

Dimensionamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de aço sem estribos: uma análise paramétrica

Shear design of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups: a parametric analysis

Gabriela Mazureki Campos Bahniuk 

Allan Guimarães Borçato 

Ricardo Pieralisi 

Resumo

Algumas normativas apresentam recomendações de dimensionamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras, porém com diferenças entre si. Desse modo, este artigo tem como objetivo realizar o dimensionamento ao cisalhamento e análise paramétrica de vigas em concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) sem estribos, baseando-se nos métodos propostos pela NBR 16935:2021, pelo FIB Model Code 2010, pela RILEM TC 162-TDF e pela norma alemã. Buscou-se na literatura ensaios experimentais de vigas de CRFA, com armadura longitudinal e sem estribos, para obter valores experimentais a serem comparados com as previsões fornecidas pelas normativas. Para a análise paramétrica, consultou-se trabalhos com resultados de resistência residual à tração baseados no ensaio EN 14651, ensaio similar ao indicado pela NBR 16935:2021. Os parâmetros variados foram a largura (b_w), a altura útil (d) e a taxa de armadura longitudinal (ρ). Os resultados mostraram que a NBR 16935:2021 e o FIB Model Code 2010 apresentam, na média, valores característicos mais distantes dos resultados experimentais, sendo mais conservadoras em relação às demais normativas. Entre os parâmetros analisados, a taxa de armadura longitudinal apresentou a maior influência nos resultados.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Vigas sem estribo. Capacidade ao cisalhamento. Análise paramétrica. NBR 16935.

Abstract

Some standards present design recommendations for the shear of fiber reinforced concrete beams, but with there are differences between them. Thus, the aim of this article is to perform the shear design and parametric analysis of beams in steel fiber reinforced concrete (SFRC), without stirrups, based on the methods proposed by the recently released NBR 16935:2021, the FIB Model Code 2010, RILEM TC 162-TDF and the German standard. The study involved a literature review, researching publications of experimental tests involving SFRC beams, with longitudinal reinforcement and without stirrups, aiming to obtain experimental values to compare with the standards' theoretical predictions of shear capacity. For the parametric analysis, the researchers sought studies with residual tensile strength results based on the EN 14651 test, which is similar to the test recommended by NBR 16935:2021. The parameters that varied were width (b_w), useful height (d) and longitudinal reinforcement ratio (ρ). The results showed that NBR 16935:2021 and the FIB Model Code 2010 present, on average, characteristic values that are far from the experimental results, being more conservative than the other standards. The longitudinal reinforcement ratio had the greatest influence on the results compared with the other analysed parameters.

Keywords: Fiber reinforced concrete. Beams without stirrups. Shear capacity. Parametric analysis. NBR 16935.

¹Gabriela Mazureki Campos Bahniuk

¹Universidade Estadual de Ponta Grossa
Ponta Grossa - PR - Brasil

²Allan Guimarães Borçato

²Instituto Federal de Santa Catarina
São Carlos - SC - Brasil

³Ricardo Pieralisi

³Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

Recebido em 14/06/21

Aceito em 19/10/21

Introdução

O concreto apresenta ótima resistência à compressão, porém reduzida resistência à tração, e uma opção para melhorar essa resistência é a utilização de fibras dispersas na mistura, sendo as fibras de aço as mais comumente utilizadas (LANTSOGHT, 2019a). As primeiras vigas reforçadas com fibras ensaiadas para resistir ao cisalhamento foram testadas em 1972, e desde então vários estudos demonstraram que a presença de fibras de aço aumenta a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto (BARROS; FOSTER, 2018). As fibras podem ou não substituir as armaduras transversais convencionais de aço em vigas de concreto armado. Entretanto, apesar do alto potencial, uma abordagem de modelagem consensual ainda não existe para prever a resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras em vigas (BARROS; FOSTER, 2018).

O uso do concreto reforçado com fibras (CRF) de aço está diretamente relacionado ao seu comportamento pós-fissuração em tração. O ensaio de flexão de três pontos de acordo com a normativa EN 14651 (EUROPEAN..., 2007) é um dos ensaios recomendados para avaliar os parâmetros pós-fissuração para aplicação do CRF como material estrutural (TRINDADE *et al.*, 2020).

A tração na pós-fissuração, ou *pull-out*, é a resposta do reforço da fibra em materiais à base de cimento, característica distintiva que define o desempenho em termos de manutenção, durabilidade e resistência em elementos estruturais de CRF (BARROS; FOSTER, 2018).

As fibras de aço no CRF têm sido utilizadas como armadura primária ou secundária em elementos estruturais, conforme sugerido em códigos e recomendações internacionais RILEM TC 162-TDF (RÉUNION..., 2003), EHE-08 (COMISIÓN..., 2008), FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), CNR-DT 204 (NATIONAL..., 2006), ACI 318-08 (AMERICAN..., 2007), AS 3600-2018 (AUSTRALIAN..., 2018). O ensaio de flexão de três pontos normatizado pela EN 14651 (EUROPEAN..., 2007) é indicado para parametrizar a resistência residual para correspondentes aberturas de fissuras e, desse modo, obter a lei constitutiva a ser aplicada no projeto estrutural de elementos do CRF.

Estudo desenvolvido por Lantsoght (2019b) apresenta um banco de dados de 488 experimentos de cisalhamento em vigas de concreto com fibras de aço sem estribos, além de compilar diversas equações empíricas e disposições de códigos e de pesquisadores para previsão da capacidade de cisalhamento. A comparação realizada demonstra grande dispersão nos valores experimentais com os previstos nos modelos e conclui que nenhum dos métodos disponíveis descreve adequadamente o comportamento de vigas CRF com fibras de aço que falham por cisalhamento.

Em fevereiro de 2021, houve a publicação da normativa brasileira de projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. A NBR 16935 (ABNT, 2021a) estabelece os requisitos de desempenho mecânico para estruturas de CRF para atuação isolada ou em conjunto com as armaduras. Também foi publicada a NBR 16940 (ABNT, 2021b), que apresenta o método de ensaio para determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais), com procedimento semelhante ao recomendado pela EN 14651 (EUROPEAN..., 2007).

