

# AValiação DO ENSaIO DE DUPLO FENDILHAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO À TRACção DE UM CONCRETO DE ALTA RESISTência REFORçADO COM FIBRAS DE Aço

Erlucivânia Bueno da Silva<sup>1</sup>  
Kleber Silva Peixoto<sup>2</sup>  
Daniel de Lima Araújo<sup>3</sup>

## RESUMO

O ensaio de fendilhamento de corpo de prova com duplo corte em cunha, ou ensaio de duplo fendilhamento, é um típico ensaio de tração indireta. Neste ensaio, um plano do corpo de prova está submetido a um campo de tensões de tração aproximadamente constante, diferentemente do campo de tensões no ensaio de flexão em corpo de prova prismático utilizado para avaliar a tenacidade à tração do concreto fibroso. O objetivo deste trabalho é obter uma geometria adequada do corpo de prova para o ensaio de duplo fendilhamento que permita obter a resposta pós-pico de um concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), utilizando uma máquina de ensaio eletromecânica. Com a geometria definida, foi analisada a influência de dois tipos de fibras de aço no comportamento à tração de um UHPFRC. Concluiu-se que o ensaio de duplo fendilhamento é viável para a caracterização à tração do UHPFRC, desde que a geometria do corpo de prova seja adequadamente definida para garantir que a ruptura ocorra no plano de fendilhamento. Além disso, identificou-se grande influência do diâmetro da fibra de aço no comportamento pós-pico do UHPFRC.

**Palavras-chave:** Ensaio de duplo fendilhamento, fibra de aço, DEWS, UHPC, UHPFRC.

## EVALUATION OF THE DOUBLE-EDGE WEDGE SPLITTING TEST FOR TENSILE CHARACTERIZATION OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE

### ABSTRACT

The double-edge wedge splitting (DEWS) test, or double splitting test, is a typical indirect tension test. In this test, a plane of the specimen is subjected to an approximately constant tensile stress field, differing from the stress field used in flexural tests to assess the tensile strength of fibrous concrete prism specimens. This study aimed to determine an adequate specimen geometry to assess the post-peak response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) in DEWS test using an electromechanical testing machine. After identification of the best geometry, the influence of two types of steel fibers on the tensile behavior of UHPFRC was analyzed. It was concluded that the DEWS test is suitable for assessing the tensile characteristics of UHPFRC, provided that the specimen geometry is properly defined to ensure that failure occurs in the crack plane. Moreover, the results revealed a large influence of steel fiber diameter on the post-peak behavior of UHPFRC.

**Keywords:** Double splitting test, steel fiber, DEWS, UHPC, UHPFRC

Recebido em 17 de novembro de 2024. Aprovado em 20 de dezembro de 2024

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (2013) e mestrado em Mestrado Estruturas e Materiais pela Universidade Federal de Goiás (2016). Especialização em estruturas metálicas pelo SENAI FATESG (2017). Doutorando em Estruturas e Materiais pela Universidade Federal de Goiás. Atualmente é professora da Faculdade Unida de Campinas. erlucivania@gmail.com

<sup>2</sup> Engenharia Civil Pela Universidade Federal De Goiás. klebersilva@discente.ufg.br

<sup>3</sup> Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás (1992), mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela Universidade de São Paulo (1997) e doutorado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) também pela Universidade de São Paulo (2002). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Goiás, atuando junto ao Programa de Pós-Graduação (mestrado e doutorado) em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGECON) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG. dlaraujo@ufg.br

## INTRODUÇÃO

O concreto reforçado com fibras é um compósito formado por uma matriz cimentícia associada com fibras, que podem ser de natureza metálica, vítrea, sintética ou de carbono. A adição de fibras à matriz cimentícia tem como principal objetivo minimizar o comportamento frágil do concreto à tração, o que é especialmente importante nos concretos de alta resistência à compressão. A presença de fibras no concreto fissurado permite a transferência de tensões através das fibras, reduzindo a concentrações de tensões no concreto, o que garante naturalmente maior controle da fissuração.

Segundo Li et al. (2021), o uso de fibras de aço em UHPC (Concreto de Ultra Alto Desempenho) resulta em uma maior ductilidade e tenacidade, permitindo um melhor controle do comportamento pós-fissuração e uma maior capacidade de absorção de energia. Além disso, a adição de fibras de aço pode melhorar a resistência ao impacto e a fadiga do UHPC. De acordo com os estudos de Zhou et al. (2020), a adição de fibras de aço ao UHPC também pode melhorar a resistência ao cisalhamento e a flexão, bem como reduzir a sua fissuração.

Existem na literatura vários estudos que avaliaram as propriedades mecânicas do UHPFRC (Concreto de Ultra Alta Resistência Reforçado com Fibras de Aço). Por exemplo, Deeb et al. (2019) avaliaram o desempenho de vigas de UHPC reforçadas com fibras de aço à flexão, e concluíram que a adição das fibras de aço resultou em uma melhoria significativa na resistência à flexão e na capacidade de deformação das vigas.

Além disso, outros trabalhos investigaram a influência de diferentes parâmetros, como a proporção de fibras, o tipo de fibra, o teor de cimento e a relação água/cimento, nas propriedades do UHPFRC. Por exemplo, Yan et al. (2021) avaliaram o efeito da proporção de fibras de aço no desempenho mecânico do UHPC reforçado com fibras de aço, e concluíram que a melhor propriedade mecânica do UHPC foi alcançada quando o teor de fibra de aço era de 4%, atingindo resistência à compressão aos 28 dias de até 163,2 MPa e resistência à tração na flexão de até 45,9 MPa.

Segundo a Norma Francesa NF P 18-470:2016 (AFNOR, 2016a), o UHPFRC é definido como um concreto caracterizado pela alta resistência à compressão (superior a 130 MPa), alta resistência à tração (maior que 6 MPa) e comportamento pós fissuração dúctil, viabilizando o projeto e a execução de estruturas e elementos estruturais sem o uso de armaduras passivas ou ativas (AFNOR, 2016a). Já na Norma Francesa NF P 18-710:2016, o UHPFRC é especificado como um concreto com alta resistência à compressão, entre 150 MPa e 250 MPa, e resistência à tração também maior que 6 MPa (AFNOR, 2016b).

O comportamento à tração do UHPFRC, normalmente, é caracterizado por meio de ensaios de prismas submetidos à flexão (AFNOR, 2016a). A partir desse ensaio, a lei constitutiva à tração do UHPFRC é obtida por meio de análise inversa. Uma forma alternativa de obter diretamente a lei constitutiva à tração do UHPFRC é empregando o ensaio de fendilhamento em corpo de prova com duplo corte em cunha (DEWS) (CUENCA et al., 2021; Monte & Ferrara, 2020).

Este trabalho tem por objetivo modificar um esquema de ensaio de duplo fendilhamento (DEWS) existente na literatura de modo a se caracterizar o comportamento pós-pico de um UHPFRC utilizando uma máquina de ensaio eletromecânica. E, a partir desse ensaio, determinar a influência de dois tipos de fibras de aço no comportamento à tração de um traço de UHPC desenvolvido nesta pesquisa.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### *Método de dosagem do UHPC*

O Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) é um material de construção altamente avançado, caracterizado por suas excelentes propriedades mecânicas e durabilidade. A dosagem adequada do UHPC é fundamental para garantir a obtenção dessas propriedades. Existem diferentes processos e métodos de dosagem para o UHPC, como a mistura seca, a mistura úmida e a mistura semelhante à do concreto convencional, cada um com suas próprias vantagens.

Um método comumente utilizado para dosagem do UHPC é o método de dosagem por volume, em que os materiais são medidos por volume. No entanto, este método é criticado por alguns autores devido à possibilidade de variação na compactação dos materiais e na densidade do pó utilizado, o que pode levar a diferenças na resistência do UHPC (Li et al., 2019).

Outro método utilizado para dosagem do UHPC é o método de dosagem por massa, em que os materiais são medidos em massa. Este método é considerado mais preciso do que o método de dosagem por volume, pois a compactação dos materiais é menos crítica e a densidade do pó utilizado não afeta a dosagem (Ferrara et al., 2014).

Husken e Brouwers (2008) constataram que a quantidade de finos a ser incorporada nas misturas deve ser limitada, porém este limite depende da distribuição granulométrica dos demais constituintes. A presença de um grande percentual de finos acaba demandando uma maior quantidade de água, o que fará com que o traço tenha sua durabilidade prejudicada devido ao aumento da relação água/cimento.

