



Análise da Eficiência de Concreto Reforçado com Fibras em Pilares Submetidos à Flexão Composta Reta

Sinara de Aquino Sousa¹, Joaquim Eduardo Mota²

¹Universidade Federal do Ceará / sinaradeaquino@gmail.com

²Universidade Federal do Ceará / jemota@fortalnet.com.br

Resumo

A incorporação de fibras ao concreto convencional tem por objetivo melhorar a resistência pós-fissuração de uma peça estrutural, pois as fibras contribuem para que as partículas do concreto permaneçam unidas, minimizando-se, dessa forma, a concentração de tensões causada pela fissuração e aumentando, conseqüentemente, a tenacidade do compósito. O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) funciona eficientemente quando o elemento estrutural composto desse material é submetido à tração, no entanto não possui a mesma eficácia quando se trata de compressão. Sendo assim, ainda existem poucos estudos científicos relacionados ao uso do CRF em pilares – em que o esforço predominante é de compressão – se comparados às pesquisas relacionadas às vigas, as quais o esforço dominante é a flexão. Entretanto, quando as forças transmitidas não são centradas no centro de gravidade (CG) do pilar, como é o caso real das edificações, esforços de tração são gerados. Portanto, no decorrer do referente trabalho, estuda-se o comportamento de pilares compostos de CRF submetidos à Flexão Composta Reta no Estado Limite Último (ELU), verificando se, ao final, que as fibras são favoráveis à capacidade resistente da seção transversal do pilar. À princípio, as informações relacionadas às fibras, ao CRF e à flexão composta reta são apresentadas e, posteriormente, evidencia-se o uso do CRF em pilares na situação descrita. A elaboração de uma planilha e a plotagem de gráficos comparativos, baseados no Modelo Rígido-Plástico, contribuem para a visualização do acréscimo do valor do momento fletor resistente quando comparado ao concreto sem fibras e demonstra que quanto maior o teor de fibras maior a resistência à flexão do elemento.

Palavras-chave

Concreto Reforçado com Fibras; Flexão Composta Reta; pilar.

1. Introdução

A indústria da Construção Civil, assim como as demais, precisa ser atualizada constantemente para que seus materiais e suas metodologias não permaneçam ultrapassados simplesmente pela conformidade com o que já existe e também por falta de pesquisas a respeito de todos os processos envolvidos.

Sendo o concreto material de construção amplamente utilizado, é primordial que seja objeto de estudos científicos com intuito de seu aprimoramento, tanto do ponto de vista técnico como econômico. Um dos produtos desenvolvidos a partir de pesquisas a respeito desse composto é o Concreto Reforçado com Fibras (CRF).

O objetivo da incorporação de fibras ao concreto convencional é, segundo Monte *et al* (2014, p. 133), melhorar a resistência pós-fissuração, pois as fibras contribuem para que as partículas sólidas do concreto permaneçam unidas, minimizando, dessa forma, a concentração de tensões causada pela fissuração, aumentando-se a tenacidade do compósito. Callister *et al* (2016, p.170) define a tenacidade como sendo “a propriedade indicativa da resistência de um material à fratura quando uma trinca está presente”, podendo ser ainda dimensionada como a energia absorvida pelo conjunto antes e após a ruptura da matriz, ou seja, com a adição de fibras ao compósito melhora-se a

ductilidade da peça, propriedade essa a qual o concreto possui baixíssimos valores se comparados aos do aço.

De acordo com Guimarães (1999, p.44), existem diversos tipos de fibras no mercado como, por exemplo, as metálicas, poliméricas, minerais e naturais, sendo as duas primeiras as mais utilizadas. Além da variedade de fibras, suas aplicações também são diversas como, por exemplo, pisos térreos, peças pré-moldadas, revestimento de túneis, vigas de pontes e concretos projetados.

Os estudos a respeito do CRF, inclusive os dos autores citados acima, sempre chegam a mesma conclusão de que as fibras trabalham bem quando a peça é submetida à flexão, mas que não possuem alteração significativa quando submetida à compressão. Dessa forma, existem várias pesquisas tendo como objeto de estudo as vigas, por terem como esforço predominante a flexão, mas os pilares são deixados de lado, visto que, os esforços predominantes são de compressão. No entanto, quando as forças transmitidas não são centradas no centro de gravidade (CG) da peça estrutural, como é o caso real das edificações, esforços de flexão são gerados, o que leva ao questionamento principal do referente trabalho que é descobrir se o uso de concreto com fibras é vantajoso em pilares que apresentam flexão composta reta.