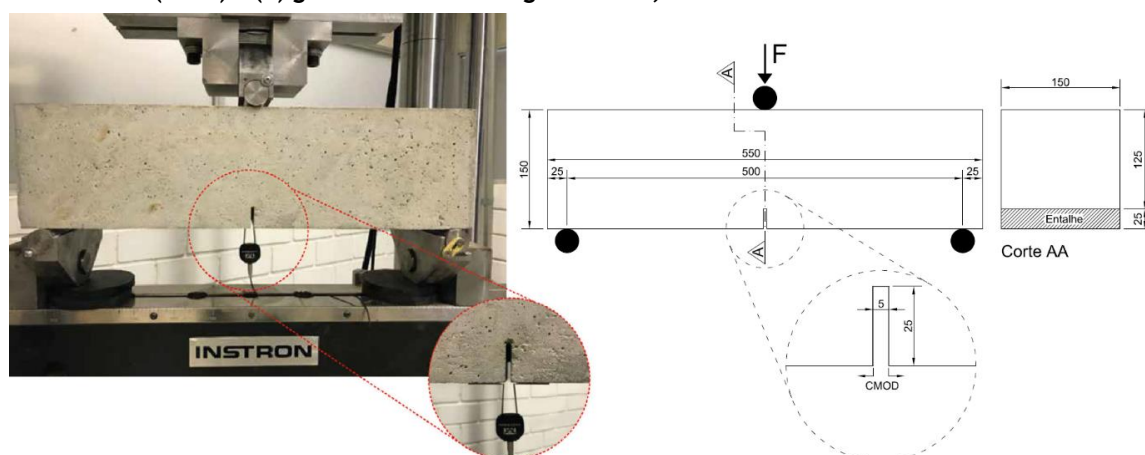
Desse modo, este artigo tem como objetivo realizar uma pesquisa na literatura de dados de ensaios experimentais de vigas de CRFA para serem comparados com a previsão de capacidade cisalhante das normativas abordadas, além de avaliar a NBR 16935 (ABNT, 2021a) ante as demais normativas internacionais no que se refere a vigas de CRFA com armadura longitudinal e sem armadura transversal. Também foi realizada uma análise paramétrica, por meio de resultados de resistência residual à tração, resistência à compressão e variação do volume de fibras de estudos de outras pesquisas. A análise paramétrica foi feita com a variação dos seguintes parâmetros: largura (b_w), altura útil (d) e taxa de armadura longitudinal (ρ).

Referencial teórico

Ensaio de flexão de três pontos

O ensaio de flexão de três pontos, de acordo com a EN 14651 (EUROPEAN..., 2007), é realizado em uma viga prismática com 500 mm de vão e comprimento total de 550 mm, seção transversal de (150×150) mm e um entalhe de 25 mm de profundidade, localizado no meio do vão da viga, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Ensaio de flexão de três pontos de acordo com EN 14651: (a) ensaio experimental realizado em Trindade (2020) e (b) geometria de uma viga ensaiada, com dimensões em mm



Fonte: adaptada de Trindade *et al.* (2020).

Segundo a NBR 16940 (ABNT, 2021b), norma que aborda esse ensaio, de maneira semelhante, os corpos de prova também devem ter seção de (150 x 150) mm, porém o comprimento pode variar entre 550 mm e 700 mm, com distância entre os apoios (vão) de 500 mm. A tolerância das dimensões nominais deve ser inferior a 2 mm. O formato e a dimensão dos corpos de prova, para o ensaio, devem ser feitos com concretos com agregado com no máximo 25 mm de diâmetro e fibras com comprimento máximo de 60 mm.

A resposta desse ensaio é expressa em uma curva força (F) *versus* abertura de fissura (do inglês *Crack Mouth Opening Displacement - CMOD*), que corresponde ao deslocamento relativo entre as duas faces internas do entalhe feito na viga. Esse ensaio é importante por fornecer a lei constitutiva para o dimensionamento dos elementos estruturais em CRF, incluindo o cisalhamento.

Para a análise dos parâmetros após a fissuração, o comportamento do CRF em termos de resistência à tração residual na flexão é indicado por valores de $f_{R,j}$ ($j=1, 2, 3$ e 4) correspondentes às aberturas de fissuras de 0,50 mm ($CMOD_1$), 1,50 mm ($CMOD_2$), 2,50 mm ($CMOD_3$) e 3,50 mm ($CMOD_4$), definido segundo a Equação 1.

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

F_j é a carga pontual medida no meio do corpo de prova correspondente às aberturas de fissuras; l é o comprimento do vão;

b é a largura; e

h_{sp} é a distância entre a ponta do entalhe e o topo da viga na seção do meio do vão, que no exemplo apresentado na Figura 1 equivale a 125 mm.

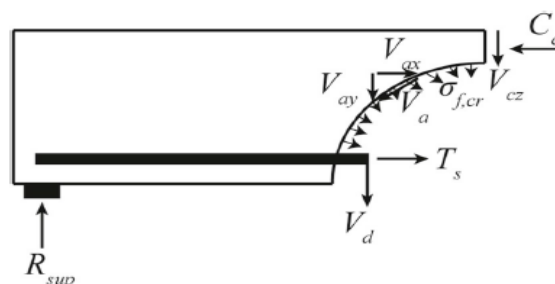
O limite de proporcionalidade f_L é outro parâmetro importante adotado no projeto de CRF e pode ser determinado com a Equação 2.

$$f_L = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde F_L é a carga medida com maior valor entre $0 \text{ mm} \leq CMOD \leq 0,05 \text{ mm}$.

Destaca-se que os dados obtidos, de resistência à tração residual na flexão, para serem aplicados neste trabalho, se referenciam a resultados de ensaios de flexão de três pontos segundo a metodologia da EN 14651 (EUROPEAN..., 2007).

Figura 2 - Visão geral dos mecanismos de transferência de cisalhamento para CRF com fibras de aço



Fonte: Lantsoght (2019a).

Mecanismos de transferência de cisalhamento no CRF

Assim como para vigas de concreto armado, a zona de compressão do concreto fornece resistência ao cisalhamento (V_{cz}), a armadura de flexão fornece resistência ao cisalhamento por meio da ação do pino (V_d), e os agregados que se projetam da face da fissura fornecem resistência ao cisalhamento através do intertravamento (V_a). A contribuição da tensão residual no concreto através da fissura é substituída pela resistência à tração do CRF ($\sigma_{f,cr}$). A Figura 2 apresenta uma visão geral dos mecanismos de transferência de cisalhamento em vigas de CRF com fibras de aço.

Os parâmetros que afetam a capacidade ao cisalhamento de vigas de CRF com fibras de aço são dependentes da resistência à compressão do concreto, da quantidade de armadura longitudinal de flexão, da distância de aplicação da carga em relação ao apoio (a), da altura útil (d) da viga, da altura do elemento estrutural, da propriedade e do volume de fibras. Vários autores desenvolveram expressões para quantificar a contribuição de fibras de aço na capacidade de cisalhamento, e sabe-se que as fibras aumentam a resistência ao cisalhamento de vigas sem estribos, mas não se sabe exatamente como cada mecanismo de resistência ao cisalhamento é afetado por elas (LANTSOGHT, 2019a).

Modelos de dimensionamento ao cisalhamento de vigas de CRF com fibras de aço com armadura longitudinal e sem armadura transversal

A escolha das normativas adotadas para o dimensionamento ao cisalhamento das vigas foi realizada considerando estudo desenvolvido por Lantsoght (2019b), que indicou grande dispersão na razão entre os valores experimentais e os previstos após a aplicação de quatro normativas: FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), RILEM (RÉUNION..., 2003), normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) e normativa francesa (ASSOCIATION..., 2013).

Porém, entre essas quatro normativas, os códigos que adotam os métodos de previsão de capacidade de cisalhamento baseados no Eurocode, isto é, RILEM (RÉUNION..., 2003), FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e normativa alemã (DAfStb, 2012), forneceram resultados razoáveis, com coeficientes de variação de 27% a 29% entre resultados experimentais e resultados previstos (LANTSOGHT, 2019b). Desse modo, essas três normativas foram adotadas, além da recém-publicada normativa NBR 16935 (ABNT, 2021a), sendo que todas incluem o efeito das fibras na capacidade de cisalhamento de vigas sem estribos. As orientações e o equacionamento dessas normativas são apresentados a seguir.

