

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Estudo da influência da orientação das fibras no comportamento ao cisalhamento do UHPFRC

André Felipe de Freitas

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ANDRÉ FELIPE DE FREITAS

**Estudo da influência da orientação das fibras no comportamento ao
cisalhamento do UHPFRC**

Versão Corrigida

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo Carrazedo

São Carlos

2026

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Sérgio Rodrigues Fontes
e pelo Serviço de Comunicação e Marketing da EESC-USP,
com dados inseridos pelo(a) autor(a).

F862e Freitas, André Felipe

Estudo da influência da orientação das fibras no comportamento ao cisalhamento do UHPFRC / André Felipe Freitas ; orientador Ricardo Carrazedo. -- São Carlos, 2026.
136 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2026.

1. UHPFRC. 2. Cisalhamento. 3. Orientação das fibras. 4. Análise de imagem. 5. Correlação de imagem digital. I. Carrazedo, Ricardo, orient. II. Título.

Responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação segundo a AACR2: Bibliotecários da EESC/USP.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ FELIPE DE FREITAS**.

Título da dissertação: "Estudo da influência da orientação das fibras no comportamento ao cisalhamento do UHPFRC".

Data da defesa: 03/07/2026.

Comissão Julgadora

Prof. Associado Ricardo Carrazedo
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Titular Antonio Domingues de Figueiredo
(Escola Politécnica/EP-USP)

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila
Jacintho

(Pontifícia Universidade Católica/PUC)

Resultado

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

*Aos meus pais, André e Adriana, que sob
muito esforço, fizeram-me chegar até aqui*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e aos espíritos protetores pela oportunidade de estar aqui e por todo o amparo ao longo desta jornada.

Aos meus pais, André e Adriana, e ao meu irmão, Rafael, minha família e minha motivação diária, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Ricardo Carrazedo, pela orientação, apoio e paciência, bem como pelos valiosos conhecimentos transmitidos ao longo do mestrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelo auxílio e suporte prestados, em especial aos técnicos do Laboratório de Estruturas: Amaury, Eric, Fabiano, Luiz Vareda e Romeu.

Aos meus colegas do departamento pelos momentos de aprendizado e descontração ao longo dessa trajetória. Seria difícil mencionar todos nominalmente sem correr o risco de omitir alguém, mas deixo registrado meu sincero agradecimento a cada um que fez parte dessa caminhada.

Ao meu grande amigo Gabriel, desde a época da graduação, pela amizade e por estar ao meu lado durante todo esse período.

À minha namorada, Luiza, pela companhia, incentivo e apoio constante ao longo da etapa final desta jornada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio do processo nº 130997/2024-2.

“Crê em ti mesmo, age e verás os resultados. Quando te esforças, a vida também se esforça para te ajudar” (Chico Xavier)

RESUMO

FREITAS, A. F. **Estudo da influência da orientação das fibras no comportamento ao cisalhamento do UHPFRC**. 2026. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2026.

Dentre os concretos especiais desenvolvidos ao longo dos últimos anos, o concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) tem recebido destaque devido à alta resistência, ductilidade e durabilidade, se apresentando como uma alternativa para substituir o concreto usual em situações particulares. Como a distribuição das fibras (orientação e dispersão) é um dos fatores que influenciam o comportamento mecânico desse material, pesquisas estudam essa influência com o intuito de maximizar as propriedades desse concreto. Este trabalho, então, avaliou a influência da orientação das fibras no comportamento mecânico de elementos de UHPFRC submetidos ao cisalhamento. Para isso, foi conduzido um ensaio de quatro pontos com extremidades engastadas em corpos de prova contendo diferentes frações volumétricas de fibras de aço, moldados por distintos procedimentos a fim de induzir diferentes orientações. A orientação das fibras foi posteriormente determinada por meio da análise de imagem das seções fissuradas. Adicionalmente, empregou-se a técnica de correlação de imagem digital para o acompanhamento do processo de fissuração e ruptura dos elementos. Foi observado que a incorporação de fibras promoveu aumentos expressivos da resistência ao cisalhamento, sendo esse efeito potencializado nas orientações em que as fibras se encontravam mais alinhadas à direção das tensões principais de tração e, conseqüentemente, mais ortogonais ao plano principal de fissuração, evidenciando maior eficiência no mecanismo de ponte de fissuras.

Palavras-chave: UHPFRC. Cisalhamento. Orientação das fibras. Análise de imagem. Correlação de imagem digital.

ABSTRACT

FREITAS, A. F. **Study of the influence of fiber orientation on the shear behavior of UHPFRC.** 2026. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2026.

Among the special concretes developed in recent years, ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) has gained significant attention due to its high strength, ductility, and durability, emerging as a potential alternative to conventional concrete in specific applications. As fiber distribution (orientation and dispersion) is one of the key factors influencing the mechanical behavior of this material, several studies have investigated this aspect in order to maximize its performance. This study evaluates the influence of fiber orientation on the mechanical behavior of UHPFRC elements subjected to shear. To this end, an experimental program was conducted using specimens with different volumetric fractions of steel fibers, cast through distinct procedures to induce different orientations. Fiber orientation was subsequently determined through image analysis of cracked sections. Additionally, digital image correlation (DIC) was employed to monitor the cracking and failure processes of the elements. For this purpose, a four-point bending test with fixed-end boundary conditions was conducted on specimens containing different steel fiber volume fractions, which were molded using distinct procedures to induce different fiber orientations. The fiber orientation was subsequently determined through image analysis of the fractured sections. Additionally, digital image correlation was employed to monitor the cracking and failure processes of the specimens. The incorporation of fibers was found to significantly enhance the shear strength, with this effect being more pronounced when the fibers were preferentially aligned with the direction of the principal tensile stresses and, consequently, oriented more perpendicular to the principal crack plane, thereby improving the efficiency of the crack-bridging mechanism.

Keywords: UHPFRC. Shear. Fiber orientation. Image analysis. Digital image correlation.

SUMÁRIO

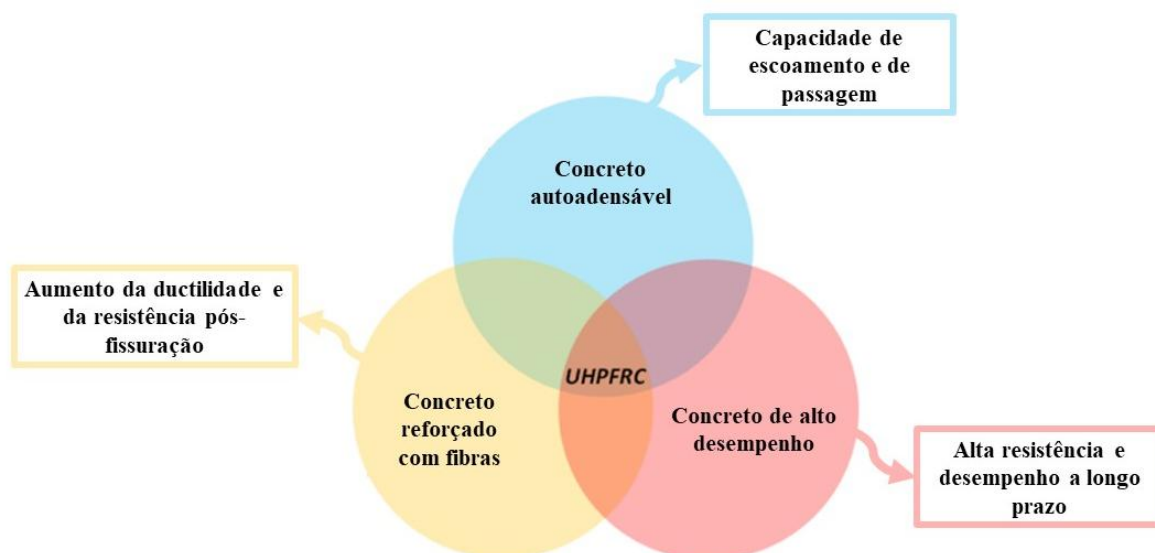
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	23
3 JUSTIFICATIVA.....	25
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
4.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS ...	27
4.1.1 Histórico, definição e composição.....	27
4.1.2 Comportamento mecânico	34
4.1.2.1 Comportamento na compressão	34
4.1.2.2 Comportamento na tração	36
4.1.2.3 Comportamento no cisalhamento.....	38
4.1.3 Influência das fibras no comportamento mecânico	40
4.1.3.1 Teor de fibras	40
4.1.3.2 Orientação e dispersão das fibras.....	45
4.1.3.3 Tipo e forma das fibras	51
4.1.4 Caracterização da orientação das fibras.....	53
4.2 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	58
5 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
5.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	63
5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	65
5.2.1 Ensaio de compressão uniaxial	65
5.2.2 Ensaio de tração uniaxial	67
5.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	68
5.3.1 Ensaio proposto por Ngo <i>et al.</i> (2017)	68
5.3.2 Ensaio realizado e moldagem das amostras	71
5.3.1 Análise de imagem para caracterização da orientação	84
5.3.2 Correlação de imagem digital	86
5.3.3 Estudo e proposição de modelo com base em regressões lineares	88
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	91
6.1.1 Ensaio de compressão uniaxial	91
6.1.2 Ensaio de tração uniaxial	95
6.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	98
6.2.1 Análise de imagem para caracterização da orientação	110

6.2.2 Correlação de imagem digital.....	114
6.2.3 Estudo e proposição de modelo com base em regressões lineares.....	116
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	123
7.1 CONCLUSÕES	123
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
REFERÊNCIAS	128

1 INTRODUÇÃO

O concreto está em constante desenvolvimento e aperfeiçoamento desde o século passado, especialmente a partir do final dos anos 80, devido ao desenvolvimento de novos cimentos, ao aparecimento das fibras como reforço para aplicações estruturais e, sobretudo, ao grande progresso no domínio dos aditivos redutores de água. Com o avanço tecnológico, um dos últimos sucessos é o concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), que incorpora os avanços da tecnologia dos concretos autoadensáveis, dos concretos reforçados com fibras e dos concretos de alto desempenho, conforme se apresenta na Figura 1.1 (Akhnoukh; Buckhalter, 2021; Torregrosa, 2013).

Figura 1.1 – Combinação das propriedades dos diferentes concretos especiais



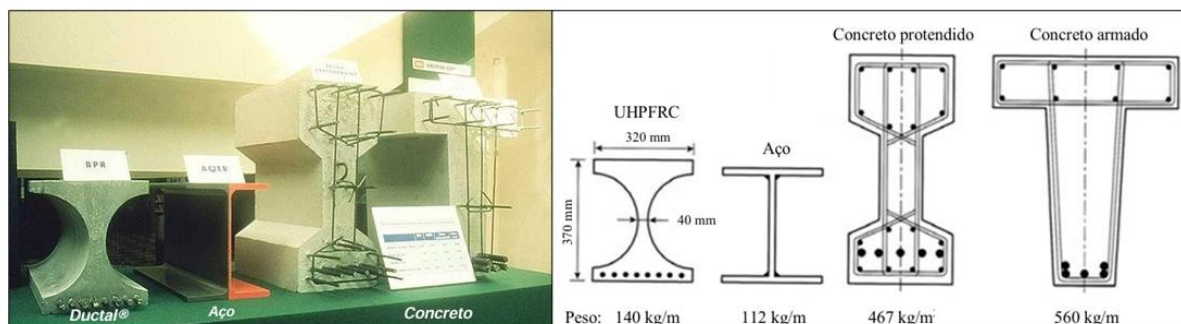
Fonte: Adaptado de Torregrosa (2013).

Reconhecido, atualmente, como o supracumulo da evolução tecnológica do concreto, de acordo com o Prof. Dr. Bernardo Tutikian (Ultra..., 2024), o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) trata-se de um compósito cimentício que exibe propriedades mecânicas e durabilidade significativamente superiores às dos concretos convencionais.

Sua matriz densa e compacta, aliada às fibras de aço, o que transforma o UHPC em UHPFRC, proporciona ao material um comportamento dúctil com alta resistência à compressão, à tração e à flexão, o que possibilita a concepção de projetos com elementos estruturais de seções mais delgadas e leves, como mostra a Figura 1.2, que evidencia a redução de massa linear proporcionada pelo UHPFRC em relação ao concreto protendido e ao

concreto armado, o que justifica seu elevado potencial de aplicação, especialmente no setor de pré-fabricados, uma vez que contribui para a redução dos custos de transporte, manuseio e montagem, além de apresentar versatilidade e elevado desempenho.

Figura 1.2 – Comparação da massa linear de diferentes seções transversais de elementos estruturais, dimensionados para a mesma capacidade resistente, incluindo UHPFRC (Ductal®), aço, concreto protendido e concreto armado



Fonte: Adaptado de Ductal (2015) e Tutikian, Isaia e Helene (2011).

Essa característica e a elevada durabilidade do material, que resulta na redução dos custos de manutenção ao longo da vida útil das estruturas, constituem os principais fatores responsáveis pela ampliação do seu emprego.

Nesse contexto, o UHPFRC se apresenta como uma alternativa promissora para aplicações em que o concreto convencional encontra limitações, oferecendo soluções mais duráveis, economicamente viáveis, sustentáveis e tecnicamente inovadoras.

As principais aplicações do UHPFRC incluem obras de infraestrutura (passarelas, vigas, tabuleiros de pontes), componentes arquitetônicos (painéis de fachada, marquises, coberturas leves, sacadas, quebra-sóis), elementos expostos a ambientes agressivos (tubulações, vertedouros) nos quais a elevada durabilidade do material é um requisito fundamental, reabilitações de estruturas, edificações à prova de explosões e construções industriais (Kimura *et al.*, 2022; Torregrosa, 2013).

Destaca-se que, segundo o Prof. Titular Sri Sritharan (Alto..., 2023), o material foi inicialmente empregado em aplicações voltadas à proteção e segurança, especialmente com fins militares, levando cerca de duas décadas para ser incorporado a aplicações em infraestrutura e na construção civil.

A Tabela 1.1 reúne as principais aplicações do UHPC e do UHPFRC ao longo do tempo, desde as suas primeiras utilizações, destacando a evolução tecnológica e a crescente diversificação de seus usos.

Tabela 1.1 – Aplicações desenvolvidas com UHPC e UHPFRC ao longo dos anos

Descrição	Figura
Passarela de Sherbrooke, em 1997, no Canadá: primeiro uso estrutural do UHPFRC, sendo empregado como material de preenchimento dos tubos de aço utilizados como diagonais da estrutura treliçada	
Vigas em UHPFRC na torre de resfriamento da usina nuclear de Cattenom, em 1998, na França	
Ponte rodoviária Bourg-lès-Valence, em 1998, na França: primeira ponte rodoviária em UHPFRC no mundo, com aplicação do material tanto no tabuleiro quanto nas vigas	
Ponte rodoviária Mars Hill Bridge, em 2006, nos EUA: primeira ponte rodoviária em UHPC no país	
Pista de aterrissagem no aeroporto de Haneda, em 2009, no Japão: extensão da pista por meio da construção, sobre o mar, de uma extensa laje em UHPC apoiada em estacas metálicas	

Continua

Conclusão

Descrição	Figura
Ponte em Völkermarkt, em 2010, na Áustria: primeira ponte em arco do mundo em UHPC	
Estádio Jean Bouin, em 2011, na França: painéis de fachada e de cobertura em UHPFRC	
Museu das Civilizações da Europa e Mediterrâneo (MuCEM), em 2013, na França: passarela, pilares, vigas e fachada em UHPFRC	
Fundação Louis Vuitton, em 2024, na França: painéis de fachada em UHPC	

Fonte: Adaptado de Ductal (2015), Perry (2015), Rebentrost e Wight (2008), Silva (2022), Toutlemonde *et al.* (2018), Voo *et al.* (2012) e Welter (2021).

