

Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em vigas submetidas ao cisalhamento

Application of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in beams subjected to shear

Diego Andrey Suk 

Vladimir Ferrari 

Resumo

Para o entendimento do comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçadas com fibras de aço e sem a utilização de estribos, foram estudadas experimentalmente vigas por meio de ensaios de flexão. Os parâmetros analisados foram duas classes de resistência à compressão (30MPa e 45MPa) e três quantidades de fibras (40kg/m³, 60kg/m³ e 80kg/m³), além de um traço de referência. Uma comparação analítica dos resultados experimentais com modelos de cálculos de regulamentações normativas e de trabalhos científicos foi estudada para a previsão da força de ruína das vigas. Os resultados experimentais demonstraram ganhos na resistência última ao cisalhamento proporcionado pelas fibras de aço, evidenciando seu grande potencial frente ao esforço de cisalhamento. O modo de ruína das vigas não foi alterado para as quantidades de fibras e classes de resistência estudadas. Porém, maior capacidade de carga e de deformação foi evidenciada com o aumento da quantidade de fibras e do f_{ck} . O modelo da norma brasileira NBR 16935 (ABNT, 2021a) mostrou excelente resultado na previsão da força de ruína das vigas do grupo C30.

Palavras-chave: Vigas de concreto. Fibras de aço. Cisalhamento. Resistência do concreto.

Abstract

For the understanding of the shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups (shear reinforcement), beams were experimentally studied employing bending tests. The analyzed parameters were two classes of compressive strength (30 MPa and 45 MPa) and three dosages of fibers (40 kg/m³, 60 kg/m³ and 80 kg/m³), in addition to the reference trace. An analytical comparison of the experimental results with calculation models from normative regulations and scientific papers was studied to predict the failure force of the beams. The results showed gains in the ultimate shear strength provided by steel fibers, evidencing their great potential against shear stress. The failure mode of the beams was not altered for the dosages of fibers and compressive strength classes studied. However, higher load and deformation capacity was evidenced with an increasing number of fibers and f_c . The model from Brazilian regulation NBR 16935 (ABNT, 2021a) showed excellent results in predicting the failure force of the beams in group C30.

Keywords: Concrete beams. Steel fibers. Shear. Concrete strength.

¹Diego Andrey Suk

¹Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

²Vladimir Ferrari

²Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

Recebido em 30/01/23

Aceito em 28/07/23

Introdução

Segundo o ACI 544.4R (2018), a adição de fibras ao concreto altera de forma significativa o seu comportamento mecânico no estado endurecido e contribui com o desempenho de elementos estruturais por meio da maior resistência às tensões provenientes da tração e melhor controle da propagação das fissuras.

Como resultado da adição de fibras, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) tem comportamento mecânico e modo de ruína modificados quando submetido a esforços de tração (Eva; Lantsoght, 2019). Ainda segundo os autores, as fibras de aço melhoram o comportamento à tração do concreto visto que possibilitam a transferência das tensões entre as faces das fissuras.

Um exemplo de modo de ruína relacionado com as tensões de tração é aquele devido ao efeito do cisalhamento (Yang; Walraven; Den Uijl, 2017).

Tipicamente, elementos estruturais sob efeito de esforços de cisalhamento são dotados de armadura formada por estribos para evitar ruptura frágil por tração. Porém, em certos casos, a armadura de cisalhamento não é desejável (Eva; Lantsoght, 2019). Um exemplo, segundo os autores, é o caso de lajes unidirecionais, onde o uso de armadura de cisalhamento não tem um interessante custo-benefício. Vigas chatas são também exemplos de elementos estruturais em que, sua espessura reduzida e a presença da armadura de cisalhamento geram dificuldades na etapa de concretagem da peça. Pode também ser citado o caso de elementos estruturais em que a moldagem fica prejudicada devido a elevada taxa de armadura.

Para tais situações, a dispersão de fibras de aço no concreto melhora a capacidade da peça no comportamento frente aos efeitos do cisalhamento e reduz ou até mesmo elimina-se a necessidade dos estribos (Eva; Lantsoght, 2019).

As fibras de aço podem ser utilizadas como complemento ou mesmo como substitutas da armadura convencional de cisalhamento formada por estribos (ACI, 2018; ABNT, 2021a). A norma brasileira ainda comenta que os estribos podem ser dispensados quando a segurança for convenientemente verificada e atendida.

As fibras de aço aumentam a resistência ao cisalhamento por meio da transferência das tensões de tração entre as faces das fissuras diagonais e esse mecanismo tem efeito interessante para o caso de vigas sem armadura transversal. Entretanto, pesquisas (Dinh; Parra-Montesinos; Wight, 2011; Shoaib, 2012) deixam claro que a influência das fibras na resposta ao cisalhamento de vigas depende de uma série de fatores, como: volume de fibras, altura útil da seção, relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil, taxa de armadura longitudinal, tipo de agregado, largura da seção e a resistência à compressão do concreto.

Recentemente a ABNT publicou a NBR 16935 (ABNT, 2021a) que traz procedimentos para o projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras e representa uma evolução dos trabalhos publicados pelo Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON) em parceria com a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE).

A norma brasileira tem como principal base de referência o código internacional FIB Model Code (FIB, 2013). Assim, as propriedades mecânicas do CRFA, especificamente as resistências residuais, são determinadas do ensaio normatizado de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos dotados de entalhe central reto passante. Esse ensaio é descrito na NBR 16940 (ABNT, 2021b), que tem como escopo o estabelecimento do método de ensaio para avaliação do comportamento mecânico do CRF na flexão por meio da identificação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais).

Ocorre que, a realização do ensaio conforme a NBR 16940, requer que a máquina de ensaio opere em circuito do tipo fechado de controle da velocidade, por meio de uma taxa constante de abertura do entalhe ou do deslocamento vertical do corpo de prova. O equipamento deve ainda, ter rigidez e capacidade de resposta suficiente para evitar zonas de instabilidade na curva de caracterização: força-abertura do entalhe ou força-deslocamento vertical.

Dessa forma, a caracterização do CRFA com vistas ao projeto de estruturas fica limitada a laboratórios de pesquisas (públicos ou particulares) que tenham equipamento com tais características.

A presente pesquisa procura contribuir com a difusão do conhecimento acerca dos benefícios da utilização do CRFA sob os efeitos do cisalhamento. Para tanto, avalia-se a influência de distintas taxas de fibras de aço e da resistência à compressão do concreto sob a resposta de vigas dotadas somente com armadura longitudinal.

Para tanto, busca a pesquisa comparar analiticamente os resultados experimentais com aqueles provenientes de modelos de cálculos de regulamentações normativas e de trabalhos científicos diversos. Ainda nesse

sentido, avalia-se a utilização de ensaios de caracterização do CFRA realizados em equipamento com circuito aberto para a obtenção das resistências residuais utilizadas na estimativa da capacidade resistente ao cisalhamento das vigas.

Programa experimental

Foram estudados 8 distintos grupos de vigas conforme indicado na Tabela 1. Os grupos 1.1 e 1.2 foram formados, respectivamente, por vigas moldadas com concretos da classe C30 e C45, sem adição de fibras, sendo denominados, portanto, como grupos de referência. Os grupos 2.1, 2.2 e 2.3 foram moldados com concreto C30 reforçado com fibras de aço em taxas, respectivamente, iguais a 40, 60 e 80 kg/m³. Os grupos 3.1, 3.2 e 3.3 foram moldados com concreto C45 reforçado com fibras de aço em taxas, respectivamente, iguais a 40, 60 e 80 kg/m³.

Em cada grupo foram moldadas 5 vigas, 8 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) para caracterização mecânica do concreto (sendo 5 para a resistência à compressão e 3 para ensaio de tração indireta) e 5 corpos de prova prismáticos (seção transversal 100 mm x 100 mm e comprimento de 380 mm) para a determinação da resistência à tração na flexão dos concretos seguindo-se as recomendações da norma Japonesa JSCE-SF4 (1984).

A referida norma descreve o método de ensaio para a determinação da resistência à flexão e tenacidade flexional do CRF por meio de ensaio de flexão em 4 pontos mediante a aplicação contínua de força em taxa de deslocamento do pistão da máquina de ensaio. O tradicional método ainda vem sendo aplicado em pesquisas (citam-se: Bauer *et al.* (2020) e Leite e Castro (2020)) quando não se dispõe de máquina de ensaio que opere em circuito do tipo fechado.

As fibras de aço utilizadas na pesquisa (Figura 1) são comercialmente denominadas por FS3N, classificadas como do tipo A-I conforme NBR 15530 (ABNT, 2019a), dotadas de ganchos nas extremidades, comprimento de 33 mm, diâmetro de 0,75 mm e um fator de forma de 44.