O estudo de dosagem do UHPC passa por uma avaliação da qualidade (origem, dureza, material orgânico) dos materiais a serem empregados, bem como da sua distribuição granulométrica. O comportamento do UHPC segue as mesmas leis fundamentais do concreto convencional, porém com a adição de aditivos redutores de água para melhorar suas características mecânicas, uma vez que a relação água/cimento interfere diretamente na sua resistência mecânica. Essas mudanças na composição do UHPC, em comparação com o concreto convencional, resultam em uma matriz com características reológicas distintas (Mahmoud et al. 2022).

De acordo com Christ (2019), as dosagens de UHPC são preponderantemente empíricas, sendo fundamental respeitar alguns princípios, tais como atingir a maior compacidade granular, empregar baixa relação água/cimento, aplicar aditivos que melhorem a trabalhabilidade e adicionar fibras ao UHPC para obter maior resistência à tração. Christ (2019) propôs um método de dosagem do UHPFRC baseado no método de otimização granular, aplicando o conceito de curva granulométrica ótima. O método consiste na seleção de materiais e análise de sua distribuição granulométrica. As etapas do método proposto por Christ (2019) podem ser resumidas em:

1. Escolha dos materiais (cimento, sílica, filler, areia): nessa etapa, opta-se, preferencialmente, por materiais com granulometria abaixo de 3 mm.
2. Determinação do Índice de Desvio de Empacotamento (IDE): aqui, procura-se obter o melhor empacotamento entre os diversos constituintes da mistura, aplicando-se o modelo de empacotamento de partículas proposto por Funk e Dinger, e modificada por Walker (2003), representada pela Equação (1):

$$\frac{PAD}{100\%} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{mas}^q - D_{min}^q} \quad (1)$$

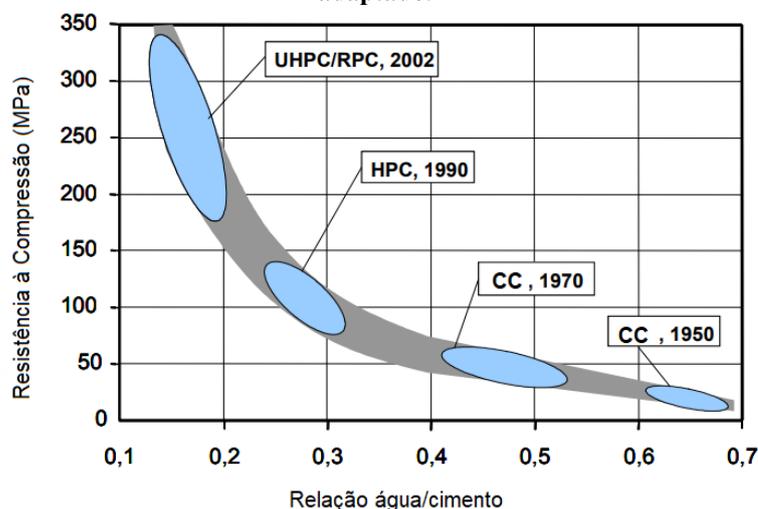
Nessa equação, PAD é o percentual acumulado do diâmetro avaliado; D é o diâmetro a ser avaliado, em mm; D\_max é o diâmetro da maior partícula em mm; D\_min é o diâmetro da

menor partícula, em mm; q é o coeficiente de distribuição, sendo indicado o valor de 0,25 para misturas com predomínio de materiais finos com granulometria abaixo de 250 .

O valor de q, também chamado de Expoente Fuller, varia entre 0 e 1. Simulações computacionais indicaram que o máximo empacotamento de esferas é obtido para  $q = 0,37$  (WALKER, 2003). Os valores utilizados na literatura variam entre 0,25 e 0,5. Quanto maior o desempenho requerido do concreto, menor o valor de q recomendado, pois implica em maior teor de argamassa (TORREGROSA, 2013).

3. Determinação da relação água/cimento: para o UHPC é aconselhável que a relação água/aglomerante esteja entre 0,16 e 0,24 (Figura 1). Em consequência da baixa quantidade de água na matriz do UHPC, torna-se necessário o emprego de uma quantidade significativa de aditivo superplastificante para garantir o comportamento reológico almejado.

**Figura 1 - Comparativo água/cimento em diferentes tipos de concretos. (CC – Concreto Convencional; HPC – Concreto de Alto Desempenho; UHPC Concreto de Ultra Alto Desempenho). Fonte: Muller (2006), adaptado.**



4. Determinação do teor de aglomerante: O consumo de cimento neste tipo de concreto varia entre 700 a 1200 kg/m<sup>3</sup>. Este consumo considerável de cimento reflete em uma considerável variação do calor de hidratação e na retração autógena do concreto (TORREGROSA, 2013).

5. Determinação do Teor Máximo de Fibras, usando a Equação (2) proposta por Martinie, Rossi e Roussel (2010).

$$T_{fibras} = \frac{400}{r} \left( 1 - \frac{M_{unitária}}{M_{específica}} \right) \quad (2)$$

Nessa equação,  $T_{fibras}$  é o teor máximo de fibras (%) a ser inserido na mistura; r é a relação de aspecto da fibra (comprimento/diâmetro);  $M_{unitária}$  é a massa unitária da areia;  $M_{específica}$  é a massa específica da areia.

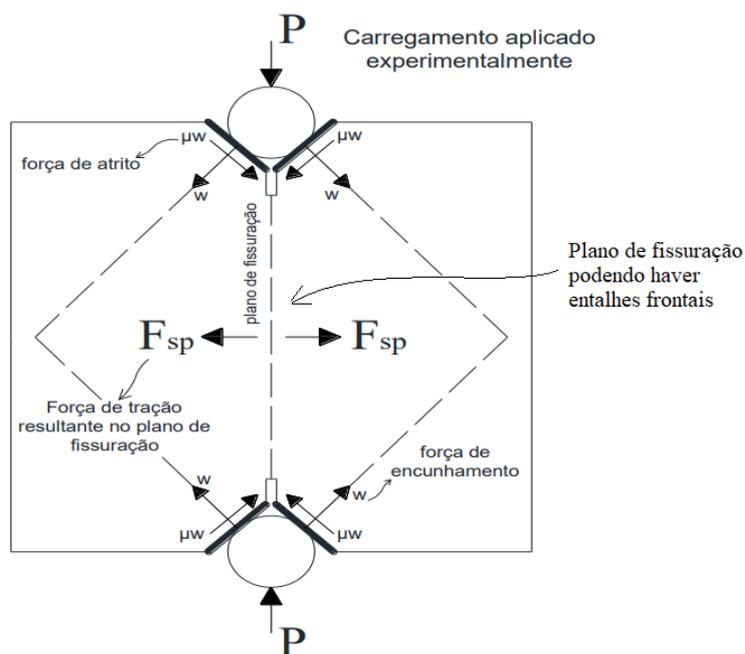
#### *O ensaio de duplo fendilhamento (dews)*

O ensaio de fendilhamento de corpo de prova com duplo corte em cunha, no inglês Double Edge Wedge Splitting (DEWS), ou simplesmente ensaio de duplo fendilhamento, é um ensaio de tração indireta que foi apresentado por Di Prisco, Lamperti e Lapolla (2010). Segundo

Borges (2017), o ensaio foi proposto buscando simplificar o ensaio de nome Wedge Splitting Test (WST) proposto por Brühwiler e Wittmann (1990).

Para execução do ensaio deve-se realizar dois cortes, no formato de cunha inclinada a 45°, localizados no meio das faces opostas de um corpo de prova cúbico. Juntamente aos cortes, são feitos entalhes nos vértices de cada cunha, com profundidade de 5 ou 10 mm, para induzir a formação da fissura nessa região. Por fim, a aplicação do carregamento é feita por meio de dois cutelos cilíndricos (com diâmetro de 30 mm) apoiados sobre as superfícies cortadas em cunha. Borges (2017) recomenda a fixação de placas metálicas nas superfícies dos cortes em cunha. A justificativa, segundo o autor, é que essa ação reduz ou elimina a perda de força por atrito entre as superfícies do cutelo e do corpo de prova. Com esta geometria, ao aplicar o carregamento externo de compressão, surge uma força de tração (FSP) na seção transversal do corpo de prova, conforme é mostrado na Figura 2. Tecnologia da Noruega, foi realizada a primeira pesquisa sobre a utilização da sílica ativa com o objetivo de se obter um concreto que fosse resistente à água altamente sulfatada de uma parte do túnel construído em Oslo. No fim da década de 1990, no Canadá tiveram os primeiros indícios em relação à utilização da sílica ativa. A partir de então, começaram a trabalhar e investigar este aditivo em diversos países (ALMEIDA, 1990).

