Revista Boletim do Gerenciamento

Site: www.nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento

Análise do comportamento à flexão de estruturas de concreto reforçadas com fibras de aço

Analysis of the Flexural Behavior of Concrete Structures Reinforced with Steel Fibers

FARIAS, Marina Barroso de [1]; SANTOS, Amaro Francisco Codá dos [2]
marinabfarias@gmail.com; coda.engenharia@uol.com.br

[1]Pós-graduanda em Planejamento, Gestão e Controle de Obras Civis, NPPG/POLI – UFRJ, Rio de Janeiro.
[2]Professor Convidado do Núcleo de Pesquisas em Planejamento e Gestão (NPPG), UFRJ, Rio de Janeiro.

Informações do Artigo

Palavras-chave:
Concreto fibroso
Modelagem numérica
Comportamento à flexão

Key word:
Fiber-reinforced Concrete, Numerical Modeling, Flexural Behavior

Resumo:

Na área da construção civil, há uma busca constante por materiais que tenham desempenho cada vez melhor em relação à resistência e à durabilidade. O concreto fibroso, ao longo do tempo, vem se mostrando uma excelente alternativa ao concreto simples, tendo uma maior capacidade de carga e controle de fissuração. Dentre as opções da constituição das fibras, destacam-se as fibras de aço, que são largamente utilizadas. Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento de uma viga de concreto com reforço de fibras de aço (CRFA) submetida à uma flexão de 3 pontos e compará-la com uma viga de concreto simples. Para isso, foi realizada uma modelagem numérica não-linear com um software comercial, utilizando o método dos elementos finitos. Após a obtenção dos resultados numéricos e a comparação com resultados experimentais existentes em referenciais teóricos, notou-se que houve uma boa representação do comportamento da viga em relação à curva carga-deflexão e à fissuração.

Abstract

In the field of civil construction, there is a constant search for materials with increasingly better performance in terms of strength and durability. Over time, fiber-reinforced concrete has proven to be an excellent alternative to plain concrete, offering greater load capacity and crack control. Among the fiber options, steel fibers stand out and are widely used. This study aims to analyze the behavior of a concrete beam reinforced with steel fibers (CRSF) subjected to three-point bending and compare it with a plain concrete beam. For this purpose, a non-linear numerical modeling was performed using commercial software, employing the finite element method. After obtaining the numerical results and comparing them with existing experimental results in theoretical references, it was noted that there was a good representation of the beam's behavior in relation to the load-deflection curve and cracking.

1. Introdução

O concreto é o segundo produto mais utilizado no mundo, estando apenas atrás da água, e é o material mais utilizado na construção civil. Seus componentes são: cimento, água, agregados finos (areia) e agregados graúdos (brita). Uma das grandes vantagens deste material é sua grande resistência à compressão. Combinando o concreto com a armadura de aço (que possui grande resistência à tração), tem-se o concreto armado, que é um dos sistemas estruturais mais importantes e utilizados na construção civil. Além da adição de armadura de aço, há uma alternativa muito eficaz para o aumento da resistência à tração do concreto: a adição de fibras à matriz cimentícea. [1]

Segundo Maccaferri [2], os materiais fibrosos são utilizados desde a antiguidade, estando presentes desde a época do Egito antigo, em que se misturavam palha e pelo de cavalo à argila na confecção dos tijolos de adobe, proporcionando um grande aumento à sua resistência à flexão. Já as fibras de aço são muito mais recentes, sendo os primeiros estudos datados da década de 50.

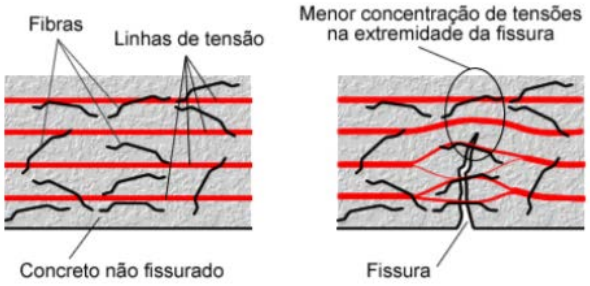
Uma das principais limitações do concreto convencional é seu comportamento frágil, havendo um nível baixo de deformação antes da ruptura, que ocorre de maneira brusca. [3] Para a melhoria do comportamento à ruptura e aumento da resistência, surge, então, uma excelente alternativa: o concreto fibroso.