Tabela 1 - Identificação dos grupos

Grupos	CRF	Taxa de fibras	Descrição
1.1	C30-0	0	Concreto referência sem fibras
1.2	C45-0	0	
2.1	C30-40	40 kg/m ³	Concreto classe C30 com fibras
2.2	C30-60	60 kg/m ³	
2.3	C30-80	80 kg/m ³	
3.1	C45-40	40 kg/m ³	Concreto classe C45 com fibras
3.2	C45-60	60 kg/m ³	
3.3	C45-80	80 kg/m ³	

Figura 1 - Fibras de aço



A Figura 2 ilustra o esquema estático do ensaio de flexão em 3 pontos das vigas estudadas, sendo a seção transversal de 80 mm de largura e 130 mm de altura, com comprimento de 750 mm e vão de 680 mm. Todas as vigas foram dotadas de armadura longitudinal posicionada no banzo inferior tracionado da seção e constituída por duas barras de aço CA-50 com 10 mm de diâmetro e equivalente a uma taxa de armadura (ρ) de 1,51%. Essa armadura foi dimensionada considerando tipo de ruína exclusivamente por efeito de cisalhamento para a viga de concreto de referência sem fibras.

O cobrimento de concreto da armadura foi de 15 mm, altura útil da seção transversal (d) é igual a 110 mm e a relação a/d (" a " é o vão de cisalhamento) para todas as vigas estudadas foi de 3,1. É importante mencionar que, o valor da relação a/d é o mesmo de outros estudos experimentais desenvolvidos por pesquisadores como Kwak *et al.* (2002), Minelli e Plizzari (2013) e Aoude *et al.* (2012).

A instrumentação das vigas consistiu na utilização de dois transdutores do tipo LVDT posicionados na seção central das vigas, um em cada face com auxílio do dispositivo rígido denominado Yoke para o correto posicionamento dos transdutores. Os ensaios foram conduzidos sob controle de deslocamento do pistão da máquina de ensaio, primeiramente a uma taxa de 0,15 mm/min até a fissuração do concreto, seguido por uma taxa de 0,30 mm/min até a ruína. Na Figura 3 tem-se o aspecto da viga durante o ensaio de flexão em três pontos.

Para a confecção dos concretos utilizados na moldagem das vigas dos diversos grupos, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland do tipo CP II Z32; areia natural do tipo média com dimensão máxima característica de 1,18 mm, módulo de finura de 1,52 e massa específica igual a 2.640 kg/m³; agregado graúdo do tipo brita zero com dimensão máxima característica de 9,5 mm, módulo de finura de 5,81 e massa específica igual a 2.880 kg/m³.

Para a garantia de mobilidade adequada dos materiais quando misturados, fez-se uso do aditivo superplastificante denominado por ADVA 548, classificado como redutor de água tipo 2 – RA2 conforme NBR 11768-1 (ABNT, 2019b).

O cálculo da dosagem dos materiais dos concretos, como mostrado na Tabela 2, foi feito sem a consideração da presença das fibras de aço e o estabelecimento de uma consistência no valor de 140 mm \pm 20 mm, aferida por meio do Slump Test conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998) – Figura 4. Em cada grupo, a relação água/cimento (a/c) foi mantida constante e o valor do slump foi corrigido por meio da incorporação do aditivo dentro dos limites recomendados pelo fabricante (volume máximo de 1,2% do peso do cimento). A metodologia aqui adotada para a dosagem e produção dos concretos foi a mesma utilizada por Leite e Castro (2020). O consumo de cimento foi de 476 e 512 kg/m³ para os concretos classe C30 e C45, respectivamente.

Figura 2 - Esquema estático das vigas sob flexão em três pontos (em mm)

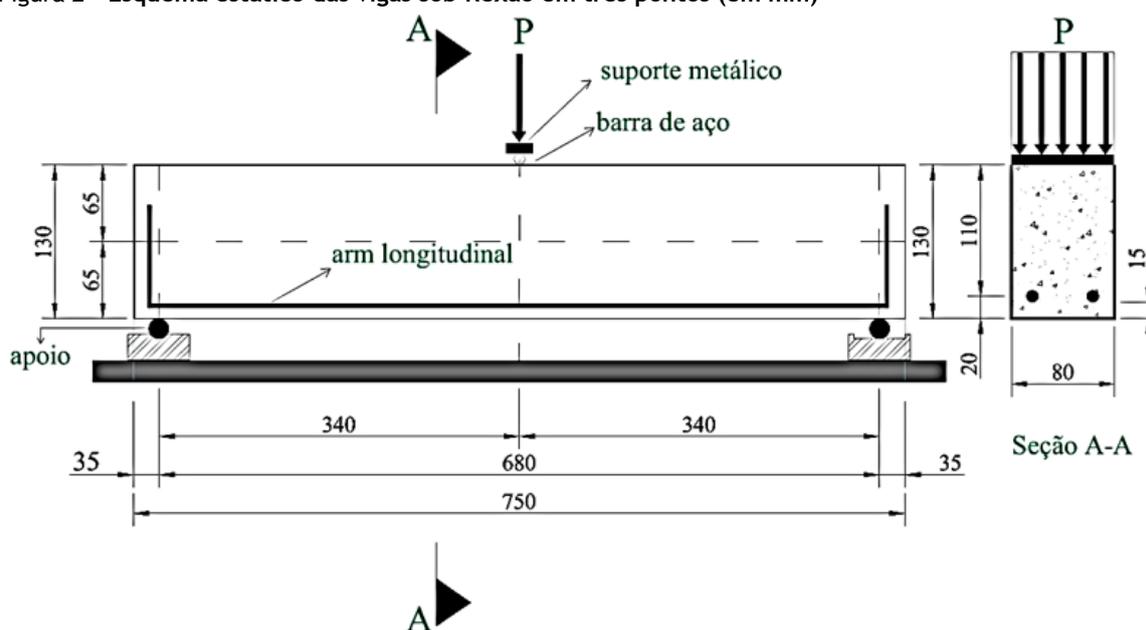


Figura 3 - Viga sob ensaio de flexão em três pontos

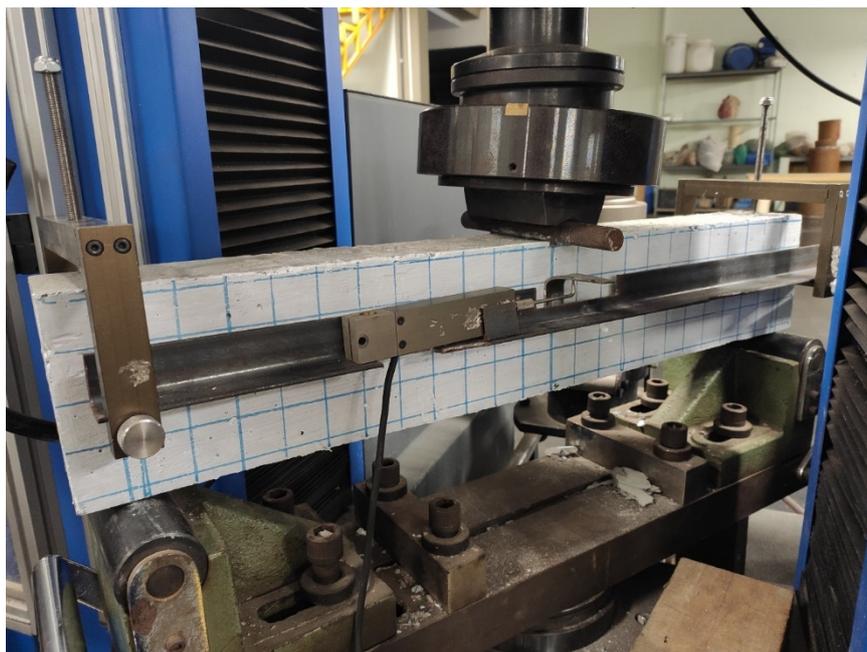


Tabela 2 - Traços dos concretos C30 e C45

Resistência	Cimento	Areia	Brita 0	Água
30 MPa	1	1,45	2,1	0,50
45 MPa	1	1,44	2,0	0,39

Figura 4 - Materiais utilizados na produção dos concretos (a) e slump do grupo C30-0 (b)



Apresentação e análise dos resultados

Caracterização dos concretos

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios das resistências dos concretos de cada grupo e também os resultados do slump das misturas no estado fresco. São indicados os valores da resistência à compressão (f_{cm}) e da tração indireta por compressão diametral ($f_{ctm,cd}$). Esse último ensaio foi realizado para alimentar os modelos analíticos de Narayanan e Darwish (1987) (modelo 2) e Shin, Oh e Ghosh (1994) (modelo 5) de previsão da capacidade resistente ao cisalhamento das vigas indicados no Quadro 1. Os valores das resistências

referem-se à idade da realização dos ensaios nas vigas ocorrido aos 38 dias. São também indicados os valores do desvio padrão das amostras (S_d) e do coeficiente de variação (C_v).