2. Justificativa

Apesar dos avanços recentes dos estudos relacionados ao Concreto Reforçado com Fibras e das novas normas referentes publicadas, ainda existem diversas composições e aplicações do CRF que devem ser melhor analisadas, como é o caso de seu comportamento quando utilizado em pilares. Essa falta de interesse no uso do CRF em pilares se deve ao fato de que esses elementos possuem esforços predominantes de compressão, o que pode levar à ideia errônea de que os esforços de tração não estão presentes. A dificuldade de realização de ensaios que envolvem pilares também é outra questão que desestimula a produção de trabalhos científicos, além disso, há um interesse maior por experimentos de reforço nos quais as fibras são utilizadas externamente à peça estrutural e não na composição do concreto. Tendo em vista o déficit de pesquisas sobre o uso de fibras adicionadas ao concreto constituinte de pilares e a dificuldade de materialização de estudos por meio de experimentações, justifica-se a produção de novas investigações como a que se segue no referente trabalho.

3. Comportamento mecânico do Concreto Reforçado com Fibras

De acordo com Medeiros (2012, p.57), o propósito das fibras não é modificar a resistência à compressão do concreto, apesar disso, devido ao incremento de tenacidade proveniente das fibras, um elemento composto de CRF pode apresentar melhor desempenho, mesmo que limitado, quando submetido à compressão, a depender da dosagem. No entanto, se o teor de fibras for superior a 2% em volume, o concreto poderá apresentar decréscimo de seu módulo de elasticidade, prejudicando sua resistência devido ao fato de que, em uma peça comprimida, o material mais importante é o concreto, que trabalha predominantemente à compressão, e quando as fibras são adicionadas e não misturadas adequadamente, essas podem aumentar o teor de ar dentro do compósito, fazendo com que a resistência decaia. Por esse motivo, a maioria dos estudos do CRF são de elementos submetidos à esforços preponderantes de tração.

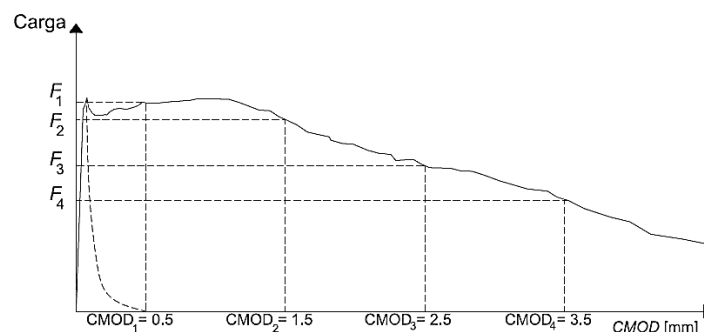
A contribuição das fibras em uma peça de CRF tracionada é, conforme Sarzalejo *et al* (2014, p.28), significativa, essencialmente na fase de pós-fissuração. No entanto, deve-se utilizar dosagens a partir de 1,5% (em volume), caso não existam adições como a sílica ativa na mistura, para que o emprego das fibras seja relevante. Um elemento de concreto com fibras em sua composição pode apresentar dois comportamentos, quando tracionados, designados de *softening* (para baixas percentagens de fibras) e *hardening* (para altas percentagens de fibras), sendo o primeiro “caracterizado pela redução gradual dos valores de força abaixo da força crítica” e o segundo pelo “aumento inicial dos valores de força com múltipla fissuração antes de se atingir a força máxima”. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021, p.5). Ou seja, quanto maior a quantidade de fibras, mais a peça se deformará antes de atingir sua ruptura.

A flexão é um estado em que um elemento pode estar submetido tanto a tensões de tração bem como a tensões de compressão, sendo, portanto, um caso mais abrangente que os anteriores. O mecanismo de funcionamento das fibras em peças estruturais submetidas à flexão é explicado por Figueiredo (2011, p.29), esclarecendo que, no surgimento de uma fissura ocorrem desvios de tensões fazendo com que haja acúmulo de tensões nas extremidades da fissura que pode ocasionar o colapso repentino da estrutura caso a resultante das tensões de tração seja acima da crítica suportada. Isso acontece, como já mencionado anteriormente, porque o concreto apresenta comportamento frágil, tornando sua ruptura abrupta se a tensão de ruptura for superada.

As fibras funcionam então como “ponte de transferência” de tensões, fazendo com que a ruptura do elemento aconteça gradualmente, dando mais tempo, por exemplo, para reparos estruturais. O reforço proveniente da fibra é tanto elástico, como oriundo do atrito com a matriz, assim, a fibra se desloca a partir da borda da fissura transferindo por atrito as tensões recebidas, além de alongar-se durante o processo. Assim, as fibras proporcionam, por conseguinte, maior resistência e maior módulo de elasticidade ao concreto. (FIGUEIREDO, 2011, p.40).