Por meio deste trabalho, será possível destacar as vantagens do concreto fibroso em relação ao concreto convencional e demonstrar seu comportamento à flexão.

2. Concreto Fibroso

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um material compósito constituído de duas fases principais: a matriz do concreto e as fibras, que podem ser constituídas de diferentes materiais, como aço, polipropileno, vidro, entre outros. O concreto fibroso possui em sua composição cimento Portland, água, agregados e fibras descontínuas e discretas.[1] Segundo Trindade et al. [4], as fibras promovem a diminuição de propagação de fissuras, sendo criada uma ponte de transferência de tensão quando se abrem as fissuras, conforme demonstrado na Figura 1, e, consequentemente, ocorre o controle da abertura de fissuras e aumento da resistência à tração do concreto. [2]

Figura 1 - Linhas de tensão no concreto fibroso



Fonte: Barros [3]

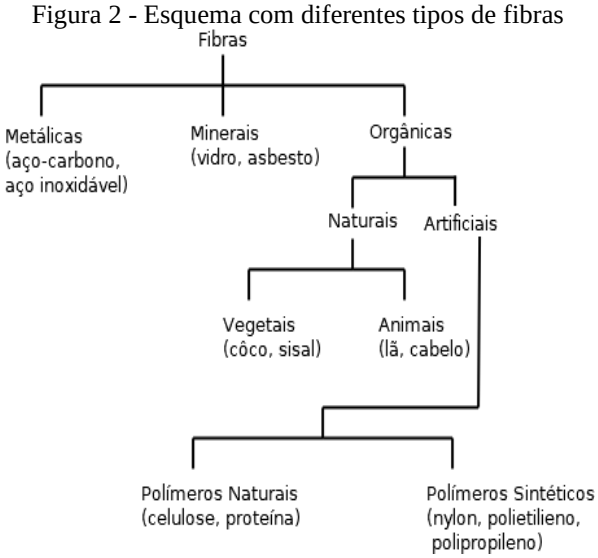
É importante ressaltar que a fissuração é a manifestação patológica mais frequente nas estruturas de concreto, sendo este um problema que exige muita atenção. Segundo Helene [5], as manifestações patológicas são evolutivas e se agravam com o passar do tempo. Uma fissura decorrente de flexão pode gerar uma corrosão da armadura, por exemplo.

A mistura do concreto com fibras, portanto, representa uma grande evolução na área dos materiais de construção e se apresenta como uma solução eficaz para evitar que danos ocorram na estrutura.

2.1. Tipos de Fibras

Os tipos de fibras podem ser classificados em metálicas (como aço, aço-carbono), minerais (como vidro) e orgânicas. As orgânicas podem ser subdivididas em artificiais e naturais. Enquanto as fibras naturais podem ser vegetais (como coco) ou animais (como pelo), as fibras artificiais podem ser divididas em polímeros naturais (como celulose) e polímeros sintéticos (como nylon e polipropileno). [6] Atualmente, as fibras mais utilizadas são as fibras de aço e as fibras de polipropileno. A Figura 2 apresenta com detalhes as diferentes classificações das fibras de acordo com os materiais que as constituem.

Figura 2 - Esquema com diferentes tipos de fibras



Fonte: adaptado de Mwangi apud Nematollahi [6]

2.1.1. Fibras de aço

Segundo Lopes [7], as fibras de aço são as mais utilizadas e o tipo de aço mais comum é o aço carbono. Geralmente, possuem extremidade em forma de gancho e possuem comprimento de 25 a 60 mm. Quanto à conformação geométrica, podem ser classificadas em três tipos: tipo A (com ancoragens nas extremidades), tipo C (corrugada) e tipo R (reta). Já em relação ao tipo de aço, há 3 classes: classe I (com arame trefilado a frio), classe II (de chapa laminada cortada a frio) e classe III (de arame trefilado e escarificado). [1]

De acordo com Quinino [8], uma das vantagens das fibras de aço é seu módulo de elasticidade alto, o que resulta na melhoria de propriedades como controle da propagação de fissuras, ductilidade, resistência à flexão, tenacidade, entre outros. Além de aumentar a durabilidade da estrutura, pode, em algumas situações, substituir a armadura convencional, havendo grande diminuição de custo e proporcionando uma obra mais otimizada. O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) tem diversas aplicações, sendo muito utilizado em túneis e pavimentos (principalmente pisos industriais).