Os valores de slump dos concretos foram aqueles conforme planejado para cada grupo, para tanto, a trabalhabilidade da mistura dos grupos contendo fibras foi corrigida com a adição de aditivo superplastificante. A mobilidade das misturas foi significativamente reduzida com a adição das fibras, porém, a partir da adição de aditivo superplastificante foi possível o reestabelecimento de adequada trabalhabilidade para os concretos. Para os grupos contendo 60 e 80 kg/m³ de fibras, em ambas as classes C30 e C45, a quantidade necessária de aditivo foi a mesma. Logo, o que se verificou foi uma necessidade de uso de aditivo quando da taxa de 40 kg/m³ e um aumento dessa quantidade para a taxa de 60 kg/m³ de fibras. Os valores de aditivo incorporados em cada mistura (em relação ao peso do cimento) estão apresentados na Tabela 3.

Os valores médios da resistência à flexão dos corpos de prova prismáticos (σ_b) calculados segundo a Equação 1 da SF4 (JSCE, 1984) são indicados na Tabela 3. Na Figura 5 tem-se o aspecto geral do ensaio de caracterização realizado nos corpos de prova prismáticos.

$$\sigma_b = \frac{P.L}{b.h^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

P : força de pico (N);

L : vão do corpo de prova prismático (mm); e

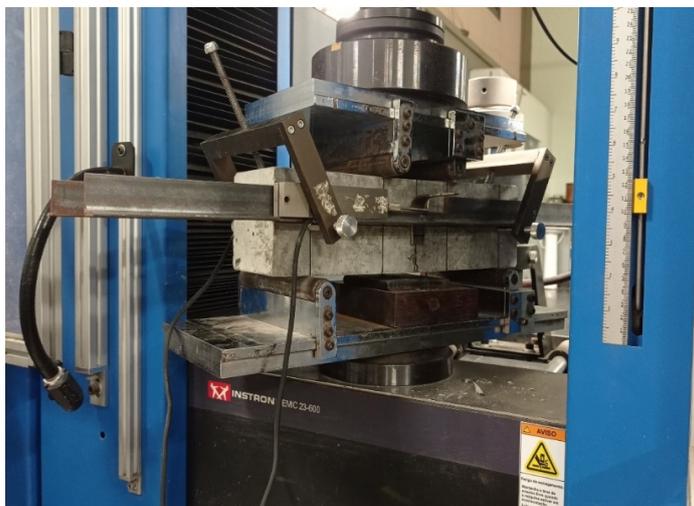
b e h : largura e altura da seção transversal do corpo de prova prismático (mm), respectivamente.

Como se vê, os valores de f_{cm} para os concretos sem fibras foram exatamente aqueles idealizados para os grupos classes C30 e C45, respectivamente. Os resultados de f_{cm} dos concretos dos grupos C30 contendo fibras foram sempre superiores ao grupo sem fibra (C30-0), chegando-se até a 11% de aumento para o C30-40, enquanto para os demais grupos, também ocorreu aumento, mas pouco significativo em cerca de 3%.

Tabela 3 - Valores médios das resistências dos concretos de cada grupo, slump e volume de aditivo

CRF	f_{cm} (MPa)	S_d (MPa)	C_v (%)	$f_{ctm,cd}$ (MPa)	S_d (MPa)	C_v (%)	σ_b (MPa)	S_d (MPa)	C_v (%)	Slump (mm)	Aditiv o (%)
C30-0	30,74	1,14	3,7	2,94	0,18	6,1	4,37	0,38	8,6	165	0
C30-40	34,05	0,61	1,8	2,49	0,20	8,0	4,17	0,32	7,7	120	0,25
C30-60	31,70	0,81	2,6	2,50	0,21	8,5	4,34	0,43	9,8	175	0,40
C30-80	31,64	1,25	4,0	2,91	0,10	3,6	4,53	0,14	3,1	140	0,40
C45-0	45,46	1,89	4,2	3,34	0,01	0,3	3,72	0,38	10,1	180	0,60
C45-40	43,20	0,59	1,4	3,81	0,31	8,1	4,63	0,14	3,1	120	0,65
C45-60	43,78	0,96	2,2	3,46	0,13	3,8	5,09	0,65	12,8	180	0,67
C45-80	45,25	0,97	2,1	4,76	0,58	12,2	6,12	0,24	3,9	160	0,67

Figura5 - Ensaio de caracterização dos corpos de prova prismáticos

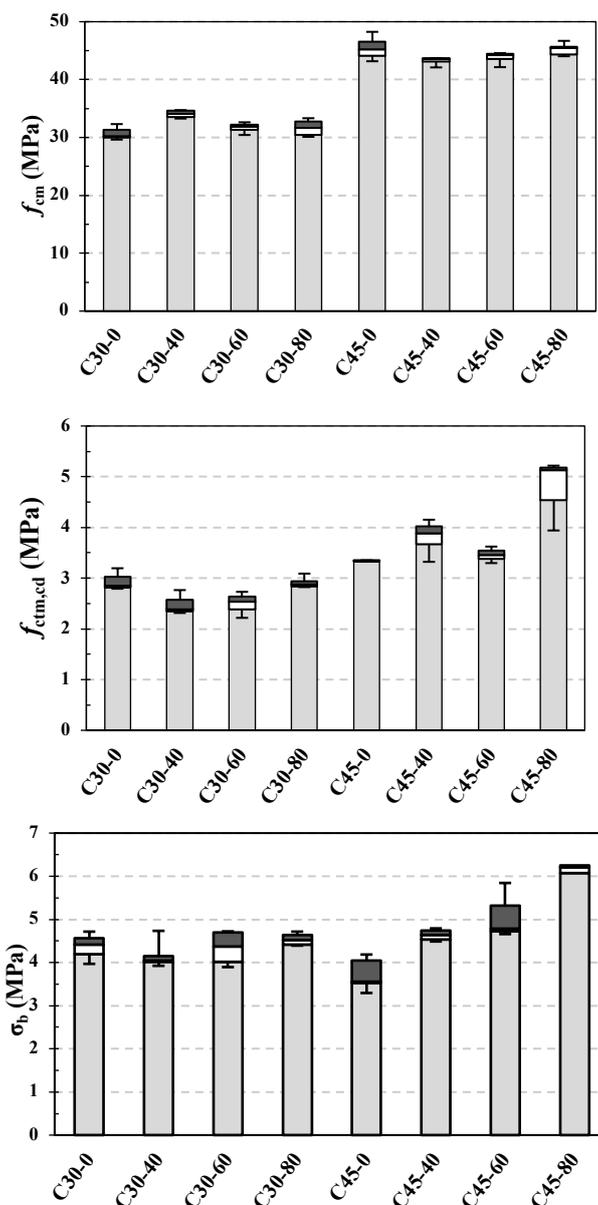


Já, por outro lado, os resultados dos grupos C45 com fibras foram sempre inferiores ao grupo sem fibra (C45-0), porém, a diminuição na resistência à compressão foi pouco significativa e inferior a 5%. De maneira geral, o que se observou é que a adição de fibras no concreto C30 proporcionou aumento na resistência à compressão e diminuição no concreto C45. Entretanto, o aumento e a diminuição foram pouco significativos, ficando restritos em até 5%, exceção apenas ao aumento de 11% observado no C30-40.

Os valores de resistência à compressão obtidos para os grupos estão em conformidade com o destacado pelo 544-1R (ACI, 2009), no sentido de que, as fibras de aço impactam de maneira pouco significativa a resistência a compressão do concreto para taxas de até 120 kg/m³.

Na Figura 6, os valores das resistências à compressão (f_{cm}), à tração indireta ($f_{ctm,sd}$) e flexão (σ_b) são apresentados graficamente e em forma de intervalo são indicados os limites superior e inferior da média dos resultados relacionado a variância.

Figura 6 - Valores das resistências à compressão (f_{cm}), à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sd}$) e à flexão (σ_b)



Nos grupos da classe C30, a adição de fibras diminuiu a resistência $f_{ctm,ed}$ em relação ao grupo sem fibras, porém, notou-se, entre os grupos com fibras, um aumento da resistência com o aumento da quantidade de fibras. Para os grupos da classe C45, a adição de fibras sempre elevou a resistência à tração indireta do concreto em relação ao grupo sem fibras (C45-0). No grupo C45-80 foi observado aumento expressivo de 43%. O resultado apresentado pelo grupo C45-60 foi inferior ao grupo C45-40, o que prejudica a afirmação quanto a tendência de aumento da resistência com o aumento da quantidade de fibras.

Na Figura 7 são apresentadas as curvas médias força-deslocamento de todos os grupos referente à caracterização dos corpos de prova prismáticos quando submetidos à flexão em quatro pontos. Fica evidente que o comportamento frágil do grupo sem fibras (C30-0) foi completamente modificado com a adição das fibras. Pode ser observado pelo detalhe indicado na Figura 6 que, as taxas de 40 kg/m³ e 60 kg/m³ de fibras não proporcionaram aumento na força de pico dos grupos C30-40 e C30-60 em comparação ao grupo sem fibras. Já para a taxa de 80 kg/m³, verificou-se aumento da força de pico de 4% em relação ao grupo sem fibras. De maneira geral, o comportamento na flexão para os grupos classe C30 foi pouco modificado até a força de pico. As modificações significativas foram aquelas pós-pico, onde ficou demonstrada que a capacidade pós-fissuração sempre aumentou com o aumento da taxa de fibras, destacando-se a resposta do grupo C30-80 com maiores valores de resistência residual pós-fissuração e manutenção da capacidade de carga mesmo com elevados valores de deslocamento. Esse grupo, mesmo sendo classe C30, apresentou um comportamento similar ao concreto classe C45 contendo 40 kg/m³ de fibras (C45-40).