**Figura 2 - Representação da distribuição de forças no corpo de prova durante o ensaio DEWS. Fonte: Adaptado de: Di Prisco, Ferrara e Lamperti (2013)**



A abertura da fissura à tração (Crack Opening Displacement ou COD) no plano central, ou plano de fendilhamento, é medida utilizando transdutores de deslocamento fixados nas duas faces do corpo de prova. Com esse esquema de ensaio, é possível traçar a curva tensão de tração versus abertura de fissura (COD) do UHPFRC.

Este ensaio é considerado mais realista do que o ensaio de flexão em corpo de prova prismático para avaliar a tenacidade à tração do concreto, especialmente em concretos de alta resistência e ultra-alta resistência, pelo fato do plano de fendilhamento estar sujeito a um campo de tensões de tração aproximadamente constante. Diversos estudos avaliaram a eficácia do ensaio de duplo fendilhamento na avaliação da tenacidade à tração de concretos reforçados com fibras de aço. Por exemplo, Li et al. (2019) e Yang et al. (2020) realizaram o ensaio de duplo fendilhamento em corpos de prova de concreto reforçado com diferentes tipos de fibras de aço, e concluíram que o uso do DEWS é um método confiável para avaliar a tenacidade à tração de concretos reforçados com fibras de aço.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### *Traço do UHPFRC*

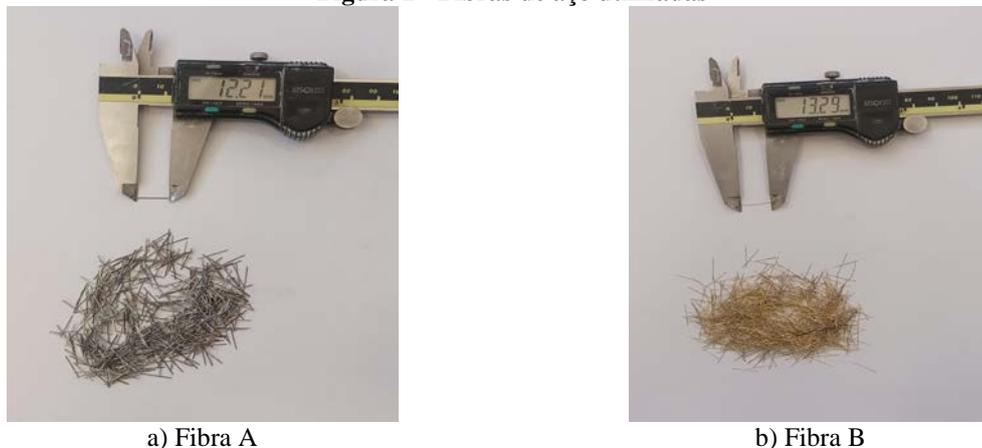
O traço do UHPFRC utilizado neste trabalho, com resistência mínima à compressão de 100 MPa, foi desenvolvido utilizando de matéria-prima local e empregando o método de dosagem desenvolvido por Christ (2019) baseado na otimização granular. O UHPFRC desenvolvido possuía agregados com dimensão máxima característica de 4,75 mm e 2% de fibras de aço, valor menor que o valor crítico obtido pela Equação (2) de 3,3 e 6,4% para as fibras A e B, respectivamente. Com o traço desenvolvido, foi analisada a influência do tipo de fibra de aço incorporada. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades das fibras A e B utilizadas (Figura 3) e na Tabela 2 é apresentada a composição dos traços. Além disso, foi utilizado um aditivo redutor de água (superplastificante PCE de pega normal) de alto desempenho de modo a se obter uma mistura autoadensável com fator água/cimento de 0,23.

A mistura do UHPFRC foi realizada em um misturador planetário de eixo vertical, com capacidade de 150 litros. O misturador possuía velocidade constante de giro das pás, com velocidade de rotação de 40 RPM. Para realização da mistura, foi adotado o seguinte procedimento:

- adicionar todos os agregados e ligantes no misturador;
- adicionar 85% do volume de água com o misturador ligado;
- misturar por 3 minutos;
- desligar o misturador e homogenizar;
- adicionar o aditivo redutor de água com 15% do volume de água;
- misturar por mais 6 minutos;
- desligar o misturador e esperar por um minuto. Observar se houve exsudação e/ou segregação.
- adicionar as fibras com o misturador em funcionamento em um intervalo de 3 minutos;
- medição do diâmetro de espalhamento (mínimo de 500 mm).

A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada 24 horas após a concretagem, sendo, em seguida, armazenados em câmara úmida, com controle de temperatura de  $22^{\circ} \pm 2^{\circ}$  e 100% de umidade, até a data do ensaio.

**Figura 1 - Fibras de aço utilizadas**



**Tabela 1 - Propriedades das fibras de aço, segundo os fornecedores**

Fibra	Comprimento da fibra ( $L_f$ ) (mm)	Diâmetro da fibra ( $d_f$ ) (mm)	Relação de aspecto ( $L_f/d_f$ )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
A	12,5	0,4	31,25	2900	200
B	13	0,2	65	2750	200

**Tabela 2 - Traços do UHPFRC**

Material	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )	
	Fibra A	Fibra B
Cimento CP II F-40	839	820
Sílica ativa	126	123
Areia artificial	962	941
Filler	261	255
Água	197	193
Superplastificante	29	29
Fibras	154	151

Para a caracterização das propriedades do UHPFRC no estado fresco, foram realizados os seguintes ensaios:

- ensaio de espalhamento (Figura 4-a) e determinação do índice de estabilidade visual e tempo de escoamento conforme a ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017a);
- determinação do teor de ar na mistura, de acordo com a norma ABNT NBR 16887 (ABNT, 2020);
- determinação da massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 9833 (ABNT, 2008);

A determinação da resistência à compressão foi realizada seguindo a metodologia presente na norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018b). A máquina utilizada para a ruptura dos corpos de prova cilíndricos, de 50 mm x 100 mm, possuía capacidade máxima de 300 kN e resolução de 0,1 kN. O ensaio foi realizado com velocidade de carregamento constante de 0,45 MPa/s. Dois corpos de prova de cada traço foram rompidos nas idades 28, 60 e 90 dias (Figura 4-b).

**Figura 4 - Ensaios de espalhamento e de resistência à compressão do UHPFRC**



a) Ensaio de espalhamento

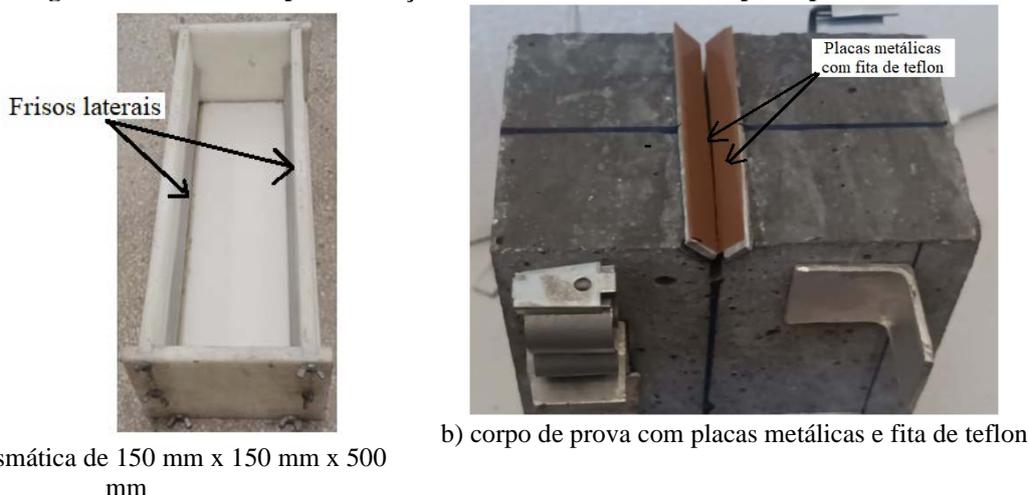


b) ruptura dos corpos de prova

#### *Ensaio de duplo fendilhamento*

A metodologia e os aparatos utilizados neste artigo para avaliar a resistência à tração por meio do ensaio de duplo fendilhamento foram desenvolvidos na pesquisa de Cândido (2022). Os corpos de prova de fendilhamento foram obtidos a partir do corte de corpos de prova prismáticos, com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm. A fôrma possuía, nas suas laterais, dois perfis metálicos para a formação da cunha no corpo de prova durante a moldagem (Figura 5a). Assim, era dispensado o corte do corpo de prova endurecido para formação da cunha.