NBR 16935:2021

A resistência do elemento estrutural ($V_{Rd,F}$) em determinada seção transversal, considerando o modelo linear indicado pela NBR 16935 (ABNT, 2021a), é apresentada nas Equações 3 a 7.

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftu,k}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq V_{Rd,Fmin} \quad \text{Eq. 3}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Eq. 4}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \quad \text{Eq. 5}$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} \cdot (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad \text{Eq. 6}$$

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

γ_c é o coeficiente de ponderação do CRF e vale 1,5;

d é a altura útil da seção transversal;

b_w é a menor largura da seção transversal na parte tracionada da viga;

σ_{cp} é igual a zero para elementos em concreto armado;

ρ_1 é a taxa de armadura longitudinal;

A_{sl} é a área da armadura longitudinal da viga;

f_{Ftu} é a resistência característica à tração direta do CRF, valor último (para determinar f_{Ftuk} considerar $w_u=1,5$ mm na Equação 6);

$CMOD_3$ corresponde a uma medida da abertura do entalhe de $w=2,5$ mm;

f_{ctk} é a resistência característica do concreto à tração direta, sendo considerado o valor de $f_{ct,m}$;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto;

f_{R1} é a resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao $CMOD_1=0,5$ mm; e

f_{R3} é a resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao $CMOD_3=2,5$ mm.

O valor mínimo de $V_{Rd,F}$ é o indicado nas Equações 8 e 9 e é limitado superiormente pelo valor obtido pelas Equações 10 e 11. A armadura mínima de cisalhamento convencional (estribos), conforme previsto na NBR 6118 (ABNT, 2014), pode ser dispensada quando for utilizado o CRF e quando a condição apresentada na Equação 12 for atendida.

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 8}$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Eq. 9}$$

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot^2\theta} \quad \text{Eq. 10}$$

$$k_c = 0,5 \cdot \left(\frac{30}{f_{ck}}\right)^{1/3} \leq 0,5 \quad \text{Eq. 11}$$

$$f_{Ftuk} \geq 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. 12}$$

FIB Model Code 2010

Segundo o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), a estimativa da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com fibras de aço pode ser feita por dois métodos (KRASSOWSKA; KOSIOR-KAZBERUK; BERKOWSKI, 2019):

(a) V_{MC1} (método da treliça): a influência das fibras na capacidade de cisalhamento é considerada usando a razão da resistência à tração residual característica na flexão da fibra (f_{Ftuk}), determinada para a abertura da fissura inicial $w_u=1,5$ mm; e

(b) V_{MC2} (Teoria do Campo de Compressão Modificada Simplificada – SMCFT): a participação das fibras na transferência de tensões de cisalhamento é considerada pela introdução da tensão de tração característica residual (f_{Ftuk}) do concreto com fibras, determinada pelo método direto do teste de tração e largura da fissura final correspondente a w_u , bem como com mudança no ângulo da biela comprimida.

Neste artigo é adotado o método V_{MC1} , pelo qual a força cortante resistente de cálculo ($V_{Rd,F}$) é determinada pelas Equações 13 a 17:

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 13}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ (efeito de escala)} \quad \text{Eq. 14}$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \quad \text{Eq. 15}$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{2,5} \cdot (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad \text{Eq. 16}$$

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad \text{Eq. 17}$$

Onde:

$$\rho_l \leq 2\%;$$

$$\gamma_c = 1,5;$$

$$w_u = 1,5 \text{ mm (para determinar } f_{Ftuk}); \text{ e}$$

σ_{cp} vale zero para elementos em concreto armado.

O valor mínimo de $V_{Rd,F}$ é o mesmo indicado nas Equações 8 e 9, e a garantia de ductilidade é respeitada segundo indicação da Equação 12.

As expressões do FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) combinam o efeito do concreto e das fibras, mas a expressão resultante é empírica e não considera as contribuições dos diferentes mecanismos de transporte de cisalhamento (LANTSOGHT, 2019a).

Observa-se que as recomendações apresentadas na NBR 16935 (ABNT, 2021) são similares ao FIB Model Code (FIB, 2010), entretanto a norma brasileira não apresenta limitação da taxa de armadura longitudinal (ρ), de 2%.

RILEM TC 162-TDF

As equações da força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}) indicadas pela RILEM (RÉUNION..., 2003) separam a contribuição do concreto (V_{cd}) da contribuição da fibra (V_{fd}) e estão apresentadas nas Equações 18 a 23:

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{fd} \quad \text{Eq. 18}$$

$$V_{cd} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 19}$$

$$V_{fd} = 0,7 \cdot k_f \cdot k \cdot \tau_{fd} \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 20}$$

$$k_f = 1 + n \cdot \left(\frac{h_f}{b_w} \right) \cdot \left(\frac{h_f}{d} \right) \leq 1,5 \quad \text{Eq. 21}$$

$$n = \frac{b_f - b_w}{h_f} \leq 3 \text{ e } n \leq \frac{3 \cdot b_w}{h_f} \quad \text{Eq. 22}$$

$$\tau_{fd} = \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot f_{Rk,4} \quad \text{Eq. 23}$$

Onde:

$$\rho \leq 2\%;$$

$k_f = 1$ se seção retangular; σ_{cp} vale zero para elementos em concreto armado; e

$f_{Rk,4}$ é a tensão residual característica para o estado limite último para um CMOD de 3,5 mm. O valor de k segue a mesma recomendação do FIB Model Code (FEDERATION..., 2010).

Destaca-se que na RILEM (RÉUNION..., 2003) o valor de γ_c não é colocado explicitamente, sendo as Equações 19 e 23 adaptadas conforme apresentado por Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015).

Normativa alemã

As equações da força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}^f) indicadas pela normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) também separam a contribuição do concreto ($V_{Rd,c}$) da contribuição da fibra ($V_{Rd,cf}$) e estão apresentadas nas Equações 24 a 29:

$$V_{Rd}^f = V_{Rd,c} + V_{Rd,cf} \quad \text{Eq. 24}$$

$$V_{Rd,c} = \frac{c_{Rd,c}}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 25}$$

$$V_{Rd,cf} = \frac{\alpha_c^f \cdot f_{ctR,u}^f \cdot b_w \cdot h}{\gamma_{ct}^f} \quad \text{Eq. 26}$$

$$f_{ctR,u}^f = k_F^f \cdot k_G^f \cdot 0,37 \cdot f_{cfIk,L2}^f \quad \text{Eq. 27}$$

$$k_G^f = 1,0 + 0,5 \cdot A_{ct}^f \leq 1,7 \quad \text{Eq. 28}$$

$$A_{ct}^f = b_w \cdot d, \text{ com } d \leq 1,5m \quad \text{Eq. 29}$$

Onde:

$\rho \leq 2\%$;

$C_{Rd,c} = 0,15$;

$\gamma_c = 1,5$, $\gamma_{ct}^f = 1,25$;

$\alpha_c^f = 0,85$ considera os efeitos de longo prazo;

$k_F^f = 0,5$ para cisalhamento; e

$f_{ctk,L2}^f$ é a tensão residual característica para o estado limite último para um CMOD de 3,5 mm.

