Mazzú (2020) por meio da execução de ensaios de flexão em três pontos realizados em quatro vigas de concreto armado mantidas em ambiente laboratorial (LAB) por 45 dias (45d) após a concretagem. Assim, os resultados experimentais das quatro vigas selecionadas, sendo duas com armadura de aço (V1_LAB_S_45d, V2_LAB_S_45d) e duas com armadura de GFRP (V1_LAB_GFRP_45d e V2_LAB_GFRP_45d), são comparados aos resultados teóricos estimados com o uso da ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2019) para as vigas com armadura de aço e com o uso da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e ACI 440.1R (2015) para as vigas com armadura de GFRP. As metodologias de cálculo do ACI 318 (2019) e da ABNT NBR 6118 (2014) para as vigas com armadura de aço encontram-se detalhadas no trabalho de Dalfré, Mazzú e Ferreira (2021), publicado na edição 101 da CONCRETO & Construções.

Tais vigas ensaiadas por Mazzú (2020) apresentaram seção transversal de 12 x 20 cm, comprimento de 250 cm, vão livre entre apoios de 230 cm (biapoiadas), cobrimento de 15 mm, armadura longitudinal negativa composta por duas barras de aço CA-50, com diâmetro de 6,3 mm (porta estribos) e armadura transversal composta por estribos de aço CA-60, com diâmetro de 5 mm, espaçados a cada 10 cm. Como armadura longitudinal positiva, em duas vigas foram utilizadas duas barras de aço CA-50, com diâmetro de 10 mm, e em duas vigas foram utilizadas duas barras de GFRP, com diâmetro de 10 mm. A Figura 3 apresenta as seções transversais e o esquema de ensaio das vigas.

As propriedades mecânicas do concreto, do aço e do GFRP utilizados foram obtidas por meio de ensaios realizados em laboratório por Mazzú (2020). Assim, foi obtida resistência à compressão do concreto de 32,79 MPa, resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do

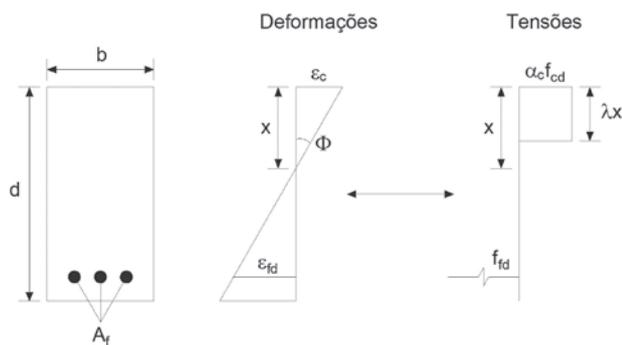


FIGURA 1

DIAGRAMAS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL PARA O CASO DE RUÍNA PELA RUPÇÃO DA ARMADURA DE FRP

FONTE: ADAPTADO DE PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021)

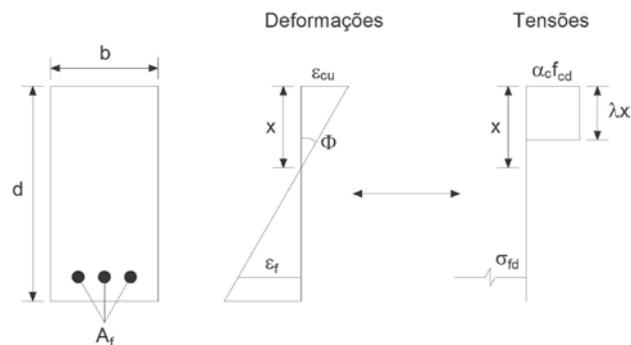


FIGURA 2

DIAGRAMAS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL PARA O CASO DE RUÍNA PELO ESMAGAMENTO DO CONCRETO

FONTE: ADAPTADO DE PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021)