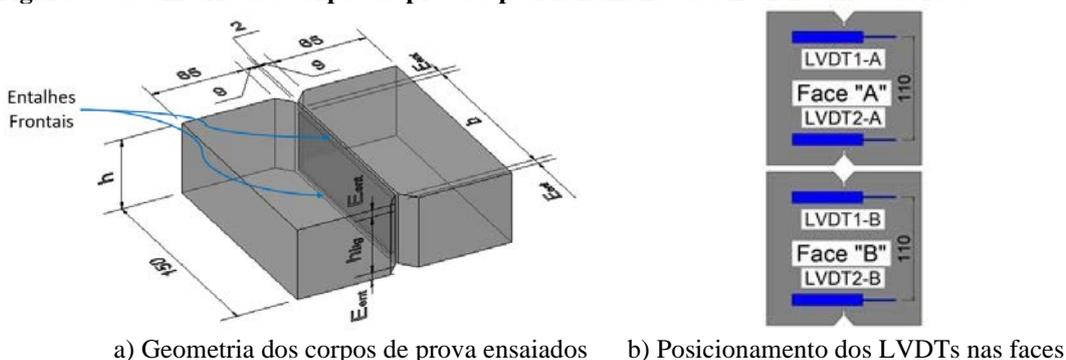
**Figura 5 - Detalhe dos perfis de aço nas laterais da fôrma e corpo de prova**



A seção transversal final dos corpos de prova do ensaio de duplo fendilhamento possuía um plano de fendilhamento com altura média (b) de 120 mm (Figura 6-a). A largura do corpo de prova e a largura do plano de fendilhamento eram variáveis, podendo apresentar entalhes nas duas faces frontais com profundidade variável conforme apresentado na Tabela 3. Para registro da abertura da fissura, os corpos de prova foram instrumentados com quatro LVDTs posicionados próximos à extremidade das cunhas (Figura 6-b).

A Série I foi utilizada com o objetivo de identificar a geometria mais adequada para obtenção da resposta pós-fissuração do UHPFRC em uma máquina de ensaio eletromecânica, assim como para obter a melhor forma de controle do ensaio (ciclo aberto com deslocamento do cutelo ou ciclo fechado com clipe gage). Já a Série II foi utilizada, após a determinação geométrica adequada na Série I, para identificar a influência do tipo de fibra de aço na resistência e na resposta pós-fissuração do UHPFRC. Na Tabela 3, as letras “A” e “B” após os nomes dos corpos de prova (CP) indicam qual fibra foi utilizada.

**Figura 6 - Geometria dos corpos de prova e posicionamento dos LVDTs em cada face**



**Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova de duplo fendilhamento**

Série	Tipo de Fibra	Nome do CP	Dimensões do corpo de prova (mm)		Profundidade do entalhe frontal (mm)	Controle da abertura da fissura
			Altura	Espessura ( <i>h</i> )		
Série I	A	CP1-I-A	150	100	-	Transdutores
		CP2-I-A	150	50	-	Transdutores
		CP3-I-A	150	50	10	Clipe Gage
		CP4-I-A	150	70	10	Clipe Gage
	B	CP1-I-B	150	50	5	Clipe Gage
		CP2-I-B	150	50	5	Transdutores
		CP3-I-B	150	50	5	Transdutores
		CP4-I-B	150	50	5	Transdutores
Série II	A	CP1-II-A	150	50	5	Transdutores
		CP2-II-A	150	50	5	Transdutores
		CP3-II-A	150	50	5	Transdutores
		CP4-II-A	150	50	5	Transdutores
	B	CP1-II-B	150	50	5	Transdutores
		CP2-II-B	150	50	5	Transdutores
		CP3-II-B	150	50	5	Transdutores
		CP4-II-B	150	50	5	Transdutores

Para a determinação da força de tração (FSP) no plano de fendilhamento, é necessário o conhecimento do valor do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) que surge entre o cutelo de aplicação da força e o corpo de prova. Para isso, foi utilizado o valor de  $\mu = 0,0323$  determinado na pesquisa de Cândido (2022), uma vez que nos ensaios deste artigo foi utilizado nas cunhas o mesmo tipo de tratamento empregado por Cândido (2022). Este autor usou uma chapa de alumínio colada em cada face da cunha e a revestiu com uma fita de teflon (politetrafluoroetileno), conforme mostrado na Figura 5b.

O ensaio de duplo fendilhamento é realizado aplicando uma força vertical no corpo de prova, por meio de um cutelo superior. Na Série I foram testados dois tipos de controle do ensaio (Tabela 3). Em um grupo, o ensaio foi realizado em ciclo fechado (closed-loop) por meio do controle da abertura da fissura no plano de fendilhamento com o uso de um Clip Gage fixado na parte superior do plano de fendilhamento (Figura 7a). O Clip Gage possuía resolução de 0,001 mm e o ensaio foi realizado sob velocidade de 0,01 mm/min até o surgimento da primeira fissura e de 0,040 mm/min até o final do ensaio. Em outro grupo, o ensaio foi realizado em ciclo aberto (open-loop) por meio da definição da taxa de deslocamento vertical do cutelo fixado à máquina de ensaio. Neste caso, foi utilizada uma taxa de deslocamento do cutelo de 0,01 mm/min até o surgimento da primeira fissura e de 0,040 mm/min até o final do ensaio. Para a medição da abertura da fissura no plano de fendilhamento, foram utilizados quatro transdutores lineares de deslocamento, dois em cada face do corpo de prova (Figuras 6b e 7b), com resolução de 0,01 mm.

**Figura 7 - Aparato e configuração do ensaio de duplo fendilhamento**



a) Controle no Clip Gage



b) Controle de deslocamento do cutelo

A força de tração no plano de fendilhamento ( $F_{sp}$ ) foi determinada realizando o equilíbrio de forças no diagrama exibido na Figura 1, resultando na Equação (3) (DI PRISCO, FERRARA e LAMPERTI, 2013):

$$F_{sp} = P \frac{\cos \theta - \mu \sin \theta}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \quad (3)$$

Nessa equação,  $P$  é a força aplicada pela máquina durante o ensaio, em N;  $\mu$  é o coeficiente de atrito estático entre o cutelo de aplicação da força e a superfície da cunha no corpo de prova (adotado como 0,0323);  $\theta$  é o ângulo formado entre a superfície da cunha e o centro do cutelo ( $45^\circ$ ).

Utilizando a Equação (4), é possível calcular a tensão de tração no plano de fendilhamento, que foi admitida constante.

$$f_{ct,wsp} = \frac{F_{sp}}{bh_{lig}} \quad (4)$$

Nessa equação,  $f_{ct,wsp}$  é a resistência à tração indireta por duplo fendilhamento, em N/mm<sup>2</sup>;  $b$  é a altura do plano de fendilhamento do corpo de prova, em mm;  $h_{lig}$  é a largura do plano de fendilhamento, em mm, que varia em função da profundidade do entalhe realizado na face frontal do corpo de prova.

As dimensões efetivas do plano de fendilhamento foram determinadas ao final do ensaio, após a separação das duas partes do corpo de prova, por meio de paquímetro eletrônico com resolução de 0,01 mm.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Propriedades do UHPFRC*

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades do UHPFRC no estado fresco, isto é: massa específica, diâmetro de espalhamento e teor de ar incorporado. Observa-se que as fibras não influenciaram na trabalhabilidade do UHPFRC, que apresentou diâmetro de espalhamento maior que 500 mm. O teor de ar incorporado foi inferior a 3%, mostrando que houve baixa incorporação de ar com o aditivo utilizado, além de não haver influência das fibras no teor de ar da mistura fresca.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de resistência média à compressão, nas idades de 28, 60 e 90 dias. Observa-se que o tipo de fibra de aço influenciou a resistência à compressão do concreto. Enquanto a resistência mínima de 100 MPa foi alcançada no traço com a Fibra B aos 28 dias, o traço com a Fibra A não atingiu esse nível de resistência, mesmo

aos 90 dias. Observa-se, ainda, pouco aumento da resistência à compressão após os 28 dias em ambos os traços.