A Figura 7 mostra que o comportamento frágil do grupo sem fibras para a classe C45 também foi modificado com a adição das fibras. No caso, para a classe C45, a modificação foi observada antes e após a força de pico. Como se vê, pelos valores de resistência à flexão (σ_b – da Tabela 3) e pelo detalhe indicado na Figura 7, a força de pico em relação ao grupo sem fibras (C45-0) foi aumentada gradativamente com o aumento da taxa de fibras dos grupos em 24,5%, 36,8% e 64,3%, respectivamente para C45-40, C45-60 e C45-80.

Para o trecho pós-pico dos concretos classe C45, fica o destaque para os grupos C45-60 e C45-80 que, apresentaram (ambos) capacidade para manter a força após a fissuração do concreto e até mesmo aumentar a resistência do material.

A evolução das resistências à fissuração (f_{cr}) e a flexão (σ_b) com a taxa de fibras para as duas classes de concreto é apresentada na Figura 8. Para os concretos da classe C30 foram observados aumentos na resistência à flexão, em relação ao grupo sem fibras, apenas para a taxa de fibras de 80 kg/m³. Já para os concretos da classe C45, fica evidenciada a tendência de aumento gradativo nas resistências com o aumento da quantidade de fibras. A resistência à fissuração, em relação ao grupo sem fibras, apresentou aumento nos valores para as taxas de 40 e 60 kg/m³, sendo que para a taxa de 80 kg/m³, o valor da resistência foi praticamente o mesmo observado para a taxa de 60 kg/m³. Para os valores de resistência à flexão foi observado tendência de aumento conforme maior quantidade de fibras.

Figura 7 - Curvas médias força x deslocamento dos corpos de prova de todos os grupos

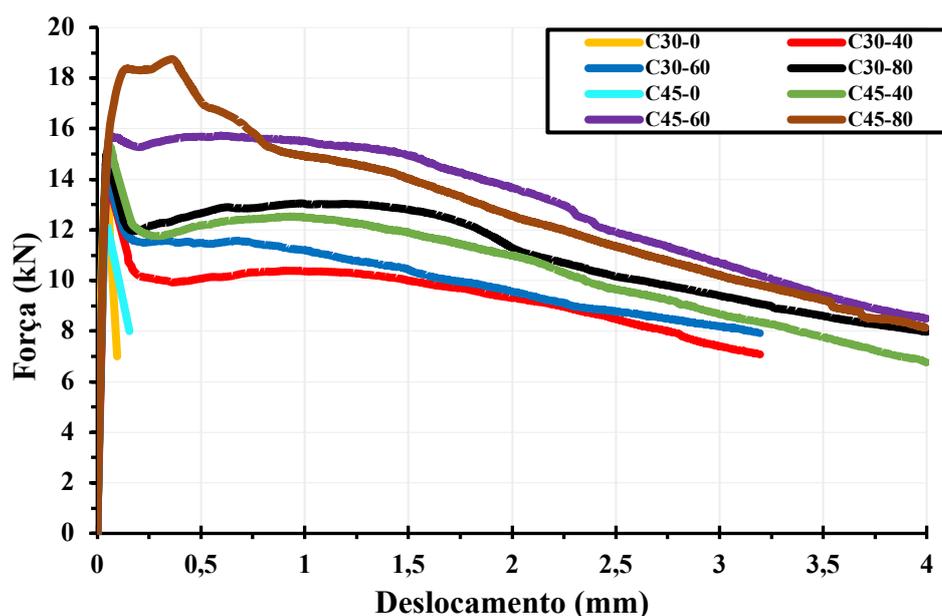
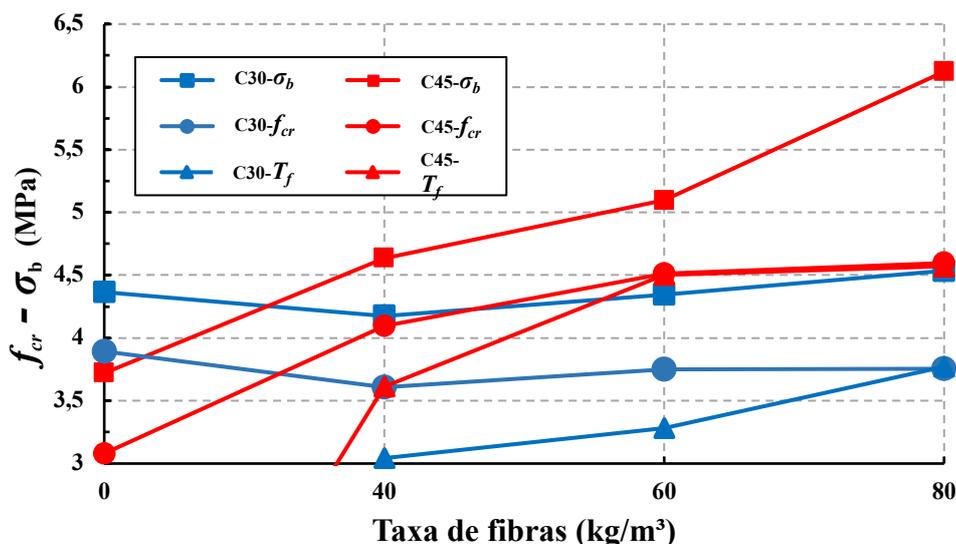


Figura 8 - Evolução da resistência à fissuração (f_{cr}), flexão (σ_b) e fator de tenacidade (T_f) em relação a taxa de fibras



Constata-se dos resultados apresentados que o efeito das fibras proporcionou aumento na tenacidade dos concretos dos grupos de ambas as classes de resistência, mesmo para quantidades baixas de fibras, 40kg/m³. Assim, estes resultados demonstram que após a fissuração da matriz, as fibras possibilitam absorção de energia, traduzida pela manutenção da capacidade de carga.

A resistência à fissuração (f_{cr}) refere-se ao valor de força correspondente ao início do comportamento não-linear da curva força-deslocamento do corpo de prova e o fator de tenacidade (T_f) foi calculado conforme SF4 (JSCE, 1984) e indicado na Equação 2.

$$T_f = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que T_b : tenacidade à flexão (Joules = N.m), calculada pela área determinada abaixo da curva força-deslocamento até o valor de deslocamento correspondente a $\delta_{tb} = \text{vão}/150$.

Comportamento das vigas

Na Figura 9 são apresentadas as curvas médias do comportamento P- δ (força versus deslocamento) das vigas de todos os grupos submetidas ao ensaio de flexão em três pontos.

É notoriamente diferente o comportamento das vigas com concreto contendo fibras em relação às vigas dos dois grupos de referência em concreto sem fibras (C30-0 e C45-0). Fica evidenciada maior rigidez, maior capacidade de carga, maior ductilidade pós-pico e maior capacidade de carga residual das vigas contendo fibras em relação às vigas dos grupos de referência. O efeito da quantidade de fibras mostrou-se diretamente proporcional a obtenção de um melhor desempenho das vigas em termos de capacidade de força máxima de pico e pós-fissuração.

De forma geral, em termos de comportamento, verificou-se para todas as vigas uma resposta elástica e linear até a força de primeira fissura no concreto (P_f) correspondente a uma fissura vertical na seção do meio do vão. Com a primeira fissura, a resposta da viga seguiu com pequena queda de rigidez e ainda linear até o surgimento de uma fissura diagonal de cisalhamento denominada por P_c . Com a fissura de cisalhamento, a queda na rigidez foi bem significativa e, somente nas vigas dos grupos contendo fibras observou-se, a formação de um patamar horizontal/inclinado (conforme o grupo) representativo da capacidade de manter a carga mesmo após o surgimento da fissura diagonal crítica que seguiu até a força máxima de pico (P_u). A força P_u é aquela associada com a ruptura da viga pela propagação e abertura da fissura diagonal crítica. Essa descrição do comportamento das vigas é representada pelo detalhe indicado no canto superior direito da Figura 9 e na Figura 10 tem-se o aspecto da viga quando do surgimento da fissura diagonal crítica (correspondente ao valor de P_c) e o estágio correspondente a força P_u representado pela propagação e abertura da fissura diagonal.