Existe no Brasil uma norma específica para avaliar o comportamento mecânico do CRF na flexão e determinar as resistências à tração na flexão que é a ABNT NBR 16940:2021 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio. A partir do ensaio é possível construir o gráfico de carga x CMOD (medida linear da abertura do entalhe na face inferior do corpo de prova) e determinar as resistências à tração indiretas (resistência à tração na flexão) do CRF (f_L , f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} e f_{R4}). Também são obtidas as resistências à tração direta (f_{Ftu} e f_{Fts}) por meio de análise inversa. O gráfico citado é apresentado a seguir.

Gráfico 1 – Diagrama típico de cargas versus CMOD



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021, p. 5) – Adaptada.

4. Pilares compostos por CRF submetidos à Flexão Composta Reta (3 páginas)

4.1. Elementos Lineares compostos de CRF no ELU

Usualmente, em uma peça de concreto armado, o concreto suporta a compressão e a armadura passiva a tração a qual o elemento está submetido. Para Fusco (1985, p.2), o Estado de Limite Último (ou de deformação plástica excessiva) ocorre quando há ruptura do concreto ou quando a armadura passiva se deforma mais do que o estabelecido.

Algumas hipóteses são consideradas para o estudo da capacidade resistente de uma peça de concreto convencional no Estado Limite Último, visto que a análise estrutural é feita a partir de modelos simplificados, mas que são capazes de representar a realidade. Essas premissas são citadas por Fusco (1985, p.5), que são:

- Manutenção da seção plana: As seções dos elementos não sofrem variações em sua seção até o ELU;
- Solidariedade dos materiais: Adota-se que a deformação de uma barra de armadura é igual a deformação específica do concreto lhe é adjacente, ou seja, existe solidariedade entre as barras e o concreto que a envolve;

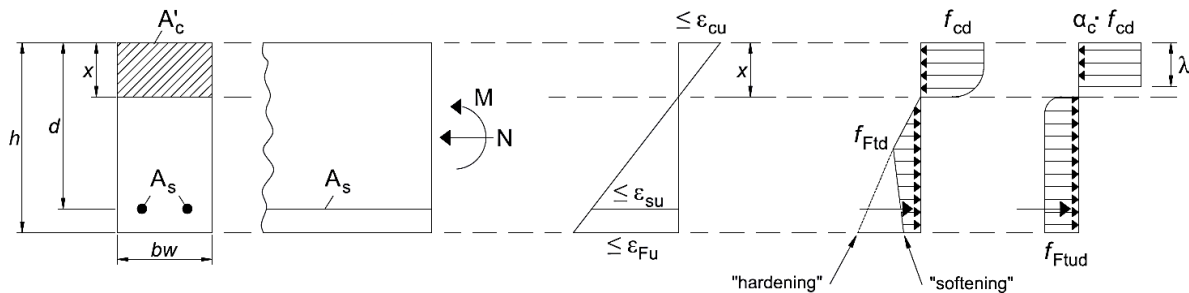
- c) As tensões de tração no concreto são desprezadas;
- d) Diagrama de Tensões Parábola-Retângulo: Para concretos de classes de resistência do grupo I (C20 até C50), o encurtamento do concreto (ϵ_{cu}) é de $3,5 \times 10^{-3}$ na flexão pura e $2,0 \times 10^{-3}$ na compressão axial, variando na compressão excêntrica. O diagrama de Tensões Parábola-Retângulo é composto por uma parábola do 2º grau com o vértice na fibra equivalente a deformação de compressão de 2 ‰, prolongada por uma reta até a deformação de compressão de 3,5 ‰. Sendo a ordenada máxima de $0,85f_{cd}$;
- e) Alongamentos últimos das armaduras: Convenciona-se o alongamento último da armadura tracionada (ϵ_{su}) como sendo 10 ‰ que são contados a partir da linha neutra (LN), que é a linha que possui tensão nula e divide a seção;
- f) Diagrama retangular de tensões: Com o intuito de simplificação, pode-se considerar que a distribuição das tensões de compressão (σ_{cd}) seja retangular. Os resultados são semelhantes aos do diagrama parábola-retângulo, que vêm a divergir significativamente apenas no domínio 5.

Conforme a ABNT NBR 16935:2021 um elemento linear de CRF sujeito a solicitação normal atinge o Estado Limite Último quando uma das situações é alcançada:

- a) máxima deformação de compressão no CRF, ϵ_{cu} ;
- b) máxima deformação de tração no aço (se existir), ϵ_{su} ;
- c) deformação última do CRF, ϵ_{Fu} .