**Tabela 4 - Propriedades do UHPFRC no estado fresco**

Traço	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro de espalhamento (mm)	Teor de ar incorporado (%)
Fibra A	2596,26	780,0	2,7
Fibra B	2547,80	803,3	2,2

**Tabela 5 - Resistência média à compressão do UHPFRC**

Idade (Dias)	f <sub>ci</sub> (MPa)	
	Traço Fibra A	Traço Fibra B
28	80,83	100,1
60	-	107,2
90	85,65	-

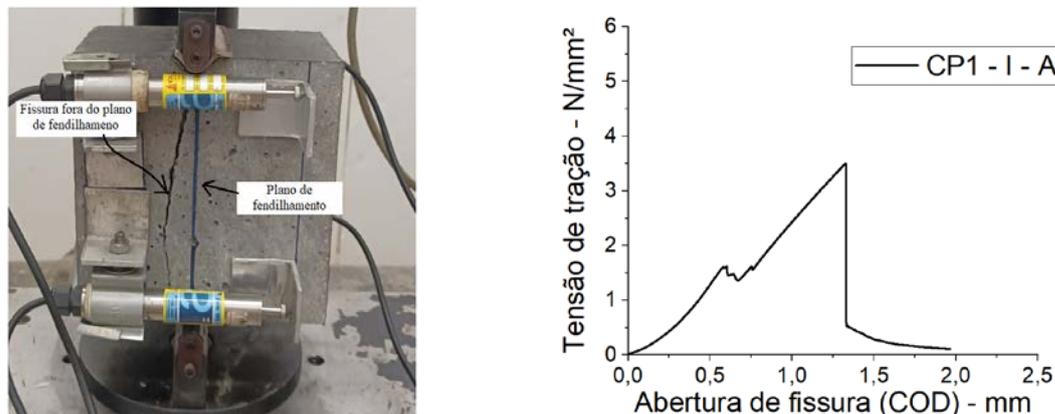
### Análise da geometria do corpo de prova

A Série I teve por objetivo avaliar a geometria do corpo de prova de forma a se obter uma resposta pós-fissuração ao UHPFRC utilizando uma máquina de ensaio eletromecânica, assim como verificar qual a melhor forma de controle de ensaio. Para isso, foram utilizados os corpos de prova apresentados na Série I da Tabela 3.

O primeiro ensaio consistiu na utilização de um corpo de prova com espessura de 100 mm (CP1-I-A) e controle do deslocamento do cutelo, como realizado por outros autores para a caracterização do concreto reforçado com fibras de aço (MONTE et al., 2023). Como observado na Figura 8a, a ruína ocorreu fora do plano de fendilhamento, com uma queda brusca da força logo após o pico de força (Figura 8b). Isso mostra que para o UHPFRC em análise, essa geometria do corpo de prova não é adequada.

A ruína brusca do CP1-I-A ocorreu devido à grande quantidade de energia armazenada no corpo de prova quando da formação da fissura no plano de fendilhamento, fato que é agravado devido à maior resistência do UHPFRC. Assim, a largura do corpo de prova CP2-I-A foi reduzida para 50 mm, conforme ensaio realizado por Di Prisco, Ferrara e Lamperti (2013) também em UHPFRC com resistência à compressão de 143 MPa e reforçado com 3% de fibras de aço de 13 mm de comprimento. Apesar da redução da força máxima resistida pelo corpo de prova em quase 1/3, ainda assim houve a ruína brusca quando da fissuração do concreto, que também ocorreu fora do plano de fendilhamento (Figura 9).

**Figura 8 - Forma de ruptura do corpo de prova e curva tensão de tração versus abertura da fissura (COD) – CP1-I-A**



a) Fissura no CP1-I-A

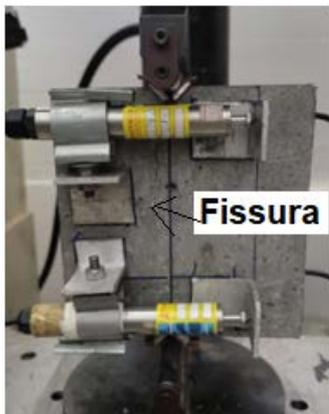
b) Curva tensão versus abertura da fissura (COD) no CP1-I-A

Na sequência, foram realizados três ensaios em ciclo fechado, com controle da abertura da fissura no plano de fendilhamento. De modo a garantir que a ruína ocorresse no plano de

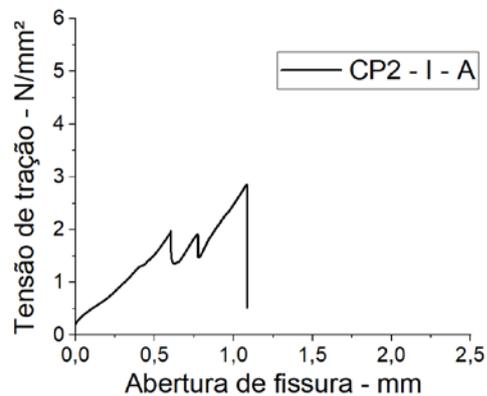
fendilhamento, foram executados entalhes, com espessura de 5 mm, nas faces frontais do corpo de prova. Com isso, a largura do plano de fendilhamento ( $h_{lig}$ ) era menor que a espessura do corpo de prova ( $h$ ) nesses ensaios. Os dois primeiros corpos de provas possuíam entalhes com profundidade de 10 mm, diferindo na espessura do corpo de prova: CP3-I-A, com espessura ( $h$ ) de 50 mm (Figura 10) e CP4-I-A, com espessura ( $h$ ) de 70 mm (Figura 11). O terceiro corpo de prova, CP1-I-B, possuía espessura ( $h$ ) de 50 mm e entalhe com profundidade de 5 mm (Figura 12). Com isso, a largura ( $h_{lig}$ ) do plano de fendilhamento era, respectivamente, 30 mm, 50 mm e 40 mm nesses corpos de prova.

Analisando as Figuras 10, 11 e 12 verifica-se que a medida que aumenta  $h_{lig}$  a resistência à tração diminui. A abertura da boca da fissura foi semelhante para a  $h_{lig}$  com 30 e 40 mm, no entanto, para  $h_{lig}=50$  mm obteve-se um maior valor para abertura da boca da fissura.

**Figura 9 - Forma de ruptura do corpo de prova e curva tensão de tração versus abertura da fissura (COD) – CP2-I-A**



a) Fissura no CP2-I-A

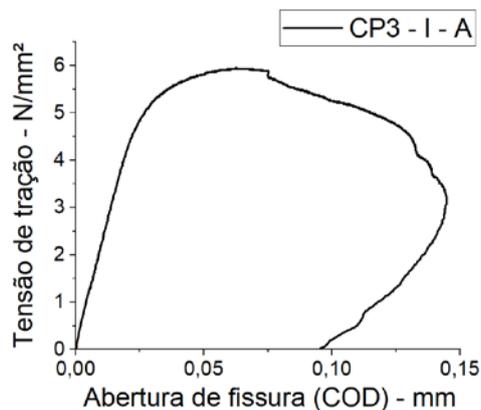


b) Curva de tensão versus abertura da fissura (COD) - CP2-I-A

**Figura 10 - Forma de ruptura do corpo de prova e curva tensão de tração versus abertura da fissura (COD) – CP3-I-A**



a) Face Frontal A –  $h_{lig} = 30$  mm

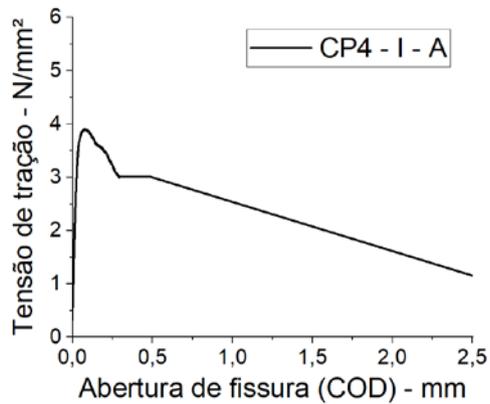


b) Curva tensão de tração versus abertura de fissura (COD)

**Figura 11 - Forma de ruptura do corpo de prova e curva tensão de tração versus abertura da fissura (COD) – CP4-I-A**



a) Face frontal A –  $h_{lig} = 50$  mm

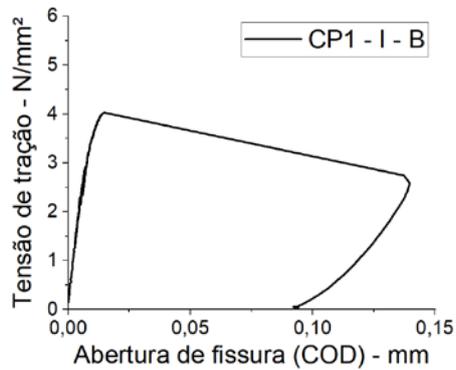


b) Curva tensão de tração versus Abertura de fissura (COD)