Figura 9 - Curvas médias força x deslocamento das vigas dos grupos estudados

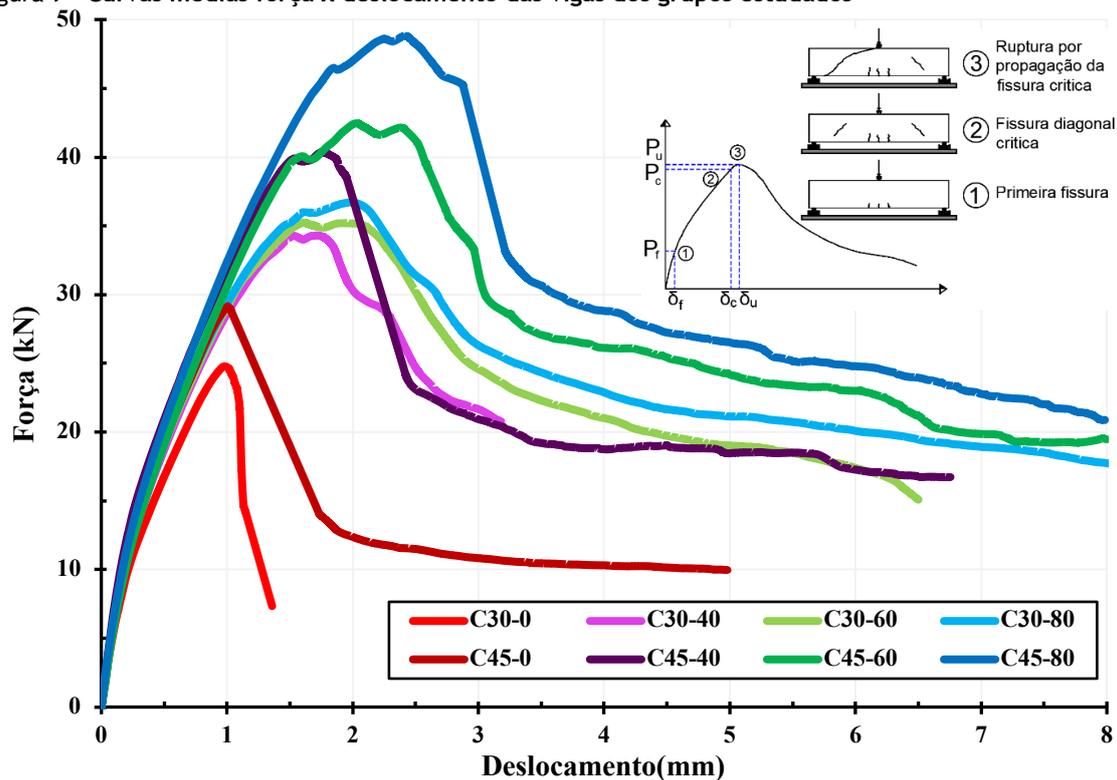
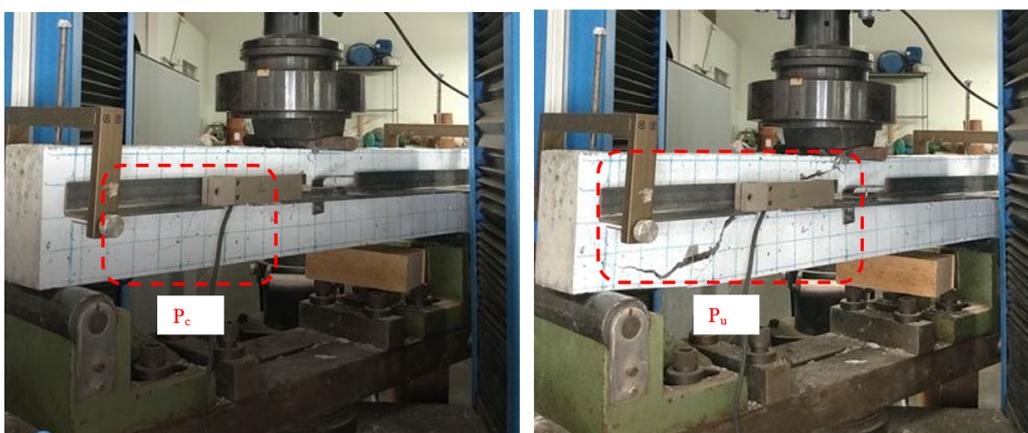


Figura 10 - Indicação do surgimento e da propagação da fissura diagonal crítica



Na Tabela 4 são indicados os valores médios das forças (primeira fissura, fissura crítica e de pico) das vigas de cada grupo e, nas Figuras 11 e 12 esses valores são graficamente comparados. Dos valores indicados observam-se aumentos de, respectivamente, 36,5%, 37,2% e 40,1% na força P_c das vigas dos grupos C30-40, C30-60 e C30-80 em relação ao grupo de referência C30-0. Para a força P_u , os aumentos foram de 38,5%, 46,5% e 52,3% das vigas dos grupos em comparação com o grupo referencial C30-0.

Para a força P_c , os aumentos observados foram, respectivamente, de 31,9%, 38,0% e 55,7% nas vigas dos grupos C45-40, C45-60 e C45-80 em relação ao grupo de referência C45-0. Para a força P_u , os aumentos foram de 36,7%, 46,2% e 63,6% das vigas dos grupos em comparação com o grupo referencial C45-0.

Fica evidenciado, portanto, que os maiores percentuais de ganho de capacidade de carga foram àqueles associados com a maior taxa de fibra (80 kg/m^3) para ambas as classes de concreto C30 e C45. Além disso, as vigas dos grupos da classe C45 apresentaram maiores valores de carga do que as vigas da classe C30. A Figura 12 ilustra a evolução dos valores de forças de cada grupo com a quantidade de fibras conforme a classe do concreto.

Tabela 4 - Forças de primeira fissura (P_f), fissura crítica (P_c) e de pico (P_u) das vigas analisadas

CRF	Força primeira fissura			Força fissura crítica			Força de pico		
	P_f (kN)	S_d	C_v	P_c (kN)	S_d	C_v	P_u (kN)	S_d	C_v
C30-0	9,58	0,17	1,8%	24,89	0,89	3,6%	25,14	0,78	3,1%
C30-40	9,97	0,45	4,4%	33,98	1,06	3,1%	34,82	0,32	9,0%
C30-60	10,39	0,31	2,9%	34,16	2,03	5,9%	36,85	2,49	6,8%
C30-80	10,54	0,58	5,7%	34,86	1,31	3,7%	38,29	2,94	7,7%
C45-0	11,38	0,24	2,1%	30,08	3,24	10,8%	30,83	2,40	7,8%
C45-40	11,44	0,39	3,3%	39,67	2,27	5,7%	42,16	2,3	5,5%
C45-60	11,51	0,47	4,5%	41,51	2,81	6,8%	45,09	4,84	10,7%
C45-80	11,73	0,47	4,0%	46,82	2,44	5,2%	50,44	3,38	6,7%

Figura 11 - Forças de primeira fissura (P_f), fissura crítica (P_c) e de pico (P_u) das vigas analisadas

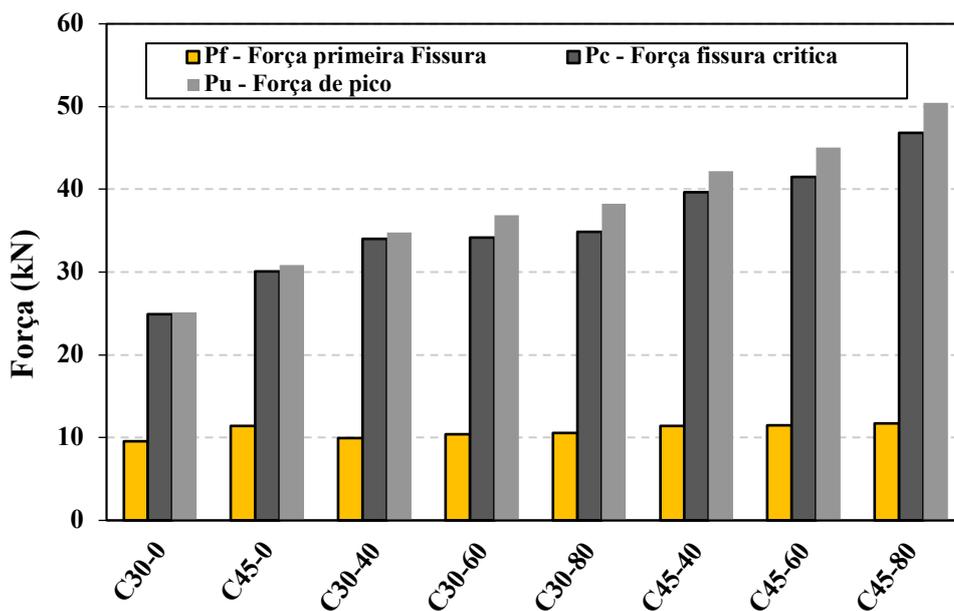
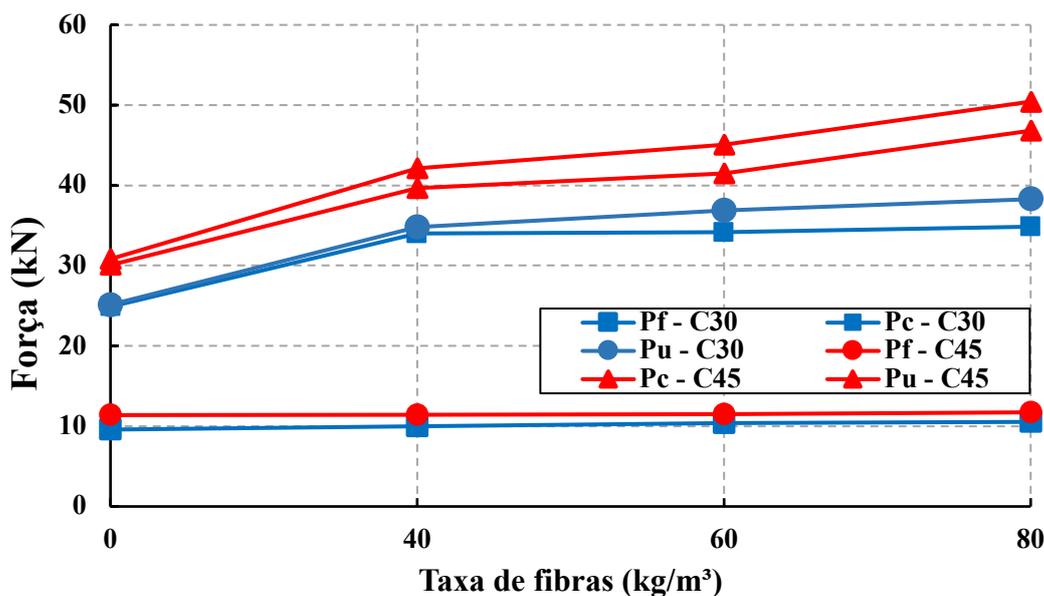