Os valores máximos de ϵ_{cu} e ϵ_{su} são de 3,5 ‰ e 10 ‰, respectivamente, assim como apresentado os valores para o concreto convencional. Já para elementos de CRF que possuem comportamento *hardening*, tem-se $\epsilon_{Fu} = 20$ ‰ para distribuições de tensões variáveis ao longo da seção transversal e $\epsilon_{Fu} = 10$ ‰ para distribuições de tensões de tração ao longo da seção transversal. Além disso, a tração no concreto é considerada fazendo com que os valores dos coeficientes de ponderação das resistências sejam levemente superiores aos do concreto convencional devido à implementação das fibras que aumenta a tenacidade do compósito. O diagrama simplificado para uma seção de uma peça retangular de CRF é apresentado a seguir.

Figura 1 – ELU para elementos lineares de CRF



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021, p. 16) - Adaptada.

Ademais, existem duas hipóteses de leis constitutivas que podem ser utilizadas para análise de seções com objetivo de determinação do momento resistente no ELU, considerando o comportamento pós-fissuração: o modelo Rígido-Plástico e o modelo Linear.

O modelo Rígido-Plástico é adotado quando as não linearidades são consideradas e só deve ser aplicada para verificações de Estado Limite Último. Nessa análise utiliza-se como valor de referência f_{Ftu} , que representa a resistência à tração direta última do CRF, onde:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{F3}}{3} \quad (1)$$

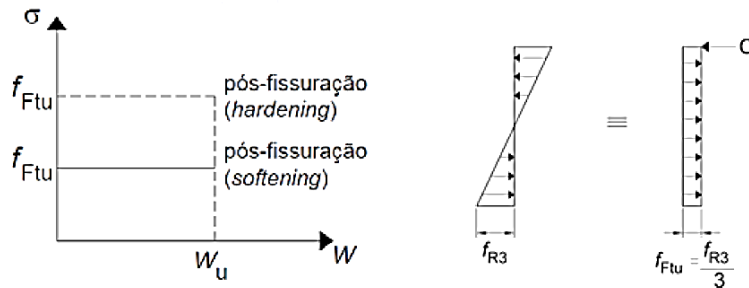
Em que:

- f_{Ftu} é a resistência à tração direta do CRF, valor último (em kPa ou MPa);

- f_{F3} é a resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao $CMOD_3 = 2,5$ mm (determinado conforme a ABNT NBR 16940:2021, em kPa ou MPa).

Considera-se a equivalência estática e a hipótese de que toda a resistência de compressão está concentrada na parte superior da seção. Esse modelo não é indicado quando os efeitos de segunda ordem global são considerados na determinação dos esforços, que é o caso dos pilares.

Figura 2 – Modelo Rígido-Plástico



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021, p. 6) - Adaptada.

Já para o Modelo Linear tem-se que, conforme a ABNT NBR 16935 (2021, p.13), “na análise linear, admite-se o comportamento elástico-linear do CRF. Os valores para o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson podem ser adotados de acordo com o material concreto simples, sem a adição de fibras”. Esse modelo utiliza os seguintes valores de referência:

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad (2)$$

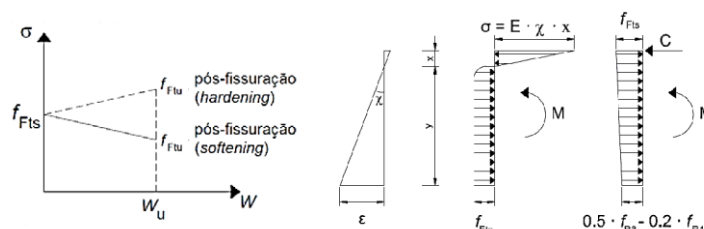
$$f_{Ftuk} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} \cdot (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad (3)$$

Onde:

- f_{R1} é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao $CMOD_1$;
- f_{R3} é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao $CMOD_3$;
- f_{Fts} é a resistência característica à tração direta de serviço do CRF;
- f_{Ftuk} é a resistência característica à tração direta última do CRF;
- w_u é a abertura de fissura última para o valor de $CMOD$ considerado no projeto;
- $CMOD_3 = 2,5$ mm.
- As resistências podem ser dadas em kPa e os deslocamentos em (mm), sendo os valores limites de $CMOD$ para f_{Fts} e f_{Ftuk} , respectivamente, de 1,5 mm e 2,5 mm.

O momento resistente é obtido a partir do diagrama de tensão de tração ao longo da seção, conforme mostrado a seguir.

Figura 3 – Modelo Linear



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021, p. 6) - Adaptada.