**Figura 12 - Forma de ruptura do corpo de prova e curva tensão de tração versus abertura da fissura (COD) – CP1-I-B**



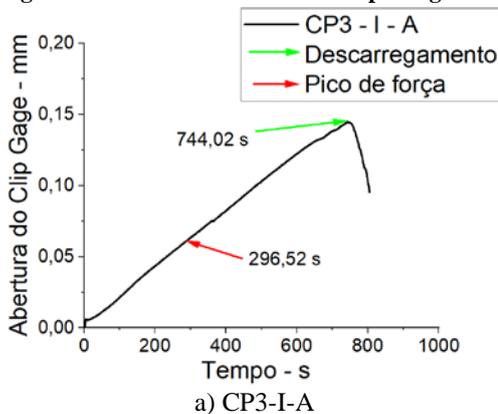
a) Face Frontal A –  $h_{lig} = 40$  mm



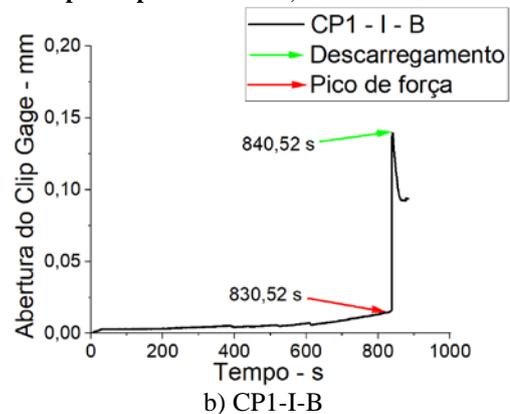
b) Curva tensão de tração versus abertura de fissura (COD)

A Figura 13 apresenta a abertura registrada pelo Clip Gage ao longo do ensaio. Observa-se que, com essa configuração, não houve variação na taxa de abertura da fissura quando do início da fissuração do plano de fendilhamento nos corpos de prova, mas apenas quando do descarregamento. Isso mostra que esse esquema de ensaio se mostrou adequado para obter uma resposta pós-fissuração estável para o UHPFRC até o início do descarregamento observado no ensaio.

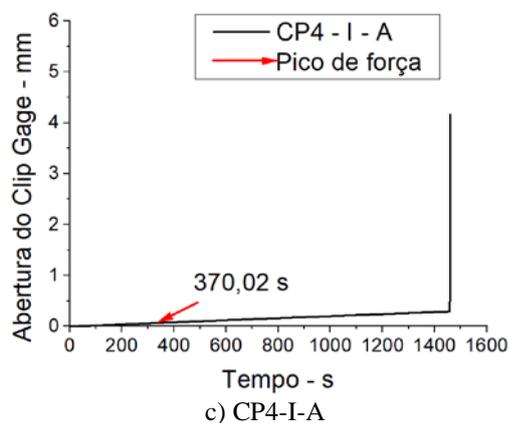
**Figura 2 - Curva de abertura do Clip Gage versus Tempo dos corpos de prova CP3-I-A, CP1-I-B e CP4-I-A**



a) CP3-I-A



b) CP1-I-B



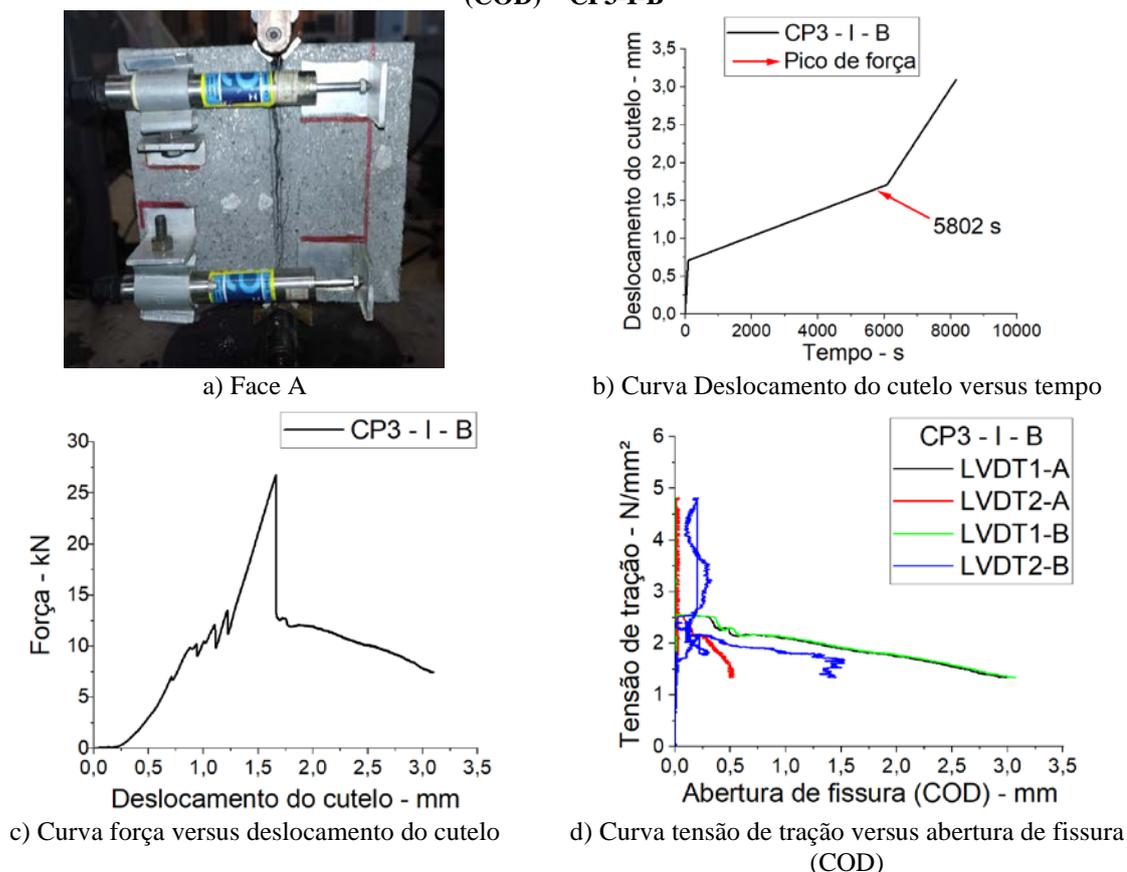
Devido ao entalhe frontal, a fissuração do corpo de prova ficou contida no plano de fendilhamento nos corpos de prova CP3-I-A e CP1-I-B. No entanto, no corpo de prova CP4-I-A a fissuração ocorreu fora do plano de fendilhamento (Figura 11a), indicando que uma largura (hlig) de 50 mm parece ser excessivamente grande para garantir que a ruína ocorra apenas no plano de fendilhamento com o tamanho de fibra utilizada no ensaio.

Nos corpos de prova CP3-I-A e CP1-I-B, a partir de uma abertura de fissura de cerca de 0,14 mm, observou-se o descarregamento nos dois corpos de prova. Isso ocorreu devido ao fato que, na verdade, a abertura da fissura não é uniforme no plano de cisalhamento, mas tende a se concentrar junto aos cutelos onde a força é aplicada. Assim, nos níveis iniciais de abertura da fissura (COD), o corpo de prova sofre rotação no plano de fendilhamento, o que dificulta a realização do ensaio para elevados valores de abertura da fissura com o controle pelo Clip Gage. A maior abertura da fissura registrada no corpo de prova CP4-I-A deve-se ao fato dela ter se propagado para fora do plano de fendilhamento, o que foi registrado pelo aumento brusco de taxa de deslocamento no Clip Gage (Figura 13c).

Tendo como objetivo caracterizar o comportamento do UHPFRC para valores de abertura de fissura compatíveis com os observados nos ensaios de flexão, ou seja, de até 2,5 mm (valor da abertura de fissuras no Estado Limite Último associada a resistência residual (Borges, 2017)), foram ensaiados na sequência dois corpos de prova com entalhe frontal e largura do plano de fendilhamento de 40 mm, porém em ciclo aberto com controle de deslocamento do cutelo (CP2-I-B e CP3-I-B). A Figura 14a mostra que neste caso, diferentemente do corpo de prova CP2-I-A que não continha o entalhe frontal, a fissuração ficou contida no plano de fendilhamento. Com isso, foi possível registrar uma resposta pós-fissuração após o pico de força, sendo a abertura da fissura registrada pelos transdutores até o final do ensaio (Figura 14c).

Com o controle do ensaio sendo realizado pelo deslocamento do cutelo, observou-se uma variação na taxa de deslocamento imposta ao corpo de prova quando atingida a força máxima, com o início da fissuração do plano de fendilhamento. Contudo, a taxa de deslocamento não variou mais que 1,14% do valor definido para o ensaio e retornou a esse valor após cerca de 0,02 mm de abertura da fissura. Por essa razão, admitiu-se que, apesar dessa variação, o ensaio mostrou-se adequado para representar o trecho pós-fissuração do UHPFRC e, assim, foi utilizado na etapa seguinte de análise da influência do tipo de fibra de aço. A Figura 14b ilustra a taxa de deslocamento do ensaio. Ressalta-se que a alteração na taxa após o pico de força mostrada nesse gráfico refere-se à alteração da taxa de carregamento para 0,04 mm/min realizada após o surgimento da fissura no plano de fendilhamento.