Para seções sujeitas a tensões axiais, o valor de $V_{Rd,cf}$ vale zero. O valor de k segue a mesma recomendação do FIB Model Code (FEDERATION..., 2010).

Modos de ruptura de vigas

No estudo de Krassowska, Kosior-Kazberuk e Berkowski (2019), a análise do padrão de fissura mostra como a incorporação de fibras no concreto influencia no modo de falha de vigas armadas com a mesma armadura transversal. As fissuras perpendiculares ao eixo longitudinal representam a falha por flexão (Figura 3a), enquanto na ruptura por cisalhamento a propagação de fissuras ocorre em direção ao ponto de aplicação de carga concentrada e em direção ao posicionamento da armadura longitudinal (Figura3b).

Método

A metodologia do presente trabalho consistiu em realizar uma pesquisa analítica de publicações de ensaios experimentais de vigas de concreto reforçado com fibras de aço com armadura longitudinal e sem estribos. Foram obtidos valores experimentais de modo a serem comparados com previsões de capacidade cisalhante dos modelos normativos internacionais e da normativa brasileira.

Os estudos desenvolvidos por Amin e Foster (2016), Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015), Pansuk *et al.* (2017) e Resende (2020) foram os selecionados por apresentarem todos os dados necessários para a realização do dimensionamento ao cisalhamento e pelo fato de o modo de ruptura das vigas ocorrer por cisalhamento. A Figura 4 exemplifica o modo de ruptura por cisalhamento em uma viga ensaiada por Amin e Foster (2016).

Além disso, diversos outros artigos foram consultados, incluindo autores indicados em Lantsoght (2019b), porém essas publicações não incluíam dados de resistência residual à tração determinada segundo a normativa EN 14651 (EUROPEAN..., 2007) ou o modo de ruptura não tinha ocorrido por cisalhamento. Como não seria possível aplicar exatamente o indicado pelas normativas adotadas neste trabalho, esses artigos não foram selecionados.

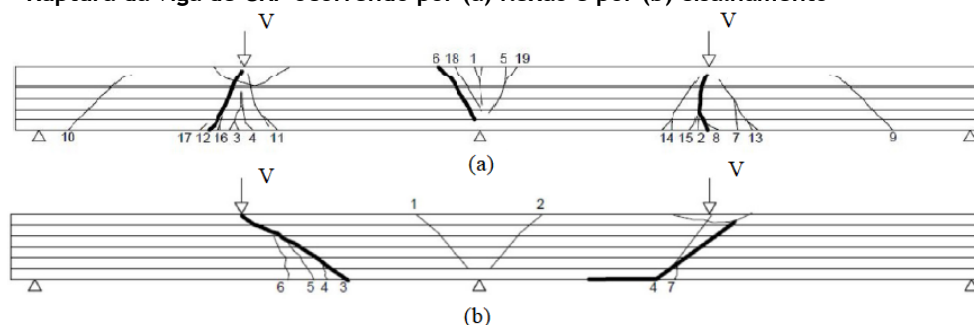
A Tabela 1 apresenta os dados das fibras e parâmetros geométricos das vigas ensaiadas por Amin e Foster (2016), Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015), Pansuk *et al.* (2017) e Resende (2020). Todas as vigas apresentadas foram armadas com armadura longitudinal e não possuíam armadura transversal, e o modo de ruptura ocorreu por cisalhamento.

A maior parte das seções transversais das vigas é retangular, com exceção das vigas identificadas como S_W70 e S_W110, que possuem seções I, com largura da alma de 70 cm e de 110 cm respectivamente. Para essas duas vigas, no cálculo da capacidade de cisalhamento indicado pela RILEM (RÉUNION..., 2003), o cálculo do parâmetro k_F considerou o fato de a viga possuir seção I.

Todas as fibras utilizadas nas vigas são de aço, entretanto na pesquisa de Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015) foram utilizadas fibras de aço recicláveis provenientes de pneus usados.

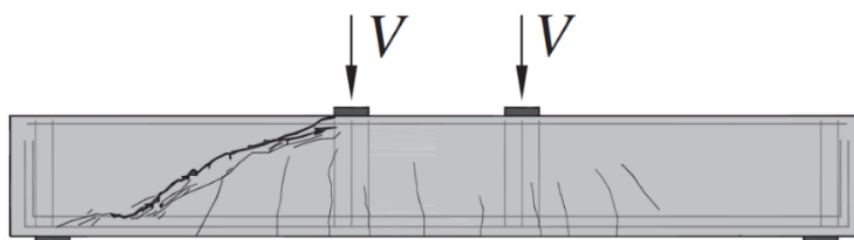
A Tabela 2 apresenta os valores característicos das resistências à tração residual na flexão dos CRF utilizados nas vigas ensaiadas. O CRF da viga identificada como B50-0-0-0 de Amin e Foster (2016) e da viga B(1L) de Resende (2020) possui um comportamento *hardening*. Os demais CRF das vigas ensaiadas possuem um comportamento *softening*. Pansuk *et al.* (2017) apresentaram diretamente o valor de f_{Ftuk} , e não as resistências à tração residual.

Figura 3 - Ruptura da viga de CRF ocorrendo por (a) flexão e por (b) cisalhamento



Fonte: adaptada de Krassowska, Kosior-Kazberuk e Berkowski (2019).

Figura 4 - Ruptura da viga de CRF ocorrendo por cisalhamento



Fonte: adaptada de Amin e Foster (2016).

Tabela 1 - Características das vigas ensaiadas em CRF de aço sem estribos

Autor	Ident.	B _w (mm)	h (mm)	d (mm)	ρ	a/d	f _{cm} (MPa)	Tipo de fibra	V _f (%)	l _f /d _f ¹
Amin e Foster (2016)	B25-0-0-0	300	700	622	0,0198	2,81	34	gancho ²	0,32	65
	B50-0-0-0	300	700	622	0,0198	2,81	36	gancho ²	0,69	65
Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015)	S_W70	70	300	270	0,0217	2,56	50	reciclada	0,77	58
	S_W110	110	300	270	0,0170	2,56	50	reciclada	0,77	58
	S_W150	150	300	270	0,0140	2,56	50	reciclada	0,77	58
Pansuk <i>et al.</i> (2017)	NS08	150	400	350	0,0267	2,86	121,1	gancho ²	0,80	65
	NS16	150	400	350	0,0267	2,86	120,3	gancho ²	1,60	65
Resende (2020)	B(1L)	150	200	169	0,0654	2,55	39,8	gancho ²	1,00	80

Nota: ¹l_f/d_f é a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra (circulares) ou diâmetro equivalente (não circulares); e ²hooked na língua inglesa.