Lima [9] afirma que as fibras de aço são as mais econômicas e as que aderem melhor à matriz cimentícea. As características mecânicas são excelentes sendo a resistência à tração deste tipo de fibra em torno de 1100 Mpa e o módulo de elasticidade em torno de 200 GPa. Segundo Barros [3], as fibras de aço possuem uma relação entre comprimento e diâmetro da seção transversal de 20 a 100 e as formas da seção transversal devem ser pequenas para que possam ser devidamente misturadas e espalhadas no concreto fresco.

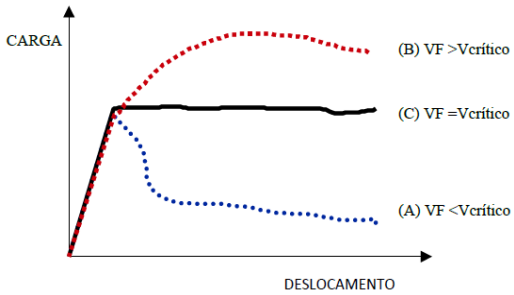
Quanto ao seu desempenho, promovem alta redução do aparecimento de fissuras, inclusive aquelas causadas por retração do concreto. São responsáveis por um aumento de 30 a 40% da resistência à tração, para adições de teor de 1,5% de fibras. [9]

É importante destacar que o desempenho do CRF depende principalmente de propriedades como: geometria das fibras e fator de forma, fração volumétrica de fibras, aderência fibra-matriz e orientação e distribuição das fibras dentro do concreto. [9]

A fração volumétrica das fibras (ou teor) pode ser classificado em fração baixa (menor do que 1%), moderada (de 1 a 2%) e alta (maior do que 2%). Conforme a Figura 3, com um teor abaixo do volume crítico, ocorre um comportamento strain-softening, em que há a diminuição da tensão após a primeira fissura. Já acima do volume crítico ocorre um comportamento strain-hardening, em que mesmo após a primeira fissura, a estrutura continua permitindo o aumento do carregamento.

Desta forma, com alto teor de fibras, o CRFA possui excelentes propriedades mecânicas e pode ser utilizado sem armadura, dependendo de sua aplicação e dos esforços aos quais a estrutura está submetida. [1]

Figura 3 - Gráfico Carga X Deslocamento com diferentes tipos de teores de fibras.



Fonte: Figueiredo [1]

2.1.2. Fibras Naturais

Há milhares de anos as fibras naturais são utilizadas como reforço de materiais, porém começaram a ser mais utilizadas após a segunda guerra mundial. Como demonstrado anteriormente, as fibras naturais podem ser de origem animal ou vegetal. As fibras vegetais possuem o maior destaque, tendo como principais vantagens as seguintes propriedades: recicláveis, biodegradáveis e não tóxicas; baixa massa específica; baixo custo; abrasividade reduzida; baixo consumo de energia na produção; e estimulam o emprego na zona rural. [10] Há, porém, algumas limitações para a produção industrial deste material, relacionadas a custos para adaptação do processo produtivo e a falta de informações e normas referentes às fibras vegetais. [11]

Alguns exemplos dessa fibra são as fibras de coco e sisal, cujas matérias-primas são abundantes na natureza e possuem baixo custo. As matérias-primas podem ser extraídas das folhas, como o sisal, do talo ou tronco, como o rami; do caule, como o bambu e do fruto, como o coco. [11]

Segundo Savastano Júnior [11], estas fibras apresentam alta resistência à tração, mas possuem baixo módulo de elasticidade, o que faz com que seu uso seja feito como reforço a altas deformações do compósito. As fibras de coco, por exemplo, possuem módulo de elasticidade de aproximadamente 3 GPa e resistência à tração de aproximadamente 100 Mpa.