4.2. ELU com a contribuição das fibras na Flexão Composta Reta em Pilares

A Flexão Composta Reta (ou Normal) ocorre quando a força normal e momento fletor atuam simultaneamente em determinada seção fazendo com que a peça fique submetida a esforços de tração ou compressão ou ambos.

Santos (1983, p.502) divide a Flexão Composta Reta em três categorias: tração simples e flexo-tração com pequena excentricidade, flexo-compressão e flexo-tração com grande excentricidade e flexo-compressão com pequena excentricidade. Visto que as fibras contribuem na ductilidade de uma peça estrutural quando submetidas à tração e que os pilares são submetidos predominantemente a esforços de compressão, o estudo de fibras nesses elementos foi realizado no caso de flexão composta com grande excentricidade, o qual existem esforços de tração na parte inferior da seção transversal, abrangendo os domínios 2, 3 e 4, nos quais uma armadura está tracionada (A_s) e outra comprimida (A_s').

O Modelo Linear já considera as fibras misturadas ao compósito desde as equações de equilíbrio. Esse modelo já considera as fibras misturadas ao compósito. Sendo assim, a partir das hipóteses de Fusco e das premissas descritas na NBR 16935, determinam-se, para uma seção de pilar, a força e o momento do CRF resistentes à tração expostos a seguir.

Para o somatório de forças:

$$R_f = f_{Ftud} \cdot (h - x) \cdot b \quad (4)$$

$$N_d = R_c + R_s - R_s' - R_f \quad (5)$$

$$N_d = 0,68 \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_s' \cdot \sigma_{sd}' - A_s \cdot \sigma_{sd} - f_{Ftud} \cdot (h - x) \cdot b \quad (6)$$

Para o somatório de momentos em $h/2$:

$$M_d = 0,68 \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4x\right) + (A_s' \cdot \sigma_{sd}' + A_s \cdot \sigma_{sd}) \cdot \left(\frac{h}{2} - d'\right) + R_f \cdot \left(\frac{x}{2}\right) \quad (7)$$

$$M_d = 0,34 \cdot b \cdot d^2 \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,8x\right) + (A_s' \cdot \sigma_{sd}' + A_s \cdot \sigma_{sd}) \cdot \left(\frac{h}{2} - d'\right) + f_{Ftud} \cdot b \cdot \frac{(h-x)}{2} \cdot x \quad (8)$$

Sendo:

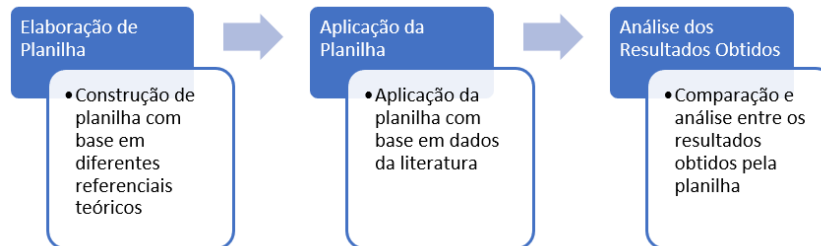
- R_c é a resultante de compressão do concreto (em unidade de força);
- R_f é a força resistente proveniente do CRF com fibras (em unidade de força);
- R_s é a reação da armadura inferior (em unidade de força);
- R_s' é a reação da armadura superior (em unidade de força);
- A_s é a área da seção da armadura inferior (em unidade de área);
- A_s' é a reação da seção da armadura superior (em unidade de área)
- σ_{sd} é a tensão normal no aço de armadura inferior (em MPa ou kPa)
- σ_{sd}' é a tensão normal no aço de armadura superior (em MPa ou kPa)
- f_{Ftud} é a resistência de cálculo à tração direta última do CRF;
- b equivale a largura da seção (em unidade de comprimento)
- N_d é a força normal de cálculo da seção (em unidade de força)
- M_d é momento de cálculo da seção (em unidade de força x distância)
- e é a excentricidade da força normal com relação ao CG (em unidade de comprimento)
- h é a altura da seção transversal da peça (em unidade de comprimento)
- d' é a distância entre o eixo da armadura de compressão e a face mais próxima do elemento (em unidade de comprimento)
- x é a distância até a fibra extrema mais comprimida
- d é a altura útil da seção transversal

- β_x é o número adimensional resultante da divisão de x por d
- f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto

5. Metodologia

Apresenta-se abaixo o passo a passo da metodologia utilizada no referente trabalho.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Elaborado pelos autores.