Tabela 2 - Resistência à tração residual na flexão das vigas ensaiadas em CRF de aço sem estribos

Autor	Identificação	f _{cm} (MPa)	f _{R1} (MPa)	f _{R2} (MPa)	f _{R3} (MPa)	f _{R4} (MPa)
Amin e Foster (2016)	B25-0-0-0	34,0	2,39	2,52	2,56	2,26
	B50-0-0-0	36,0	6,74	8,58	8,07	7,91
Zamanzadeh, Lourenço e Barros. (2015)	S_W70	50,0	5,36	5,17	4,86	4,41
	S_W110	50,0	5,36	5,17	4,86	4,41
	S_W150	50,0	5,36	5,17	4,86	4,41
Pansuk <i>et al.</i> (2017)	NS08	147,69	-	-	-	-
	NS16	146,71	-	-	-	-
Resende (2020)	B(1L)	39,8	9,56	10,57	10,76	10,31

Com os dados apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2 foi possível determinar a previsão de capacidade cisalhante característica através das normativas abordadas neste trabalho, e por meio dos resultados obtidos foi possível realizar a comparação com os valores obtidos experimentalmente.

Na sequência, a fim de avaliar a influência de alguns parâmetros na previsão da resistência ao cisalhamento, uma análise paramétrica foi realizada abordando as seguintes variáveis: largura (b_w), altura útil (d) e taxa de armadura longitudinal (ρ). Para a obtenção dos dados experimentais do concreto reforçado com fibras de aço, foram pesquisados artigos que indicassem dados de resistência à compressão e de resistência à tração residual na flexão com no mínimo três variações de volume de fibras. Também foram realizadas as verificações de possibilidade de dispensa da armadura transversal e de valores mínimos de resistência ao cisalhamento.

Os valores de resistência à compressão e de resistência à tração residual na flexão com três variações de volume de fibras foram obtidos a partir da pesquisa realizada por Lee (2017). Esses valores foram utilizados para o desenvolvimento da análise paramétrica e são apresentados na Tabela 3.

Além disso, para o dimensionamento ao cisalhamento adotou-se uma viga padrão com as seguintes características:

- (a) largura (b_w) de 200 mm;
- (b) altura (h) de 500 mm;
- (c) altura útil (d) de 450 mm; e
- (d) taxa de armadura longitudinal (ρ) de 1%.

As variações de b_w , d e ρ ocorreram conforme apresentado na Tabela 4.

O valor final para a taxa de armadura longitudinal foi limitado em 2%, pois esse é o limite indicado por três das normativas adotadas. Além disso, a análise paramétrica foi realizada com resultados de cálculo, isto é, ponderados e variando apenas um parâmetro por análise. Dessa forma, quando os demais parâmetros não estavam em análise, eles foram considerados como valores fixos, com as medidas padrão informadas.

Resultados e discussão

Comparação entre resultados experimentais e normativos

Com a aplicação dos dados apresentados em Amin e Foster (2016), Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015), Pansuk *et al.* (2017) e Resende (2020), foi possível calcular a previsão característica da capacidade cisalhante das vigas ensaiadas. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente pelos autores e os valores resultantes do dimensionamento segundo as três normas internacionais adotadas e a norma brasileira.

Os resultados obtidos pela NBR 16935 (ABNT, 2021a) e pelo FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) foram os mesmos, considerando que as equações de determinação de resistência do elemento são iguais. Além disso, para Pansuk *et al.* (2017) os valores previstos pela RILEM (RÉUNION..., 2003) e normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) não puderam ser calculados, porque os autores apresentaram apenas o valor de f_{Ftuk} .

Analisando a Tabela 5, observa-se que as capacidades de cisalhamento características estimadas pelas normativas NBR 16935 (ABNT, 2021a), FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), RILEM (RÉUNION..., 2003) e norma alemã (DEUTSCHER..., 2012) foram superiores aos valores experimentais obtidos por Amin e Foster (2016), especialmente para a viga identificada como B50-0-0-0, bem como para a viga B(1L) (RESENDE, 2020). Destaca-se o fato de que o CRF dessas vigas possui um comportamento *hardening*, podendo caracterizar que as normativas não apresentam bons resultados teóricos para esse tipo de concreto. Assim, maior investigação de CRFA com esse comportamento deve ser realizada para comprovar esse resultado observado.

Para os demais estudos, isto é, de Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015) e de Pansuk *et al.* (2017), os resultados experimentais foram superiores às capacidades de cisalhamento características estimadas pelas quatro normativas, destacando o fato de que esses concretos tinham comportamento *softening*.

Tabela 3 - Resultados de resistências residuais à tração obtidos por Lee (2017)

V _f (%)	f _{ck} (MPa)	f _L (MPa)	f _{R1} (MPa)	f _{R2} (MPa)	f _{R3} (MPa)	f _{R4} (MPa)
0,250	55,6	5,345	4,330	3,003	2,232	1,608
0,375	55,6	5,646	4,647	3,517	2,686	2,385
0,500	55,6	5,705	6,178	4,996	3,398	2,719

Fonte: Lee (2017).

Tabela 4 - Variáveis e limites inicial e final para análise paramétrica

Parâmetro	Limite inicial	Limite final	Variação
ρ (%)	0,2	2,0	0,2
b _w (mm)	200	800	10
d (mm)	200	800	10

Tabela 5 - Capacidade de cisalhamento de vigas de CRF sem estribos de acordo com resultados experimentais e valores característicos de resistências das normativas

Autores	Identificação	V _{exp} (kN)	V _{Rk,NBR} (kN)	V _{Rk,FIB} (kN)	V _{Rk,RILEM} (kN)	V _{Rk,alemã} (kN)
Amin e Foster (2016)	B25-0-0-0	274,00	299,98	299,98	279,07	290,04
	B50-0-0-0	344,00	412,15	412,15	492,13	611,30
Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015)	S_W70	81,29	47,62	47,62	52,14	39,81
	S_W110	95,81	69,00	69,00	74,02	61,03
	S_W150	109,17	88,15	88,15	94,56	82,14
Pansuk <i>et al.</i> (2017)	NS08	340,00	204,56	204,56	-	-
	NS16	531,00	215,66	215,66	-	-
Resende (2020)	B(1L)	80,30	118,29	118,29	119,94	100,99

Verificando as vigas ensaiadas por Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015), observa-se que os valores previstos de capacidade cisalhante – exceto os valores previstos pelo FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a), que são idênticos – são relativamente próximos, mas não foi possível observar um padrão de resultados. Observa-se ainda que para quase todos os resultados a normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) foi a que apresentou as menores resistências características estimadas (exceto para as vigas de Amin e Foster).

Quanto aos valores de capacidade cisalhante experimental entre as vigas ensaiadas pelos mesmos autores, observa-se que em todas houve acréscimo de resistência com o aumento do volume de fibras, o mesmo observado nas previsões de resistência de cisalhamento segundo todas as normativas. Porém, a porcentagem de acréscimo na previsão teórica foi diferente entre as normativas.

Além disso, foi possível realizar comparações dos resultados experimentais em relação às previsões de resistência característica ao cisalhamento calculadas pelas normativas, conforme apresentado na Figura 5.