Os países que se destacam pelo avanço no desenvolvimento, pesquisa e aplicação do UHPC/UHPFRC, consolidando-se como referências no uso dessa tecnologia, são: Austrália, China, França, Estados Unidos, Canadá, Nova Zelândia, Coreia do Sul, Alemanha, Irã e Japão. Já no Brasil, assim como em toda a América Latina, tem-se a sua aplicação bastante incipiente, sendo o material tratado como uma tecnologia emergente.

No Brasil, conforme a Figura 1.3 apresenta, a primeira aplicação ocorreu em painéis de fachada no edifício ocupado pelo Escritório de Representação do Ministério das Relações Exteriores (ERESP), concluído em 2016. No que se refere a aplicações estruturais, há, até o momento, os seguintes registros: uma passarela pré-fabricada em UHPC, com 8,6 m de comprimento e 2,0 m de largura, instalada na cidade de São Paulo, em 2024; reformas de instalações litorâneas (intervenções em ambientes agressivos), como os portos de Santos (SP) e de Rio Grande (RS), e reforços de monumentos e edificações de valor cultural, a exemplo do Museu Oscar Niemeyer (PR) (Alto..., 2023; Cassol..., 2024; Oliveira, 2019).

Figura 1.3 – Elementos produzidos com UHPC/UHPFRC no Brasil: (a) painéis de fachada do edifício do ERESP e (b) passarela pré-fabricada



(a)



(b)

Fonte: a) Ductal (2015) e b) Cassol..., 2024.

Segundo Spasojević (2008), a utilização desse material ainda é limitada devido ao alto custo dos seus constituintes, em especial das fibras de aço e do aditivo, à sua sensibilidade ao processo de mistura e à variabilidade das suas propriedades mecânicas diante das condições de concretagem, além de ser um material que não existe há tempo suficiente para ultrapassar a forte influência dos conceitos tradicionais que caracterizam a prática comum da engenharia.

No que se refere ao elevado custo das fibras de aço, Park *et al.* (2012) destacam que o teor volumétrico de fibras exerce influência significativa no custo do UHPFRC, sendo que um

conteúdo de apenas 1% em volume pode superar o custo da própria matriz cimentícia. Ressalta-se, entretanto, que esse impacto econômico não é exclusivo do UHPFRC, sendo também observado em concretos convencionais reforçados com fibras, nos quais a adição de baixos teores já implica em um aumento relevante no custo total do material

No contexto brasileiro, essa questão é ainda mais crítica, sobretudo em função do custo e da disponibilidade das microfibras de aço, que não são produzidas nacionalmente, sendo necessário seu fornecimento por meio de importação. Como consequência, o custo de produção do UHPFRC torna-se elevado, podendo atingir valores próximos a US\$1.000/m³. Nesse cenário, a disponibilidade e o custo das fibras configuram-se como um dos principais entraves à viabilização do uso em larga escala do UHPFRC no Brasil, destaca o Prof. Dr. Roberto Christ (Ultra ..., 2024).

O uso ainda limitado no Brasil também está associado à recente ausência de norma técnica específica, suprida apenas em 2025 com a publicação da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 17246 (ABNT, 2025), que confere maior segurança técnica e jurídica à sua aplicação. A norma visa padronizar ensaios, dosagem e controle de qualidade, além de alinhar o país a referências internacionais consolidadas, como o *American Concrete Institute* (ACI), a *Fédération Internationale du Béton* (fib) e a *Association Française de Génie Civil* (AFGC). Baseada principalmente nas diretrizes europeias, em especial no *Eurocode*, a normativa contribui para ampliar a confiabilidade e viabilizar o uso desse concreto no contexto nacional.

O desafio, então, é fazer com que o desenvolvimento que se obteve desses materiais em laboratório atravesse a barreira do mercado, para que assim se tornem alternativas viáveis (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Nesse contexto, a otimização das propriedades dos concretos especiais torna-se fundamental, motivando diversas pesquisas voltadas ao ajuste de seus materiais constituintes e à compreensão do seu comportamento mecânico.

No caso do UHPFRC, a orientação e a dispersão das fibras desempenham papel crucial, influenciando diretamente suas propriedades (Kang; Kim, 2011; Song *et al.*, 2018). Assim, estudos experimentais voltados à análise da distribuição dessas fibras têm sido amplamente desenvolvidos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência da orientação das fibras sobre o comportamento mecânico de elementos de UHPFRC submetidos ao cisalhamento. Para se atingir tal objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar o comportamento mecânico do UHPFRC, incluindo suas propriedades de resistência à compressão, tração e cisalhamento, visando estabelecer parâmetros de referência para avaliação da influência da orientação das fibras;
- b) avaliar a influência dos procedimentos de moldagem na orientação das fibras e quantificar o grau de orientação obtido nas diferentes configurações analisadas;
- c) investigar a relação entre o grau de orientação das fibras e o comportamento ao cisalhamento do UHPFRC, considerando os mecanismos de fissuração e transferência de tensões após a fissuração;
- d) avaliar a aplicabilidade do procedimento experimental de cisalhamento adotado para a avaliação do comportamento do UHPFRC, considerando sua capacidade de reproduzir os mecanismos resistentes associados à atuação das fibras.

3 JUSTIFICATIVA

A motivação para a realização desta pesquisa se justificou pelos seguintes aspectos:

- a) o estudo da orientação das fibras possibilita otimizar o comportamento mecânico do UHPFRC;
- b) o estudo de elementos de UHPFRC submetidos ao cisalhamento não é tão explorado na literatura quanto é o estudo em relação à flexão. Assim, esta pesquisa teve como propósito contribuir para o avanço do conhecimento nessa área.
- c) a produção de elementos de UHPFRC no Brasil ainda é incipiente;
- d) do ponto de vista ambiental, o uso do UHPFRC, ao permitir a redução das dimensões dos elementos estruturais, pode diminuir o consumo global de materiais, contribuindo para a desmaterialização e a redução das emissões de gases do efeito estufa;
- e) a incorporação das fibras, quanto à influência na resistência ao cisalhamento, pode acarretar em reduções significativas das armaduras transversais das vigas, uma vez que estas são distribuídas continuamente ao longo do comprimento dos elementos;
- f) promover e incentivar o uso da técnica de correlação de imagem digital como método de análise experimental;
- g) dar continuidade à linha de pesquisa de concretos especiais e reforçados com fibras, do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SET–EESC–USP).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, apresenta-se os principais conceitos associados ao UHPFRC, incluindo seu histórico, definição, composição, propriedades fundamentais, comportamento mecânico e os fatores que o influenciam, com ênfase na atuação das fibras. Aborda-se, ainda, a análise de imagem aplicada à caracterização da orientação das fibras, bem como uma introdução à técnica de correlação de imagem digital.

4.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS

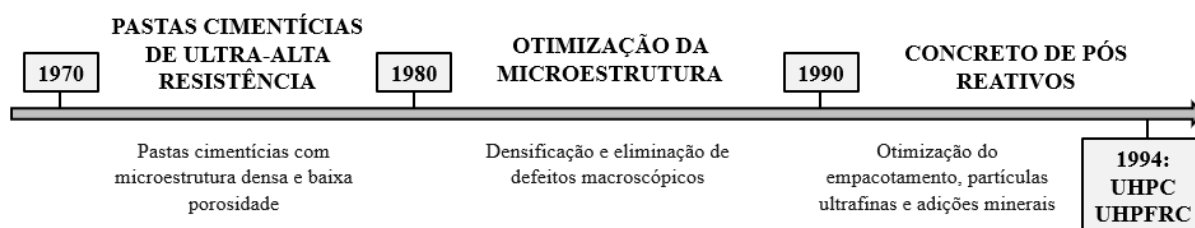
4.1.1 Histórico, definição e composição

Desenvolvido na década de 1990, a partir do empacotamento dos grãos de uma mistura de concreto de pós reativos (RPC) (Shi *et al.*, 2015), o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) é uma classe especial dos materiais compósitos cimentícios, que apresenta excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade, sendo produzido por elevadas proporções de materiais granulares ultrafinos e com baixas relações água/aglutinante (Fehling *et al.*, 2014).

Seu desenvolvimento foi precedido por importantes avanços ao longo das décadas anteriores, que são apresentados abaixo (Welter, 2021) e sintetizados na Figura 4.1:

- a) pastas cimentícias de ultra-alta resistência e baixa porosidade: Roy, Gouda e Bobrowsky (1972) e Yudenfreund *et al.* (1972) demonstraram o potencial dessas pastas, obtidas a partir de baixíssimas relações água/cimento e, em alguns casos, cura térmica;
- b) pasta cimentícia densificada com partículas pequenas (DSP) e pasta cimentícia livre de macrodefeitos (MDF): Bache (1981) e Birchall, Howard e Kendall (1981) fundamentaram seus desenvolvimentos na redução de defeitos da matriz, aliada ao uso intensivo de partículas ultrafinas, baixas relações água/cimento e agentes redutores de água de alto alcance, resultando em ganhos significativos de resistência mecânica;
- c) concreto de pós reativos: Richard e Cheyrezy (1995) propuseram esse concreto, precursor do UHPC/UHPFRC, baseado na otimização do empacotamento granular, uso de materiais ultrafinos, eliminação de agregados graúdos e adição de fibras de aço.

Figura 4.1 – Linha do tempo até o surgimento do UHPC/UHPFRC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para assegurar uma baixa relação água/aglutinante, são necessários os aditivos superplastificantes (redutores de água de alto alcance), uma vez que o baixo teor de água na mistura compromete significativamente a trabalhabilidade e a fluidez, podendo resultar em um aumento no conteúdo de cavidades de ar e poros capilares, impactando negativamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do material (Gidrão, 2020; Oliveira, 2019).

Segundo Giongo (2017), a eliminação do agregado graúdo se justifica pelo fato de que, em concretos de alta resistência, a ruptura deixa de ocorrer na zona de transição e passa a se desenvolver no próprio agregado, evidenciando sua limitação mecânica no compósito.

A presença desses agregados pode comprometer o desempenho do concreto devido à redução da densidade de empacotamento, à concentração de tensões em suas superfícies e ao enfraquecimento da interface entre agregado e matriz cimentícia (Du *et al.*, 2021).

Dessa forma, a eliminação dos agregados graúdos, combinada com a otimização da mistura granulométrica, permite a obtenção de uma matriz cimentícia homogênea e com elevada densidade de empacotamento, que apresenta alto desempenho mecânico, isto é, resistência ultra-alta e elevada durabilidade (Fehling *et al.*, 2014; Richard; Cheyrezy, 1995).

Todavia, com o aumento severo da resistência e a diminuição das imperfeições da microestrutura, o material tende a se romper de forma frágil e brusca. Nesse contexto, tem-se a adição das fibras, que proporcionam o aumento da ductilidade (Krahl; Gidrão; Carrazedo, 2018) através da resistência residual após a formação da primeira fissura, da alta tenacidade e da redução da propagação de fissuras (atenuação da velocidade de propagação da microfissura) (Shah; Ribakov, 2011), atuando como ponte de transferência de tensão ao longo dessas fissuras (Figueiredo, 2011).

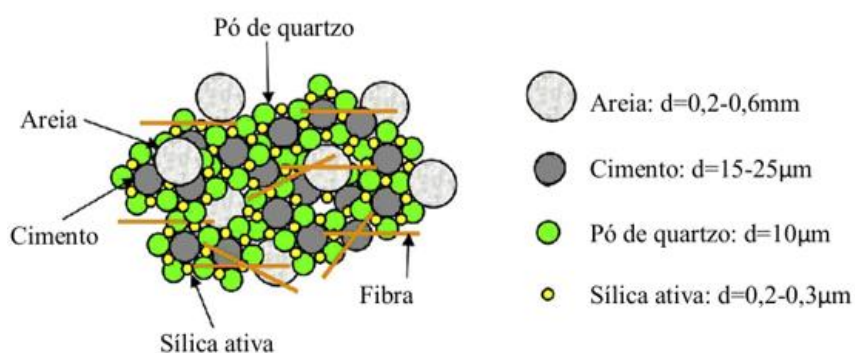
A Figura 4.2 apresenta a composição básica do UHPFRC, enquanto a Figura 4.3 ilustra a combinação dos materiais granulares ultrafinos, como o cimento Portland, a areia fina, a sílica ativa e o pó de quartzo (sílica moída), evidenciando a alta densidade de empacotamento, além das fibras.

Figura 4.2 – Composição básica do UHPFRC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.3 – Empacotamento dos componentes do UHPFRC



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

De forma geral, a areia fina constitui o maior material granular em termos dimensionais, seguida pelo cimento. Na sequência, o pó de quartzo atua preenchendo a lacuna granulométrica entre a areia e o cimento. Por fim, a sílica ativa, como a partícula mais fina da mistura e reativa, desempenha papel fundamental no preenchimento dos vazios intersticiais entre os grãos de cimento e as partículas do pó de quartzo.

Quanto à quantidade de água, Richard e Cheyrezy (1995) identificaram 0,14 como a relação água/ligante ideal, para maximizar a densidade relativa da mistura. De modo geral, a

relação típica no UHPC varia entre 0,14 e 0,20, conforme destacado por Shi *et al.* (2015), valores significativamente inferiores aos utilizados em concretos convencionais (0,40 a 0,50).

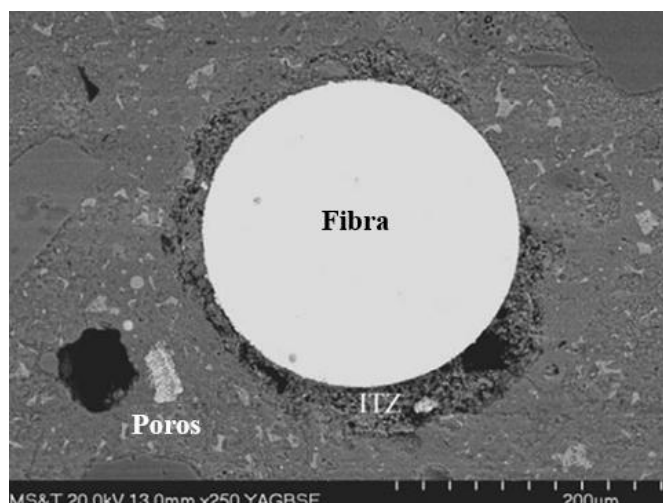
Com relação ao ligante primário, que se trata do cimento, este deve apresentar baixo teor de aluminato tricálcico (C_3A) e finura moderada, visando reduzir a demanda de água, minimizar a formação de etringita e mitigar o calor de hidratação (Habel, 2004). Além disso, o teor de cimento geralmente é elevado, com valores superiores a 700 kg/m³.

Já a sílica ativa (microssílica), um material pozolânico altamente reativo, é essencial para a produção do UHPFRC. Sua atuação ocorre por meio do preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento, da melhoria das propriedades reológicas e da formação de produtos de hidratação decorrentes da reação pozolânica (Welter, 2021).

Quanto ao pó de quartzo (quartzo triturado ou sílica moída), sua incorporação contribui para a melhoria da fluidez da mistura e para a otimização do empacotamento granular.

Como, então, o UHPFRC possui poros e microfissuras menores, e uma matriz cimentícia densificada na zona de transição interfacial (ITZ), Krahel (2018) comenta que a interface fraca desse material é entre a matriz e as próprias fibras, como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.4 – Microscopia eletrônica de varredura por retroespalhamento de poros e interface entre fibra e matriz



Fonte: Adaptado de Wu, Shi e Khayat (2016).

Com respeito às fibras, diversos tipos podem ser incorporados ao UHPFRC, variando-se quanto ao material e à geometria. Entre elas, destacam-se as fibras de aço e de carbono, amplamente utilizadas devido à sua elevada resistência à tração (Shi *et al.*, 2015).

