

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MOLDAGEM EM CAMADAS EM ELEMENTOS PRISMÁTICOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LAYER FORMING ON PRISMATIC ELEMENTS OF CONCRETE REINFORCED WITH POLYPROPYLENE FIBERS

SILVA, JUAN VICTORIO LIMA MONTENEGRO¹; LIMA, MYLENA MARIA SALGUEIRO DE²; LIMA, NÍVEA KAROLINE DA SILVA³; SANTOS, WELLINGTON DA SILVA⁴; SILVA, WANDERSON BRUNO ALCIDES DE MORAIS⁵

¹Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, juan.montenegro@ctec.ufal.br;

²Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, mylena.lima@ctec.ufal.br;

³Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, nivea.lima@ctec.ufal.br;

⁴Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, wellington.silva@ctec.ufal.br;

⁵Engenheiro Civil, Universidade Federal de Alagoas, wanderson.silva@ctec.ufal.br.

RESUMO

Com o aumento constante da demanda pelo uso do concreto reforçado com fibras (CRF), torna-se imprescindível a realização de estudos contínuos para a otimização e controle de qualidade nas aplicações, custos, usos e funções das fibras na rocha artificial. Nesse sentido, foi avaliada a utilização da moldagem em dupla camada como forma de reduzir o teor de fibras para a produção do compósito, enquanto trabalha-se com a manutenção da sua resistência. Para isso, analisou-se dois trabalhos nos quais foram trabalhados corpos de prova prismáticos moldados em dupla camada, uma contendo a adição de fibras de polipropileno e a outra composta apenas por concreto fluido, com variação do percentual da camada do CRF a fim de analisar como esse tipo de modelagem influencia na orientação das fibras e nas propriedades mecânicas do concreto estudado submetido à flexão. Nos dois estudos analisados, foi adotada uma dosagem fluida baseada no método de GOMES et al. (2003) para concreto autoadensável com o uso da fibra de polipropileno (PP) a um teor de 1% em relação a massa do cimento, utilizando fíber e aditivos superplastificantes a fim de se obter maior trabalhabilidade e plasticidade na mistura.

ABSTRACT

With the constant increase in demand for the use of fiber-reinforced concrete (FRC), continuous studies become essential for optimization and quality control in applications, costs, uses, and functions of fibers in artificial rock. In this regard, the use of double-layer molding was evaluated as a means to reduce the fiber content for composite production while maintaining its strength. For this purpose, two studies were analyzed in which double-layer molded prismatic specimens were worked on, one containing the addition of polypropylene fibers and the other composed solely of fluid concrete, with variation of the percentage of FRC layer to analyze how this type of modeling influences fiber orientation and mechanical properties of the studied concrete subjected to flexion. In both analyzed studies, a fluid dosage based on the method of GOMES et al (2003) was adopted for self-compacting concrete using polypropylene fiber (PP) at a content of 1% relative to the cement mass, using filler and superplasticizer additives to achieve greater workability and plasticity in the mix.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras; dupla camada; fibra de polipropileno; resistência à tração.

Key-words: fiber reinforced concrete; double layer; polypropylene fiber; tensile strength.

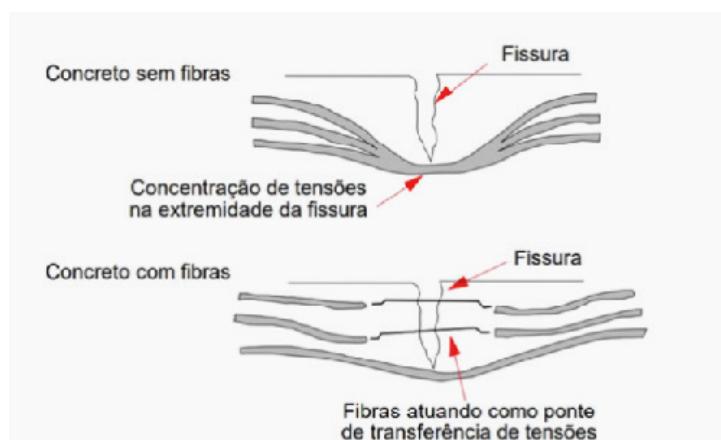
INTRODUÇÃO

O concreto é um material de construção composto por aglomerantes, agregados e água. Sua mistura resulta em uma massa sólida e resistente, valorizada pela durabilidade, elevada resistência à compressão e versatilidade para assumir formas dentro dos projetos arquitetônicos. No entanto, esse material apresenta uma série de limitações, como a baixa resistência à tração e a capacidade mínima de suportar deformações antes da ruptura, ao ser submetido a esforços de tração, além da sua grande capacidade de propagação de fissuras e microfissuras. Uma solução, então, encontrada para contornar a fragilidade do concreto a tensões de tração foi a utilização de armaduras de aço no corpo do material, resultando no “concreto armado”, que compatibiliza a alta resistência à compressão do concreto enquanto proporciona resistência à tração, oriunda da armação.

Visando aumentar a aplicabilidade do concreto, há uma constante busca por tecnologias para reduzir as deficiências do material. Nesse cenário, a adição de fibras, feitas de materiais metálicos e poliméricos, à mistura se mostrou uma alternativa técnica para reforço e redução das limitações destacadas anteriormente, visto que, ao serem adicionadas ao concreto, elas atuam como “pontes de transferência de tensões” (Medeiros, 2012), conforme a figura 1, redistribuindo os esforços na matriz, reduzindo a incidência dos esforços nas extremidades das fissuras e, consequentemente, a velocidade de propagação delas (Figueiredo, 2011; Jansson, 2011; Liao *et al.*, 2014).

Figura 1 – Atuação das fibras no compósito cimentício e redução do volume do elemento comparando a utilização.

Fonte: Medeiros (2012)



Tem-se que a adição das fibras ao concreto mantém os componentes originais, pasta e agregados, da mistura. No entanto, ao implantar esses

materiais, tem-se a diminuição da trabalhabilidade no estado fresco, assim como um aumento da porosidade dessa rocha artificial em seu estado endurecido, fatores que diminuem a sua adequação à moldagem e a resistência à compressão, respectivamente. Dessa forma, faz-se necessário a utilização de artifícios para contornar esses problemas, como a utilização de aditivos superplastificantes e a adição de Fíleres à mistura, a fim de proporcionar uma maior coesão e fluidez ao concreto.

Por isso, uma das alternativas de fibra a ser utilizada para melhorar as características do concreto é a fibra de polipropileno (PP), que possui alta resistência química, inclusive aos álcalis de concreto, baixa absorção de umidade, baixo módulo de elasticidade e baixa densidade. Sua adição na mistura cimentícia confere ao elemento estrutural maior resistência à fadiga e ao impacto, além de reduzir a perda de água no estado fresco e fissuração plástica. As fibras de PP também atuam na diminuição da tensão interna gerada pela pressão de vapor em concretos expostos a altas temperaturas, como em caso de incêndio, pois elas se fundem criando rotas de eliminação do vapor de água evitando, assim, explosões (Figueiredo, 2011).