Analisando os resultados das quatro normas avaliadas, verifica-se que as que apresentaram melhor correlação entre resultados experimentais e previstos (característicos) foi a RILEM (RÉUNION..., 2003), seguido da normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) e, por fim, o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a). Trata-se de resultado semelhante ao observado por Lantsoght (2019b), que indicou, a partir das análises realizadas pela sua pesquisa, melhor correlação pela normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012), seguido da RILEM (RÉUNION..., 2003) e em seguida pelo FIB Model Code (FEDERATION..., 2010). Ressalta-se que a metodologia de determinação da resistência residual à tração adotada pela maioria dos autores que constam na pesquisa de Lantsoght (2019b) não adotou a normativa EN 14651 (EUROPEAN..., 2007) como modo de determinação da resistência residual à tração, porém o estudo também verificou que o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e, conseqüentemente, a NBR 16935 (ABNT, 2021a) apresentaram a menor correlação, sendo normativas mais conservadoras. É observado também na pesquisa de Lakavath, Joshi e Prakash (2019) que o código FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) superestimou a capacidade de cisalhamento em comparação com as disposições da RILEM (RÉUNION..., 2003).

O valor médio das relações V_{exp}/V_{Rk} para cada normativa foi de 1,36 para o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a), de 1,06 para a RILEM (RÉUNION..., 2003) e de 1,21 para a normativa alemã (DAfStb, 2012), resultando numa média geral de 1,21. Esse valor corresponderia ao coeficiente de ponderação da resistência característica.

Análise paramétrica

Na primeira variação da análise paramétrica adotaram-se constantes a largura (b_w) de 200 mm e a altura (h) de 500 mm, e variou-se a taxa de armadura longitudinal (ρ), conforme apresentado na Tabela 4. O gráfico demonstrando a variação nos valores da força cortante resistente de cálculo é visto na Figura 6. Considerando que os resultados obtidos pelo FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e pela NBR 16935 (ABNT, 2021a) são iguais, optou-se por apresentar na legenda dos gráficos apenas NBR.

Verifica-se que para a maior taxa de armadura longitudinal analisada, 2%, e para o volume de fibras de 0,5%, o código FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a) apresentaram a maior força cortante resistente de cálculo, demonstrando que a taxa de armadura longitudinal (ρ) tem significativo impacto no método adotado por essas normativas.

Figura 5 - Previsões de resistência característica ao cisalhamento em comparação com resultados experimentais

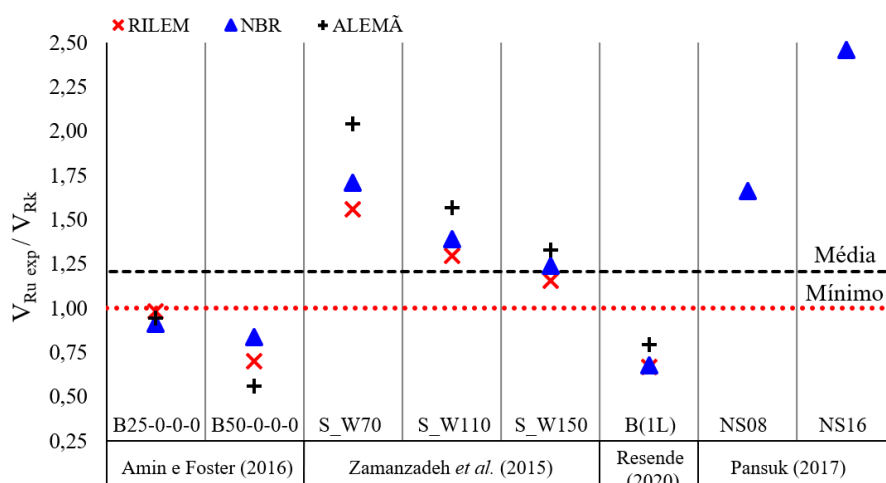
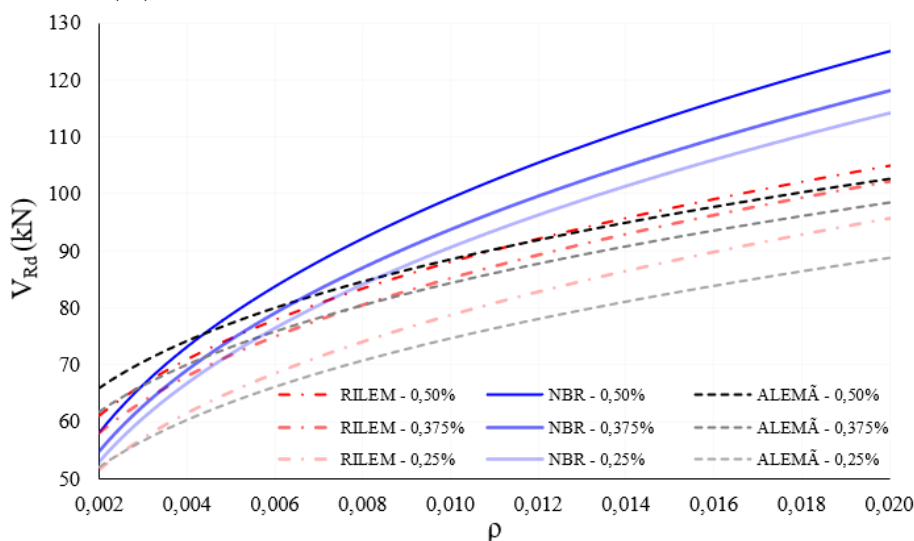


Figura 6 - Força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}) em função da taxa de armadura longitudinal (ρ) e do volume de fibras (V_f)



Observa-se que, mesmo para uma variação constante de taxa de fibras, ρ entre 0,2% e 2,0%, não se verifica diferença constante entre as forças cortantes resistentes de cálculo, destacando nesse ponto as normativas da RILEM (RÉUNION..., 2003) e da normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012), que apresentam diferença significativa entre as taxas de 0,25% e 0,375%, enquanto o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a) apresentam maior diferença entre as taxas de 0,375% e 0,5%.

O comportamento da curva no gráfico é similar entre a normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) e a RILEM (RÉUNION..., 2003), enquanto a curva do FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e da NBR 16935 (ABNT, 2021a) apresentam ganho mais significativo de resistência com o acréscimo da taxa de armadura longitudinal.

Na sequência da análise paramétrica, adotaram-se constantes a altura (h) em 500 mm e a taxa de armadura longitudinal (ρ) em 1%, e variou-se a largura (b_w), conforme apresentado na Figura 7.

Observando os dados da Figura 7, constata-se maior homogeneidade dos resultados e maiores valores de força cortante resistente de cálculo conforme o acréscimo da largura e do volume de fibras.

A maior diferença dos resultados é observada na largura de 800 mm, especialmente entre os resultados com diferentes volumes de fibras (V_f) do modelo da normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012), sendo essa diferença gradativamente ampliada desde a largura inicial de 200 mm.

Em todas as variações de largura desta análise, os valores obtidos pelo FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e pela NBR 16935 (ABNT, 2021a) no V_f de 0,50% foram os que apresentam maiores forças cortantes resistentes de cálculo. Observa-se ainda que os valores de cortante resistente de cálculo da RILEM (RÉUNION..., 2003) para V_f de 0,50% são praticamente os mesmos que os da normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) para V_f de 0,375%. Para todos os códigos, os menores valores de cortante resistente de cálculo ocorreram para o volume de fibras de 0,25%.