As fibras de aço mais comumente utilizadas na composição do UHPFRC são as lisas e retas (vide Figura 4.5), devido à aderência e fricção aprimoradas com a matriz densa (Krahl, 2018), com comprimento de 13 mm e diâmetro de 0,2 mm (microfibras), revestidas de cobre, apresentando resistência à tração e módulo de elasticidade da ordem de 2500 MPa e 200 GPa, respectivamente (Oliveira, 2019).

Figura 4.5 – Fibras de aço lisas e curtas geralmente utilizadas no UHPFRC



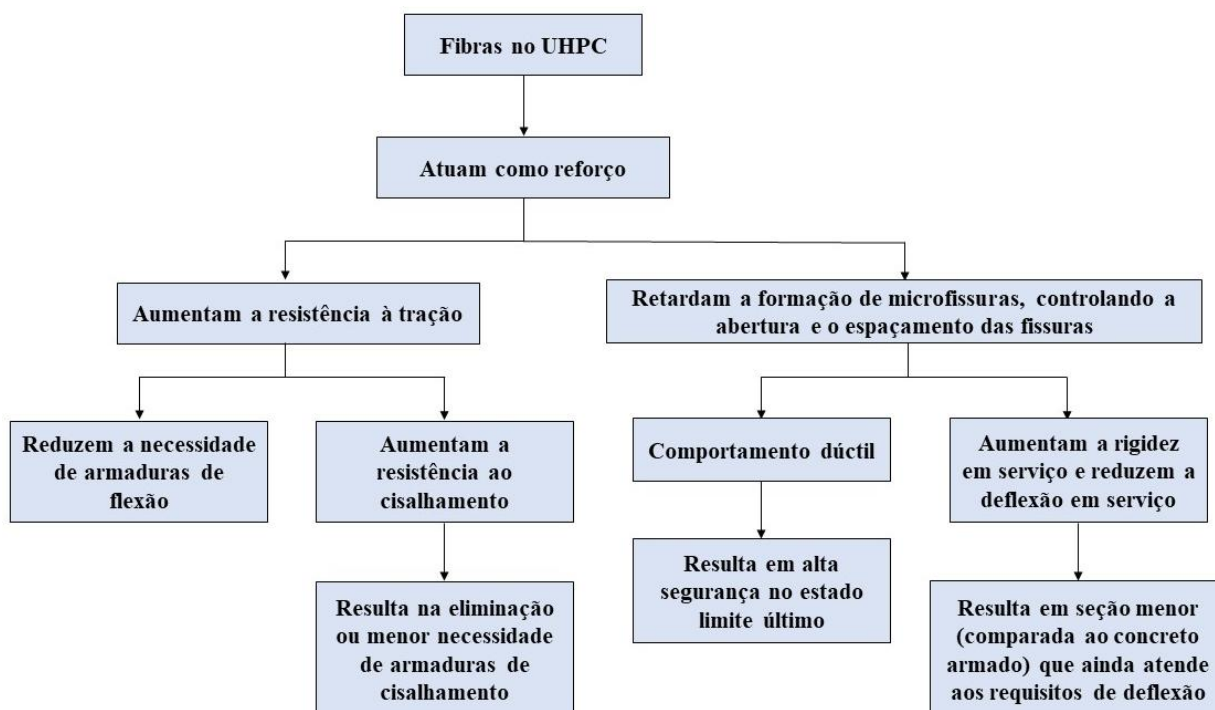
Fonte: SDS (2026).

Teores elevados de fibras podem prejudicar a homogeneidade e a trabalhabilidade da mistura fresca de concreto, devido à segregação da fibra na matriz cimentícia (WU *et al.*, 2016), e, então, acarretar em um aumento do teor de vazios, reduzindo as propriedades mecânicas e a durabilidade do material (Dils; Boel; Schutter, 2013).

Dessa forma, em geral, teores de fibras em torno de 2% em volume são recomendados para assegurar um comportamento dúctil ao UHPFRC e garantir uma adequada trabalhabilidade da mistura (Acker; Behloul, 2004; Barnett *et al.*, 2010; Kang; Kim, 2012).

A Figura 4.6 apresenta um esquema proposto por Baqersad, Sayyafi e Bak (2017), o qual sintetiza a influência das fibras nas propriedades do material. Os autores destacam que o uso de fibras pode levar à redução da necessidade de armaduras de cisalhamento; aspecto que constituiu uma das principais motivações para a presente pesquisa.

Figura 4.6 – Influência das fibras nas propriedades mecânicas e características do UHPFRC



Fonte: Adaptado de Baqersad, Sayyafi e Bak (2017).

Figueiredo (2011) destaca que as fibras de aço constituem uma estratégia de reforço distinta, podendo ser utilizadas de forma complementar à armadura convencional, buscando-se a otimização do comportamento do conjunto.

Quanto à cura desse concreto, destaca-se que, em razão do reduzido teor de água presente na mistura, os procedimentos devem ser rigorosamente controlados, de modo a assegurar que a água incorporada não seja dissipada antes da ocorrência do processo de hidratação.

Embora a literatura apresente múltiplas definições para o UHPC/UHPFRC e sua classificação não esteja relacionada apenas à resistência mecânica, mas também à durabilidade, densidade e permeabilidade (Mehta; Monteiro, 2008), prevalece o entendimento de que esse material possui resistência mínima à compressão de 100 MPa aos 28 dias (Hung; Lee; Chan, 2019), resistência à tração variando entre 7 e 15 MPa (Fehling, Leutbecher e Bunje, 2004) e resistência à flexão na faixa de 15 a 40 MPa (Fehling *et al.*, 2014), dependendo da quantidade, do tipo e da orientação das fibras utilizadas.

A ABNT NBR 17246 (ABNT, 2025) define o UHPC como um concreto de matriz cimentícia, homogêneo, com baixa porosidade, resistência à compressão superior a 100 MPa e

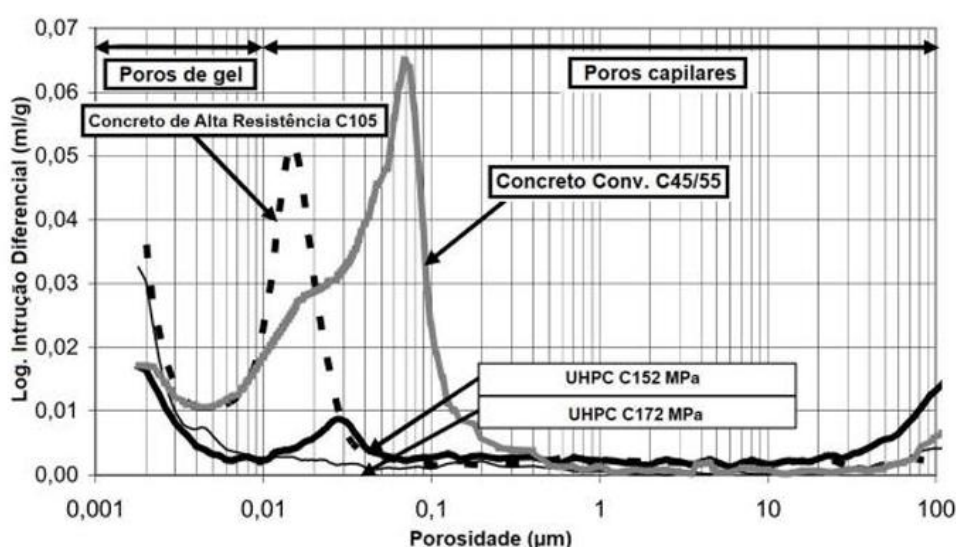
comportamento dúctil à tração, com a resistência característica à tração no limite de elasticidade maior do que 6 MPa.

Ressalta-se que a norma brasileira adota apenas a denominação UHPC, sem utilizar a nomenclatura UHPFRC. Dessa forma, sua definição já incorpora requisitos de desempenho à tração que, na prática, são alcançados por meio da adição de fibras ao compósito, não havendo, portanto, uma classificação normativa distinta para o concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras.

Quanto à durabilidade, a norma estabelece limites para o índice de vazios ($\leq 9\%$ aos 90 dias), bem como exige baixa permeabilidade à penetração de cloretos e a gases, uma vez que a redução do volume e da conectividade dos poros dificulta o transporte de agentes agressivos, contribuindo diretamente para o aumento da durabilidade do material.

A Figura 4.7 apresenta a distribuição do tamanho e do volume de poros para diferentes classes de concretos, indicando uma clara transição de poros maiores para menores à medida que se passa do concreto convencional para o concreto de alta resistência e, principalmente, para o UHPC. Enquanto o concreto convencional apresenta um maior volume de poros capilares, o UHPC se caracteriza por uma microestrutura altamente refinada, com predominância de poros na faixa de gel e reduzido volume de poros capilares.

Figura 4.7 – Distribuição do tamanho e do volume de poros para diferentes classes de concretos



Fonte: Schmidt e Fehling (2005).

Com relação às demais propriedades do material, a Tabela 4.1 apresenta valores típicos de desempenho mecânico e de durabilidade para misturas de UHPFRC submetidas à cura a vapor, conforme relatado por Cavill, Rebentrost e Perry (2006).

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas usuais do UHPFRC

Propriedade	Valor
Fluidez - <i>Flow table</i> (mm)	190-200 (após 20 golpes)
Resistência à compressão com cura térmica (MPa)	150
Resistência à tração sob flexão (MPa)	24
Primeira fissura em flexão (MPa)	20
Módulo de elasticidade (GPa)	47
Densidade (kg/m ³)	2450
Retração (μ)	< 500 (depois de 50 dias em cura úmida e 0 em cura com calor)

Fonte: Cavill, Rebentrost e Perry (2006).

4.1.2 Comportamento mecânico

O comportamento mecânico dos materiais é um campo fundamental da ciência e engenharia de materiais, dedicado ao estudo de suas respostas sob diferentes tipos de solicitações. Sua compreensão é essencial tanto para o desenvolvimento de materiais com propriedades otimizadas quanto para a previsão e aprimoramento do desempenho de elementos e estruturas em aplicações práticas.

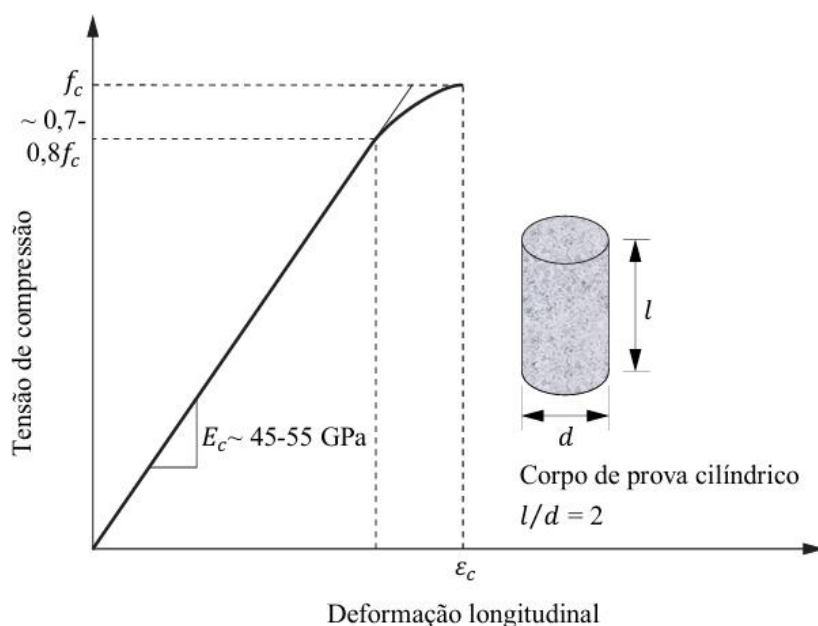
4.1.2.1 Comportamento na compressão

A matriz altamente densa do UHPC e do UHPFRC proporciona ao material elevada resistência à compressão, além de maior rigidez, usualmente expressa pelo módulo de elasticidade (Oliveira, 2019).

De acordo com Fehling *et al.* (2014), o UHPC é caracterizado por um comportamento elástico linear até cerca de 70% a 80% da resistência à compressão e módulo de elasticidade geralmente na faixa de 45 a 55 GPa. A elevada resistência à compressão é acompanhada por um comportamento frágil, observado na forma de uma ruptura brusca e explosiva.

A Figura 4.8 ilustra a curva tensão-deformação típica do UHPC obtida em ensaio de compressão uniaxial. A deformação correspondente à resistência à compressão situa-se tipicamente entre 3,4 e 4,4‰ (Graybeal, 2007).

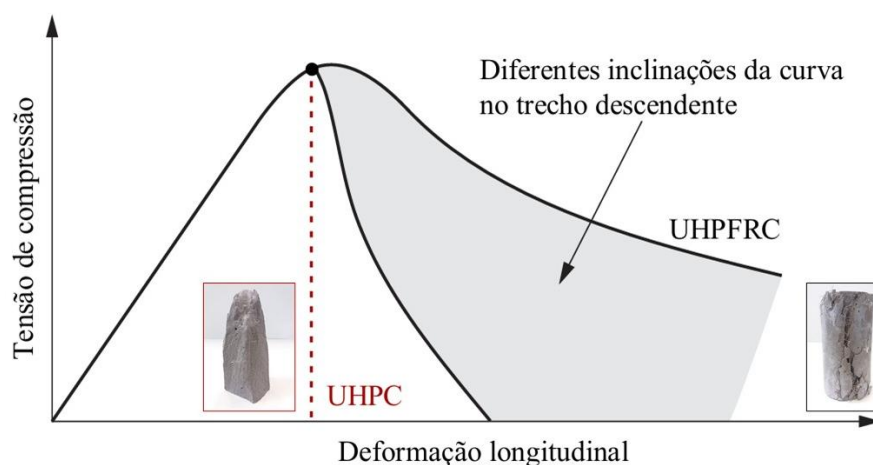
Figura 4.8 – Curva tensão-deformação do UHPC em ensaio de compressão uniaxial



Fonte: Oliveira (2019), adaptado de Fehling *et al.* (2014).

A incorporação de fibras modifica significativamente o comportamento pós-pico do material, conferindo-lhe maior ductilidade, conforme ilustrado na Figura 4.9. Em geral, a presença de fibras exerce pouca ou nenhuma influência no trecho ascendente da curva tensão-deformação, de modo que o módulo de elasticidade do UHPFRC não apresenta variações relevantes em relação ao UHPC. Por outro lado, o trecho descendente (pós-pico) pode assumir diferentes inclinações, sendo fortemente influenciado por fatores como o teor, a geometria, a rigidez e a orientação das fibras, além da qualidade da aderência entre as fibras e a matriz cimentícia (Fehling *et al.*, 2014).

Figura 4.9 – Curva tensão-deformação na compressão do UHPC e UHPFRC

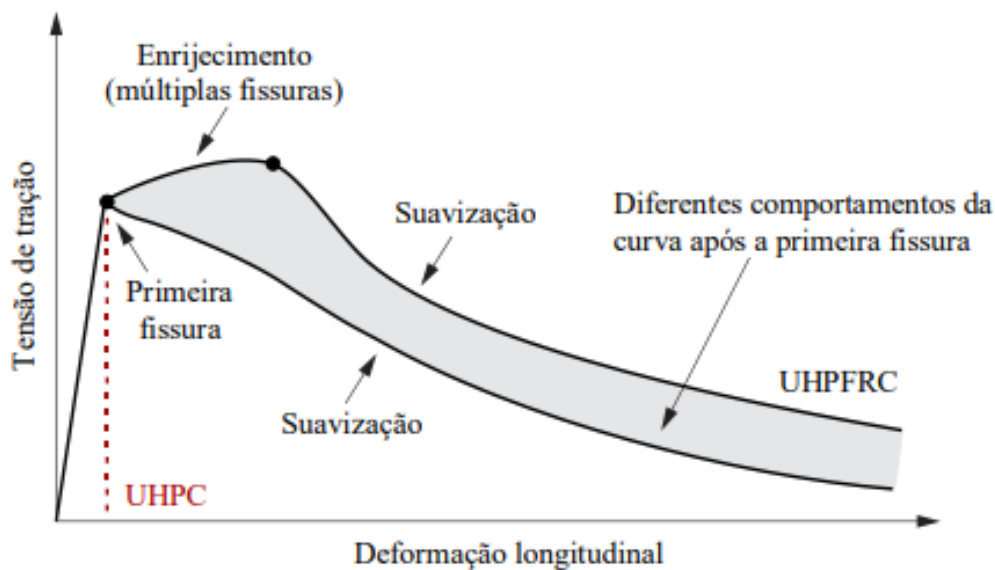


Fonte: Adaptado de Oliveira (2019), a partir de Fehling *et al.* (2014).