É, ainda, importante destacar que um aspecto de preocupação é a durabilidade das fibras vegetais, que sofrem grande deterioração em meios úmidos e alcalinos. [8]

2.1.3. Fibras poliméricas

Segundo Lima [9], as fibras poliméricas possuem em sua composição um material polimérico em formato de filamentos muito finos e possuem grande flexibilidade e tenacidade. São produzidas em diferentes formatos e, diferente das fibras de aço, possuem baixo módulo de elasticidade, aproximadamente de 8 GPa e resistência à tração de 400 a 700 Mpa.

Este tipo de fibra é normalmente utilizado como reforço para a retração do concreto e possui a capacidade de diminuir a exsudação do concreto, visto que possui uma grande área específica, fazendo com que parte da água da mistura fique adsorvida à superfície das fibras. [9]

Outra aplicação de extrema importância é em estruturas submetidas a altas temperaturas. Estas fibras possuem baixa condutividade térmica, funcionando como um isolante térmico e melhorando a resistência ao fogo do concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP). [9]

Já em relação ao comportamento à flexão, também possuem a capacidade de aumentar a ductilidade do concreto após a fissuração. Entretanto, diferente das fibras de aço, não causam uma influência significativa no aumento da resistência do material, visto que possuem baixo módulo de elasticidade.

Desta forma, as fibras poliméricas possuem importante aplicação sob altas temperaturas, mas não possuem a mesma capacidade das fibras de aço, no que diz respeito ao controle da fissuração. [9]

3. Modelagem Computacional

Este artigo tem como objetivo demonstrar o comportamento do CRFA submetido à flexão e analisar a fissuração e a curva carga-deflexão de uma viga composta por este tipo de material. Para avaliar os diferenciais deste material, foi apresentada a comparação com o concreto simples.

Para a demonstração do comportamento do concreto fibroso, foi feita uma modelagem numérica de uma viga por meio do software DIANA FEA, com o método dos elementos finitos. Nesta análise, foi simulada uma viga com entalhe submetida à flexão de três pontos, que consiste em uma viga biapoiada sujeita a um carregamento no meio do vão. O carregamento adotado foi um deslocamento prescrito de 1 mm e, visto que não há normas

brasileiras para este ensaio, este trabalho será baseado na norma EN 14651:2005. [12]

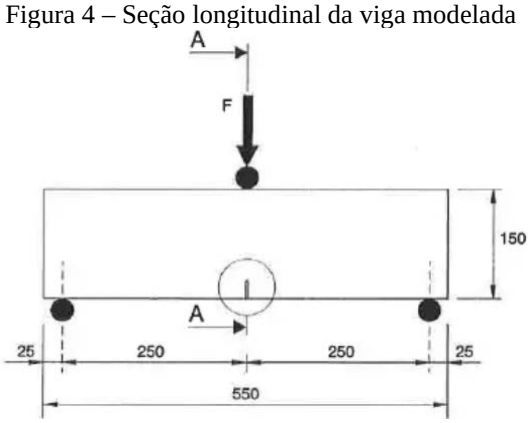
É importante destacar que com o entalhe é possível prever o comportamento da fissuração, tendo uma abertura de fissura que começa a partir do entalhe e percorre toda a extensão acima deste.

3.1. Geometria do modelo

O corpo de prova modelado possui comprimento de 550 metros, altura de 150 metros e largura de 150 metros, conforme Figuras 4 e 5, sendo estas dimensões determinadas pela EN 14651 [12]. Já o entalhe possui largura de 4 mm e altura de 25 mm. Para evitar a concentração de tensões, foram modelados blocos de aço entre os apoios e a viga. Em relação aos apoios, o suporte da esquerda impede a translação na direção y, o suporte da direita impede a translação nas direções x e y e o apoio superior, onde é aplicada a carga, impede a translação na direção y. Como carregamento, foi adotado um deslocamento prescrito no meio do vão de 1 mm. Foram criadas, também, interfaces entre os blocos de aço e a viga de concreto.