E por fim, na última análise paramétrica adotaram-se constantes a largura (b_w) em 200 mm e a taxa de armadura longitudinal em 1%, e variou-se a altura útil (d), conforme demonstrado na Figura 8.

Na Figura 8, observa-se um comportamento similar nos códigos FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), NBR 16935 (ABNT, 2021a) e RILEM (RÉUNION..., 2003), isto é, com o acréscimo da altura útil (d) e do volume de fibras (V_f), aumenta-se proporcionalmente a cortante resistente de cálculo. Já para a normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012), destaca-se o comportamento não padronizado conforme a variação da altura útil, especialmente a partir da altura útil de aproximadamente 600 mm. Na altura útil de 800 mm, o maior valor de cortante resistente de cálculo foi o determinado segundo o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a), de 158,77 kN para V_f de 0,50%, enquanto os valores observados na RILEM (RÉUNION..., 2003) foram de 140,92 kN, e para a normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) de 152,88 kN.

A Figura 9 apresenta uma comparação entre os valores previstos pela NBR 16935 (ABNT, 2021), RILEM (RÉUNION..., 2003) e normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012). Essa comparação foi realizada devido ao fato de que na análise paramétrica entre forças cortantes resistentes de cálculo (V_{Rd}) em função da taxa de armadura longitudinal (ρ) foram observadas maiores variações de resultados.

Verificou-se na comparação entre os resultados experimentais e os valores previstos pelas normativas analisados neste trabalho (Tabela 5) que a NBR 16935 (ABNT, 2021a) e o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) apresentaram em quase todas as vigas analisadas os maiores valores teóricos de capacidade cisalhante (exceto na viga B50-0-0-0), sendo ainda os valores mais próximos dos resultados experimentais. Esse comportamento é similar ao observado na Figura 9, que apresenta uma comparação entre os valores de força cortante de cálculo (V_{Rd}) das demais normativas obtidos em relação à NBR 16935 (ABNT, 2021a), considerando a variação da taxa de armadura longitudinal (ρ) e o volume de fibras (V_f). Entretanto, percebe-se que, para os valores de volume de fibras de 0,375% e de 0,50% e para baixas taxas de armadura longitudinal ($\rho < 0,45\%$), a NBR 16935 (ABNT, 2021a) apresentou valores de capacidade cisalhante previstos menores que as demais normativas analisadas.

Figura 7 - Força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}) em função da largura (b_w) e do volume de fibras (V_f)

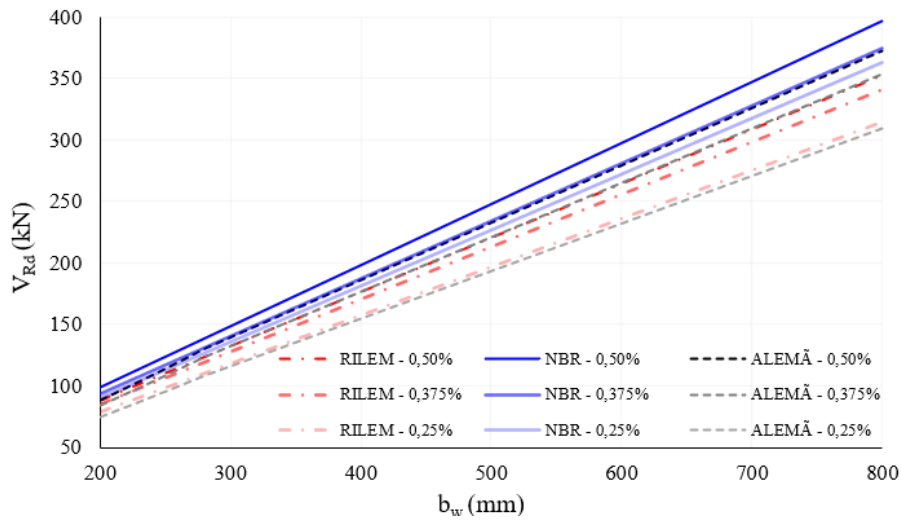


Figura 8 - Força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}) em função da altura útil (d) e do volume de fibras (V_f)

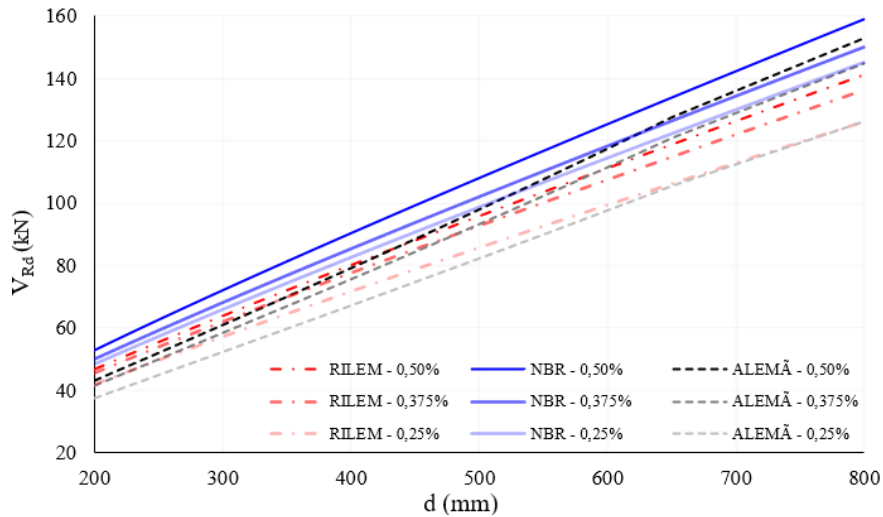
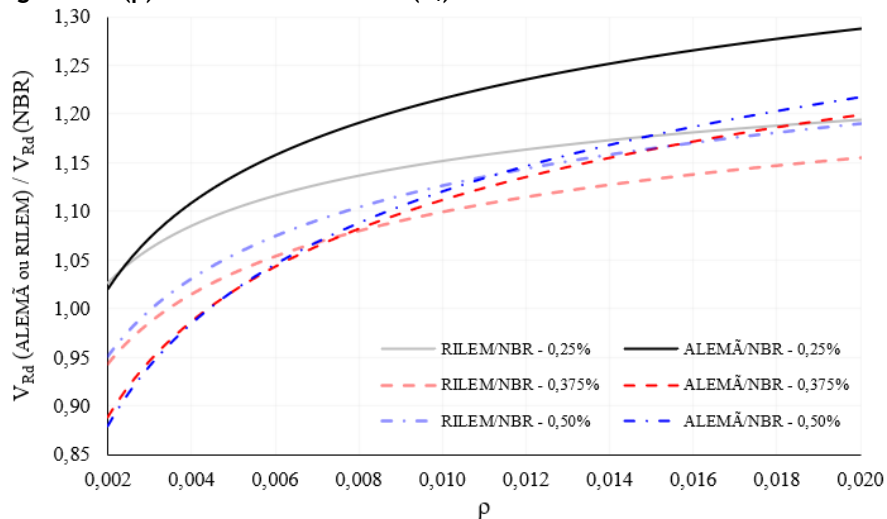


Figura 9 - Comparação entre forças cortantes resistentes de cálculo (V_{Rd}) em função da taxa de armadura longitudinal (ρ) e do volume de fibras (V_f)



Conclusão

Neste trabalho foram realizados dimensionamentos ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com armadura longitudinal e sem armadura transversal, baseados em resultados experimentais e segundo recomendações de três métodos internacionais, FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), RILEM (RÉUNION..., 2003) e a normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012), além da recém-publicada NBR 16935 (ABNT, 2021a).