Na segunda metade do século XX, as pesquisas relacionadas ao Concreto Reforçado com Fibras (CRF) receberam um impulso significativo, especialmente na Europa e nos Estados Unidos da América (Naaman; Shah, 1975). Nos últimos anos, em todo o mundo, houve um crescimento da pesquisa vinculada ao CRF, preconizado por códigos e recomendações internacionais. Buscando sanar a carência de referências normativas locais e suprir algumas dificuldades tecnológicas que distinguiam a realidade brasileira dos países desenvolvidos, um conjunto de normas brasileiras voltadas para elementos de CRF foram publicadas em 2021. Dessa maneira, a elaboração desses documentos regulamentadores possibilitou um cenário de avanço nas especificações técnicas e nos procedimentos adotados, garantindo, assim, maior padronização e qualidade nos elementos dimensionados. Como também, promovendo maior aceitação e aprimoramento tecnológico do material.

As perspectivas do mercado, apontadas por Figueiredo (2011), traziam como tendência grandes contribuições de CRF em obras dos setores de saneamento e de sistemas de transportes de massa. Atualmente, com a publicação das normas, esse cenário mostra-se cada vez mais promissor e cheio de possibilidades. Monte e Figueiredo (2022) demonstram

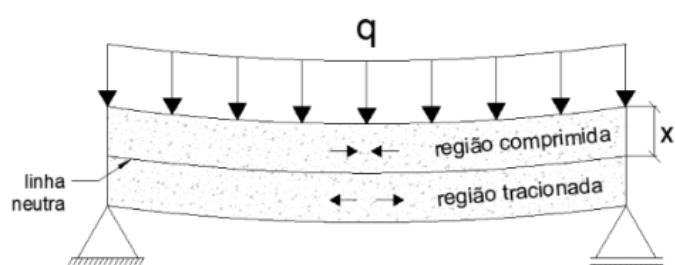
como as melhorias normativas têm corroborado para a utilização no reforço estrutural de elementos de saneamento.

Mesmo trazendo diversos benefícios, o uso de concretos reforçados com fibras ainda é considerado muito recente no Brasil, quando comparado a sua extensa aplicação em países desenvolvidos, especialmente nos Estados Unidos e nos países da Europa (Figueiredo, 2011). No Brasil, um dos principais obstáculos para a aplicação prática do CRF é o alto custo associado à incorporação dessas fibras ao concreto, tornando-se uma limitação significativa. Nesse contexto, tem-se que um dos motivos para a não adesão massiva das fibras como reforço está relacionado ao custo final da peça, visto que não é um material amplamente utilizado no Brasil, fazendo com que o seu preço seja elevado. Visando a redução desse ônus, a utilização de espécimes moldados em camadas com o posicionamento das fibras na região de interesse dentro do elemento estrutural pode ser uma boa solução, visto que não haverá a utilização da fibra em toda a rocha artificial.

Como descrito por Amaral Júnior, Silva e Moravia (2017), é importante salientar que a adição de fibras de polipropileno no concreto não provoca aumento significativo de resistência à compressão, acrescentar esse material nas partes comprimidas apenas aumenta os custos de produção do concreto. Desse modo, incluir as fibras somente na parte tracionada do elemento estrutural resulta em otimização de custos.

Portanto, para definir a região tracionada do elemento é levada em consideração a linha neutra (ver Figura 2), plano paralelo ao eixo longitudinal do elemento que delimita a parte comprimida e a parte tracionada, que varia de acordo com o valor do momento fletor produzido pelas cargas transversais que atuam na estrutura, mas comumente está localizada próxima ao centro de gravidade de peça (Moura, 2019).

Figura 2 – Linha neutra em viga simplesmente apoiada.
Fonte: Moura (2019)

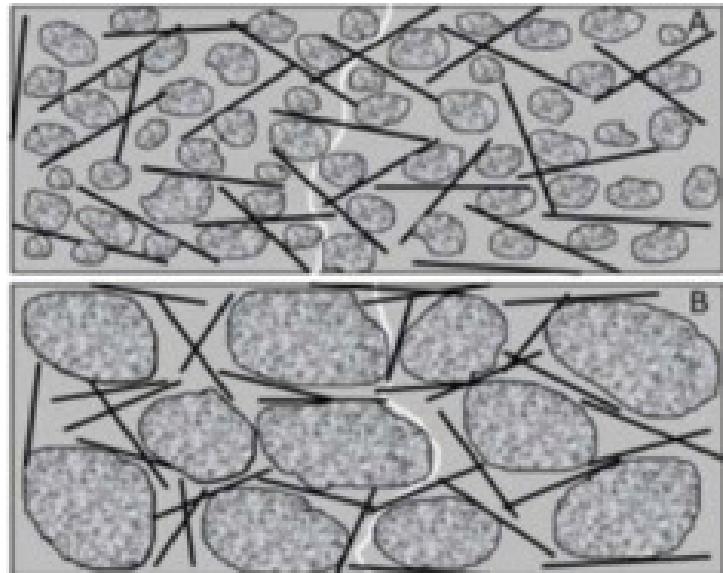


O interesse em adicionar fibras de polipropileno na região de tração é oferecer maior grau de deformabilidade no estado pós-fissuração e antes da ruptura da estrutura, redistribuindo os esforços de tensão ao longo do elemento e proporcionando menor velocidade de fissuração, maior maleabilidade e tenacidade para o concreto, tornando-o mais resistente à tração (Donato *et al.*, 2017).

É fundamental adicionar as fibras de forma controlada, uma vez que elas podem afetar a trabalhabilidade do compósito. Um teor excessivo de fibras pode levar à segregação, bem como ao aparecimento de agregados aglomerados nas peças de concreto, ou resultar em áreas mais aparentes a falhas (Figueiredo, 2005).

Alguns fatores influenciam o desempenho da fibra no concreto, como a distribuição final das fibras, que é determinada principalmente pelas propriedades do concreto no estado fresco, o processo de lançamento e as paredes das formas (Laranjeira *et al.*, 2012; Ferrara, 2015; Alberti *et al.*, 2018). Além disso, a relação entre o tamanho da fibra e do agregado graúdo utilizado é uma variável significativa para promover sua distribuição homogênea, como visualizado na figura 3, de forma que a fibra deve ser, pelo menos, duas vezes maior que o agregado para que haja uma boa ancoragem no concreto e as tensões pós-fissuração sejam transferidas para as fibras (Midl; Dietrich, 1995).

Figura 3 – Relação entre o tamanho das fibras e do agregado graúdo.
Fonte: Figueiredo (2011)



Com relação à orientação, na avaliação feita por Alferes Filho, Monte e Figueiredo (2019), corroborando com o estudo de Deeb *et al.* (2014), à

medida que as fibras se afastam do centro, há uma tendência de alteração na sua posição devido ao fluxo de concreto durante o lançamento. Visto que o reforço mais eficiente é alcançado quando as fibras estão alinhadas às linhas de tensão na estrutura, devem ser aplicados métodos de indução de orientação das mesmas para que não ocorra dispersão aleatória e perda de eficiência (Martine; Roussel, 2011).