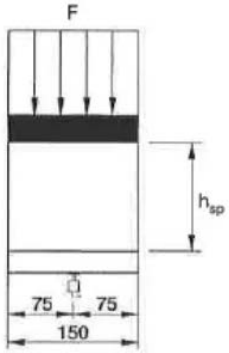
Ressalta-se que o modelo em questão foi simplificado para 2D, conforme Figura 6, visto que representa de maneira satisfatória o comportamento aos esforços analisados.

Figura 4 – Seção longitudinal da viga modelada



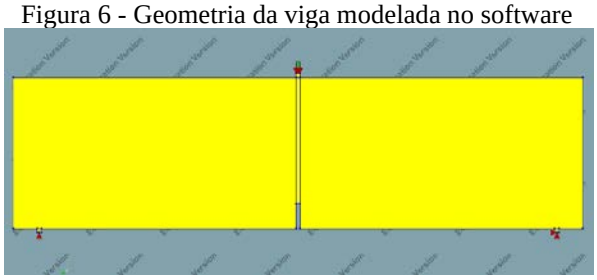
Fonte: EN 14651 [12]

Figura 5 - Seção transversal da viga modelada



Fonte: EN 14651 [12]

Figura 6 - Geometria da viga modelada no software

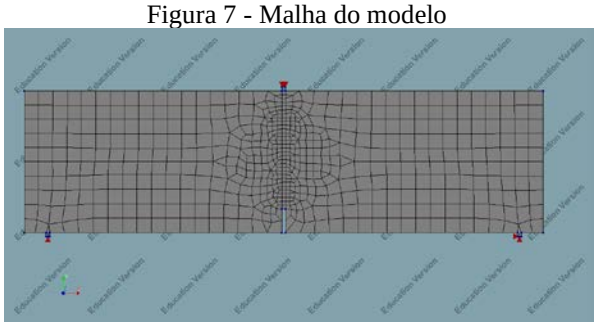


Fonte: Autoria Própria.

3.2. Malha

A malha do modelo, apresentada na Figura 7, foi composta da seguinte forma: ao longo de toda a viga foram criados elementos quadriláteros com 15 mm de lado e ao longo da região acima do entalhe os elementos possuem 4 mm de lado. No programa, foi definido um elemento quadrático para a análise.

Figura 7 - Malha do modelo



Fonte: Autoria Própria.

3.3. Propriedades dos materiais

Para analisar o comportamento do material, foram analisados um concreto convencional e um concreto reforçado com fibras de aço. As propriedades básicas do concreto (material da viga), aço (material dos

blocos) e interface (entre blocos e viga) são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Foi utilizado o concreto C30 e, para o CRFA, foi utilizado um teor de fibras equivalente a 35 kg/m^3. O modelo de tração utilizado para o concreto convencional foi o baseado na energia de fissuração linear ("linear-crack energy") e, para compressão, foi utilizada a lei de compressão parabólica. Já para o concreto fibroso, foi adotada a lei parabólica para o comportamento à compressão e, para o comportamento à tração, foi seguido o modelo do CEB-FIP para concreto reforçado com fibras, em que as propriedades de abertura de fissura e tensões foram adotadas de maneira a seguir os critérios da norma EN 14651 [12] e baseadas em tutoriais do software Diana Fea [13]

Tabela 1 - Propriedades do concreto

Propriedade	Valor
E	30 GPa
υ	0.15
ρ	2400 kg/m^3
ft	2,0 MPa
fck	30 MPa

Fonte: Autoria Própria

Tabela 2 - Propriedades do aço

Propriedade	Valor
E	200 GPa
v	0
ρ	0

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 - Propriedades da interface

Propriedade	Valor
Rigidez normal k_n	1000 N/mm^3
Rigidez cisalhante k_s	10 N/mm^3

Fonte: Autoria Própria

4. Resultados e Discussão

4.1. Comportamento à flexão

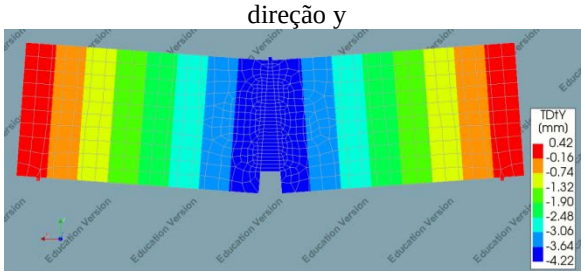
Foi aplicado um deslocamento prescrito no meio do vão da viga de maneira com que a viga sofresse flexão e houvesse a abertura de fissura acima do entalhe. Para que houvesse o deslocamento necessário para a abertura da fissura, foram aplicados passos de carga, em que há um fator que é multiplicado pelo deslocamento de 1 mm. A tabela 4 apresenta os valores dos passos de carga que foram dados até a obtenção do deslocamento final de 4,20 mm na direção y, no meio do vão. A Figura 8 apresenta o deslocamento total da viga e demonstra a estrutura deformada.