**Figura 3 - Forma de ruptura do corpo de prova e curva tensão de tração versus abertura da fissura (COD) – CP3-I-B**



### *Análise da influência do tipo de fibra de aço*

Na Tabela 6 é mostrada a resistência à tração do UHPFRC obtida do ensaio de duplo fendilhamento para os dois tipos de fibra de aço analisados na Série II. Nessa série foram ensaiados seis corpos de prova para cada tipo de fibra, contudo alguns corpos de prova foram excluídos por ainda apresentar uma fissuração não completamente contida no plano de fendilhamento. Assim, quando mais de um terço da extensão da fissura encontrava-se fora do plano de fendilhamento, o resultado do corpo de prova foi descartado.

Na Tabela 6 também é mostrada a altura efetiva ( $b$ ) e a largura efetiva ( $h_{lig}$ ) do plano de fendilhamento de cada corpo de prova, determinadas ao final do ensaio e após a completa separação do corpo de prova. Observa-se que o valor médio da largura e da altura efetivas diferiram em menos de 5% dos valores previstos de 120 mm e 40 mm, respectivamente. Além disso, o coeficiente de variação da área efetiva do plano de fendilhamento medida nos corpos de prova foi de 8% com a fibra B e de 2% com a fibra A, mostrando um adequado controle no corte realizado nos corpos de prova. Vale observar que o valor médio da área efetiva de todos os corpos de prova ensaiados diferiu em 3,2% da área teórica do plano de fendilhamento, de modo que os resultados de resistência à tração não seriam muito diferentes caso fosse utilizada a área teórica do plano de fendilhamento.

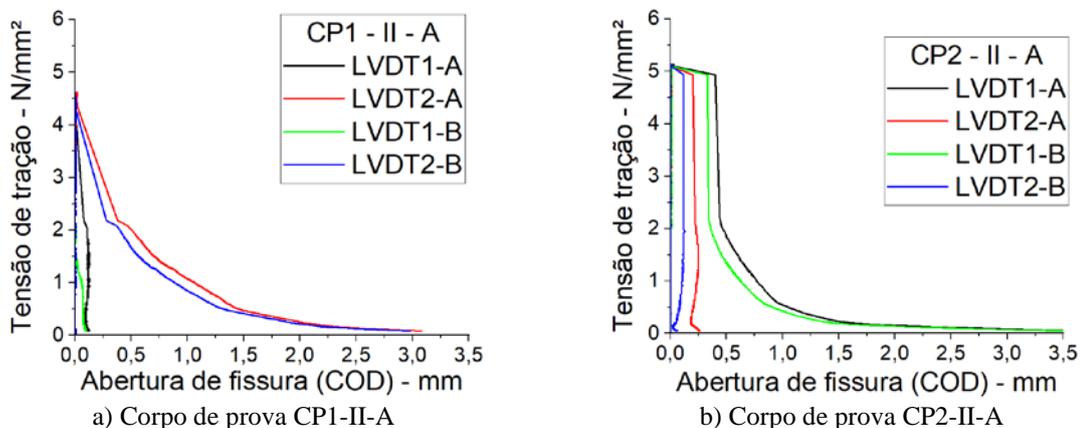
**Tabela 6 - Resultados do ensaio de duplo fendilhamento**

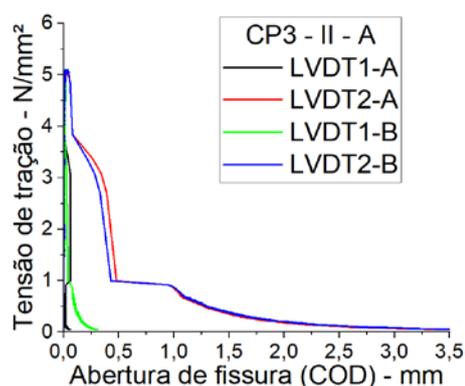
Nome dos corpos de prova	$P_{max}$ (kN)	$F_{sp}$ (kN)	Plano de fendilhamento			$f_{ct,wsp}$ (N/mm <sup>2</sup> )
			Altura efetiva (mm)	Largura efetiva (mm)	Área do plano de fendilhamento efetiva (mm <sup>2</sup> )	
CP1-II-A	23,19	21,74	119,66	39,37	4711,01	4,62
CP2-II-A	25,30	23,72	116,83	39,56	4621,79	5,13
CP3-II-A	26,80	25,12	123,23	39,50	4867,59	5,16
CP4-II-A	20,66	19,37	121,86	39,57	4822,00	4,02
Média	23,99	22,49	120,40	39,50	4755,60	4,73
Desvio Padrão	2,31	21,64	2,42	0,08	95,97	0,47
CP3-I-B	26,75	25,08	121,82	42,80	5213,90	4,81
CP1-II-B	29,15	27,33	119,80	37,27	4464,95	6,12
CP2-II-B	23,68	22,19	122,18	43,44	5307,50	4,18
CP3-II-B	24,14	22,63	121,71	41,62	5065,57	4,47
CP4-II-B	23,76	22,27	123,62	46,41	5737,20	3,88
Média	25,50	23,90	121,83	42,31	5157,82	4,69
Desvio Padrão	2,15	2,02	1,22	2,97	412,27	0,78

Tomando os valores médios de resistência à tração ( $f_{ct,wsp}$ ) mostrados na Tabela 6, observa-se uma diferença de apenas 1% entre os dois traços, o que indica que o tipo de fibra não teve influência na resistência à tração por fendilhamento do UHPFRC. De fato, ao se realizar uma análise de variância (ANOVA), com significância ( $\alpha$ ) de 5%, conclui-se que a resistência à tração não foi significativamente influenciada pelo tipo de fibra de aço adicionada ( $p$ -value = 0,94 > 0,05).

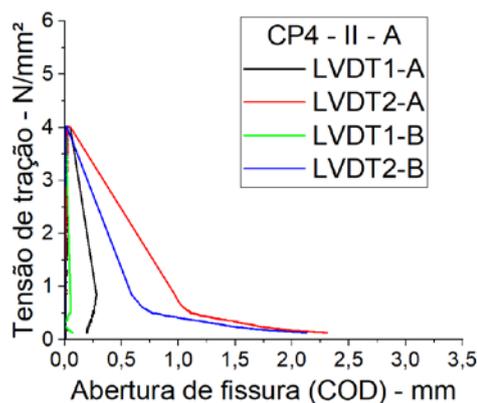
Na Figura 15 são mostradas as curvas de tensão de tração no plano de fendilhamento versus abertura de fissura (COD) para os corpos de prova do traço com a fibra de aço A. Já na Figura 16, são mostradas as mesmas curvas para os corpos de prova do traço com a fibra de aço B. De forma geral, observa-se que os quatro transdutores não apresentam os mesmos valores de abertura de fissuras. Os valores são idênticos entre transdutores em faces opostas do corpo de prova, na mesma altura, mas diferem quando são analisados na mesma face. Isso confirma que, no ensaio de duplo fendilhamento, de forma geral, há um giro no plano de fendilhamento, de modo que a abertura de fissura não é constante ao longo da altura do plano de fendilhamento.

**Figura 45 - Curvas de tensão de tração versus abertura de fissura (COD) para o traço com a fibra A**





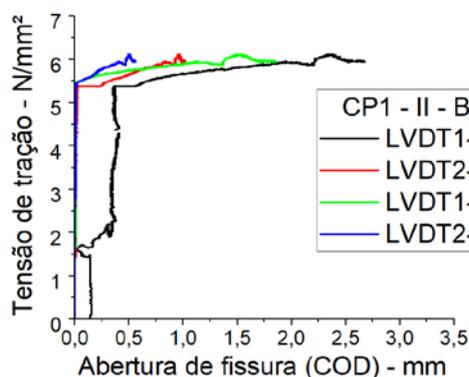
c) Corpo de prova CP3-II-A



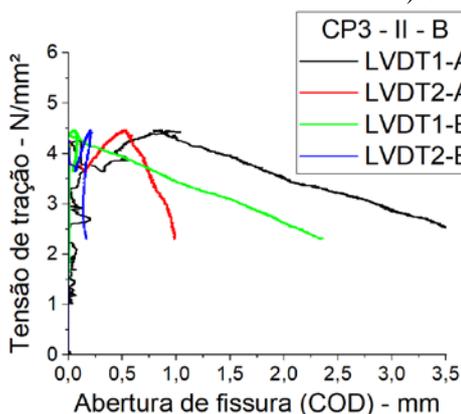
d) Corpo de prova CP4-II-A

Apesar desse comportamento, é possível identificar nos gráficos das Figuras 15 e 16 a influência do tipo de fibra de aço. O traço com a fibra B, de menor diâmetro, apresentou uma maior dissipação de energia no trecho pós-pico quando comparado com o traço com a fibra A. Em média, até a abertura de fissura de 2,5 mm, a energia sob a curva tensão de tração no plano de fendilhamento versus abertura de fissura (COD) para o UHPFRC com a fibra A foi de 1,48 N/mm. Já para o UHPFRC com a fibra B, essa energia foi, em média, igual a 3,89 N/mm.