Nos artigos analisados, a indução da orientação das fibras foi ocasionada devido ao efeito parede descrito por Wille e Parra-Montesinos (2013). Esse fenômeno ocorre em função do comprimento da fibra e da distância entre as paredes paralelas da forma, pois as paredes restringem o deslocamento do concreto fluído no estado fresco, tornando a velocidade de fluxo da parte central do molde maior. Dessa forma, a variação de velocidade da mistura rotaciona as fibras de forma que elas tendem a alinhar-se no sentido do fluxo. Assim, a distância entre as paredes deve ser suficiente para permitir a rotação das fibras.

Com isso, o artigo em questão analisou a influência da modelagem em dupla camada na orientação das fibras e nas propriedades mecânicas do concreto estudado submetido à flexão a partir dos dados obtidos nos dois estudos realizados. Tendo em vista que, para garantir a otimização dos custos e redução da aleatoriedade do posicionamento das fibras, as amostras cujos dados foram analisados nesse artigo foram moldadas em dupla camada com espessuras variadas de forma que as fibras sejam preferencialmente concentradas na região tracionada, considerando um elemento estrutural simplesmente apoiado submetido à flexão, tomando a linha neutra como referência para a divisão das camadas a fim de alcançar seu posicionamento ótimo e melhor desempenho.

DESENVOLVIMENTO

A fim de realizar a avaliação proposta, foram observadas as abordagens realizadas pelos autores Dias (2019) e Silva (2019), os quais procederam suas pesquisas voltadas para a análise do comportamento de elementos de concreto reforçado com fibras de polipropileno moldados em camadas submetidos a esforços de flexão. A escolha dos autores se deu pela proximidade da abordagem realizada por cada um, bem como compartilharem a mesma base material nos elementos desenvolvidos, os quais fizeram o uso do mesmo tipo e teor de fibra e da mesma dosa-

gem de concreto.

Materiais

Visando uma dosagem que proporciona uma fluidez adequada na mistura para viabilizar a utilização de fibras de polipropileno (PP), foi realizada uma adaptação no traço encontrado em estudos anteriores (Oliveira et al., 2018) utilizando o método de dosagem de Gomes et al. (2003) para concreto autoadensável, para o uso da fibra de PP a um teor de 1% em relação a massa do cimento. Assim, nos dois estudos, teve-se a dosagem apresentada no quadro 1.

Quadro 1 – Dosagem do concreto.

Fonte: Silva et al. (2019)

Material	Massa (Kg/m³)
Cimento	377,9
RBMG	188,95
Agregado Miúdo	774,53
Agregado Graúdo	813,75
Água inicial	151,16
Água complementar	37,75
Água de absorção	11,17
Superplastificante	6,3
Fibras de Polipropileno	3,78

As propriedades físicas do cimento CP V ARI RS e as propriedades das fibras de polipropileno estão descritas nos quadros 2 e 3, respectivamente.

Quadro 2 – Propriedades físicas do cimento CP V ARI RS.

Fonte: Silva et al. (2019)

Resistência à compressão	
01 Dia	19,11 MPa
03 Dias	30,34 MPa
07 Dias	38,4 MPa
28 Dias	47,91 MPa
Finura	
Massa Específica	3,08 g/cm³
Blaine	4,143 cm²/g
Tempo de pega	
Início	159 min
Fim	234 min

Quadro 3 – Caracterização da fibra de polipropileno.
Fonte: Silva et al. (2019)

Resistência à compressão	Resistência à compressão
Comprimento	40 mm
Densidade	0,92 g/cm ³
Absorção	Nenhuma
Módulo de elasticidade longitudinal	9,5 Gpa
Ponto de fusão	160 °C
Ponto de ignição	590 °C
Resistência Álcalis, Ácido e Sal	Alta
Fator de forma	90
FResistência à tração	600-650 MPa

Metodologia de produção

As matrizes M1 (sem adição de fibras) e M2 (com adição de fibras de polipropileno) foram produzidas simultaneamente. A produção da M1 seguiu os seguintes passos: adicionou-se os agregados miúdos e graúdos e a água de absorção, misturando por 30 segundos, em seguida, o cimento e o RBMG foram adicionados e misturados por mais 30 segundos. A água inicial (80% da relação a/c) foi adicionada e misturou-se por 90 segundos. Posteriormente, o aditivo superplastificante foi diluído na água restante (20% da relação a/c). O material obtido foi adicionado à betoneira e a mistura foi feita por mais 120 segundos.

Para a produção da matriz M2, utilizou-se a mesma metodologia da M1. Em seguida, foi adotada uma abordagem cuidadosa ao incorporar as fibras, adicionando-as gradativamente para evitar a formação de aglomerados. Esse fenômeno é resultado da má distribuição das fibras devido a uma mistura inadequada do material (Figueiredo, 2011).

Após a produção das matrizes M1 e M2 ser concluída, com o concreto em estado fresco, fez-se os ensaios de espalhamento com cone Abrams (*slump-flow test*), para a determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual, seguindo as recomendações da NBR 15823-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010).

Metodologia de moldagem em dupla camada

Com a intenção de se obter maior adesão entre os dois tipos de concretos utilizados, as produções das misturas foram realizadas de forma simultânea com uso de dois misturadores seguindo as etapas descritas anteriormente. Concluída esta etapa, com a preparação prévia das for-

mas com o posicionamento da placa de separação das misturas na posição para as proporções adotadas (ver Figura 4a), foi realizado o preenchimento das formas com lançamento simultâneo dos dois concretos e logo em seguida realizada a remoção da placa, conforme visto na figura 4b, para garantir a aderência entre as duas misturas.

Figura 4 – (a) Fôrma com a placa separadora e sem a placa. **(b)** Placa de ACM sendo removida após o preenchimento da fôrma com concreto fresco.

Fonte: Dias et al. (2019)



(a)

(b)

Decorrido o período de 24h após as moldagens, os espécimes foram submetidos ao processo de cura submersa em tanques com água. Embora a NBR 14931 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) traga em seu escopo a recomendação de uma cura com 28 dias, os espécimes foram submetidos a um período de cura de 21 dias, visto a utilização do cimento CP V ARI RS em suas composições.

Ao todo foram produzidas um total de 25 vigas prismáticas seguindo as dimensões estabelecidas pela norma EN 14651 (CEN, 2007), 150x150x550 mm, com variação das espessuras das camadas de concreto reforçado com fibra de polipropileno (CRFP) e concreto fluido (CF) nas ordens de 100% CRFP, 75% CRFP e 25% CF, 50% CRFP e 50% CF, ilustradas na Figura 5, 66,67% CRFP e 33,33% CF, ilustrada na Figura 6.

Figura 5 – Esquema de moldagem em camadas segundo a proposta de Silva et al. (2019).