Tabela 4 - Propriedades do Concreto

Valor do passo	Nº de passos
0,01	5
0,001	150
0,005	200
0,01	300

Fonte: Autoria Própria

Figura 8 - Representação do deslocamento da viga na direção y

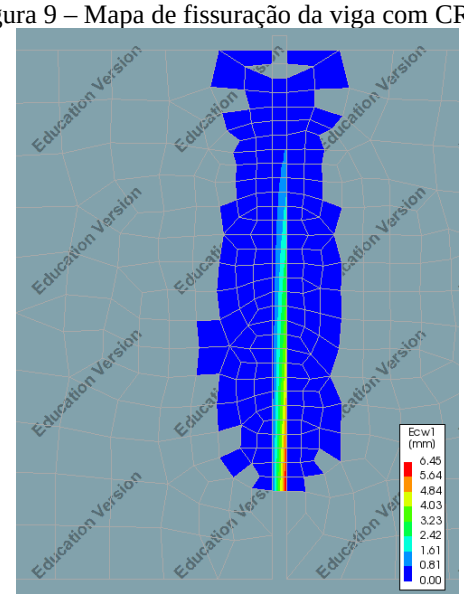


Fonte: Autoria Própria

4.2. Mapa de fissuração

Como resultado, a análise não-linear do programa apresenta o mapa de fissuração da viga, conforme Figura 9. Ocorreu uma abertura de fissura de 6,45 mm para um deslocamento de 4,20 mm. Este comportamento representa bem o que deveria ocorrer no corpo de prova experimental, como demonstrado na Figura 10, retirada do referencial teórico. Há a propagação da fissura ao longo do entalhe e as fibras funcionam como uma ponte de transferência dos esforços, permitindo que a estrutura continue suportando a carga aplicada após a abertura da fissura.

Figura 9 – Mapa de fissuração da viga com CRFA



Fonte: Autoria Própria.

Figura 10 - Fissuração de uma viga com entalhe em um experimento

Fonte: Quinino [7]

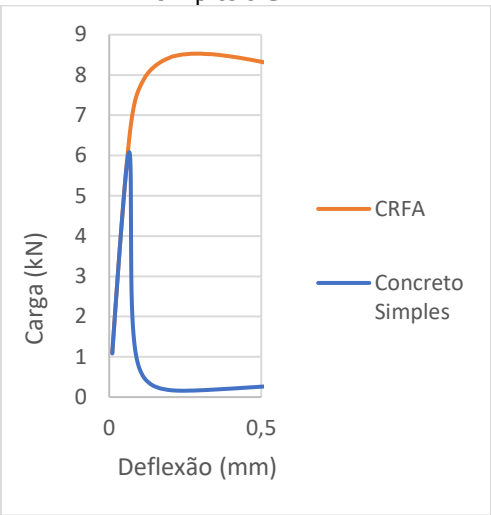
4.3. Curva Carga vs. Deflexão

Outra característica importante de ser analisa é a curva carga vs. deflexão da estrutura. A partir da Figura 11, percebe-se que o concreto simples apresenta um comportamento frágil, tendo uma carga máxima de 6,1 kN e queda brusca da capacidade de carga após atingir este valor. Já o CRFA apresenta um comportamento pseudo-dúctil no estágio de pós-fissuração, após atingir o pico de carga. A carga máxima do concreto fibroso foi de 8,5 kN, representando um aumento de 39% em relação ao concreto simples.

Além disso, no ramo descendente, é possível perceber um comportamento strain-softening em ambos os materiais, mas no concreto simples há uma declividade muito maior do que no CRFA. No CRFA, percebe-se o efeito das fibras, que fazem a ponte de transferência das tensões e permitem a continuidade da capacidade de carga da estrutura, que diminui mais gradativamente, com um comportamento pseudo-dúctil.