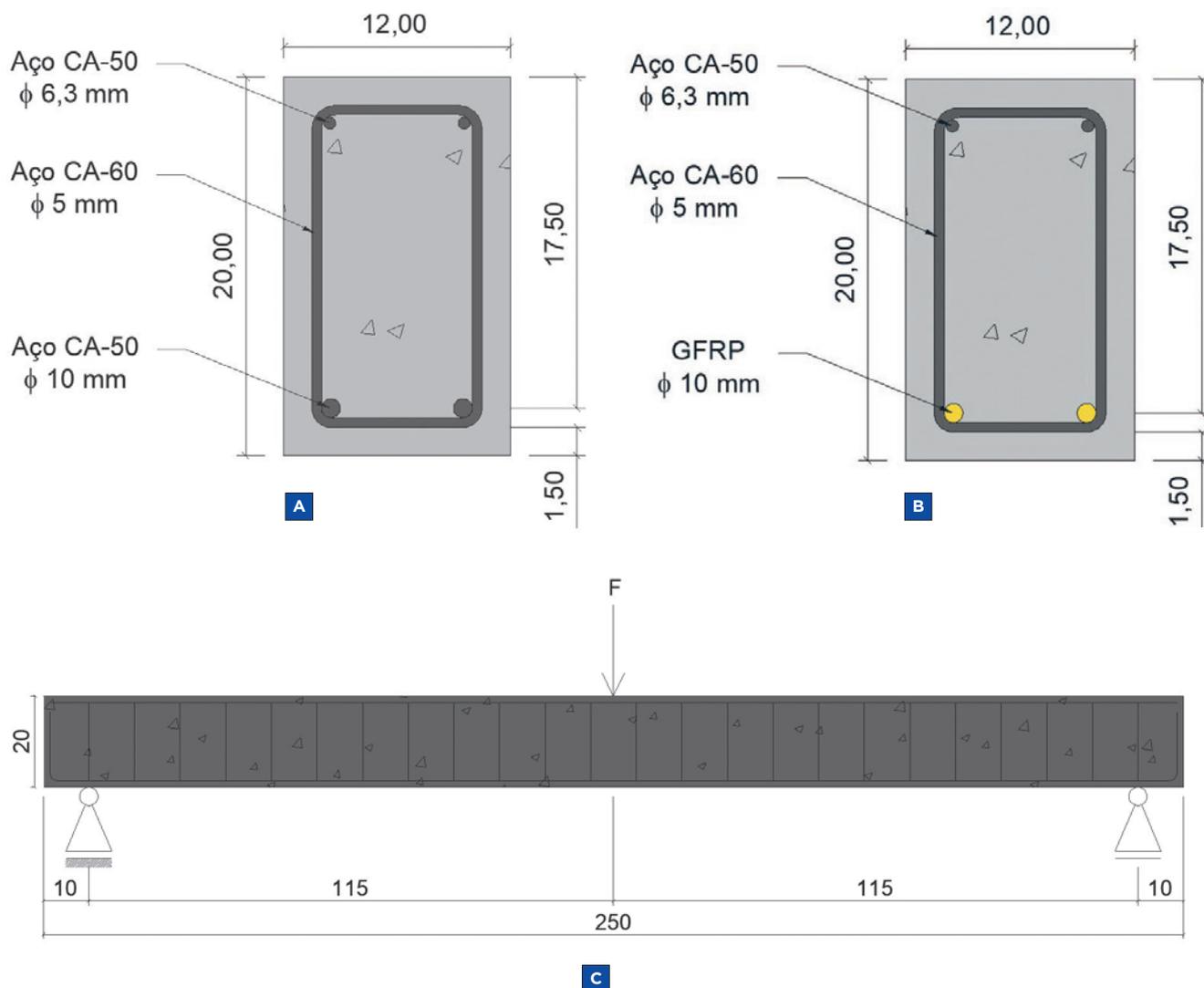


FIGURA 3

SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE AÇO (A) E DE GFRP (B) E ESQUEMA LONGITUDINAL DAS VIGAS (C) – MEDIDAS EM CENTÍMETROS

FONTE: MAZZU (2020)

aço (diâmetro de 10 mm) de 565,35 MPa e 194,33 GPa, respectivamente, e resistência à tração e módulo de elasticidade do GFRP (diâmetro de 10 mm) de 1554,88 MPa e 64,19 GPa, respectivamente.

Apesar de existirem similaridades entre os procedimentos de dimensionamento das recomendações brasileira e americana, tanto para armaduras de aço quanto para armaduras de FRP, existem particularidades que conduzem a diferenças nos resultados. O ACI 318 (2019) e o ACI 440.1R (2015) não consideram a aplicação de fatores de redução da resistência do aço, do FRP e do concreto ao

longo do dimensionamento, mas reduzem o momento resistente calculado por um coeficiente que depende do modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural. Já, a ABNT NBR 6118 (2014) e a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) minoram as resistências dos materiais durante o dimensionamento para garantir a segurança do elemento estrutural, não reduzindo o momento resistente calculado ao término do dimensionamento. Desta forma, os resultados experimentais foram comparados aos teóricos obtidos, considerando-se a aplicação dos fatores de re-

dução das resistências dos materiais (no caso das normas brasileiras) e dos coeficientes de minoração do momento resistente (no caso das normas americanas), visando aproximar uma situação de projeto real, e, também, desconsiderando-se tais fatores de redução, visando melhor aproximação dos resultados obtidos em laboratório, sob ambiente controlado.