Figura 12 - Evolução das forças de primeira fissura (P_f), fissura crítica (P_c) e de pico (P_u) com a variação da taxa de fibras nas vigas



O estudo também demonstrou aumento na força de primeira fissura com o aumento da quantidade de fibras. Na classe C30 foram observados aumentos de, respectivamente, 4,1%, 8,4% e 10% na força P_f das vigas dos grupos C30-40, C30-60 e C30-80 em relação ao grupo de vigas C30-0. Na classe C45 foram observados aumentos de, respectivamente, 0,5%, 1,1% e 3% na força P_f das vigas dos grupos C45-40, C45-60 e C45-80 em relação ao grupo de vigas C45-0.

Na Tabela 5 são também indicadas as relações entre as forças P_c/P_f e P_u/P_c e os valores das forças correspondentes as deformações limites em relação ao Estado Limite de Serviço indicadas na NBR 6118 (2014) e iguais a 1,94 mm (vão/350) e 2,72 mm (vão/250).

Para os grupos sem fibras C30-0 e C45-0, a relação P_c/P_f foi praticamente a mesma, 2,60 e 2,64, respectivamente, denotando-se que a resistência à compressão não exerceu influência na relação entre essas forças. Por outro lado, com a presença das fibras, os valores da relação P_c/P_f foram da ordem de 3,41, 3,29 e 3,31 para os grupos C30-40, C30-60 e C30-80 e da ordem de 3,47, 3,61 e 3,99 para os grupos C45-40, C45-60 e C45-80, respectivamente. Então, o maior f_{ck} resultou em maiores acréscimos na relação entre a força de fissura diagonal e a força de primeira fissura.

Pelos valores da relação P_u/P_c para os grupos sem fibras, C30-0 (1,01) e C45-0 (1,02), constata-se que após o surgimento da fissura crítica, as vigas não registraram acréscimos significativos no valor da força. Para os grupos contendo fibras, foram registrados acréscimos nos valores de força de até 10% (C30-80) e de 9% (C45-60).

A capacidade das vigas do grupo C45-80 em manter a força mediante o avanço da fissuração e deformação fica revelada pelo valor da relação entre " $P_{1,250}/P_{1,350} = 0,98$ ", como sendo praticamente igual a 1,0. As vigas desse grupo apresentaram a característica de manter o valor da força constante mesmo em estágio avançado da fissuração e aumento da deformação da peça.

Para o grupo de vigas C45-60, o valor dessa relação foi de 0,88 e, ainda menor, para o grupo C45-40 (0,58). Já para os grupos de vigas da classe C30, o valor dessa relação foi de 0,72; 0,77 e 0,79, respectivamente, para C30-40; C30-60 e C30-80. Os resultados revelam a influência direta da resistência do concreto na capacidade resistente pós-fissuração das vigas contendo fibras de aço.

Estimativa da capacidade resistente das vigas ao cisalhamento

Consta na literatura formulações matemáticas representativas de modelos do comportamento de vigas de concreto reforçado com fibras sem o uso de armadura transversal. Neste estudo, para a estimativa da capacidade resistente das vigas, são apresentados e analisados os resultados obtidos por onze modelos analíticos indicados no Quadro 1. Os parâmetros comuns em todos os modelos são listados como legenda, já aqueles parâmetros específicos a cada modelo são descritos junto ao Quadro 1.

O parâmetro "F" refere-se ao fator fibra conforme Equação 3:

$$F = \frac{L_f}{d_f} \cdot \rho_f \cdot V_f \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

L_f , d_f e V_f : comprimento, diâmetro e volume das fibras, respectivamente; e

ρ_f : fator relacionado com a aderência entre fibra e a matriz.

Tabela 5 - Relações entre as forças e correspondentes aos limites vão/350 e vão/250

CRF	Relação		Força para vão/350			Força para vão/250			$P_{1,250}/P_{1,350}$
	P_c/P_f	P_u/P_c	$P_{1,350}$	S_d	C_v	$P_{1,250}$	S_d	C_v	
C30-0	2,60	1,01	-	-	-	-	-	-	-
C30-40	3,41	1,02	31,27	2,52	8,04%	22,66	0,92	4,08%	0,72
C30-60	3,29	1,08	35,21	3,47	9,86%	27,14	2,69	9,90%	0,77
C30-80	3,31	1,10	36,66	4,02	10,96%	29,12	5,05	17,33%	0,79
C45-0	2,64	1,02	12,58	1,85	14,73%	11,14	1,19	10,66%	0,89
C45-40	3,47	1,06	39,81	3,02	7,58%	23,14	3,96	17,13%	0,58
C45-60	3,61	1,09	41,96	2,58	6,15%	36,89	8,22	22,28%	0,88
C45-80	3,99	1,08	46,63	2,08	4,46%	45,88	6,42	13,99%	0,98

Quadro 1 - Modelos analíticos para estimativa da capacidade resistente ao cisalhamento de vigas

Modelo	Autor	Equação
[1]	Sharma (1986)	$V_u = \frac{2}{3} \cdot 0,8 \cdot \sqrt{f_c} \left(\frac{d}{a}\right)^{0,25} \cdot b \cdot d$
[2]	Narayanan e Darwish (1987)	$V_u = \left(e \left(0,24 \cdot f_{ct,sp} + 80 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \right) + \sigma_f \right) \cdot b \cdot d$ <i>e</i> : considera o efeito de arco, como a relação a/d é maior do que 2,8, foi tomado valor igual a 1; $\sigma_f = 0,41 \cdot F \cdot \tau$; $\tau = 4,15 \text{ MPa} \rightarrow$ resistência da aderência entre matriz e fibra.
[3]	Ashour, Hasanaim e Wafa (1992)	$V_u = \left(2,11 \cdot \sqrt[3]{f_c} + 7 \cdot F \right) \cdot \sqrt{\rho \cdot \frac{d}{a}} \cdot b \cdot d$
[4]	Li, Ward e Hamza (1992)	$V_u = \left(1,25 + 4,68 \cdot (f_{fl} \cdot f_{ct,sp})^{3/4} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^{1/3} \cdot \frac{1}{d^{1/3}} \right) \cdot b \cdot d$
[5]	Shin, Oh e Ghosh (1994)	$V_u = \left(0,19 \cdot f_{ct,sp} + 93 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} + 0,83 \cdot \sigma_f \right) \cdot b \cdot d$
[6]	Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999)	$V_u = (0,167 \cdot e + 0,25 \cdot F) \cdot \sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$
[7]	Kwak <i>et al.</i> (2002)	$V_u = \left(3,7 \cdot e \cdot f_{ct,sp}^{2/3} \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a}\right)^{1/3} + 0,8 \cdot \sigma_f \right) \cdot b \cdot d$ $e = 3,4 \cdot \frac{d}{a} \rightarrow$ para $a/d < 3,4$
[8]	Yakoub (2001)	$V_u = \left[0,83 \beta^3 \sqrt{\rho} \left(\sqrt{f_c} + 249,28 \sqrt{\frac{\rho}{\left(\frac{a}{d}\right)^5}} \right) + 0,162 \frac{L_f}{D_f} V_f R_g \sqrt{f_c} \right] \cdot b \cdot d$ Fator geométrico R_g das fibras $R_g = d/a$ para $a/d \leq 2,5$ e $R_g = 0,4$ para $a/d > 2,5$
[9]	Sahoo e Sharma (2014)	$V_u = (0,251 + 0,173 \cdot V_f + 0,069 \cdot V_f^2) \cdot \sqrt{f_c} \cdot b \cdot d$
[10]	NBR 16935 (ABNT, 2021a)	$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{1/3} \right\} \cdot b \cdot d$ γ_c : coeficiente de ponderação, aqui considerado igual a 1,0
[11]	TC TDF-162 (RILEM, 2003)	$V_u = (0,12 \cdot k (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,7 \cdot k \cdot \tau_{fd}) \cdot b \cdot d$ $\tau_{fd} = 0,12 \cdot f_{Rk,4}$

Nota: Legenda: b: largura da seção transversal da viga;

d: altura útil da seção transversal da viga;

a: comprimento do vão de cisalhamento da viga;

f_c : resistência à compressão do concreto;

$f_{ct,sp}$: resistência à tração por compressão diametral do concreto;

V_u : capacidade resistente da seção transversal ao esforço cortante;

ρ : taxa da armadura longitudinal da seção transversal da viga; e

f_{fl} : resistência à flexão do concreto.