Fonte: Autores (2023)

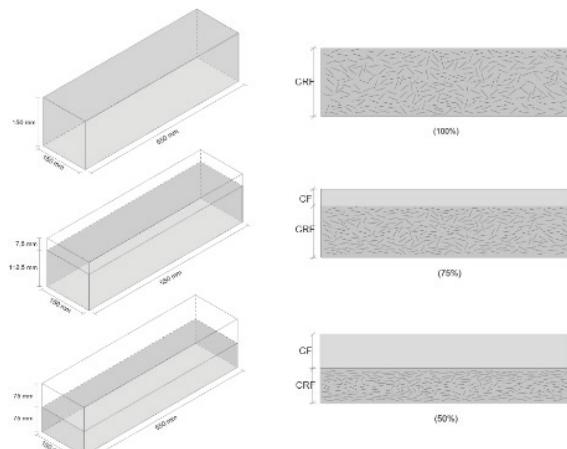
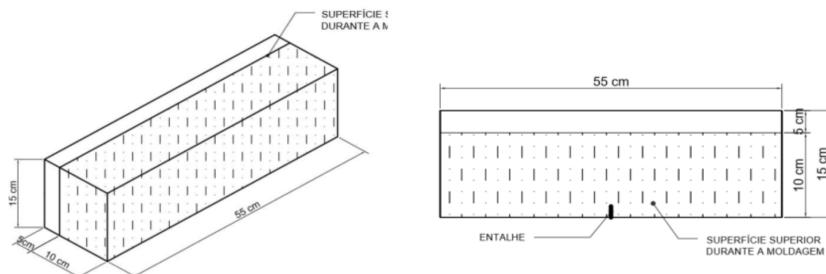


Figura 6 – Esquema de moldagem em camadas segundo a proposta de Dias et al. (2019) para amostras compostas por 66,67% CRFP e 33,33% CF.

Fonte: Dias et al. (2019)



Metodologia de ensaio

Com a proposta de se avaliar a tração na flexão ambos autores tiveram como base a abordagem preconizada pela norma EN 14651 (CEN, 2007) realizando suas respectivas adaptações para aderência às suas propostas.

Como instrumento de ensaio foi utilizado a prensa hidráulica universal SHIMADZU, de modelo Autograph AG-X Plus com capacidade de 100kN para a execução do ensaio. Uma base de alumínio graduada com régua e dois roletes de suporte é fixada na base da máquina e a célula de carga é acoplada à parte móvel superior da máquina.

Os ensaios foram desenvolvidos em sistema fechado com a aplicação da taxa de carregamento de forma constante e igual a 0,05mm/min durante os 5 primeiros minutos do ensaio, em função da abertura de fissura ou *Crack Mouth Opening Displacement* (CMOD) até uma abertura de fissura da ordem de 0,1mm. Decorrido o período inicial, a taxa de carregamento em função do CMOD foi alterada para a constante de 0,20mm/min. A adoção de uma menor velocidade na etapa inicial justifica-se pela redução do risco de instabilidade pós-pico no elemento.

A coleta de dados dos ensaios foi realizada por meio do software TRAPEZIUM X, no qual foram gerados os conjuntos de dados correlacionando o tempo de ensaio, a carga aplicada e deslocamento vertical do pistão em arquivo CSV.

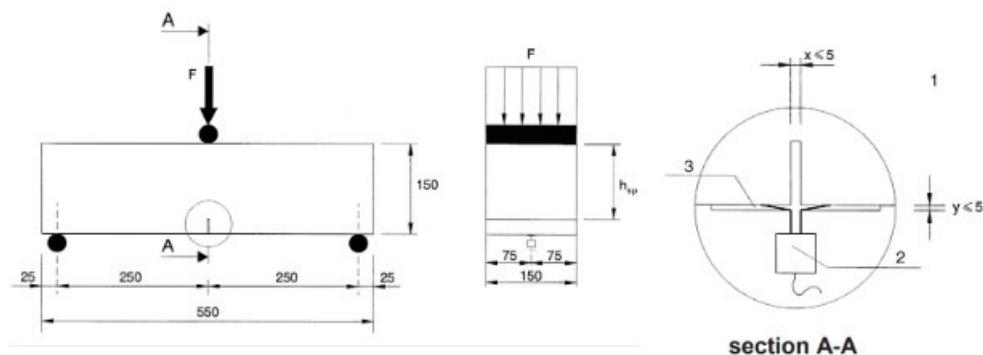
Abordagem de Dias et al. (2019)

Indo além da abordagem descrita acima, a autora fez uso do arranjo de ensaio completo descrito pela EN 14651 (CEN, 2007), conforme figura 7, com realização de entalhe na face lateral rotacionada das vigas, fixação de cantoneiras metálicas adjacentes ao entalhe e o posicionamento de

transdutores LVDTs laterais às cantoneiras de modo a propiciar a medição da abertura da fissuração da viga a partir do afastamento das cantoneiras e o deslocamento dos transdutores LVDTs.

Figura 7 – Esquema do ensaio de flexão em três pontos com entalhe.

Fonte: EN 14651 (CEN, 2007)



Com relação aos dados do ensaio, além da coleta realizada através do software TRAPEZIUM X, os deslocamentos medidos pelos LVDTs foram computados pelo software ITOM. A utilização conjunta desses softwares permitiu a coleta dos dados em um mesmo formato, os quais foram posteriormente compatibilizados usando a função VLOOKUP do software EXCEL.

Tal correlação dos parâmetros relacionados à carga aplicada com a abertura de fissura registrada pelos LVDTs possibilitou a obtenção do perfil das curvas carga-abertura de fissura, conforme exemplo na figura 8. Essa análise gráfica se faz necessária para seguir o procedimento proposto pela norma EN 14651 (CEN, 2007) na avaliação dos resultados do CRF.

Figura 8 – Diagrama de Carrega - CMOD and F_j ($j = 1, 2, 3, 4$).

Fonte: EN 14651 (CEN, 2007)

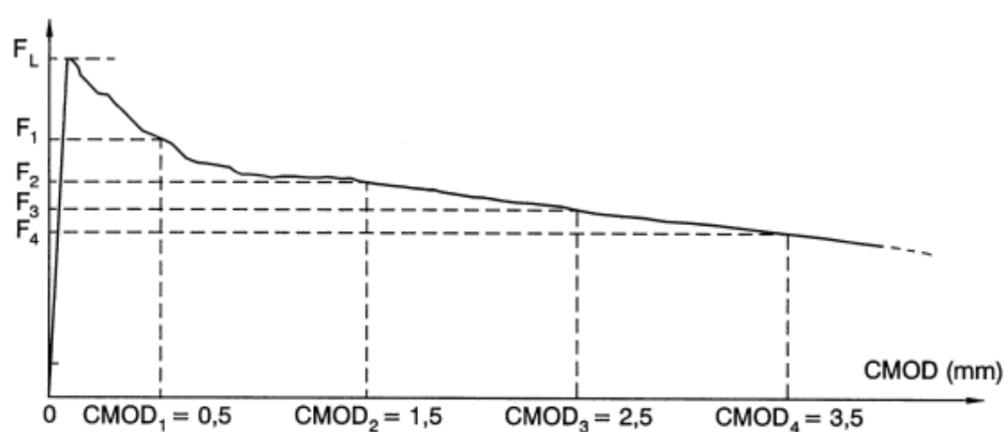
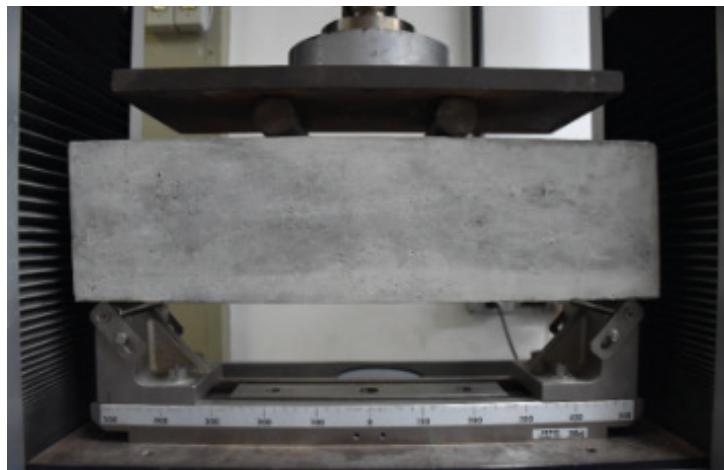