4.1.2.2 Comportamento na tração

Enquanto o UHPC apresenta um comportamento frágil na tração, a incorporação de fibras proporciona ao UHPFRC um comportamento dúctil, caracterizado por uma suavização da curva tensão-deformação, como a Figura 4.10 apresenta.

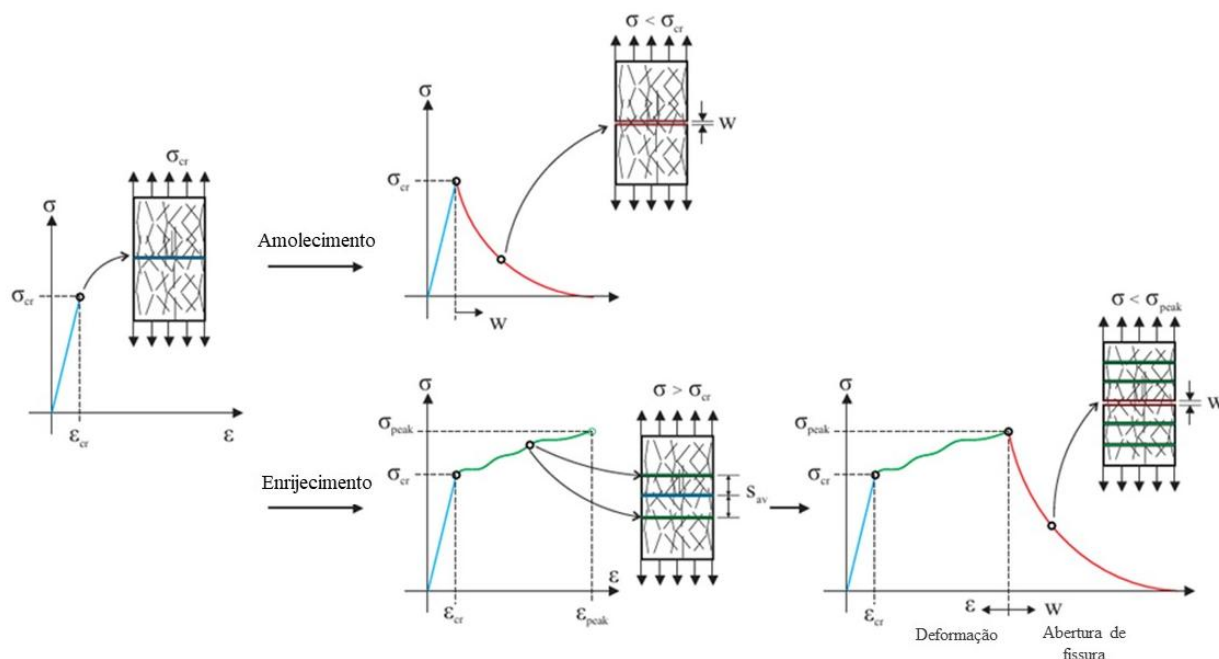
Figura 4.10 – Curva tensão-deformação na tração do UHPC e UHPFRC



Fonte: Oliveira (2019), adaptado de Wille *et al.* (2014b).

O UHPFRC pode apresentar dois tipos de comportamento após a formação da primeira fissura: enrijecimento (endurecimento) por deformação (*strain-hardening*) ou amolecimento por deformação (*strain-softening*), como indica a Figura 4.11.

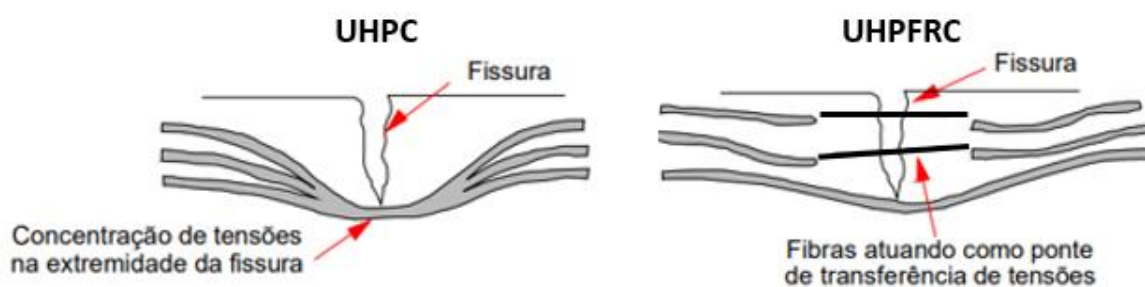
Figura 4.11 – Comportamentos à tração do UHPFRC



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2023).

Após a primeira fissura, que ocorre quando a matriz não suporta mais as tensões de tração, as fibras são ativadas, atuando como pontes de transferência de tensões (vide Figura 4.12) e redistribuindo-as nas regiões adjacentes. Esse mecanismo pode resultar em múltiplas fissuras e em um aumento da tensão de tração, caracterizando o comportamento de enrijecimento. Esse regime é dividido em três fases: (1) comportamento elástico seguido pelo início da microfissuração e do arrancamento das fibras; (2) formação de múltiplas fissuras com redistribuição de tensões, aumentando a resistência e a ductilidade; (3) formação de uma macrofissura, levando ao comportamento de amolecimento (Oliveira, 2019; Ribeiro, 2023; Wille; Naaman, 2010).

Figura 4.12 – Atuação das fibras pela fissura



Fonte: Adaptado de Medeiros (2012).

No entanto, dependendo da quantidade, geometria e orientação das fibras, bem como da aderência com a matriz, a capacidade de transferência de tensões pode ser limitada, fazendo com que o UHPFRC apresente apenas o comportamento de amolecimento logo após a primeira fissura, sem a fase de múltiplas fissuras. Nesse caso, a tensão máxima é atingida rapidamente, seguida pela formação de uma macrofissura e pelo arrancamento progressivo das fibras, resultando na perda de resistência (Fehling *et al.*, 2014; Graybeal; Baby, 2013).

Durante o amolecimento, Krahl (2018) aponta que o deslizamento das fibras nas macrofissuras prevalece sobre a redistribuição ou transferência de tensões entre as faces da fissura. Assim, essa fissura tende a abrir, e o deslizamento e a retirada das fibras são os principais mecanismos de dano.

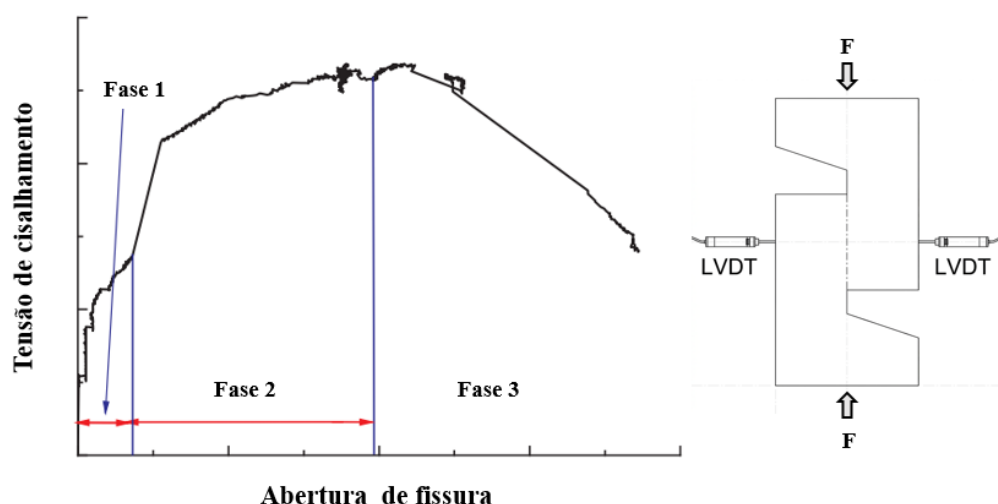
Portanto, ao se desenvolver misturas de UHPFRC, o comportamento de endurecimento por deformação sob tração é desejado, pois o material pode dissipar mais energia e apresentar maior durabilidade, devido à ocorrência de microfissuração múltipla (Krahl, 2018).

4.1.2.3 Comportamento no cisalhamento

As pesquisas existentes concentram-se principalmente nas resistências à compressão e à tração do UHPC/UHPFRC, sendo ainda insuficientes as investigações sobre outras propriedades mecânicas, como o comportamento a longo prazo e a resistência ao cisalhamento, o que evidencia a necessidade de estudos adicionais nessa área. Nesse contexto, a pesquisa sobre a resistência ao cisalhamento do UHPFRC ainda é limitada, sobretudo devido à ausência de um método padrão de ensaio (Yang *et al.*, 2022).

A Figura 4.13 apresenta a curva tensão de cisalhamento-abertura de fissura de cisalhamento de corpos de prova de UHPFRC submetidos ao ensaio de cisalhamento direto realizado por Wu *et al.* (2019).

Figura 4.13 – Curva típica de tensão de cisalhamento-abertura de fissura de um corpo de prova de UHPFRC



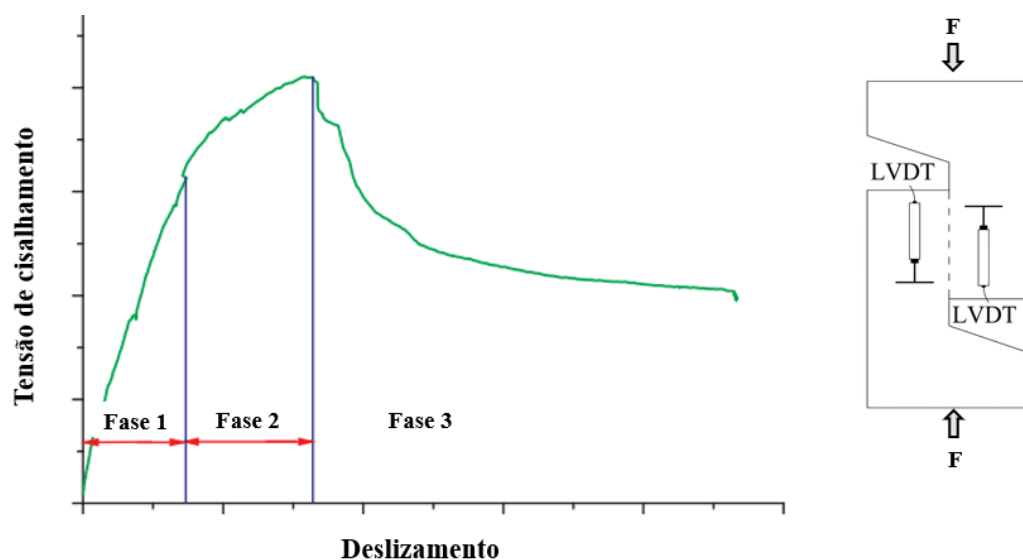
Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2019).

Na fase I, antes da formação de fissuras na superfície de cisalhamento, o material apresenta comportamento elástico linear. Na fase II, com o aumento da carga até cerca de 45% da carga máxima, surgem microfissuras próximas ao plano de cisalhamento, ocorre a degradação da matriz cimentícia nessa região e se inicia o arrancamento de fibras. Com o incremento da carga, intensifica-se o arrancamento, e a fissura de cisalhamento se propaga rapidamente até a carga última. Na fase III, após o pico, observa-se a redução da rigidez, passando as fibras de aço a desempenhar papel predominante na resistência ao cisalhamento (Wu *et al.*, 2019).

A partir da formação da primeira microfissura, ocorre a propagação das fissuras com o aumento da carga. Nesse processo, as fibras atuam como pontes de transferência de tensões através da matriz danificada, retardando a abertura e a propagação das fissuras, e contribuindo para o aumento da resistência e da ductilidade do material.

Apresenta-se na Figura 4.14 a curva tensão de cisalhamento-deslizamento correspondente ao mesmo ensaio, a qual exibe forma semelhante e pode ser dividida também em três fases. Segundo Wu *et al.* (2019), na fase I, o comportamento é elástico linear até aproximadamente 70% da carga máxima de cisalhamento. Na fase II, com o rápido desenvolvimento do deslizamento, a curva se desvia da linearidade até atingir a carga última. Na fase III, observa-se a redução da carga no regime pós-ruptura.

Figura 4.14 – Curva típica de tensão de cisalhamento-deslizamento de um corpo de prova de UHPFRC



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2019).

4.1.3 Influência das fibras no comportamento mecânico

O comportamento mecânico do UHPFRC é influenciado por diversos fatores relacionados às fibras e sua interação com a matriz, dentre os quais se destacam: o teor de fibras, a sua orientação e dispersão, o seu tipo e forma (razão de aspecto), o seu comportamento durante o arrancamento e a própria resistência da matriz.

Dentre esses fatores, é amplamente reconhecido que a quantidade de fibra incorporada à matriz, associada à sua orientação na região de fissuração, constitui um dos principais parâmetros determinantes do comportamento do material (Casagrande, 2017).

Vale destacar que, como o UHPFRC é uma classe particular dos concretos reforçados com fibras, muitas das considerações e discussões possuem caráter geral (Ribeiro, 2023).

4.1.3.1 Teor de fibras

A eficiência das fibras está intrinsecamente relacionada à sua função como elementos de transferência de tensões através das fissuras no concreto. Sob essa perspectiva, torna-se evidente que a capacidade de reforço conferida ao material depende diretamente do teor de fibras incorporado. Assim, o aumento da fração volumétrica de fibras implica em um maior número de pontos de ancoragem atuando na ponte de transferência de tensões, o que se traduz em um desempenho pós-fissuração superior (Figueiredo, 2011).

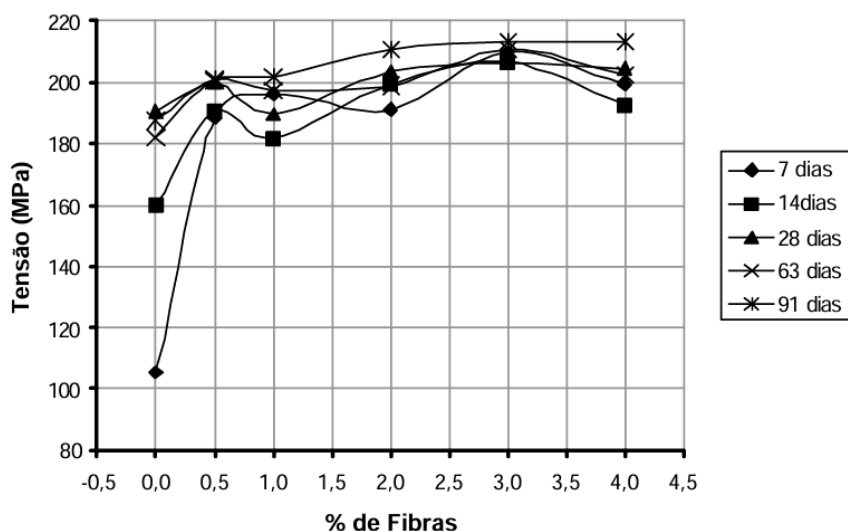
No entanto, o aumento na quantidade de fibras tem um ponto crítico, a partir do qual podem ocorrer prejuízos para as propriedades mecânicas do concreto. Esse efeito é atribuído à perda de trabalhabilidade decorrente do elevado volume de fibras, que compromete o adensamento adequado da mistura, gerando defeitos internos (Vanderlei, 2004).