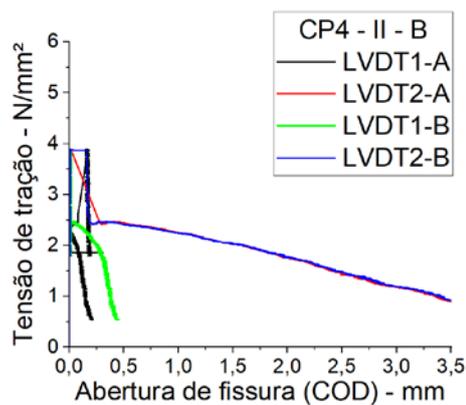
Figura 16 - Curvas de tensão de tração versus abertura de fissura (COD) para o traço com a fibra B



a) Corpo de prova CP1-II-B



c) Corpo de prova CP3-II-B



d) Corpo de prova CP4-II-B

A maior energia observada no UHPFRC com a fibra B deve-se à maior eficiência dessa fibra. Uma vez que ela possui menor diâmetro, há uma maior quantidade de fibras por metro cúbico de concreto, quando comparada ao UHPFRC com a fibra A, de maior diâmetro, ao se adicionar a mesma massa de fibras nos dois traços. Isso pode ser claramente observado na Figura 17, que mostra o plano de fendilhamento de dois corpos de prova ao final do ensaio.

Nota-se uma maior quantidade de fibras no plano de fendilhamento do corpo de prova CP2-II-B com a fibra B. Além disso, as fibras B estavam mais bem distribuídas no plano de fendilhamento quando comparadas com as fibras A, o que justifica o pior desempenho do UHPFRC no trecho pós-pico quando reforçado com as fibras A.

**Figura 17 - Aspecto do plano de fendilhamento ao final do ensaio dos corpos de prova CP1-II-A e CP2-II-B**

(a) Corpo de prova CP1-II-A com fibra A

(b) Corpo de prova CP2-II-B com fibra B

## CONCLUSÃO

As principais conclusões dessa pesquisa são:

- O ensaio de fendilhamento com duplo corte em cunha (DEWS) é uma alternativa viável para a caracterização à tração do UHPFRC, desde que a geometria do corpo de prova seja adequadamente definida de modo a garantir que a ruptura ocorra no plano de fendilhamento. Para o concreto estudado nesse artigo, a ruptura no plano de fendilhamento foi garantida apenas quando foram realizados entalhes nas faces frontais do corpo de prova e a largura do plano de fendilhamento foi menor que 40 mm. Portanto, sugere-se essa prática ao se realizar o ensaio DEWS no UHPFRC.

- A realização do ensaio em ciclo fechado, com controle da abertura da fissura no plano entalhado, mostrou-se viável de ser realizado em uma máquina de ensaio eletromecânica. Contudo, como a abertura da fissura não ocorre de maneira uniforme ao longo do plano de fendilhamento, o controle com apenas um Clip Gage não permitiu realizar o ensaio até valores elevados de abertura da fissura devido ao giro do corpo de prova no plano de fendilhamento.

- Com a realização do ensaio em ciclo aberto, com controle do deslocamento do cutelo, houve instabilidade no ensaio quando atingida a máxima força resistida pelo corpo de prova. Contudo, essa perturbação ficou restrita a um pequeno valor de abertura da fissura nos corpos de prova com a fibra B, o que indica que ele pode ser utilizado no caso do UHPFRC com volume mínimo de fibras de 2%.

- O tipo de fibra de aço não influenciou significativamente a resistência à tração indireta do UHPFRC aqui estudado. Contudo, ela teve influência significativa no trecho pós-fissuração do UHPFRC, que apresentou comportamento do tipo softening. Como a fibra B tinha metade do diâmetro da fibra A, havia mais fibras, e mais bem distribuídas, no plano de fendilhamento dos corpos de prova com a fibra B. Assim, a fibra B é a mais indicada visando uma melhor resposta pós-fissuração do UHPFRC, para um mesmo volume de fibras.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a esta pesquisa por meio da concessão de bolsa e de apoio financeiro (processo 404388/2021-3). Também agradecem à empresa MC-Bauchemie Brasil pela doação do aditivo redutor de água utilizado e às empresas Pedreira Pedra Britada e GOIARTE pela doação de materiais utilizados na confecção do concreto.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. (2020). NBR 16887: Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 9833: Concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ABNT NBR 5739: Concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT NBR 15823-2: Concreto auto-adensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.
- AOUDA, M., et al. Ultra-high performance concrete reinforced with steel fibers: Effect of mixing process on fresh and hardened properties. *Construction and Building Materials*, v. 301, p. 124035, 2021.
- BORGES, Leonardo Augusto Cruz. Ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha na avaliação de concretos com baixos teores de fibra de aço. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BRÜHWILER, E.; WITTMANN, F. H. The Wedge Splitting Test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Engineering Fracture Mechanics*, United Kingdom, v. 35, n. 1-3, p. 117-125, 1990.
- CÂNDIDO, Eduardo Augusto da Silva. Avaliação da resistência à tração de concretos reforçados com fibras de aço por diferentes métodos de ensaio. Goiânia, 2022.
- CHRIST, Roberto. Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC). [<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9052>], 2019.
- DEEB, R., et al. Flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, v. 219, p. 703-713, 2019.
- DI PRISCO, M.; FERRARA, L.; LAMPERTI, M. G. L. Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 46, p. 1893-1918, 2013.
- FERRARA, L., MARTINELLI, E., PEPE, M., COSENZA, E. (2014). Influence of the mixing procedure on the rheological behavior and compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 1-7.
- KWON, Y. M., et al. Shear behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete walls. *Engineering Structures*, v. 162, p. 385-397, 2018.
- LI, H., et al. Effects of steel fiber on the mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 274, p. 121722, 2021.
- LI, J., et al. Evaluation of fracture toughness of steel fiber reinforced concrete using the double-edge-notched wedge splitting method. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 301-309, 2019.
- LI, Y., LI, L., LI, J., CHEN, X., LU, Z. (2019). Effect of powder density on the properties of ultra-high-performance concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1), 484-497.

- HUSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for earth-moist concret: A theoretical and experimental study. *Cement and Concret Research*, v. 38, n. 10, p. 1246-1259, 2008.
- Mahmoud H. Akeed, Shaker Qaidi, Hemn U. Ahmed, Wael Emad, Rabar H. Faraj, Ahmed S. Mohammed, Bassam A. Tayeh, Afonso R.G. Azevedo, Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part III: Fresh and hardened properties, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 17, 2022.
- MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of Fiber Reinforced Cementitious Materials: Classification and Prediction. *Cement and concrete research*, v. 40, n. 2, p. 226-234, 2010.
- Monte, R., Pereira, L. da S., Figueiredo, A. D. de ., Blanco, A., & Bitencourt Júnior, L. A. G.. (2023). Simplified DEWS test for steel fibre-reinforced concrete characterisation. *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 16(6), e16604.
- MULLER, Harald S. Betonbautechnik – neue Entwicklungen im Überblick. In: *Innovationen in der Betonbautechnik 3. Symposium Baustoffe und*
- NORMA FRANCESA. NF P 18-710. National Additon to Eurocode 2 – Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC). Paris: [s.n.], 2016b. 96p. *Bauwerkserhaltung.*, 2006.
- YAN et al. Effect of different steel fiber types on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1167 012001, 2021.
- YANG, Q., et al. Fracture toughness of steel fiber reinforced high strength concrete evaluated by double-edge-notched wedge splitting test. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 240, p. 107322, 2020.
- ZHOU, X., et al. Mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete reinforced by steel fiber. *Construction and Building Materials*, v. 240, p. 117958, 2020.