Figura 9 – Imagem do aparelho de ensaio montado com a viga posicionada para realização de ensaio. Fonte: Silva et al. (2019)



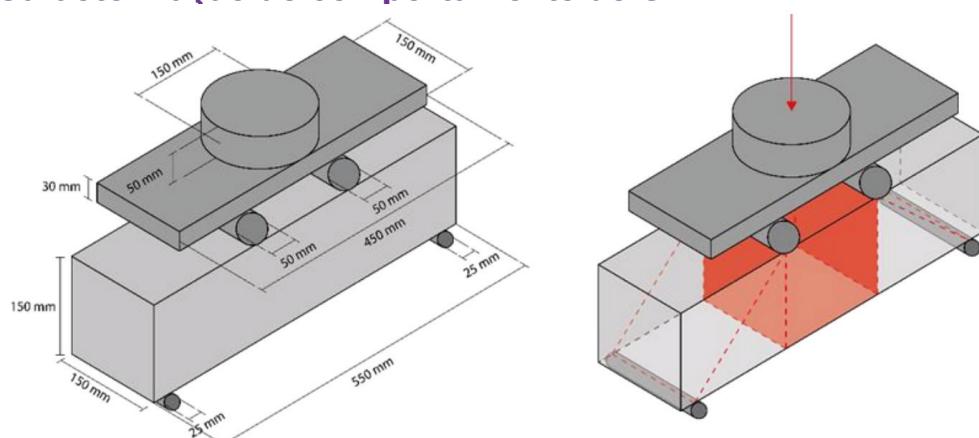
Abordagem de Silva et al. (2019)

Além da abordagem inicial descrita anteriormente, o autor propôs adaptações no arranjo de ensaio, seguindo o arranjo proposto pela norma NBR 12142 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010) para a avaliação da tração na flexão por meio do ensaio de flexão em 4 pontos, obtendo uma avaliação da tração em uma zona de flexão pura isenta de esforços de cisalhamento, conforme figura 9.

Para o arranjo proposto não foi adotada a realização do entalhe no elemento e, com a ausência do entalhe, não foi feito o uso dos transdutores LVDTs pela incerteza da origem da fissuração. A ausência do entalhe foi justificada pela garantia da zona de flexão pura, assim, a indução da fissura é obtida de forma natural e sem a presença de esforços cisalhantes, como ilustrado na figura 10, o que por sua vez possibilitou a realização da análise do comportamento da propagação da fissura.

Caracterização do comportamento do CRF

Figura 10 – Vistas isométricas do arranjo de ensaio adotado e da região do terço médio isento dos esforços de cisalhamento. Fonte: Autores (2023)



Os autores optaram por adotar a norma europeia EN 14651 (CEN, 2007) para avaliar e caracterizar elementos de concreto reforçado com fibras (CRF), apesar da existência de outros instrumentos normativos como ASTM C - 1018, NBN B 15 - 238 e EFNARC. A escolha dessa norma se deu devido ao seu papel central no dimensionamento de estruturas de CRF, conforme preconizado pelo Model Code 2010 (FIB, 2012) (Souza, 2018).

Após a coleta de dados, estes, foram aplicados nas formulações normatizadas para obter as características das abordagens realizadas. A relação proposta entre o deslocamento axial (δ) e a abertura de fissura (CMOD) em milímetros é expressa pela equação 1.

$$\delta = 0,85CMOD + 0,04 \quad (1)$$

Para a análise da curva carga-abertura de fissura, segundo a norma EN 14651 (CEN, 2007), são adotadas as resistências que correspondem aos Estados Limite Último ($f_{R,3}$) e de Serviço ($f_{R,1}$), e o limite de proporcionalidade extraídos do gráfico do ensaio, sendo calculadas de acordo com as equações 2 e 3.

$$f_{R,j} = \frac{3*F_j*l}{2*b*h_{sp}^2} \quad (2)$$

$$f_{ct,L}^f = \frac{3*F_L*l}{2*b*h_{sp}^2} \quad (3)$$

Onde:

$f_{R,j}$: é a resistência residual à flexão correspondente à abertura de fissura j, onde j = 0,5; 2,5; 2,5 ou 3,5 mm – $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$, respectivamente (MPa);

F_j : é a carga correspondente à abertura de fissura j, onde j = 0,5; 1,5; 2,5; ou 3,5 mm - F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , respectivamente (N);

L: é o vão de ensaio (mm);

b: é a largura do corpo de prova (mm);

h_{sp} : é a distância entre o topo do entalhe e a face superior do corpo de prova (mm);

$f_{ct,L}^f$: limite de proporcionalidade (MPa), identificado como LOP. Define a resistência calculada a partir da carga máxima dentro do intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm;

F_L : carga máxima de ensaio (N) entre o intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm.

Para averiguar o bom desempenho de elementos estruturais de CRF, o Model Code 2010 (FIB, 2012) traz como recomendação as equações 4 e 5 que relacionam o estado limite último ($f_{R,1k}$), o estado limite de serviço ($f_{R,3k}$) e a resistência nominal característica do concreto (f_{Lk}).

$$f_{R,1k} / f_{Lk} \geq 0,4 \quad (4)$$

$$f_{R,3k} / f_{R,1k} \geq 0,5 \quad (5)$$

O atendimento dessas equações aferem uma garantia de bom desempenho para os elementos estruturais.

Além da verificação de desempenho, o Model Code 2010 (FIB, 2012) adota a relação presente na equação 5 como parâmetro de classificação do comportamento do CRF quanto a tenacidade, onde $f_{R,1k}$ está compreendido no intervalo de 1 a 8 MPa e a relação $f_{R,3k} / f_{R,1k}$ pode ser representada pelas letras (a, b, c, d, e) como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Classes para as resistências residuais $f_{(R,3k)}^a / f_{(R,1k)}$, obtidas pelo ensaio EN 14651 (CEN, 2007).

Fonte: EN 14651 (2007)

Letras	Condições
a	$0,5 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 0,7$
b	$0,7 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 0,9$
c	$0,9 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 1,1$
d	$1,1 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 1,3$
e	$1,3 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}}$

RESULTADOS

Após o tratamento dos dados, foram traçadas as curvas de carga por abertura de fissura agrupadas por lote considerando a espessura da camada de CRFP, tais curvas são apresentadas a seguir:

As curvas de carga pelo deslocamento dos 03 lotes com os 09 espécimes moldados estão representadas nas figuras 11 (a), (b) e (c).