Na Tabela 6 são reunidos os dados que caracterizam as vigas de cada um dos grupos e que foram utilizados para a alimentação dos modelos matemáticos.

O modelo da NBR 16935 (ABNT, 2021a) (modelo 10) trata do dimensionamento de elementos lineares de CRF submetidos à força cortante, dotados de armadura longitudinal e sem armadura transversal. O modelo de cálculo da norma e os demais modelos foram neste estudo utilizados para efeito da estimativa da capacidade de carga teórica e comparação com o valor obtido experimentalmente. O parâmetro “k”, representa o fator que leva em conta o efeito escala do elemento, calculado pela Equação 4, em que “d” é a altura útil da seção transversal.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

Eq. 4

Tabela 6 - Dados dos grupos de vigas utilizados nos modelos analíticos

CRF	V _f (%)	F	f _c (MPa)	f _{ct,sp} (MPa)
C30-40	0,51	0,22	34,05	2,49
C30-60	0,77	0,34	31,70	2,50
C30-80	1,02	0,45	31,64	2,91
C45-40	0,51	0,22	43,20	3,81
C45-60	0,77	0,34	43,78	3,46
C45-80	1,02	0,45	45,25	4,76

Nota: L_f: 33 mm d_f: 0,75 mm a: 340 mm d: 110 mm ρ: 1,51%

A resistência característica à tração direta do CRFA é representada pelo parâmetro “f_{ftuk}”, calculada pelas Equações 5 e 6.

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

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad \text{Eq. 6}$$

O valor último da abertura de fissura (w_u) foi considerado como sendo igual a “w_u = 1,5 mm”. Os parâmetros “f_{R1}” e “f_{R3}” representam, respectivamente, os valores característicos das resistências residuais equivalente ao CMOD₁ = 0,5 mm e CMOD₃ = 2,5 mm. No estudo, o controle do ensaio de caracterização do CRF não foi realizado pelo *clip gauge*, então, a Equação 7 (indicada no item 6.1 da NBR 16940 (ABNT, 2021b)) será utilizada para equivalência entre os valores de CMOD e deformação vertical (δ):

$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04 \quad \text{Eq. 7}$$

Assim, estabelecida a equivalência entre δ e CMOD, foi possível determinar os valores de forças residuais associadas com as deformações equivalentes δ₁ e δ₃ (F_j) e, conseqüentemente os valores de resistência residual (f_{R,j}) foram calculados pela Equação 8.

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Eq. 8}$$

A resistência característica do concreto sem fibras à tração direta (f_{ctk}) aqui será tomado como sendo os valores que foram determinados experimentalmente.

Na Tabela 7 são indicados os resultados obtidos para a capacidade teórica resistente ao esforço cortante da seção transversal das vigas de cada grupo conforme os modelos matemáticos. Os resultados analíticos representados pelo termo (V_{u,teor}) são comparados com os experimentais (V_{u,exp}) por meio do valor da relação V_{u,exp}/V_{u,teor} apresentada entre parênteses.

Para facilitar a visualização geral dos resultados obtidos, apresenta-se por meio da Figura 13 os valores da relação entre V_{u,exp}/V_{u,teor}. A linha tracejada em preto refere-se ao valor unitário e representa modelo com excelente estimativa da capacidade resistente ao cisalhamento da viga. Os resultados abaixo e acima da linha tracejada representam, respectivamente, estimativa contra a segurança e a favor da segurança.

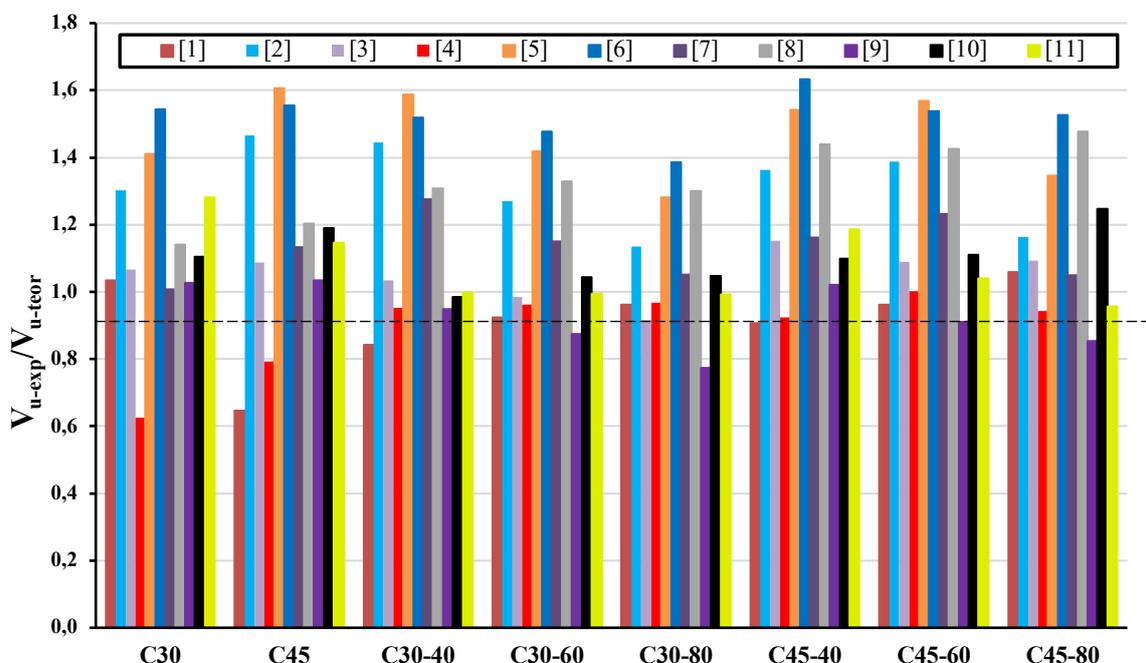
Fundamentado na Figura 13, os modelos propostos por Sharma (1986) (modelo 1), Li, Ward e Hamza (1992) (modelo 4) e Sahoo e Sharma (2014) (modelo 9) apresentaram as estimativas de força última ao cisalhamento contra a segurança (resultados < 1 em relação aos valores médios das forças de ruína obtidas experimentalmente), isto é, os modelos resultaram em forças superestimadas para as vigas ensaiadas. As formulações propostas por Ashour, Hasanaim e Wafa (1992) (modelo 3), Kwak *et al.* (2002) (modelo 7), o modelo da NBR 16935 (ABNT, 2021a) (modelo 10) e da RILEM (RILEM, 2003) (modelo 11) apresentaram as melhores aproximações entre a força prevista analiticamente e a obtida experimentalmente. Os modelos Narayanam e Darwish (1987) (modelo 2), Shin, Oh e Ghosh (1994) (modelo 5), Khuntia, Stojadinovic e Goel (1999) (modelo 6) e Yakoub (2001) (modelo 8) mostraram ser bastante conservadores para as vigas estudadas.

Deve ser registrado a excelente resposta obtida pelos modelos da NBR 16935 (ABNT, 2021a) (modelo 10) e da RILEM (RILEM, 2003) (modelo 11). Para os grupos da classe C30, a força V_{u,teor} é praticamente igual a força V_{u,exp} (erro menor que 5%). Já para a classe C45, foi observada maior divergência entre V_{u,teor} e V_{u,exp}. A divergência, no modelo (modelo 10) aumenta com o aumento da quantidade de fibras revelando uma tendência de discrepância da equação com o aumento da resistência do concreto.