Além disso, as metodologias de dimensionamento das vigas com barras de GFRP, tanto brasileira quanto americana, levam em conta a agressividade do ambiente por meio da aplicação de um fator ambiental de redução, o qual, neste trabalho, foi

utilizado igual a 0,8, uma vez que as vigas aqui apresentadas não foram mantidas sob a influência de água e intempéries.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, os resultados experimentais obtidos Mazzú (2020) para quatro vigas de concreto armado, sendo duas com armadura de aço e duas com armadura de GFRP, foram comparados aos resultados teóricos determinados com base nos modelos de dimensionamento das normas ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2014), para as vigas com armadura de aço, e ACI 440.1R (2015) Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) para as vigas com armadura de GFRP. Assim, na Figura 4 são apresentadas as curvas de força *versus* deslocamento vertical a meio vão obtidas por Mazzú (2020) por meio de ensaios de flexão em três pontos.

Na Figura 4, é possível notar a diferença entre os comportamentos mecânicos das vigas com armadura de aço e de GFRP. Até o surgimento da primeira fissura, todas as vigas apresentam curvas praticamente coincidentes, uma vez que até este momento o concreto é responsável por resistir às solicitações impostas. A partir de então, as armaduras passam a ser solicitadas e as vigas perdem rigidez, fato demonstrado pelas mudan-

TABELA 3

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS PARA AS VIGAS COM ARMADURA DE AÇO

		V_LAB_S_45d			
Modo de ruína		Força máxima (kN)		Diferença (%)	
		Com redução	Sem redução	Com redução	Sem redução
Mazzú (2020)	Escoamento do aço	26,05		-	
ACI 318 (2019)	Escoamento do aço	22,48	24,98	13,71	4,12
ABNT NBR 6118 (2014)	Escoamento do aço	21,33	24,98	18,11	4,12

ças nas inclinações das curvas. Após a fissuração, o comportamento das vigas passa a se diferenciar, observando-se a formação de patamar de escoamento para as vigas com armadura de aço e comportamento linear até a ruptura para as vigas com armadura de GFRP. Segundo Mazzú (2020), foi observada rigidez 66% inferior das vigas com armadura de GFRP em relação às vigas com armadura de aço após a fissuração. As vigas com armadura de GFRP apresentaram força máxima e deslocamento vertical 37% e 78% superiores, respectivamente, quando comparadas às vigas com armadura de aço convencional, tendo em vista a maior resistência à tração e menor módulo de elasticidade deste material.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados teóricos obtidos por meio dos modelos de dimensionamento, com e sem reduções, em comparação aos resultados experimentais de Mazzú (2020) para as vigas com armadura de aço e de GFRP.

Com relação às vigas com armadura de aço, nota-se na Tabela 3 que ambos os modelos do ACI 318 (2019) e da ABNT NBR 6118 (2014)

previram com acerto o modo de ruína das vigas, o qual foi baseado no escoamento do aço. Além disso, quando se considera a aplicação dos coeficientes de redução das resistências dos materiais (no caso da norma brasileiro) e o coeficiente de redução do momento resistente (no caso da norma americana), nota-se que a norma brasileira resulta em valores mais conservadores, com maior diferença em relação aos resultados experimentais (18,11%). Entretanto, sem o uso dos coeficientes, ambas as normas resultam no mesmo valor de capacidade resistente, com diferença de 4,12% em relação aos resultados experimentais. Dessa forma, com exceção da metodologia de aplicação dos coeficientes de segurança, as normas apresentam as mesmas formulações para o cálculo da capacidade resistente e fornecem os mesmos resultados teóricos.

Analisando-se a Tabela 4 é possível observar que, quando considerados os coeficientes de redução, a norma americana resulta em valores bem mais conservadores em relação aos resultados experimentais do que a recomendação brasileira, com diferença de 46,54%. Já a recomendação brasileira apresenta diferença de 29,72%, valor inferior à norma americana, mas ainda demonstrando a segurança dos valores considerados em um projeto real em relação aos obtidos em laboratório. Quando se desconsideram os coeficientes de redução, simulando um ambiente controlado de laboratório, os valores obtidos por meio da aplicação das metodologias de dimensionamento se aproximam mais dos resultados experimentais, sendo a norma americana mais conservadora em relação