Além disso, esse aumento pode intensificar o agrupamento das fibras (efeito de grupo), reduzindo a sua eficiência durante o arrancamento, devido à sobreposição de tensões no concreto entre as fibras (Oliveira, 2019).

A formação de aglomerados de fibras diminui a área de contato de interação com a matriz, introduzindo zonas de fraqueza no material (Li; Wang; Backer, 1990). No UHPFRC, resultados experimentais indicam que o efeito de grupo ocorre já com 1% de teor de fibras (Kim; Yoo, 2019).

Quanto à resistência à compressão, conforme apresentado na Figura 4.15, Vanderlei (2004) verificou que o aumento do teor de fibras no concreto, até 3% em volume, tende a promover o incremento na resistência. Entretanto, para teores superiores, observa-se uma tendência de redução dessa propriedade.

Figura 4.15 – Resistência à compressão em função do volume de fibras

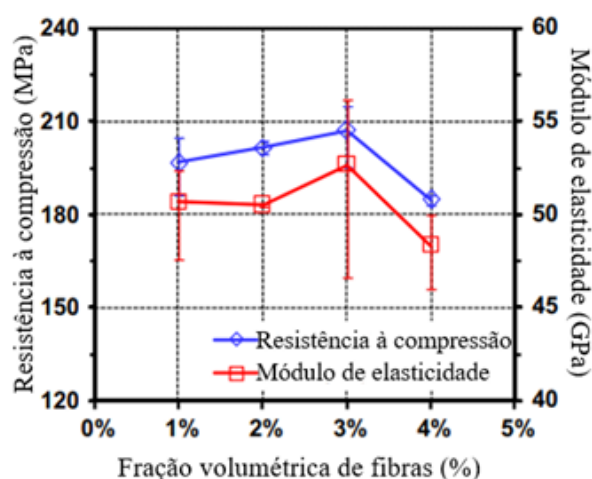


Fonte: Vanderlei (2004).

O mesmo foi observado por Yoo, Lee e Yoon (2013), que investigaram a influência do teor de fibras no UHPFRC sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os autores verificaram que essas propriedades aumentam com a fração volumétrica de fibras até cerca de 3% (vide Figura 4.16). Para esse teor, foi registrada uma resistência à compressão de aproximadamente 210 MPa, superior em cerca de 5%, 3% e 12% aos valores obtidos para 1%,

2% e 4% de fibras, respectivamente. Quanto ao módulo de elasticidade, foi observado um valor próximo de 52,5 GPa para o teor de 3% de fibras, representando acréscimos de apenas cerca de 3%, 4% e 9% em comparação aos teores de 1%, 2% e 4%, respectivamente.

Figura 4.16 – Efeito do teor de fibra na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do UHPFRC



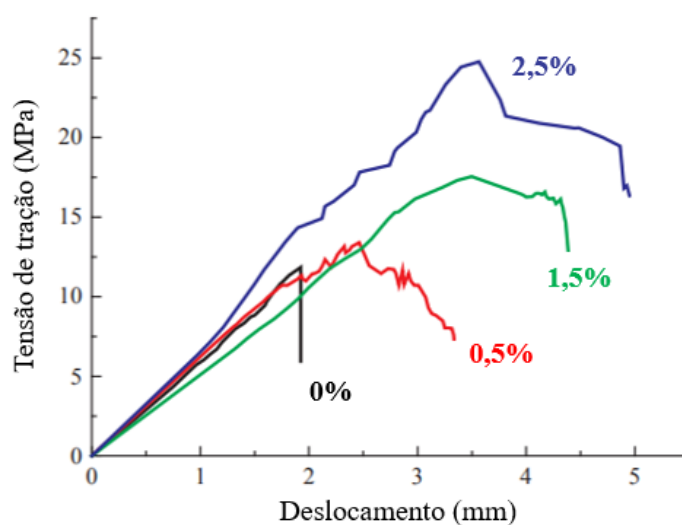
Fonte: Páez Sepúlveda (2025), adaptado de Yoo, Lee e Yoon (2013).

Gidrão (2020) atribui o ligeiro aumento do módulo de elasticidade à regra das misturas (Mehta; Monteiro, 2008), uma vez que as fibras de aço possuem elevado módulo. No entanto, devido à sua baixa fração volumétrica, o efeito no módulo global é limitado. Assim, embora haja ganhos significativos nas propriedades pós-fissuração, esses não se refletem de forma expressiva no módulo de elasticidade.

Quanto à resistência à tração, esta pode ser significativamente aumentada com o incremento do teor de fibras, desde que a fração volumétrica se mantenha abaixo de um determinado limite; acima desse valor, o aumento do teor também passa a afetar negativamente essa propriedade. Contudo, esse limite não é único: Hu *et al.* (2017) indicam cerca de 5% em volume, enquanto Meng *et al.* (2018) propõem aproximadamente 3%.

Wu *et al.* (2019) realizaram ensaios de tração por compressão diametral para avaliar a resistência à tração do UHPFRC. Conforme mostra a Figura 4.17, os resultados indicaram que os compósitos com 0,5%, 1,5% e 2,5% de fibras apresentaram acréscimos relativos de 13%, 47% e 109%, respectivamente, em relação ao compósito sem fibras, sendo o maior valor de resistência observado para o teor de 2,5%.

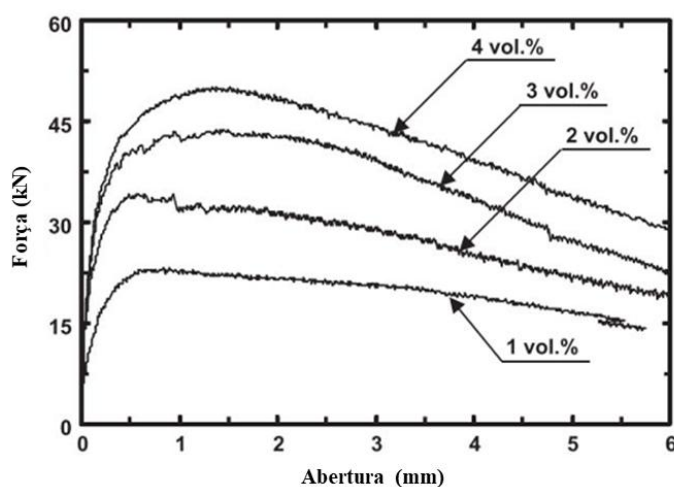
Figura 4.17 – Curva tensão-deslocamento obtida em ensaio de tração por compressão diametral UHPFRC para diferentes teores de fibra



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2019).

A Figura 4.18 apresenta os resultados de Yoo *et al.* (2014), que investigaram a influência do teor de fibras na resistência à tração na flexão de prismas entalhados de UHPFRC. Os resultados mostraram que os concretos com 2%, 3% e 4% de fibras apresentaram resistências 49%, 88% e 114% superiores, respectivamente, à do compósito com 1% de fibras, sendo o maior valor observado para o teor de 4%.

Figura 4.18 – Curva força-abertura de fissura (CMOD) do UHPFRC submetido ao ensaio de tração na flexão para diferentes teores de fibra



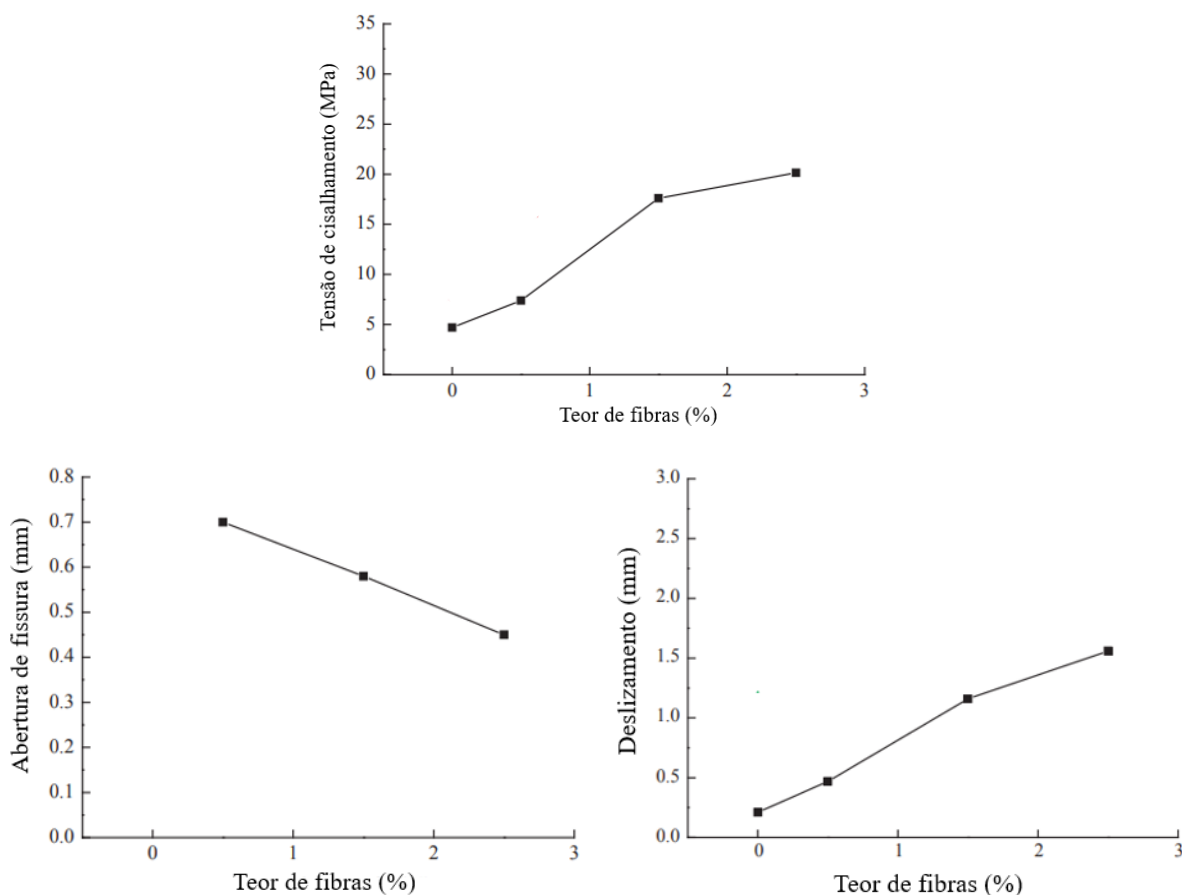
Fonte: Adaptado de Páez Sepúlveda (2025), a partir de Yoo *et al.* (2014).

De acordo com Hoang e Fehling (2017), a taxa de incremento nas resistências tende a ser menor para teores de fibra mais elevados.

Wen *et al.* (2022) comentam que, em contraste com sua influência mais moderada na resistência à compressão do UHPFRC, a fração volumétrica de fibras possui um efeito significativamente mais pronunciado na resistência à tração.

O teor volumétrico de fibras de aço também influencia significativamente o comportamento ao cisalhamento do UHPFRC. Wu *et al.* (2019) verificaram que o aumento do teor de fibras promove incrementos na resistência última ao cisalhamento e na capacidade de deslizamento relativo entre as faces fissuradas, acompanhados pela redução da abertura das fissuras. Conforme apresentado na Figura 4.19, o aumento do teor de fibras de 0% para 0,5%, 1,5% e 2,5% resultou em acréscimos de 57%, 275% e 329% na resistência ao cisalhamento, e de 124%, 452% e 643% no deslizamento, respectivamente, além de significativa redução da abertura de fissuras.

Figura 4.19 – Resultados dos corpos de prova de UHPFRC com diferentes teores volumétricos de fibras no ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2019).

Para todas as propriedades, há um aumento significativo da variabilidade em função do teor de fibras de aço, e esse comportamento pode ser explicado pela provável orientação das fibras durante a moldagem, além da diminuição da trabalhabilidade (Gidrão, 2020).

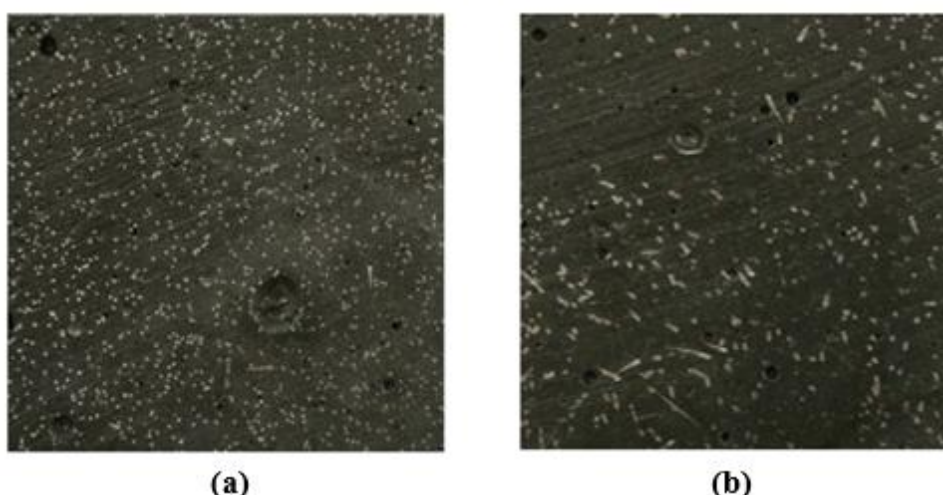
O teor de fibras está diretamente associado aos dois comportamentos abordados anteriormente (*strain-softening* e *strain-hardening*) através do conceito de volume crítico de fibras, que consiste no teor mínimo necessário para que o material mantenha resistência após a fissuração da matriz. Abaixo desse valor, o material apresenta perda progressiva de capacidade resistente (*strain-softening*); acima dele, suporta maiores níveis de carregamento mesmo após a fissuração (*strain-hardening*) (Figueiredo, 2011).

4.1.3.2 Orientação e dispersão das fibras

Fatores como a quantidade e o tipo de fibra (tamanho e geometria), a reologia do concreto, o modo de lançamento e compactação do material, e a geometria da fôrma influenciam na orientação e dispersão das fibras (Duque; Graybeal, 2017; Kang *et al.*, 2011; Yoo; Kang; Yoon, 2014).

A Figura 4.20 ilustra duas configurações distintas de distribuição das fibras em um plano de corte. Observa-se um alinhamento preferencial em uma única direção, associado a uma dispersão mais homogênea na Figura 4.20a. Por outro lado, na Figura 4.20b, as fibras apresentam orientação mais aleatória e dispersão polarizada.

Figura 4.20 – Exemplos de configurações de distribuição de fibras no plano: (a) orientação preferencial em uma única direção, com dispersão homogênea; (b) orientação aleatória, associada a uma dispersão polarizada



Fonte: Adaptado de Kang e Kim (2011).

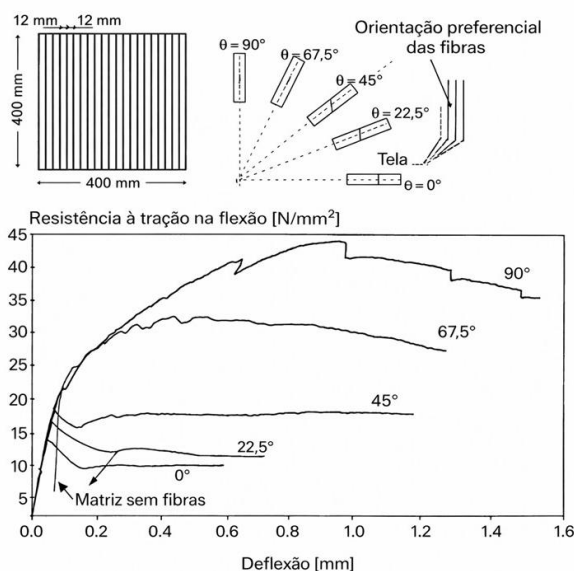
Como o UHPFRC apresenta características típicas de concretos autoadensáveis (CAA), a sua elevada fluidez contribui tanto para uma melhor dispersão das fibras quanto para o seu alinhamento preferencial na direção do fluxo do material (Boulekbache *et al.*, 2016; Wille *et al.*, 2014a).

Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2017) destacam que a ocorrência de uma orientação preferencial das fibras em uma determinada direção resulta em um comportamento anisotrópico do material, o que deve ser considerado para uma previsão mais precisa do desempenho mecânico do compósito.

Quanto à influência sobre o comportamento mecânico, estudos realizados indicam que as fibras alinhadas à direção das tensões de tração proporcionam maiores incrementos nas resistências à tração do que as orientadas aleatoriamente no concreto, e que uma dispersão mais homogênea destas também favorece o desempenho do material (Boulekbache *et al.*, 2016; Duque; Graybeal, 2017; Kang; Kim, 2011).

Bernier e Behloul (1996) investigaram a influência da orientação das fibras na resistência à tração na flexão e no comportamento pós-fissuração do UHPFRC, forçando o concreto a escoar através de telas durante a moldagem, de modo a obter a orientação preferencial das fibras. Os resultados, apresentados na Figura 4.21, indicaram que a resistência máxima à tração na flexão é alcançada quando praticamente todas as fibras estão alinhadas na direção da tração ($\theta = 90^\circ$), enquanto no caso mais desfavorável, com as fibras perpendiculares à direção da tração ($\theta = 0^\circ$), estas chegaram a exercer um efeito de separação. Nesse último caso, a resistência à tração na flexão foi ainda inferior à da matriz do concreto sem fibras.

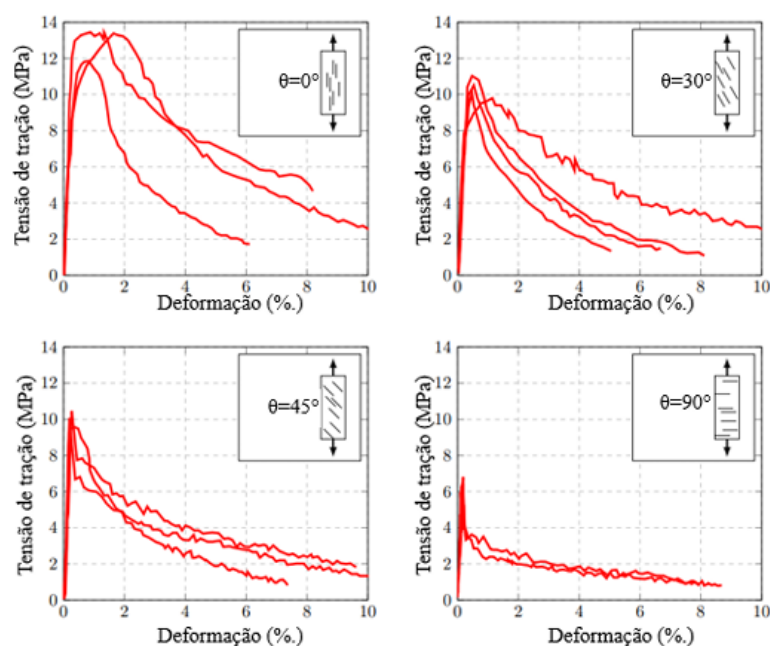
Figura 4.21 – Influência da orientação das fibras na resistência à tração por flexão e na ductilidade



Fonte: Adaptado de Bernier e Behloul (1996).

Bayard (2003) realizou ensaios de tração direta em corpos de prova de UHPFRC com 2% de fibras de aço, orientadas a 0° , 30° , 45° e 90° . A Figura 4.22 apresenta as curvas tensão-deformação, evidenciando uma redução progressiva do desempenho com o aumento do ângulo em relação à direção da carga. O melhor comportamento foi observado para fibras alinhadas a 0° , paralelas à sollicitação, enquanto a orientação a 90° resultou em uma redução de aproximadamente 50% na resistência à tração.

Figura 4.22 – Efeito da orientação das fibras na resposta à tração direta



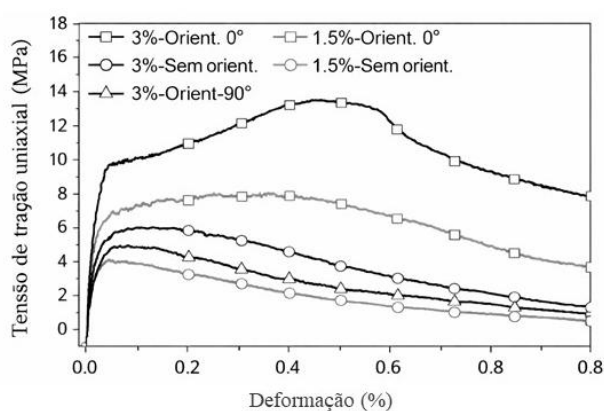
Fonte: Páez Sepúlveda (2025), adaptado de Bayard (2003).

Resultados semelhantes foram reportados por Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2017), que realizaram ensaios de tração uniaxial em prismas de concreto com 1,5% e 3% de fibras de aço. Por meio da aplicação de campo magnético, as fibras foram orientadas em 0° (paralelas ao eixo longitudinal), 90° (perpendiculares) e de forma aleatória. Os autores verificaram que as maiores resistências à tração ocorreram quando as fibras estavam alinhadas à direção das tensões aplicadas, conforme ilustrado na Figura 4.23.

Figura 4.23 – (a) Produção de corpos de prova com orientação preferencial das fibras (neste caso, orientadas a 0°); (b) curva tensão-deformação, para diferentes teores e orientações de fibras



(a)



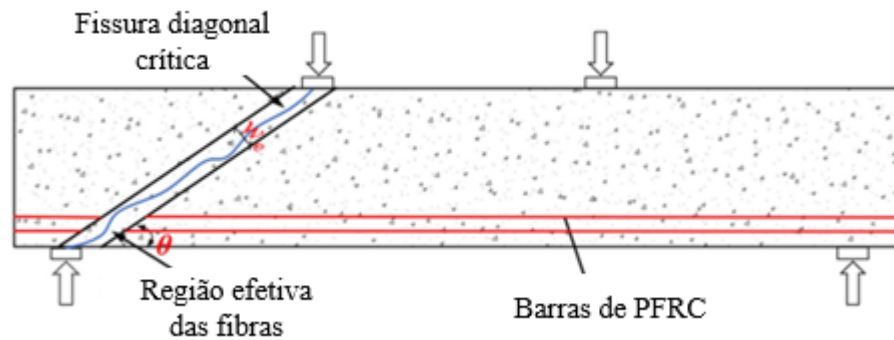
(b)

Fonte: Adaptado de Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2017).

Mais recentemente, Liang *et al.* (2024) investigaram o efeito da orientação das fibras no comportamento ao cisalhamento de vigas de UHPFRC, constatando que fibras orientadas perpendicularmente às fissuras diagonais críticas promovem o aumento da resistência ao cisalhamento, devido à maior eficiência no mecanismo de ponte de fissuras. Em comparação à condição com fibras aleatoriamente distribuídas, esse incremento foi de cerca 24% na resistência.

Os autores observaram que a maior parte da contribuição das fibras de aço para a resistência ao cisalhamento das vigas provém daquelas localizadas na região efetiva de cisalhamento (vide Figura 4.24), enquanto fibras situadas longe dessas fissuras têm impacto mínimo nessa contribuição.

Figura 4.24 – Região efetiva das fibras de aço

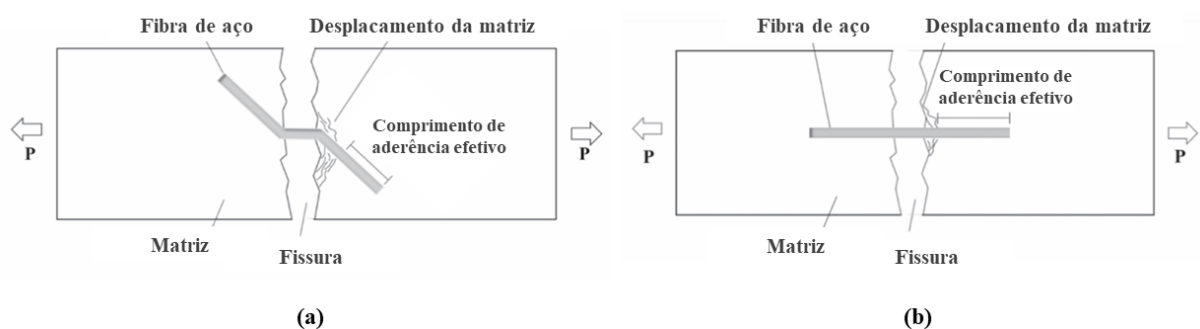


Fonte: Adaptado de Liang *et al.* (2024).

Quando a orientação das fibras é paralela à direção da tensão principal de tração em compósitos reforçados com fibras de aço, estas se posicionam perpendicularmente às fissuras, permitindo que um maior número de fibras atue de forma eficaz como ponte, contribuindo para a resistência. Assim, o efeito de reforço de uma distribuição alinhada à tração é significativamente superior ao de uma distribuição aleatória.

Com relação ao mecanismo de interação fibra-matriz, o desempenho de uma fibra individual também é favorecido pelo alinhamento. Quando a orientação da fibra não é compatível com a direção da tração, ocorre fragmentação da matriz na região de arrancamento, reduzindo o comprimento de aderência efetivo e, conseqüentemente, a eficiência de reforço (vide Figura 4.25a). Por outro lado, quando a fibra está alinhada, o arrancamento ocorre perpendicularmente à fissura, com menor perturbação da matriz adjacente, mantendo praticamente inalterada a sua capacidade de transferência de tensões (ver Figura 4.25b). Dessa forma, o alinhamento das fibras em relação à direção das tensões de tração permite o pleno aproveitamento do seu potencial de reforço (Mu *et al.*, 2023).

Figura 4.25 – Arrancamento de uma única fibra de aço da matriz: (a) corpo de prova com fibra não alinhada à direção da tração; (b) corpo de prova com fibra alinhada à direção da tração

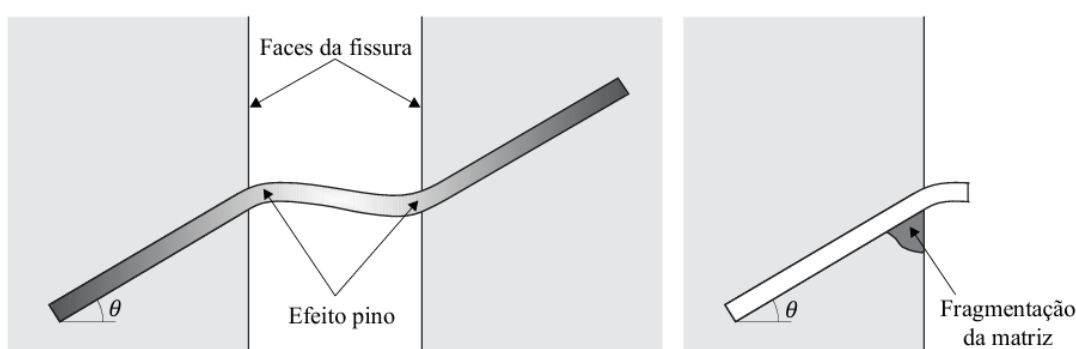


Fonte: Adaptado de Mu *et al.* (2023).

Além do efeito de fragmentação da matriz, quando a fibra está inclinada em relação à direção da força de tração aplicada, destaca-se o efeito pino (vide Figura 4.26), caracterizado pelo aumento da força de arrancamento e do deslizamento associado, em decorrência das restrições geométricas impostas pela inclinação da fibra durante o seu arrancamento (Cunha, 2010; Lee; Kang; Kim, 2010; Zhang *et al.*, 2018).

Assim, a eficiência da fibra resulta do equilíbrio entre o ganho promovido pelo efeito pino (travamento) e a perda associada à fragmentação (danificação local) da matriz.

Figura 4.26 – Mecanismos adicionais da fibra inclinada: efeito pino e fragmentação da matriz



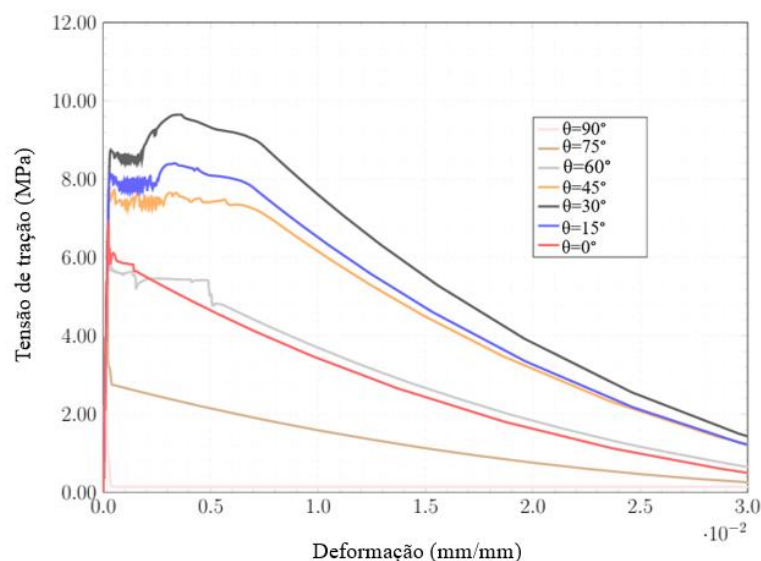
Fonte: Oliveira (2019), adaptado de Cunha (2010).

Dessa forma, outros estudos indicam que a máxima resistência à tração não ocorre necessariamente quando as fibras estão alinhadas com a direção da carga (ângulo próximo de 0°). A eficiência máxima é atingida quando as fibras se encontram inclinadas em torno de 30° em relação à normal ao plano de fissuração (Huo *et al.*, 2021; Ribeiro; Krah; Carrazedo, 2022; Zhang *et al.*, 2018).

Nessa condição, a contribuição das fibras para a resposta do compósito é maximizada, pois fibras inclinadas geram uma componente adicional de atrito na interface com a matriz, aumentando a força necessária para o arrancamento. Além disso, a rigidez à flexão das fibras de aço contribui como um mecanismo adicional de dissipação de energia durante esse processo (Ribeiro, 2023).

A Figura 4.27 apresenta os resultados obtidos por Ribeiro, Krah e Carrazedo (2022), que investigaram esse comportamento por meio de um modelo micromecânico para a resposta à tração do UHPFRC, considerando o arrancamento das fibras, o teor e a orientação, bem como o efeito de grupo.

Figura 4.27 – Efeito do ângulo de orientação no comportamento à tração do UHPFRC



Fonte: Adaptado de Ribeiro, Krahel e Carrazedo (2022).

4.1.3.3 Tipo e forma das fibras

As fibras inicialmente aderem à matriz e, com a deformação do compósito, passam a mobilizar resistência por atrito. A transferência de esforços ocorre por cisalhamento ao longo do comprimento de embutimento, de modo que a carga transmitida depende diretamente desse parâmetro (Ribeiro, 2023). Assim, quanto maior o comprimento da fibra, maior o seu embutimento na matriz e, conseqüentemente, maior a capacidade resistente pós-fissuração do compósito.