Primeiramente, destaca-se o fato de os resultados obtidos com a NBR 16935 (ABNT, 2021a) serem exatamente iguais aos do FIB Model Code (FEDERATION..., 2010), observando-se apenas que a norma brasileira não apresenta a limitação da taxa de armadura longitudinal (ρ) de 2%.

Quanto aos resultados da análise comparativa entre resultados experimentais da literatura e resistência característica ao cisalhamento previsto pelas normativas conclui-se o seguinte:

(a) alguns resultados de resistência ao cisalhamento estimados pelas quatro normativas foram superiores aos obtidos experimentalmente, especificamente para as vigas com concreto com comportamento tipo *hardening*, tais como as vigas ensaiadas por Amin e Foster (2016) e Resende (2020). Já para as vigas ensaiadas por Zamanzadeh, Lourenço e Barros (2015) e Pansuk *et al.* (2017) os resultados experimentais foram superiores aos estimados, destacando que essas vigas tinham concreto com comportamento do tipo *softening*;

(b) observou-se acréscimo de resistência ao cisalhamento com o aumento do volume de fibras tanto nos resultados experimentais quanto nas previsões de resistência característica de cisalhamento segundo as quatro normativas; e

(c) os resultados teóricos foram próximos, mas não se verificou um padrão de resultados de cada norma para as diferentes vigas ensaiadas. A norma NBR 16935 (ABNT, 2021a) e o FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) apresentaram resultados mais conservadores entre os valores experimentais e os teóricos.

Quanto à análise paramétrica conclui-se o seguinte:

(a) a taxa de armadura longitudinal tem significativo impacto na capacidade de resistência ao cisalhamento proposto pelo método FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e pela NBR 16935 (ABNT, 2021a);

(b) constata-se maior homogeneidade dos resultados de força cortante resistente entre as normativas analisadas conforme o acréscimo da largura e do volume de fibras, comportamento similar com a variação da altura útil até o valor de 60 cm;

(c) para uma altura útil acima de 60 cm, verificou-se que esse parâmetro tem significativo impacto no método proposto pela normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012), tanto no volume de fibras de 0,375% quanto no volume de fibras de 0,50%;

(d) nas três situações analisadas parametricamente, observa-se maior diferença da resistência ao cisalhamento entre os diferentes volumes de fibras no método adotado pela normativa alemã (DEUTSCHER..., 2012) e pela RILEM (RÉUNION..., 2003), que são métodos que separam a contribuição do concreto da contribuição da fibra. Também, menor diferença entre as resistências ao cisalhamento é identificada no método proposto pelo FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e pela NBR 16935 (ABNT, 2021a) para diferentes volumes de fibras em que o efeito do concreto e das fibras é combinado; e

(e) na grande maioria dos resultados da análise paramétrica, a norma FIB Model Code (FEDERATION..., 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021a) apresentam os maiores valores de capacidade cisalhante de cálculo, sendo menos conservadores que as outras duas normas analisadas.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-08**: building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills, 2007.

AMIN, A.; FOSTER, S. J. Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. **Engineering Structures**, v. 111, p. 323-332, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935**: projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras: procedimento. Rio de Janeiro, 2021a.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16940**: concreto reforçado com fibras: determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais): método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. **Bétons fibrés à ultra-hautes performances**: recommandations. Paris, 2013.
- AUSTRALIAN STANDARDS. **AS 3600**: Concrete structures. Sydney, 2018.
- BARROS, J. A. O.; FOSTER, S. J. An integrated approach for predicting the shear capacity of fibre reinforced concrete beams. **Concrete Structures**, v. 174, p. 346-357, jan. 2018.
- COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **EHE-08**: instruccion del hormigon estructural. Madrid, 2008.
- DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON. **Richtlinie Stahlfaserbeton**. Berlin, 2012.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**: test method for metallic fiberreinforced concrete: measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels, 2007.
- FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. **FIB Model Code for concrete structures**. FIB Model Code 2010. Lausanne, 2010.
- KRASSOWSKA, J.; KOSIOR-KAZBERUK, M.; BERKOWSKI, P. Shear behavior of two-span fiber reinforced concrete beams. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 1442-1457, 2019.
- LAKAVATH, C.; JOSHI, S. S.; PRAKASH, S. S. Investigation of the effect of steel fibers on the shear crack-opening and crack-slip behavior of prestressed concrete beams using digital image correlation. **Engineering Structures**, v. 193, p. 28-42, apr. 2019.
- LANTSOGHT, E. O. L. Database of shear experiments on steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. **Materials**, v. 16, n. 6, p. 1-36, 2019b.
- LANTSOGHT, E. O. L. How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? **Composites Part B: Engineering**, v. 175, p. 107079, jan. 2019a.
- LEE, J. H. Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. **Composite Structures**, v. 168, p. 216-225, 2017.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **CNR-DT 204**: guide for the design and construction of fiber-reinforced concrete structures. Rome, 2006.
- PANSUK, W. *et al.* Shear capacity of high performance fiber reinforced concrete I-beams. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 182-193, 2017.
- RESENDE, T. L. de. **Contribuição dos mecanismos resistentes à força cortante em vigas de concreto armado sem e com fibras de aço**. Rio de Janeiro, 2020. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX. **RILEM TC 162-TDF**: test and design methods for steel fibre reinforced concrete sigma-epsilon-design method. Paris, 2003.
- TRINDADE, Y. T. *et al.* Design of SFRC members aided by a multiscale model: part I: predicting the post-cracking parameters. **Composite Structures**, v. 241, p. 112078, jan. 2020.
- ZAMANZADEH, Z.; LOURENÇO, L.; BARROS, J. Recycled steel fibre reinforced concrete failing in bending and in shear. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 195-207, 2015.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGEC/UFPR) e ao projeto “(Nano)materiais Avançados: preparação, caracterização, modelagem,

estudo de propriedade e aplicações” do Programa Institucional de Internacionalização (PrInt) financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Gabriela Mazureki Campos Bahniuk

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Ponta Grossa | Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, Campus Uvaranas, Uvaranas | Ponta Grossa - PR - Brasil | CEP 84030-900 | Tel.: (42) 3222-3074 | E-mail: gabriela.campos@uepg.br

Allan Guimarães Borçato

Campus São Carlos | Instituto Federal de Santa Catarina | Rua Aloísio Stoffel, 1271, Jardim Alvorada | São Carlos - SC - Brasil | CEP 89885-000 | Tel.: (49) 3325-4149 | E-mail: allan.borcato@ifsc.edu.br

Ricardo Pieralisi

Centro de Estudos de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civi | Universidade Federal do Paraná | Rua Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Centro Politécnico, Jardim das Américas | Curitiba - PR - Brasil | CEP 82590-300 | Tel.: (41) 3361-3110 | E-mail: ricpieralisi@ufpr.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.