Tabela 7 - Capacidade resistente teórica ao cisalhamento e comparação com a capacidade resistente experimental

CRF	V_{u-exp} (kN)	Modelos: V_{u-teor} (kN)										
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
C30-40	17,41	20,65 (0,84)	12,05 (1,45)	16,84 (1,03)	18,27 (0,95)	10,97 (1,59)	11,46 (1,52)	13,66 (1,27)	13,31 (1,31)	18,34 (0,95)	17,68 (0,98)	17,44 (1,00)
C30-60	18,42	19,93 (0,92)	14,52 (1,27)	18,71 (0,98)	19,17 (0,96)	13,00 (1,42)	12,47 (1,48)	16,01 (1,15)	13,86 (1,33)	21,06 (0,87)	17,65 (1,04)	18,53 (0,99)
C30-80	19,14	19,91 (0,96)	16,87 (1,13)	20,89 (0,92)	19,80 (0,97)	14,94 (1,28)	13,82 (1,39)	18,22 (1,05)	14,73 (1,30)	24,71 (0,77)	18,29 (1,05)	19,30 (0,99)
C45-40	21,08	23,26 (0,91)	15,47 (1,36)	18,31 (1,15)	22,84 (0,92)	13,67 (1,54)	12,90 (1,63)	18,15 (1,16)	14,65 (1,44)	20,66 (1,02)	19,17 (1,10)	17,77 (1,19)
C45-60	22,54	23,42 (0,96)	16,25 (1,39)	20,68 (1,09)	22,49 (1,00)	14,37 (1,57)	14,66 (1,54)	18,30 (1,23)	15,81 (1,43)	24,75 (0,91)	20,30 (1,11)	21,69 (1,04)
C45-80	25,22	23,81 (1,06)	21,67 (1,16)	23,09 (1,09)	26,76 (0,94)	18,74 (1,35)	16,53 (1,53)	24,02 (1,05)	17,08 (1,48)	29,55 (0,85)	20,22 (1,25)	26,38 (0,96)
Média		0,94	1,29	1,04	0,96	1,46	1,52	1,15	1,38	0,90	1,09	1,03
C_v (%)		7,06	9,11	7,33	2,61	7,99	4,74	7,17	5,11	8,79	7,71	7,29

Figura 13 - Relação entre a capacidade cisalhante resistente experimental e teórica dos grupos de vigas de concreto reforçado com fibras de aço



Os resultados teóricos obtidos pelos modelos da NBR 16935 (ABNT, 2021a) (modelo 10) e da RILEM (RILEM, 2003) (modelo 11) revelam que a formulação pode ser aplicada tendo-se como referência valores da caracterização do concreto reforçado com fibras a partir de ensaios por meio de controle de deslocamento do pistão, mas com registro de deslocamento da viga com uso de LVDT em suporte rígido do tipo Yoke.

Conclusões

O objetivo geral deste trabalho consistiu em analisar o comportamento ao esforço cisalhante de vigas de concreto de pequenas dimensões reforçadas com fibras de aço (CRFA) sem a utilização de armadura transversal (estribos). Para o estudo, foram utilizadas diferentes quantidades de fibras de aço (40, 60 e 80 kg/m³) e duas classes de resistência do concreto 30 MPa e 45 MPa. Após os ensaios e a análise dos resultados, é possível tecer as conclusões:

- (a) a resistência à compressão dos grupos de concreto não sofreu alteração significativa com a adição das fibras de aço. Nos concretos C30 foram observados ligeiros aumentos e nos concretos C45 uma diminuição foi constatada;
- (b) a inclusão das fibras de aço resultou em ganhos de resistência à tração por compressão diametral para os grupos de concreto C45, diferentemente da classe C30, na qual a presença das fibras reduziu a resistência;
- (c) a resistência à tração na flexão mostrou que, para um mesmo conteúdo de fibras, os grupos C45 exibiram ganhos de resistências à fissuração e flexão superiores aos grupos da classe C30. Destaque para o grupo C45-80 que obteve um aumento de 49% e 40% nas resistências à fissuração e flexão, respectivamente;
- (d) a adição das fibras de aço retardou a queda brusca da capacidade resistente das vigas de concreto após o surgimento da força de fissura crítica (P_c);
- (e) a força última das vigas de CRFA foi significativamente maior com a presença das fibras. Para a classe C45 os ganhos foram, de maneira proporcional, maiores que a classe C30 devido a maior interação entre a fibra e a matriz como observado nos ensaios de caracterização na flexão. Aumentando o volume de fibras, a força da primeira fissura foi gradualmente majorada para a classe C45, já para C30, não se constatou considerável diferença entre as três quantidades de fibras;
- (f) o modo de ruína das vigas não foi modificado com a adição das fibras, isto é, tanto os grupos de concreto simples como os de concreto reforçado com fibras apresentaram uma única fissura diagonal de cisalhamento;
- (g) a resistência do concreto influenciou diretamente na capacidade resistente pós-fissuração das vigas. Observou-se que para maior resistência, maior foi a capacidade da viga em manter constante o valor da força mesmo com o avanço da fissuração e deformação da viga;
- (h) dentre as formulações utilizadas para as previsões das forças últimas de cisalhamento das vigas, os modelos de Sharma (1986) (modelo 1), Li, Ward e Hamza (1992) (modelo 4) e Sahoo e Sharma (2014) (modelo 9) apresentaram as previsões contra a segurança (força experimental/força teórica < 1). As formulações propostas por Ashour, Hasanain e Wafa (1992) (modelo 3), Kwak *et al.* (2002) (modelo 7), o modelo da NBR 16935 (ABNT, 2021a) (modelo 10) e da RILEM (2003) (modelo 11) apresentaram as melhores aproximações entre a força prevista e a obtida experimentalmente; e
- (i) os modelos da NBR 16935 (ABNT, 2021a) (modelo 10) e da RILEM (2003) (modelo 11) apresentaram força última praticamente igual a força de ruína para os grupos C30. Os resultados do modelo da norma brasileira NBR 16935 (modelo 10) mostram tendência de aumento da divergência entre valores teóricos e experimentais com o aumento da resistência do concreto.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R**: report on fiber reinforced concrete. Farmington Hills, 2009.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.4R**: guide to design with fiber-reinforced concrete. Farmington Hills, 2018.
- AOUDE, H. *et al.* Response of steel fiber-reinforced concrete beams with and without stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 109, 2012.
- ASHOUR, S. A.; HASANAIN, G. S.; Wafa, F. F. Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. **ACI Structure Journal**, v. 89, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: aditivos químicos para concretos de cimento Portland: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2019b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: fibras de aço para concreto: requisitos e método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019a.
- 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 armado: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BAUER, A. L. *et al.* Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 3, 2020.
- DINH, H. H.; PARRA-MONTESINOS, G. J.; WIGHT, J. K. Shear strength model for steel fiber reinforced concrete beam without stirrup reinforcement. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, p. 1039-1051, 2011.
- EVA, O.; LANTSOGHT, L. Database of shear experiments on steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. **Materials**, v. 12, n. 917, p. 1-36, 2019.
- FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. **FIB Bulletin 65: Model Code 2010**, Model for concrete structures, v. 1. Lausanne, 2013.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Tokyo, 1984. n. 3.
- KHUNTIA, M.; STOJADINOVIC, B.; GOEL, S. C. Shear strength of normal and high-strength fiber reinforced concrete beams without stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 96, 1999.
- KWAK, Y. K. *et al.* Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 99, n. 4, p. 530-538, 2002.
- LEITE, A. M.; CASTRO, A. L. Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 3, p. 543-562, 2020.
- LI, V. C.; WARD, R.; HAMZA, A. M. Steel and synthetic fibers as shear reinforcement. **ACI Materials Journal**, v. 89, 1992.
- MINELLI, F.; PLIZZARI, G. A. On the effectiveness of steel fibers as shear reinforcement. **ACI Structural Journal**, v. 110, 2013.
- NARAYANAN, R.; DARWISH, I. Y. S. Use of steel fibers as shear reinforcement. **ACI Structural Journal**, v. 84, n. 3, p. 216-227, 1987.
- RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX. **TC 162-TDF**: test and design methods for steel fibre reinforced concrete sigma-epsilon-design method. **Materials and Structures**, v. 36, 2003, p. 560-657.
- SAHOO, D. R.; SHARMA, A. Effect of steel fiber content on behavior of concrete beams with and without Stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 111, p. 1157-1166, 2014.
- SHARMA, A. K. Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. **ACI Journal Proceedings**, v. 83, n. 4, p. 624-628, 1986.
- SHIN, S. W.; OH, J. G.; GHOSH, S. K. Shear behavior of laboratory-sized high-strength concrete beams reinforced with bars and steel fibers. **ACI Special Publications**, v. 142, 1994.
- SHOAIB, A. **Shear in steel fiber reinforced concrete members without stirrups**. Edmonton, 2012. Doctor – Thesis, University of Alberta, Edmonton, 2012.
- YAKOUB, H. E. shear stress prediction: steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 108, 2001.
- YANG, Y.; WALRAVEN, J.; DEN UIJL, J. A. Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, 2017.

Diego Andrey Suk

Conceptualization, Data curation, formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing - original draft.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Maringá | Av. Colombo, 5790, Jardim Universitário | Maringá - PR - Brasil | CEP 87020-900 | Tel.: (44) 99850-3653 | E-mail: diego.a.suk@gmail.com

Vladimir Ferrari

Conceptualization, formal analysis, Methodology, Supervision, Writing - review & editing.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Maringá | Tel.: (44)-3011-1336 | E-mail: vladimirjf@hotmail.com

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

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.