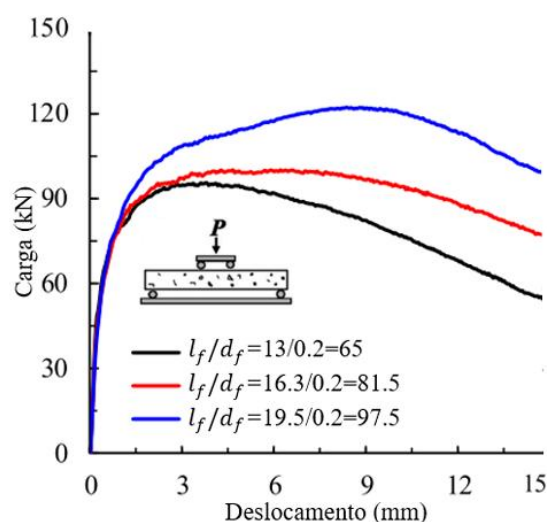
No entanto, o uso de fibras muito longas pode ultrapassar o comprimento crítico, levando à ruptura da própria fibra no momento da abertura da fissura, em vez de ser arrancada. Nesse caso, ocorre a perda do mecanismo de arrancamento, que é essencial para a dissipação de energia e o ganho de ductilidade, reduzindo, assim, a resistência residual do compósito. Dessa forma, compromete-se uma das principais contribuições das fibras às matrizes cimentícias: a redução da fragilidade do material (Figueiredo, 2011).

Quanto maior a seção transversal da fibra, maior é a sua área de contato com a matriz e, portanto, maior é a carga que a fibra pode suportar durante o seu arrancamento.

Dessa forma, Figueiredo (2011) comenta que valores mais elevados do fator de forma das fibras (comprimento/diâmetro: l_f/d_f) estão associados a uma maior capacidade resistente pós-fissuração, desde que o comprimento da fibra não ultrapasse o comprimento crítico.

Yoo *et al.* (2015) investigaram esse efeito em prismas de UHPFRC submetidos ao ensaio de flexão de quatro pontos. Os autores observaram que as amostras reforçadas com fibras de aço retas e longas ($l_f/d_f = 19,5/0,2 = 97,5$) apresentaram um aumento de 13% e 26% na resistência à tração na flexão em relação aos prismas com fibras médias ($l_f/d_f = 16,3/0,2 = 81,5$) e curtas ($l_f/d_f = 13,0/0,2 = 65,0$), respectivamente (vide Figura 4.28).

Figura 4.28 – Curva força-deslocamento para diferentes fatores de forma



Fonte: Páez Sepúlveda (2025), adaptado de Yoo *et al.* (2015).

Zhou e Qiao (2019) analisaram quatro relações de aspecto de fibras de aço em UHPFRC ($l_f/d_f = 6/0,16 = 37,5$; $13/0,2 = 65,0$; $19/0,3 = 63,3$; $25/0,38 = 65,8$) e verificaram que maiores valores tendem a aumentar a resistência à tração. Segundo os autores, fibras mais longas resultam em um menor número de interseções no plano de fissura, reduzindo a interferência entre elas, enquanto fibras mais curtas aumentam a densidade de fibras e o efeito de grupo. Embora as resistências tenham sido semelhantes para as maiores relações de aspecto, as fibras mais longas apresentaram maior capacidade de absorção de energia, devido ao maior efeito de ponte de fissuras e à desaderência mais pronunciada.

Quanto à geometria da fibra, Figueiredo (2011) comenta que a fibra ancorada apresenta maior aderência inicial à matriz, resultando em maiores forças de arrancamento. Porém, com o aumento da abertura de fissura, ocorre concentração de tensões na região de ancoragem, o que pode degradar a matriz local, reduzir a aderência e até provocar ruptura da fibra. Já a fibra reta, por não possuir ancoragem, reduz danos locais na matriz e mantém o mecanismo de escorregamento em maiores aberturas de fissura, apresentando um melhor

desempenho em regime pós-fissuração, com uma contribuição mais efetiva para a resistência residual do compósito.

Com relação à resistência da fibra, não há necessidade de se utilizar fibras de elevada resistência quando se está trabalhando com fibras curtas, abaixo do comprimento crítico, uma vez que o mecanismo predominante de falha é o arrancamento por escorregamento da fibra (Figueiredo, 2011).

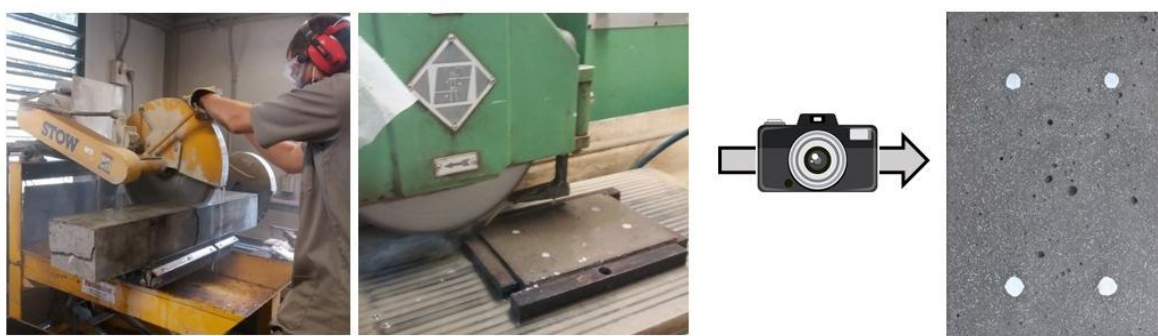
4.1.4 Caracterização da orientação das fibras

As configurações de orientação das fibras podem ser avaliadas por diversos ensaios, tais como: análise de imagens, tomografia computadorizada, fluido translúcido e viscoso, além de métodos elétricos ou magnéticos (Huang; Gao; Teng, 2021).

Oliveira (2019) destaca a análise de imagens como a técnica mais aplicável e confiável entre as disponíveis para avaliar as características de distribuição das fibras no UHPFRC, pois possibilita realizar tanto uma apreciação qualitativa quanto quantitativa.

As imagens da distribuição das fibras podem ser obtidas por método de ensaio destrutivo, em que as amostras são cortadas e fotografadas com câmera de alta resolução (vide Figura 4.29), ou por método de ensaio não destrutivo, como a tomografia computadorizada por raios X.

Figura 4.29 – Obtenção do plano de corte e da imagem



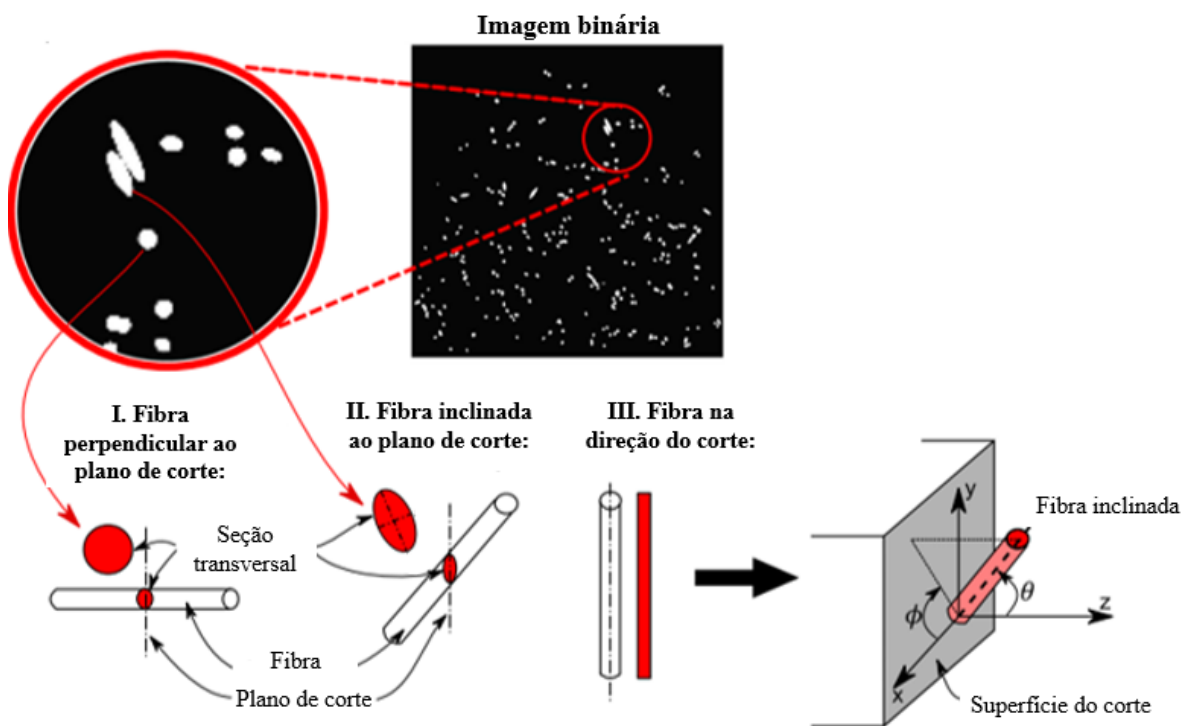
Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

Com o propósito de correlacionar as características de orientação das fibras com as propriedades mecânicas do UHPFRC, o plano de corte do elemento deve ser realizado o mais próximo possível do plano de fissuração principal e perpendicular à direção das tensões de tração.

Wille *et al.* (2014a) recomendam que o plano de análise seja cortado a uma distância equivalente a 1,5 vezes o comprimento da fibra em relação à fissura principal, evitando assim a ausência de fibras que possam ter sido removidas durante o ensaio.

Com o auxílio da técnica de processamento e análise das imagens obtidas, como a conversão das imagens coloridas RGB em imagens em escala de cinza e, posteriormente, em imagens binárias, uma fibra projetada no plano de corte pode ser aproximada por uma elipse, conforme a Figura 4.30 apresenta.

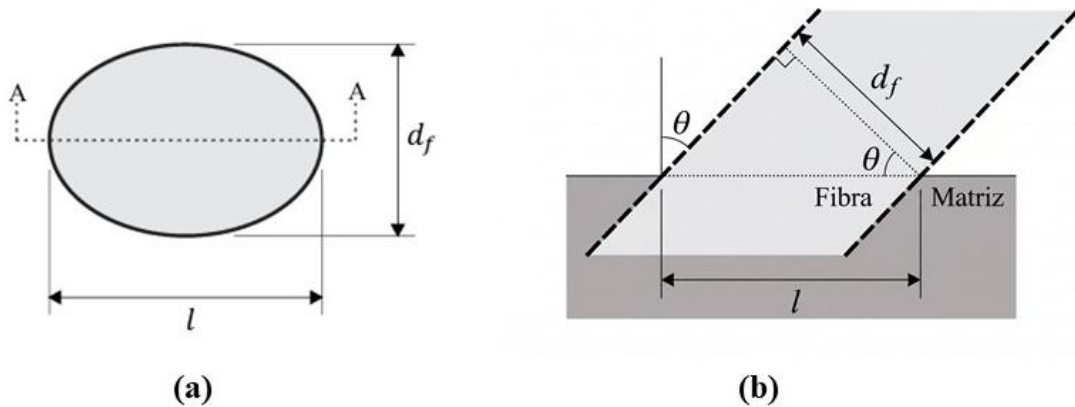
Figura 4.30 – Análise de imagem para avaliação da orientação das fibras



Fonte: Adaptado de Faustmann, Kronau e Fischer (2024).

Isto é, as fibras de seção cilíndrica, quando interceptadas por um plano de corte, projetam-se como elipses, cujo eixo menor corresponde ao diâmetro da fibra (vide Figura 4.31a). Dessa forma, o ângulo de orientação/inclinação da fibra, definido como o ângulo entre seu eixo longitudinal e a direção normal ao plano de corte, pode ser determinado pela Equação (4.1) (vide Figura 4.31b).

Figura 4.31 – Representação de uma fibra no plano de corte: (a) vista em planta do plano de corte (fibra projetada como elipse) e (b) vista lateral da seção A-A



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

$$\theta = \arccos\left(\frac{d_f}{l}\right) \quad (4.1)$$

Sendo:

- a) θ : o ângulo entre o eixo longitudinal da fibra e a direção normal ao plano de corte;
- b) d_f : o comprimento do menor eixo da elipse que representa a fibra no plano de corte;
- c) l : o comprimento do maior eixo da elipse que representa a fibra no plano de corte.

Observa-se que, para $d_f/l = 1$, a projeção da fibra é circular, indicando que ela se encontra paralela à direção normal ao plano de corte. Por outro lado, quando d_f/l tende a zero ($l \gg d_f$), a fibra encontra-se perpendicular a essa direção (fibra extremamente alongada na seção).

Dessa forma, é possível obter o coeficiente de orientação através da média dos cossenos dos ângulos de orientação das fibras (Equação (4.2)), como realizado por Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2017), Duque e Graybeal (2017) e Zhou e Uchida (2017). Destaca-se que essa abordagem, para fins de simplificação, considera apenas a disposição geométrica das fibras.

$$\eta_\theta = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_{i=1}^{n_f} \cos(\theta_i) \quad (4.2)$$

Sendo:

- a) η_θ : o coeficiente de orientação das fibras;
- b) n_f : o número total de fibras na imagem;
- c) θ_i : o ângulo entre o eixo longitudinal da fibra i e a direção normal ao plano de corte.

O coeficiente de orientação das fibras varia, então, entre 0 e 1. Quando igual a 1, esse indica que todas as fibras estão paralelas à direção normal ao plano de corte; igual a 0, aponta que todas as fibras estão perpendiculares à direção normal ao plano de corte; igual a 0,5, manifesta que as fibras estão distribuídas aleatoriamente no espaço 3D (Švec *et al.*, 2014).

Ribeiro (2023) apresenta, na Tabela 4.2, os valores do coeficiente de orientação obtidos a partir de corpos de prova submetidos à tração, determinados em relação à direção de carregamento. Os resultados evidenciam de forma clara a influência do método de moldagem sobre o coeficiente de orientação.

Observa-se, contudo, que a maioria das amostras apresenta tendência a um alinhamento preferencial das fibras em determinada direção. Além disso, verifica-se que valores mais elevados do coeficiente de orientação podem ser alcançados por meio de técnicas específicas de indução de alinhamento, como a aplicação de campos eletromagnéticos, conforme reportado por Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2019).

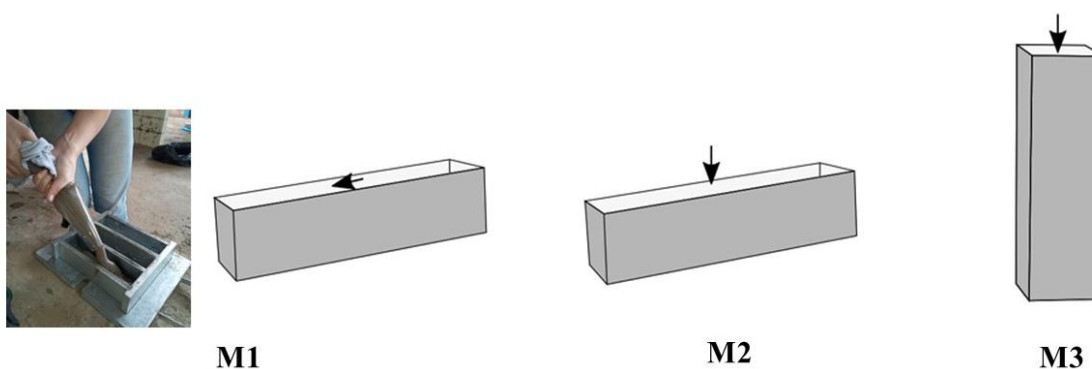
Tabela 4.2 – Influência do método de moldagem no coeficiente de orientação

Autor	Descrição	η_θ
Duque e Graybeal (2017)	Corpo de prova extraído de laje, com eixo perpendicular à direção de fluxo do concreto durante a moldagem	0,65
Duque e Graybeal (2017)	Corpo de prova extraído de laje, orientado a 45° em relação à direção de fluxo do concreto durante a moldagem	0,74
Duque e Graybeal (2017)	Corpo de prova extraído de laje, com eixo paralelo à direção de fluxo do concreto durante a moldagem	0,83
Duque e Graybeal (2017)	Corpos de prova moldados diretamente em fôrma	0,85
Kang e Kim (2011)	Concretagem realizada com fluxo paralelo à direção das tensões de tração	0,65
Kang e Kim (2011)	Concretagem realizada com fluxo transversal à direção das tensões de tração	0,43
Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2019)	Fibras com alto grau de orientação (1,5% em volume de fibras)	0,89
Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2019)	Fibras não orientadas (1,5% em volume de fibras)	0,71
Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2019)	Fibras com alto grau de orientação (3% em volume de fibras)	0,87
Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2019)	Fibras não orientadas (3% em volume de fibras)	0,74

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2023).