Figura 11(a) – Curvas sobrepostas de carga versus deslocamento das vigas com 50% do volume de CRFP e 50% de CF.
Fonte: Dias et al. (2019)

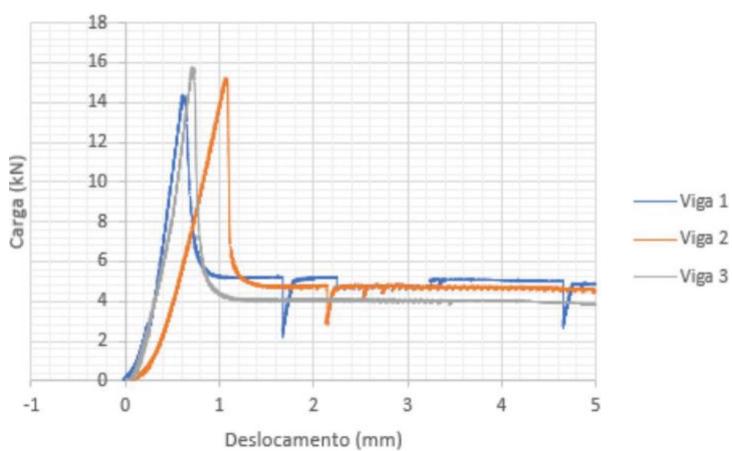


Figura 11(b) – Curvas sobrepostas de carga versus deslocamento das vigas com 66,67% de volume de CRFP e 33,33% de CF.
Fonte: Dias et al. (2019)

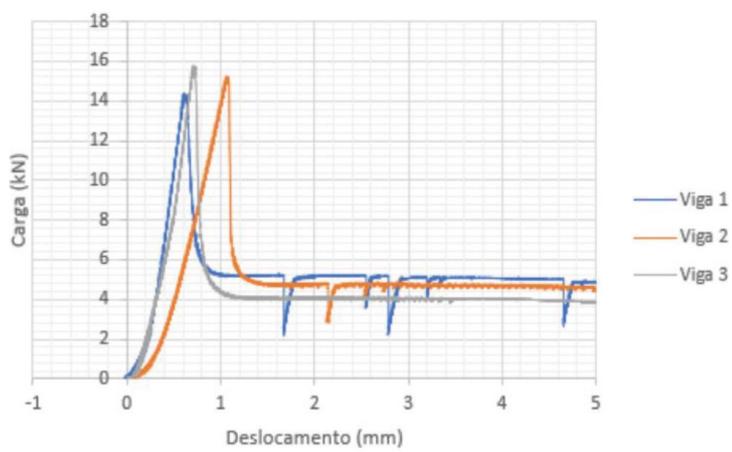
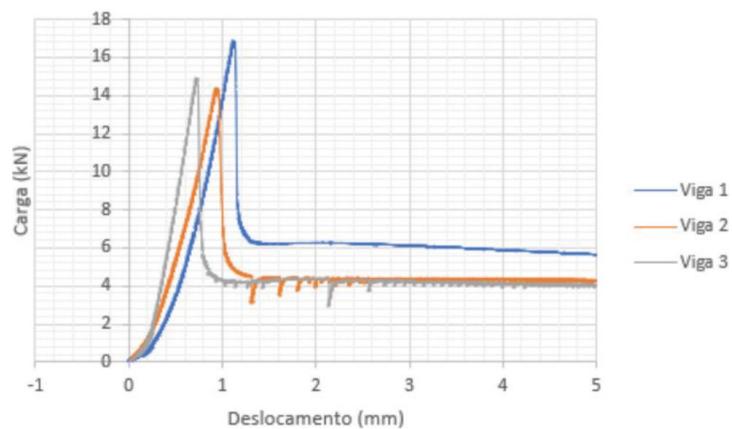


Figura 11(c) – Curvas sobrepostas de carga versus deslocamento das vigas com 100% de volume de CRFP.
Fonte: Dias et al. (2019)



Silva et al. (2019)

As curvas de carga pelo deslocamento dos 03 lotes com os 16 espécimes moldados estão representadas nas Figuras 12 (a), (b) e (c).

Figura 12(a) – Curvas de carga por abertura de fissura dos corpos de provas compostos por 100% de CRFP.

Fonte: Silva et al. (2019)

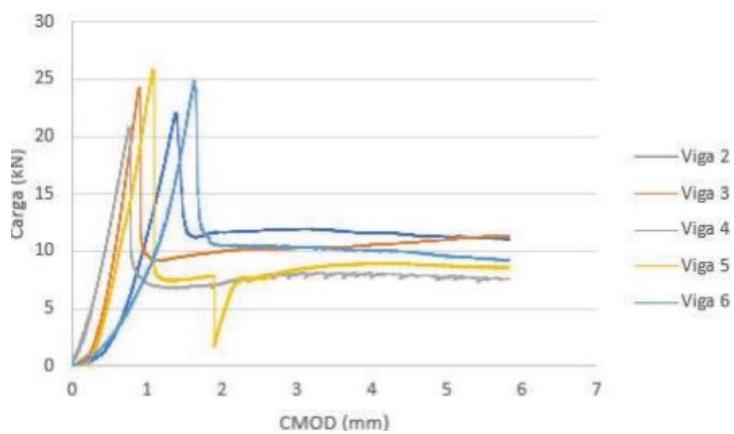


Figura 12(b) – Curvas de carga por abertura de fissura dos corpos de provas compostos por 75% de CRFP e 25% de CF.

Fonte: Silva et al. (2019)

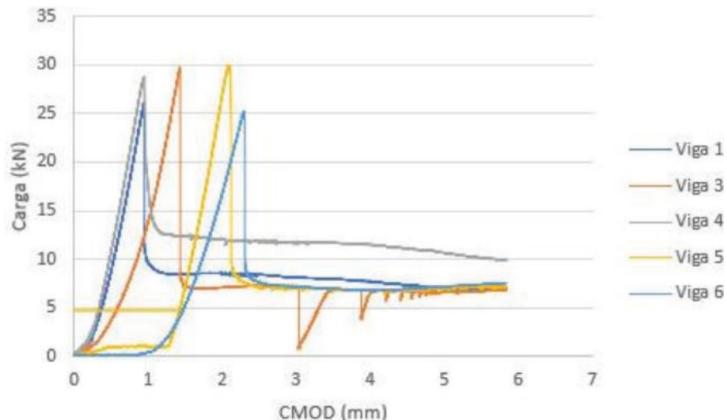
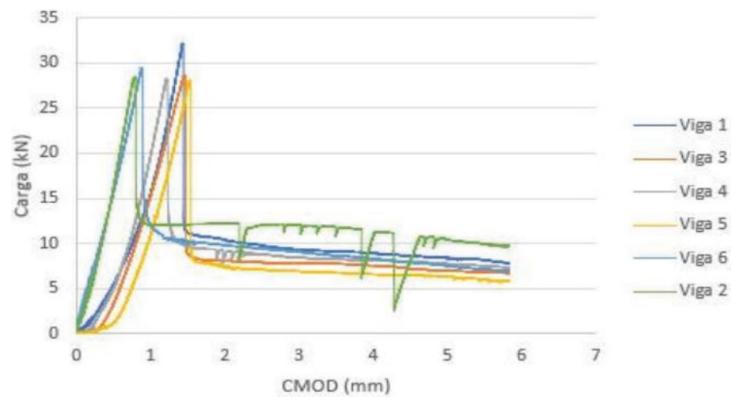


Figura 12 (c) – Curvas de carga por abertura de fissura dos corpos de provas compostos por 50% de CFRP e 50% de CF.