5.1. Elaboração de planilha de cálculo para verificação

Com o intuito de verificar a contribuição das fibras nos esforços resistentes de uma seção retangular de pilar composto de CRF submetido à flexão composta com grande excentricidade, desenvolveu-se uma planilha de cálculo fundamentando-se no Modelo Linear, tendo em vista que basta acrescentar a força e o momento proveniente das fibras nas equações dos esforços resistentes totais da seção e que o método rígido-plástico não é indicado para estudo dos pilares.

A planilha foi produzida embasando-se na bibliografia apresentada no decorrer do trabalho e, para utilizá-la, deve-se fornecer os dados de entrada, os quais são necessários para que os resultados sejam calculados e gerados para o usuário. Os dados a serem fornecidos à planilha são:

- Dados da seção
- Posição e área das armaduras
- Dados do concreto

Estabeleceram-se então intervalos para x/d até o limite do domínio 4, definindo-se o x correspondente para cada caso por meio da divisão de x/d pela altura útil (d). Por conseguinte, calcula-se, para cada x , as deformações do concreto e de cada barra de aço baseando-se nas equações de compatibilidade e nos valores referentes ao CRF. As tensões equivalentes de cada barra são encontradas multiplicando-se as deformações pelo módulo de elasticidade do aço CA-50.

Em seguida, as forças e os momentos resistentes tanto do concreto quanto das armaduras longitudinais são calculadas segundo as equações 6 e 8.

Por fim, somam-se os valores das forças e momentos do concreto, das armaduras e das fibras encontrando-se os valores totais para cada x . Um gráfico (N_d x M_d) também é plotado com as curvas dos esforços resistentes referentes ao concreto com e sem adição de fibras.

5.2. Aplicação numérica da planilha desenvolvida

Para aplicação numérica da planilha elaborada utilizaram-se os dados de caracterização do concreto apresentados por Maués (2019, p.44), o qual realizou diversos experimentos com concreto adicionado de fibras metálicas, variando-se a quantidade de fibras (45 kg/m^3 , 60 kg/m^3 e 75 kg/m^3) utilizadas. A dosagem do composto empregado é detalhada abaixo.

Tabela 1 – Dosagem do CRF utilizado

Concreto	Cimento ^a (kg/m ³)	Areia ^b (kg/m ³)	Brita ^c (kg/m ³)	a/c	Fibras ^d		Aditivo ^e (ml/m ³)
					(kg/m ³)	(%)	
CF0W0					0	0	0
CF0W13					0	0	0
CF45W0	380	696	1022	0,54	45	0,6	320
CF60W0					60	0,8	640
CF75W0					75	1,0	800

^a CPH E32; ^b Areia média: Módulo de Finura = 2,92; ^c Brita 0: Diâmetro Máximo = 9,5mm NBR NM 248(2003); ^d Dramix3D 65/60; ^e Super Plastificante de Alto Desempenho MC-PowerFlow 1180;

Fonte: Maués (2019, p.44) – Adaptada.

As resistências à compressão dos concretos são informadas abaixo.

Tabela 2 – Resistências características dos concretos utilizados

Concreto	f _{ck} (MPa)
CF45W0	28,2
CF60W0	29,3
CF75W0	29,3

Fonte: Maués (2019, p.46) – Adaptada.

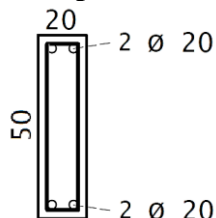
As resistências residuais à tração na flexão foram calculadas com base em um ensaio de tração na flexão semelhante ao descrito na norma ABNT NBR 16940:2021. Os valores encontrados por Maués (2019, p.49) estão a seguir.

Tabela 3 – Resistências residuais à tração na flexão dos concretos utilizados

Concreto	f _{Lp} (MPa)	f _{R1} (MPa)	f _{R2} (MPa)	f _{R3} (MPa)	f _{R4} (MPa)
CF45W0	3,94	3,88	5,60	5,75	5,77
CF60W0	4,92	6,76	9,28	9,45	9,28
CF75W0	5,27	11,16	14,76	18,54	17,72

Fonte: Maués (2019, p.49) – Adaptada.

A largura e altura da seção retangular, bem como as armaduras e sua disposição ficam a critério do usuário, sendo assim, optou-se por uma seção de 20 cm x 50 cm e armaduras de bitola de 20 mm (área da seção de cada uma de 3,14 cm² aproximadamente) como mostrado na figura abaixo. O valor adotado para a abertura de fissura última (w_u) foi de 1,5 mm.

Figura 5 – Seção de pilar selecionado para análise

Fonte: Elaborado pelos autores.

Salienta-se que as armaduras e sua disposição foram selecionadas para efeitos de estudo. As disposições normativas da NRB 6118 devem ser seguidas para cálculo da armadura de pilares.