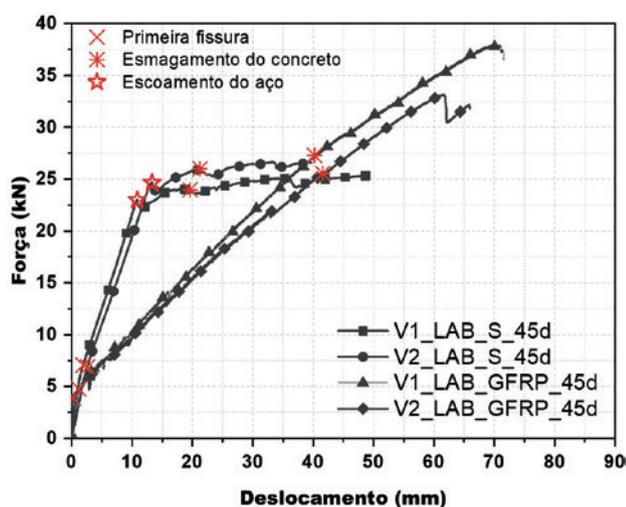


FIGURA 4

CURVAS FORÇA *VERSUS* DESLOCAMENTO VERTICAL A MEIO VÃO DAS VIGAS

FONTE: ADAPTADO DE MAZZÚ (2020)

TABELA 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS PARA AS VIGAS COM ARMADURA DE GFRP

		V_LAB_GFRP_45d			
Modo de ruína		Força máxima (kN)		Diferença (%)	
		Com redução	Sem redução	Com redução	Sem redução
Mazzú (2020)	Esmagamento do concreto	35,60		–	
ACI 440.1R (2015)	Esmagamento do concreto	19,03	29,28	46,54	17,76
Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)	Esmagamento do concreto	25,02	30,85	29,72	13,34

à recomendação brasileira, com diferenças de 17,76% e 13,34%, respectivamente. Nota-se que ambos os modelos previram com acerto o modo de ruína obtido experimentalmente, o qual foi baseado no esmagamento do concreto comprimido.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo apresentar a metodologia para o dimensionamento de vigas de concreto armado com barras de FRP da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) recentemente publicada, bem como comparar os resultados teóricos obtidos por meio da aplicação dos modelos do ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2014), para vigas com armadura de aço, e do ACI 440.1R (2014) e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), para vigas com armadura de GFRP, com os resultados experimentais obtidos por Mazzú (2020). Assim, os resultados apresentados permitiram concluir que:

- ▶ As vigas com armadura de aço e de GFRP apresentam comportamentos mecânicos distintos, sendo que a primeira apresenta patamar de escoamento no qual o deslocamento aumenta sem grandes incrementos de força e a segunda apresenta comportamento linear até a ruptura;
- ▶ Com exceção da consideração dos coeficientes de redução das resistências dos materiais ou do momento resistente, a metodologia de dimensionamento do ACI 318 (2019) e da ABNT NBR 6118 (2014) é a mesma, portanto, conduzindo aos mesmos resultados de capacidade resistente;
- ▶ Quando se consideram os coeficientes de redução, a norma brasileira resulta em valores mais conservadores para as vigas com armadura de aço, enquanto a norma americana resulta em valores mais conservadores para as vigas com armadura de GFRP;

- ▶ Ainda que menos conservadora, a recomendação brasileira para a utilização de armadura de GFRP apresenta resultados seguros em relação aos resultados experimentais;
- ▶ Quando se desconsideram os coeficientes de redução para o dimensionamento das vigas com armadura de GFRP, os valores obtidos de forma teórica se aproximam mais dos resultados experimentais, com a norma americana ainda sendo mais conservadora; e
- ▶ Todas as normas previram com acerto o modo de ruína obtido nos ensaios experimentais.

Resalta-se que, mesmo que esteja em processo de crescimento, a aplicação das barras de FRP como armadura ainda não é tão comum quando comparada às armaduras de aço convencional. Por este motivo, os procedimentos de dimensionamento de estruturas com este tipo de armadura ainda serão bastante discutidos, revisados e adaptados, principalmente no Brasil, tendo em vista que normas ABNT para a caracterização do material e sua aplicação em estruturas de concreto encontram-se em processo de desenvolvimento e devem ser publicadas nos próximos meses.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 para a realização deste trabalho. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – Building code requirements for reinforced concrete. Detroit, USA. 2019.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 440.1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2014.
- [4] DALFRÉ, G. M.; FERREIRA, F. G. S.; MAZZÚ, A. D. E. (2020). Dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras não metálicas. CONCRETO & Construções, v. 98, pp. 72-78. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2020.98.0007>.
- [5] DALFRÉ, G. M.; MAZZÚ, A. D. E.; FERREIRA, F. G. S. (2021). Discussões sobre o dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras de GFRP. CONCRETO & Construções, v. 101, pp. 79-86. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2021.101.0008>.
- [6] IBRACON/ABECE. Prática recomendada CT 303: Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). São Paulo, 2021.
- [7] MAZZÚ, A. D. E. (2020). Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- [8] MOOLAEI, S.; SHARBATDAR, M. K.; KHEYRODDIN, A. (2021). Experimental evaluation of flexural behavior of HPRFCC beams reinforced with hybrid steel and GFRP bars. Composite Structures, v. 275. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114503>.