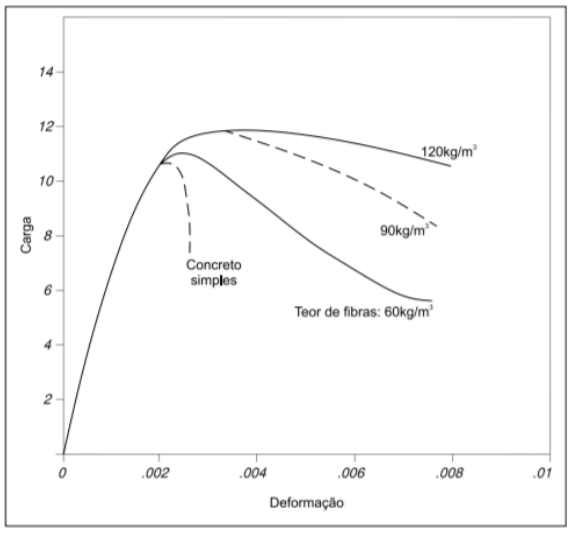
Com isso, nota-se que houve o aumento da capacidade de carga com o CRFA em relação ao concreto convencional e o aumento da ductilidade após a fissuração. O comportamento das curvas pode ser comparado com a Figura 12, retirada do referencial teórico.

Figura 11 - Curva carga X deflexão do concreto simples e CRFA



Fonte: Autoria Própria.

Figura 12 - Curvas de carga x deformação para concreto simples e concreto com diferentes teores de fibras



Fonte: Maccaferri [2]

5. Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o CRFA é uma excelente alternativa para o aumento considerável da resistência à flexão da estrutura e o controle de abertura e propagação de fissuras. É essencial ressaltar a importância do controle de fissuração, visto que além de garantir a estabilidade estrutural, reduz a permeabilidade da estrutura e impede o ingresso de agentes agressivos, que são responsáveis pela corrosão de armaduras e degradação do concreto. [14]

Além disso, a dosagem da mistura, com adequado teor de fibras, deve ser realizada de maneira equilibrada, de modo a manter a trabalhabilidade do concreto e obter o comportamento otimizado, com alto desempenho estrutural, como apresentado.

Para futuros trabalhos, recomenda-se que sejam modeladas vigas com diferentes tipos de fibras, comparando as vantagens e desvantagens de cada tipo. Seria interessante, também, avaliar o uso de fibras naturais, que apresentam grandes vantagens em relação a sustentabilidade e estão em destaque, havendo um grande crescimento de estudos deste tipo de material nos últimos anos.

6. Referências

[1] FIGUEIREDO, A. D. Concreto Reforçado com Fibras. São Paulo, 2011. 247p. Tese (Livre-docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[2] MACCAFERRI. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto – Manual Técnico. São Paulo, 2008.

[3] BARROS, A. R. *Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.* 2009. 155p. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

[4] 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, 1 jun. 2020.

[5] HELENE, Paulo. *Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.* 2. Ed. São Paulo: PINI, 1992.

[6] BEHBAHANI, H., NEMATOLLAHI, B. (2011*). Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266174465.

[7] LOPES, M. M. *Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto.* Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

[8] QUININO, U. C. M. *Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.* Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

[9] LIMA, I. E. P. *Estudo dos aspectos de dimensionamento de elementos estruturais de concreto reforçado com fibras com base na teoria de flexão em vigas.* Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

[10] BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. C.; PINTO, E. B. *Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais.* Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

[11] SAVASTANO JÚNIOR, Holmer. *Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de res;iduos para a construção de baixo custo.* Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

[12] EN 14651:2005. *Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).* European Committee for Standardization.

[13] DIANA FEA. User's Manual Material Library 2010; 1-696

[14] BUTTIGNOL, T. E. T., FERNANDES, J. F., BITTENCOURT, T. N., SOUSA, J. L. A. *Verificação de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aço no estado limite último.* Revista Ibracon de estruturas e materiais, v. 11, n. 5 (outubro 2018) p.997 – 1024.