Fonte: Silva et al. (2019)



Para todos os lotes, observa-se um comportamento de softening no estado pós-pico, o que se mostra esperado visto que o volume de fibras utilizado nas moldagens se encontra abaixo do volume crítico.

Além disso, a queda acentuada de resistência após a ruptura da matriz, e a incapacidade das fibras de absorver e redistribuir a energia nesse estágio do ensaio, mostra adesão às características das fibras utilizadas, uma vez que estas apresentam um baixo módulo de elasticidade, fator característico das fibras poliméricas (Figueiredo, 2011).

Após a dissipação inicial de energia, observa-se uma estabilização do comportamento do elemento com a formação de um patamar de escoamento onde há baixa variação da perda de resistência. Nesse estágio, as fibras atuam de forma preponderante absorvendo a energia e resistindo aos esforços de tração nas regiões fissuradas e, assim, reduzindo a velocidade da propagação e limitando a abertura das fissuras (Di Prisco; Plizzari; Vandewalle, 2009; Prisco *et al.*, 2010).

No tocante às cargas de ruptura das matrizes, é notada a diferença entre os valores obtidos para cada autor em suas abordagens. Com base nas curvas de carga por deformação, foram levantados os valores extremos e médios para as cargas de pico de cada conjunto de corpos de prova de acordo com a espessura da camada de fibras adotada, como apresentando no quadro 5.

Quadro 5 – Comparativo das resistências de pico entre as abordagens realizadas pelos autores.
Fonte: Autores (2023)

%CRPF	Dias <i>et al.</i> (2019)			Silva <i>et al.</i> (2019)			Comparação entre os autores	
	Límite Inferior (kN)	Límite Superior (kN)	Valor médio (kN)	Límite Inferior (kN)	Límite Superior (kN)	Valor médio (kN)	Valores médios (kN)	%
100	14,4	16,8	15,3	21	26	23,9	+8,6	+56,21
75	-	-	-	25	30	28	-	-
66,67	14,4	15,8	15,1	-	-	-	-	-
50	14,4	15,8	15,1	28	32,5	28,9	+13,8	+91,39

Ao analisar o comparativo das resistências de pico, fica evidente uma significativa influência da abordagem adotada por cada autor na capacidade resistiva máxima do elemento estrutural.

Essa discrepância pode ser justificada pela forma como a abordagem de Silva *et al.* (2019) lidou com o entalhe na peça. A remoção do entalhe retirou a indução de fissuração em um ponto específico da peça. Além disso, o arranjo do ensaio com a realização da flexão em 4 pontos eliminou as tensões de cisalhamento no local de fissuração. Tal combinação de fatores permitiu a ocorrência de uma ruptura em uma zona de flexão pura na região do terço médio da viga, o que pode explicar a diferença

nos resultados de resistência em relação às outras abordagens analisadas.

Ademais, ao analisar a variação de resistência dentro de cada abordagem dos autores, observamos um padrão distinto de comportamento em cada situação. De acordo com Dias *et al.* (2019), houve manutenção das resistências à medida que as camadas variavam. Já segundo Silva *et al.* (2019), houve um aumento de resistência com a variação das camadas.

Apesar das diferenças, ambas as abordagens destacam a influência da redução da espessura da camada de CRFP na metodologia de moldagem em camadas. Ao reduzir a quantidade de fibras utilizadas, foi possível manter a resistência dos elementos estruturais em comparação com aqueles compostos integralmente de CRFP e, em alguns casos, obter um ganho de resistência por meio dessa abordagem.

Os resultados obtidos são consequência da influência causada nas fibras devido à moldagem em camadas, visto que essa abordagem de moldagem reduz a aleatoriedade na distribuição das fibras dentro do elemento, levando ao alinhamento preferencial em uma direção paralela às linhas de tensão. Esse alinhamento proporciona uma maior efetividade no reforço das fibras junto ao CRF (Wille; Parra-Montesinos, 2013).

Em seguimento a análise da curva carga-abertura de fissura, com a aplicação das equações 2 e 3 foram calculados os limites de proporcionabilidade e as resistências residuais para as aberturas de fissura em 0,50 mm e 2,5 mm, as quais correspondem às resistências nos Estados Limite Último ($f_{R,3}$) e de Serviço ($f_{R,1}$).

Os resultados das médias dos lotes estão apresentados nos quadros 6 e 7.

Quadro 6 – Resultados obtidos com as curvas carga versus abertura de fissura, segundo EN 14651 (CEN, 2007) - Dias *et al.* (2019). Fonte: Adaptado, Dias *et al.* (2019)

%CRFP	Amostra	LOP (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,1} / LOP$	$f_{R,3} / f_{R,1}$	Classificação de desempenho
100	Média	4,52	1,66	1,44	0,38	0,88	-
66,67	Média	4,83	1,50	1,46	0,31	0,98	-
50	Média	4,92	1,59	1,53	0,32	0,96	-
100	D.P.	0,55	0,35	0,19	0,12	0,12	-
66,67	D.P.	0,23	0,20	0,19	0,06	0,02	-
50	D.P.	0,42	0,35	0,34	0,05	0	-

Quadro 7 – Resultados obtidos com as curvas carga versus abertura de fissura, segundo EN 14651 (CEN, 2007) - Silva et al. (2019).
Fonte: Adaptado, Silva et al. (2019)

%CRFP	Amostra	LOP (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,1} / LOP$	$f_{R,3} / f_{R,1}$	Classificação Resistência Residual
100	Média	0,058	1,3118	2,131	22,411	1,626	1,0 e
75	Média	0,072	1,509	1,995	20,969	1,322	1,5 e
50	Média	0,153	1,729	2,039	11,266	1,179	1,5 d
100	D.P.	0,064	0,917	0,393	18,974	2,423	1,061
75	D.P.	0,019	0,944	0,449	10,252	2,765	1,025
50	D.P.	0,176	1,444	0,381	20,200	2,022	1,169

Ao analisar os valores presentes no quadro 6, pode-se observar que os valores médios dos lotes avaliados não atenderam aos requisitos estipulados nas equações 3 e 4, apresentando valores inferiores a 0,4 para a relação $f_{R,1} / LOP$. Essa constatação indica que o concreto reforçado com um teor de fibras poliméricas de 3,78kg/m³ não apresenta garantia de bom desempenho em elementos estruturais. Portanto, essas fibras não podem ser parcialmente substituídas por barras metálicas e não estão em conformidade com os critérios estabelecidos pelo FIB Model Code 2010 (FIB, 2013).

É importante ressaltar que esses resultados insatisfatórios podem ser atribuídos à incompatibilidade da metodologia de caracterização do CRF na abordagem da moldagem em camadas. Além disso, outro fator que pode ter atenuado os resultados é o baixo teor de fibras utilizado e a possível má homogeneização das fibras na matriz do concreto durante a concretagem. Esses elementos podem ter impactado negativamente na resistência e no comportamento estrutural do CRF, levando aos resultados observados.