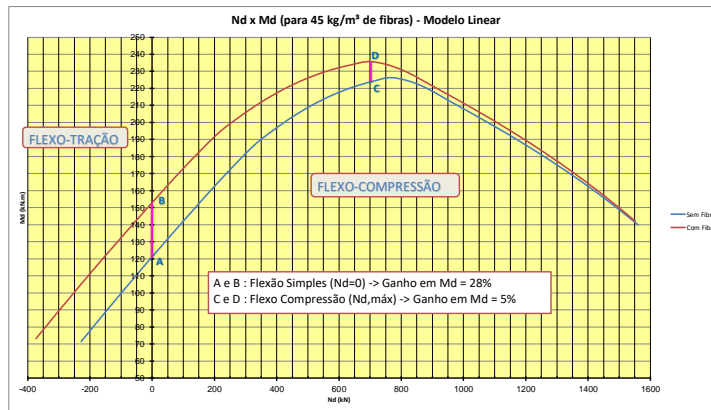
6. Conclusões

A partir da utilização dos dados provenientes da literatura, foi possível realizar estudos comparativos entre os resultados obtidos para o momento resistente por meio da planilha elaborada, os quais serão detalhados a seguir.

Os valores para a força normal resistente não serão considerados para análise visto que existe pouca influência das fibras na resistência à compressão, assim como visto no referencial teórico.

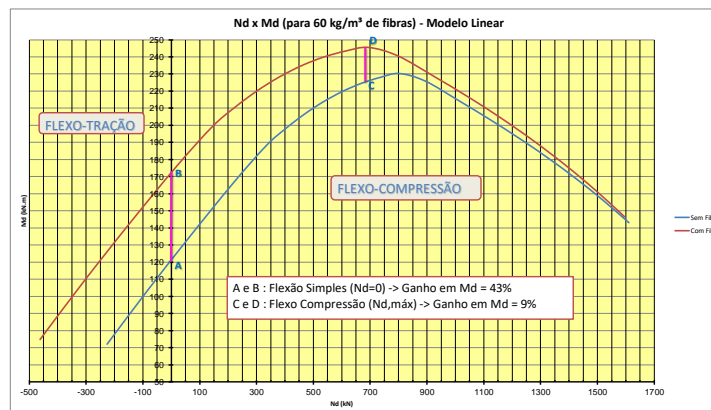
As curvas $Nd \times Md$ para cada quantidade de fibras encontram-se abaixo.

Gráfico 2 – Curva $Nd \times Md$ para CRF com 45 kg/m^3 de fibras metálicas



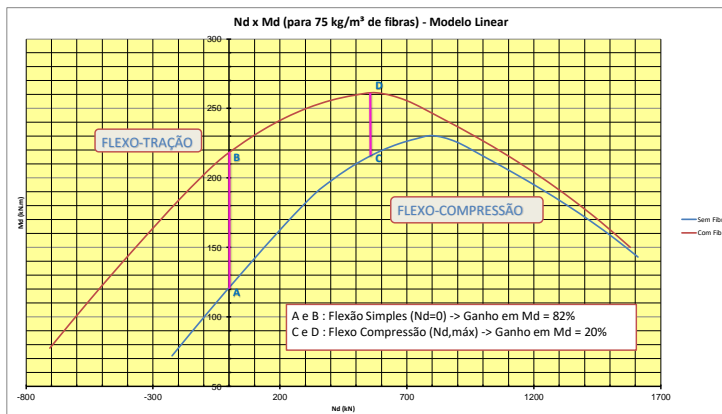
Fonte: Elaborado pelos autores.

Gráfico 3 – Curva $Nd \times Md$ para CRF com 60 kg/m^3 de fibras metálicas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Gráfico 4 – Curva $Nd \times Md$ para CRF com 75 kg/m^3 de fibras metálicas



Fonte: Elaborado pelos autores.

A planilha abaixo apresenta um resumo do acréscimo percentual para cada teor de fibra adotado variando-se o x, comparando-se o antes (sem fibras) com o depois (com incremento das fibras). Os números obtidos entre os teores não são comparados entre si inicialmente.

Tabela 4 – Acréscimo no Momento Resistente Total com a incorporação das fibras metálicas

x (m)	Acréscimo no Momento Resistente Total (%) (Comparação com o concretos sem fibras)		
	CF45	CF60	CF75
0,02	2,40	3,86	7,84
0,05	3,21	5,15	10,45
0,07	3,50	5,61	11,39
0,09	3,56	5,70	11,57
0,12	3,71	5,93	12,04
0,14	3,97	6,35	12,89
0,16	4,15	6,64	13,47
0,19	4,27	6,81	13,83
0,21	4,32	6,89	13,99
0,24	4,32	6,89	13,98
0,26	4,26	6,80	13,80
0,28	4,16	6,63	13,45
0,31	4,10	6,53	13,26
0,33	4,09	6,51	13,22
0,35	3,99	6,35	12,89
0,38	3,79	6,03	12,23
0,40	3,47	5,52	11,21
0,42	3,02	4,80	9,73
0,45	2,39	3,80	7,71
0,47	1,54	2,45	4,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos momentos resistentes da seção de CRF tiveram acréscimos significativos quando comparados aos valores obtidos sem a incorporação de fibras, sendo, para x igual a 0,21 m os acréscimos de 4,32 % para o concreto com 45 kg/m³ de fibras, 6,89% para o CRF com 60 kg/m³ de fibras e 13,99% para o 75 kg/m³ de fibras presentes. Esses valores demonstram que a tenacidade do compósito foi aumentada, elevando-se as resistências na flexão, o que fez com que a peça se tornasse mais dúctil. Ou seja, a seção com fibras suporta esforços de flexão maiores do que a peça sem a incorporação das fibras metálicas.

Além da comparação do concreto sem fibras com o CRF, realizou-se a comparação entre os teores de CRF's adotados variando-se o x, os quais os valores seguem abaixo.

Tabela 5 – Valores dos Momentos Resistentes Totais para cada teor de fibra analisado

x (m)	Momento Resistente Total (kN.m)		
	CF45	CF60	CF75
0,02	73,08	74,75	77,61
0,05	104,78	107,98	113,42
0,07	136,98	141,54	149,28
0,09	170,02	175,79	185,55
0,12	192,42	199,25	210,74
0,14	202,72	210,47	223,41
0,16	211,65	220,15	234,26
0,19	219,20	228,30	243,30
0,21	225,36	234,92	250,52
0,24	230,15	240,01	255,93
0,26	233,56	243,56	259,53
0,28	235,59	245,59	261,31
0,31	230,82	240,66	255,85
0,33	218,94	228,46	242,85
0,35	207,16	216,22	229,52
0,38	195,21	203,66	215,58
0,40	182,88	190,56	200,82
0,42	169,99	176,75	185,08
0,45	156,43	162,12	168,22
0,47	142,08	146,54	150,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que, a partir dos resultados obtidos, à medida que mais fibras são adicionadas ao concreto, a resistência à tração da peça aumenta e, conseqüentemente, diminui-se a propagação e amplitude de fissuras, com aumento em torno de 25,72 kN.m no momento resistente entre um CRF de 45 kg/m³ de fibras para o de 75 kg/m³ de fibras em x igual a 0,28. Sendo assim, uma peça mais durável é produzida para teores apresentados, visto que a entrada de agentes patológicos se dá por meio da abertura de fissuras.

Todos os gráficos de $N_d \times M_d$ para CRF apresentam deslocamento vertical quando comparados ao concreto sem fibras, indicando o ganho no momento resistente, sendo o maior acréscimo para o CRF de 75 kg/m³ de fibras, o qual possui ganho de 82% em M_d no caso de flexão simples e 20% na flexo-compressão. Demonstrando que, assim como apresentado na literatura, quanto maior a quantidade de fibras incorporadas, maior a eficiência da seção do elemento no combate aos esforços solicitantes.

Com a ênfase dada a pilares, comprovou-se, por meio dos resultados obtidos, o aumento do momento resistente na seção transversal em pilares compostos de CRF submetidos à flexão composta com grande excentricidade quando comparados ao concreto sem adição de fibras. E que o aumento da seção resistente é proporcional ao aumento do teor de fibras.

Em suma, a crença de que o uso de CRF em pilares não é adequado foi desmentida com base em evidências teóricas e dados numéricos.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16940: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2016.
- FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. Concreto reforçado com fibras. 2011. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- FUSCO, P. B. Estruturas de concreto: Solicitações normais. 9. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1985.
- GUIMARÃES, Ana Elisabete Paganelli. Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- MAUÉS, Kássio Anderson Castro. Eficácia das fibras de aço no reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem estribos: Investigação experimental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- MEDEIROS, Arthur. Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.
- MONTE, Renata *et al.* Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 132-149, 2014, <https://doi.org/10.1590/S1517-70762014000200008>.
- SARZALEJO, Antonio Gallovich *et al.* Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto: Manual Técnico. São Paulo: Maccaferri America Latina, 2014. Disponível em: <https://www.maccaferri.com/br/documentos/manual-tecnico/>. Acesso em 18 out. de 2022.
- SANTOS, L. M. Cálculo de Concreto Armado, v.1. São Paulo: LMS, 1983.