Ao avaliar os resultados apresentados no quadro 7, podemos constatar nesta abordagem que as fibras poliméricas atendem aos requisitos das equações 3 e 4, com relações $f_{R,1} / LOP$ e $f_{R,3} / f_{R,1}$ superiores a 0,4 e 0,5, respectivamente. Essa conformidade permite a aferição de bom desempenho ao concreto reforçado com fibras poliméricas.

Além disso, seguindo o descrito no Quadro 4, as amostras receberam classificações (1,0 e), (1,5 e) e (1,5 d) para os percentuais de CRFP de 100%, 75% e 50%, respectivamente. Essas classificações têm a finalidade de reforçar a qualidade do concreto reforçado com fibras, demonstrando sua adequação aos padrões estabelecidos pelo FIB Model Code 2010 (FIB, 2013) e garantindo a confiabilidade estrutural do material em diferentes proporções de fibras poliméricas.

Atenta-se ainda com relação aos resultados apresentados no quadro 4, que, dada a abordagem adotada pelo autor, a adequada avaliação realizada pelos instrumentos normativos utilizados se mostra prejudicada visto o não atendimento de todos os parâmetros estabelecidos para a obtenção dos valores de ensaio, fazendo assim com que a aderência com os resultados esperados careça de um aprofundamento dos estudos da abordagem proposta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destaca-se, inicialmente, que pela inexistência de um instrumento normativo com previsão da abordagem realizada pelos autores no tocante a moldagem em camadas, a avaliação dos resultados obtidos com o emprego dos instrumentos normativos adotados se torna prejudicada, uma vez que não são levadas em consideração as interferências da alteração da espessura da camada de concreto com fibras bem como a alteração do posicionamento das fibras dentro do elemento estrutural.

Tais fatores, aliados à adoção de arranjos de ensaios distintos, dão argumentos para a interpretação dos valores obtidos para cada autor e para a comparação entre eles.

Na abordagem realizada por Dias *et al.* (2019) , pode-se observar uma semelhança entre os valores de desempenho obtidos para as variações propostas, no entanto, também são observados ganhos expressivos no Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU) a medida que foi realizada a redução da espessura da camada de concreto com fibras.

Na abordagem realizada por Silva *et al.* (2019) , observa-se um ganho expressivo nos valores de desempenho obtidos para as variações propostas com um incremento médio de resistência de fissuração de 20,92% quando comparados os conjuntos dos elementos compostos integralmente de CRFP com aqueles com 50% de CRFP e 50% de CF.

Tais observações corroboram com a proposta da influência da moldagem em camadas no posicionamento ótimo das fibras, visto que a medida que a espessura da camada de CRF foi reduzida o alinhamento preferencial das fibras foi intensificado levando a uma compensação da redução da quantidade de fibras na região solicitada.

Como fator atenuante para a discrepância entre os valores obtidos para cada abordagem, é importante considerar as implicações que a escolha do arranjo de ensaio e a abordagem adotada podem ter causado nos resultados obtidos. Em comparação, como apresentado no Quadro 5, os autores utilizaram proporções semelhantes, resultando em um ganho de resistência de 56,21% para elementos com 100% de CRFP e de 91,39% para aqueles com uma camada de 50% de CRFP.

A remoção do entalhe evitou a indução de fissuração em um ponto específico, enquanto a realização da flexão em 4 pontos eliminou as tensões de cisalhamento no local de fissuração. Por outro lado, a manutenção do entalhe e a realização da flexão em 3 pontos levou a interferência das tensões de cisalhamento no local de fissuração, o que pode ter limitado o potencial de reforço das fibras e, consequentemente, resultou em valores de resistência inferiores.

O uso das fibras na região de maior solicitação de tração mostrou-se relevante, mediante ao fato de que os espécimes de multicamadas obtiveram valores de desempenho superiores ou equivalentes aos compostos por uma maior quantidade de fibras. Deste modo, teve-se uma redução no custo final da peça, mantendo as suas vantagens.

REFERÊNCIAS

- ABRISHAMBAF, A.; BARROS, J. A. O.; CUNHA, V. M. C. F. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. **Cement and Concrete Research**, v. 51, p. 57–66, Set. 2013.
- ABUKHASHABA, M. I.; MOSTAFA, M. A.; ADAM, I. A. Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 2, p. 341–354, jun. 2014.
- AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 287–293, mar. 2012.
- ALFERES FILHO, R. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação do grau de orientação de fibras de aço induzida na moldagem de elementos pla-

nos com concreto autoadensável. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.

AMARAL JÚNIOR, J. C. do; SILVA, L. C. F.; MORAVIA, W. G. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017.

DEEB, R.; KARIHALOO, B. L.; KULASEGARAM, S. Reorientation of short steel fibres during the flow of self-compacting concrete mix and determination of the fibre orientation factor. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 112–120, fev. 2014.

DIAS, G. S.; OLIVEIRA, K. C. da S.; BRUNO, W.; SOUZA, D. de A.; MELO, A. H. V. de M.; BARBOZA, A. da S. R. Estudo experimental do comportamento de resistência a flexão em elementos de concreto com dupla camada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61., 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2019.

FIB. **Model code 2010**: final draft. Lausanne: International Federation for Structural Concrete. 2012.

FIGUEIREDO, Antônio D. de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248f. Tese (Livre Docênciam) - Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, E. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de resistência, fissuras e deformações**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, p. 985–1015, 2005.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concreto auto-adensável de alta resistência com aditivos minerais. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 2003.

JANSSON, A. **Effects of Steel Fibres on Cracking in Reinforced Concrete**. Thesis (Doctorade of Philosophy). Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg (SE), 2011.

LIAO, LIN; DE LA FUENTE, A.; CAVALARO, S.; AGUADO, A. **Complementary use of inductive test and bedding test for the characterization of SFRC.** 2014.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras.** 2012. 201f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Tendências para o uso de fibras no reforço estrutural de tubos de concreto. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 108, n. 108, p. 87-97, out./dez. 2022. Disponível em: https://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao108/Revista%20IBRACON%20108%20final.pdf. Acesso em: 20 jul. 2023.

MOURA, T. R. C. de. Demonstração do cálculo da linha neutra em vigas submetidas à flexão. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 04, ed. 10, vol. 10, p. 99-115, out. 2019.

NAAMAN, A.; SHAH, S. **Bond studies on oriented and aligned steel fibres.** In: RILEM Symp, Fibre Reinf Cem and Concr. [S.l.: s.n.], 1975. p. 171-178.

SILVA, W. B. A. M.; OLIVEIRA K. C. da S.; DIAS, G. S.; FREITAS, D. J. P.; BARBOZA, A. da S. R. Avaliação da propagação de fissuras em espécimes de dupla camada em ensaio de flexão em 4 pontos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61., 2019, Fortaleza. **Anais [...].** Fortaleza: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2019.

SOUZA, Pedro Luís Araújo Seixas de. **Caracterização da distribuição e orientação das fibras em betões de elevado desempenho reforçado com fibras.** 2013/2014. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

WILLE, K; TUE, N. V.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1825-1838, aug. 2013.