Ribeiro (2023) investigou a influência de diferentes métodos de moldagem na orientação das fibras, avaliando os coeficientes de orientação obtidos em cada configuração. A autora produziu prismas por três métodos distintos: no método 1 (M1), o concreto foi moldado longitudinalmente em fôrma horizontal; no método 2 (M2), na direção transversal; e, no método 3 (M3), verticalmente em fôrma vertical. O método M1 teve como objetivo promover o alinhamento das fibras na direção longitudinal, utilizando uma espécie de saco de confeiteiro. Nos métodos M2 e M3, o lançamento foi realizado de forma convencional, variando-se apenas a orientação da fôrma (vide Figura 4.32).

Figura 4.32 – Processos de moldagem adotados por Ribeiro (2023)



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2023).

A Tabela 4.3 apresenta os coeficientes de orientação obtidos pela autora, tendo sido o plano de corte transversal à direção do comprimento do prisma. Como esperado, Ribeiro (2023) verificou que moldar um prisma dispondo o concreto longitudinalmente na fôrma (M1) resultava em um maior alinhamento das fibras na direção longitudinal da amostra, já que os coeficientes de orientação foram maiores para este método. Devido a um melhor controle do processo de moldagem, observou-se também menores dispersões dos resultados neste método.

Tabela 4.3 – Coeficientes de orientação obtidos por Ribeiro (2023)

Prismas	η_θ	Coeficiente de variação (%)
M1 (1%)	0,797	1,81
M2 (1%)	0,746	3,64
M3 (1%)	0,680	4,90
M1 (2%)	0,810	2,13
M2 (2%)	0,753	2,53
M3 (2%)	0,699	3,66

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2023).

4.2 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Desenvolvida no início da década de 1980, a correlação de imagem digital (DIC) é um método óptico que permite visualizar campos de deslocamentos por sucessivos pós-processamentos das imagens captadas a uma frequência constante (Skarżyński; Syroka; Tejchman, 2011).

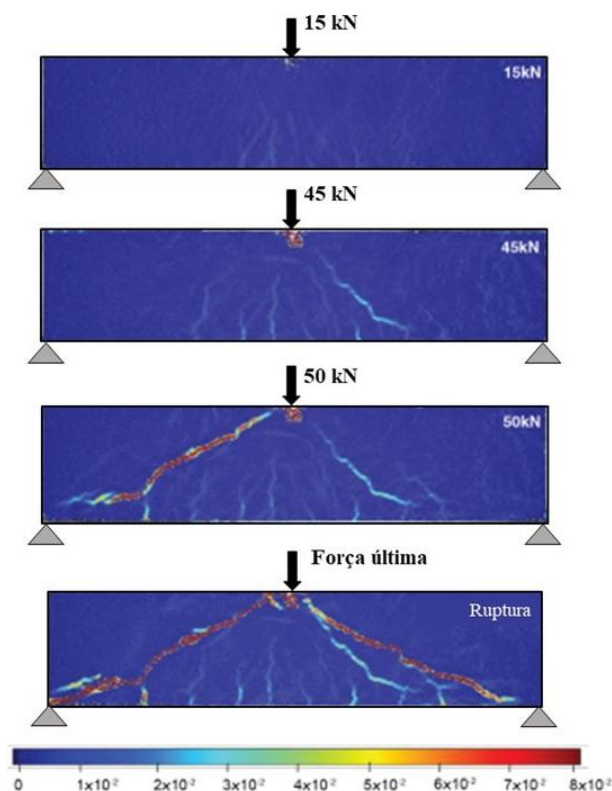
Isto é, trata-se de uma técnica que permite obter medições da superfície de um corpo através da comparação de imagens deformadas com a imagem em estado não deformado (imagem de referência), utilizando-se uma função de correlação adequada.

Por ser, então, uma técnica que não exige contato direto com a amostra e é independente do material analisado ou da escala de interesse, a DIC pode ser aplicada em uma ampla variedade de situações para investigar e caracterizar a deformação de sólidos. Entre os materiais mais comuns testados estão metais, polímeros, concretos, amostras geológicas, tecidos biológicos, eletrodos de baterias, explosivos, entre outros, relata iDICs (2018), organização conhecida como Sociedade Internacional de Correlação de Imagem Digital (*International Digital Image Correlation Society*).

A correlação de imagem digital tem se mostrado particularmente promissora no monitoramento da formação e evolução de fissuras em elementos de concreto (Ottoni, 2024), possibilitando o acompanhamento contínuo da abertura de fissuras, inclusive em estágios iniciais (Gehri, Mata-Falcón, Kaufmann, 2022; Golewski, 2022.; McCormick; Lord, 2012).

A Figura 4.33 apresenta um exemplo de aplicação da DIC na investigação do processo de fissuração, com base na evolução do campo de deformações longitudinais ao longo do carregamento, de uma viga de concreto armado sem estribos submetida ao ensaio de flexão em três pontos.

Figura 4.33 – Campo de deformações longitudinais para diferentes etapas de carregamento



Fonte: Adaptado de Tambusay, Suryanto e Suprobo (2018).

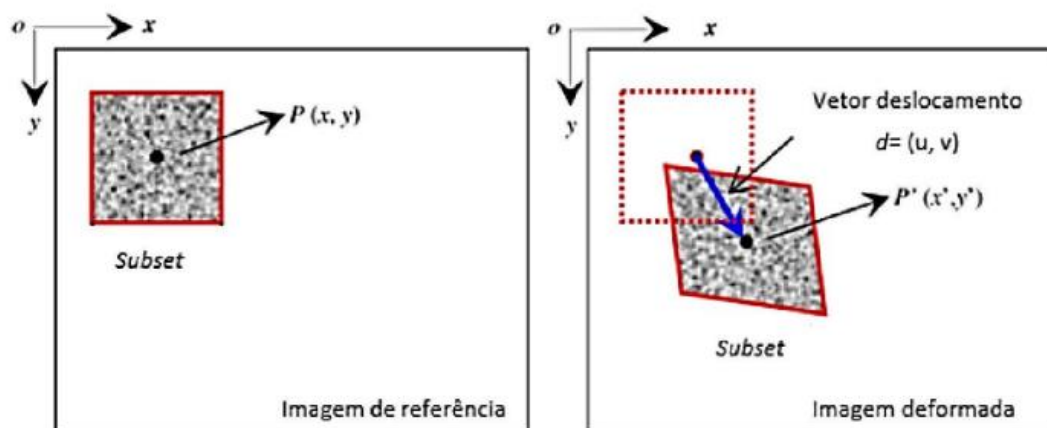
A técnica elimina interferências associadas à instrumentação tradicional, como a influência do contato físico dos sensores sobre o corpo de prova, possíveis desalinhamentos na instalação, restrições locais à deformação impostas pelos dispositivos e erros decorrentes da fixação inadequada ou perda de aderência, além de possibilitar a obtenção de medições de campo completo, em contraste com técnicas convencionais que se restringem a pontos específicos.

Adicionalmente, a DIC apresenta um custo relativamente reduzido quando comparada a sistemas tradicionais de aquisição de dados baseados em sensores e instrumentação mais complexa (Smrkić; Koščak; Damjanović, 2018).

Quanto ao princípio de funcionamento, a imagem inicial é dividida em várias regiões, denominadas blocos ou *subsets*, e esses blocos são procurados na imagem seguinte. Cada bloco é um conjunto de *pixels*, e o objetivo do algoritmo é determinar a sua nova posição a partir dos valores das intensidades luminosas desses *pixels* (Beleza, 2017).

Conforme apresentado pela Figura 4.34, o algoritmo calcula o movimento que o bloco realizou de uma configuração para outra, dentro de uma área, denominada região de interesse, obtendo assim os deslocamentos e, posteriormente, as deformações.

Figura 4.34 – Ilustração de um *subset* de referência, antes da deformação, e do mesmo *subset* após a deformação

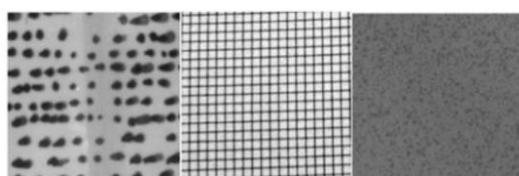


Fonte: Rosas (2019).

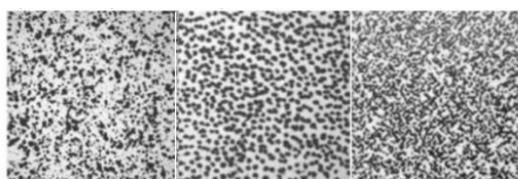
Ferreira (2012) explica que a avaliação do grau de similaridade entre os subconjuntos de referência e o estado deformado é realizada por meio da maximização de coeficientes de correlação, calculados a partir das matrizes de intensidade dos *pixels* em escala de cinza. Esse processo, realizado de forma iterativa com métodos de otimização, permite extrair a função de mapeamento de deformações que relaciona as imagens.

Para se evitar mais de uma correspondência para um bloco, ou seja, a fim de garantir a identidade única do *subset*, a superfície do objeto deve ser preparada com um padrão aleatório de alto contraste (padrão estocástico), chamado *speckle* (iDICs, 2018), conforme apresenta a Figura 4.35. Dessa forma, padrões de texturas, naturais ou artificiais, são utilizados como portadores de informação.

Figura 4.35 – Padrões de *speckles*



Padrões ruins: repetitivo ou com baixo contraste



Padrões bons: aleatório e com alto contraste



Exemplo

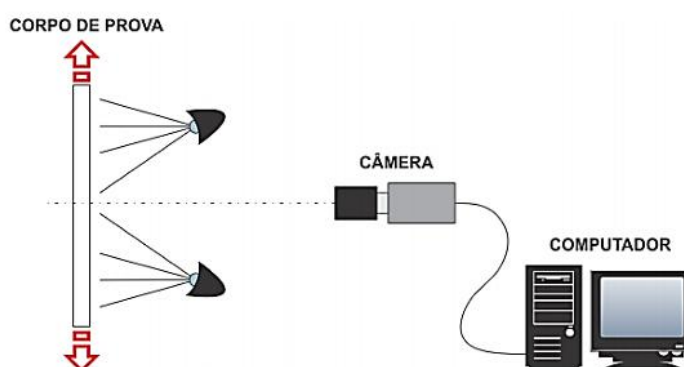
Fonte: Adaptado de Santos (2023).

O sistema de correlação de imagem digital deve ser capaz de interpretar diferentes intensidades de luz, bem como gravar padrões de escalas de cinza para cada *pixel*, de modo que cada ponto seja único (Santos *et al.*, 2015).

Segundo o manual da iDICs (2018), a precisão dos resultados obtidos com a técnica está significativamente relacionada com a qualidade do conjunto de pontos; o ideal é que este seja não periódico e sem uma orientação preferencial, com o tamanho dos pontos dependendo do tamanho da área de interesse do corpo de prova e da resolução da câmera fotográfica.

A Figura 4.36 ilustra o arranjo típico dos equipamentos para a aplicação da técnica. Durante a aquisição das imagens, utiliza-se um sistema de iluminação adequado para garantir maior precisão nos resultados. Destaca-se, ainda, a necessidade de manter a lente da câmera ortogonal à superfície analisada, a fim de evitar distorções nas imagens.

Figura 4.36 – Configuração típica do ensaio experimental para análise da correlação de imagem



Fonte: Ferreira (2012).

Para o processamento das imagens, existem *softwares* consolidados no mercado e também códigos de acesso livre e gratuito (Santos, 2023). De acordo com Beleza (2017), os *softwares* principais de utilização gratuita são os seguintes: ZEISS INSPECT Correlate (o antigo GOM Correlate), NCorr, OpenCV, Opticist-Moire *Software*, CIAS e Algoritmo Matlab.

Uma das formas de estimar, de maneira indireta, a qualidade (precisão e acurácia) das informações geradas pelo *software* de correlação de imagem consiste na comparação entre duas imagens obtidas sob o mesmo nível de carregamento (geralmente nulo) e nas mesmas condições de ensaio (posicionamento da câmera, iluminação, entre outros). A variação entre as medições dessas imagens pode ser utilizada como um indicador da incerteza do sistema. Adicionalmente, uma verificação localizada pode ser realizada por meio da comparação, em

uma região específica de interesse, entre os resultados fornecidos pela correlação de imagem e aqueles obtidos por instrumentação convencional (Resende, 2020).

5 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, apresenta-se as informações acerca da campanha experimental e dos procedimentos adotados para a análise dos resultados.

As atividades experimentais foram realizadas nas dependências do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET–EESC–USP).

5.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

Utilizou-se os seguintes materiais na composição do UHPC/UHPFRC:

- a) cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) (massa específica de 3,16 g/cm³);
- b) areia industrial fina (massa específica de 2,64 g/cm³ e diâmetro máximo de 0,42 mm) como agregado miúdo;
- c) pó de quartzo (sílica moída, com massa específica de 2,72 g/cm³) como fíler, para preencher a falha granulométrica entre a areia fina e o cimento;
- d) sílica ativa não densificada (massa específica de 2,22 g/cm³) como adição pozolânica e para preencher os vazios entre o cimento e o pó de quartzo;
- e) superplastificante à base de policarboxilato (massa específica de 1,06 g/cm³);
- f) água;
- g) no caso do UHPFRC: fibras de aço lisas e curtas, revestidas de cobre (vide Tabela 5.1 e Figura 5.1).

Tabela 5.1 – Características das fibras de aço utilizadas

Característica	Valor
Comprimento (mm)	13,0
Diâmetro (mm)	0,2
Resistência à tração (MPa)	2850
Módulo de elasticidade (GPa)	200
Massa específica (g/m ³)	7,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1 – Fibras de aço utilizadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 5.2, apresenta-se a composição utilizada para o concreto nesta pesquisa. Essa dosagem foi baseada no estudo de Sobuz *et al.* (2016), com algumas adaptações na quantidade de água e de aditivo superplastificante, a fim de proporcionar maior fluidez à mistura, resultando em uma relação água/cimento de 0,21.

Tabela 5.2 – Composição da matriz do concreto

Material	Consumo (kg/m³ de concreto)
Cimento	757,2
Areia fina	833,0
Pó de quartzo	378,6
Sílica ativa	189,3
Água	159,0
Aditivo superplastificante	75,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dessa composição, trabalhou-se com quatro frações volumétricas de fibras de aço: 0% (UHPC), 0,5%, 1% e 2% (UHPFRC). Destaca-se que o teor de aditivo superplastificante foi mantido constante em todas as composições, independentemente do teor de fibras.

Quanto à produção, foi utilizado um misturador mecânico de bancada para argamassas e concretos, com capacidade de 18 litros, e se adotou a sequência de Ribeiro (2023) para o procedimento de mistura:

- a) a areia, 20% da água e 25% do aditivo superplastificante foram misturados por 1 minuto em baixa velocidade;

- b) o cimento, o pó de quartzo, a sílica ativa, 20% da água e 25% do aditivo superplastificante foram adicionados e misturados por 4 minutos em velocidade média;
- c) 40% da água e 50% do aditivo superplastificante foram incorporados e misturados por 5 minutos em velocidade alta;
- d) a água restante foi adicionada e misturada por mais 3 minutos em velocidade máxima;
- e) no caso do UHPFRC, as fibras de aço foram finalmente introduzidas e misturadas por mais 3 minutos em velocidade alta, para homogeneização da mistura.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Com o intuito de se caracterizar os concretos produzidos, isto é, obter as suas propriedades mecânicas, foram realizados os ensaios de compressão uniaxial e tração uniaxial.

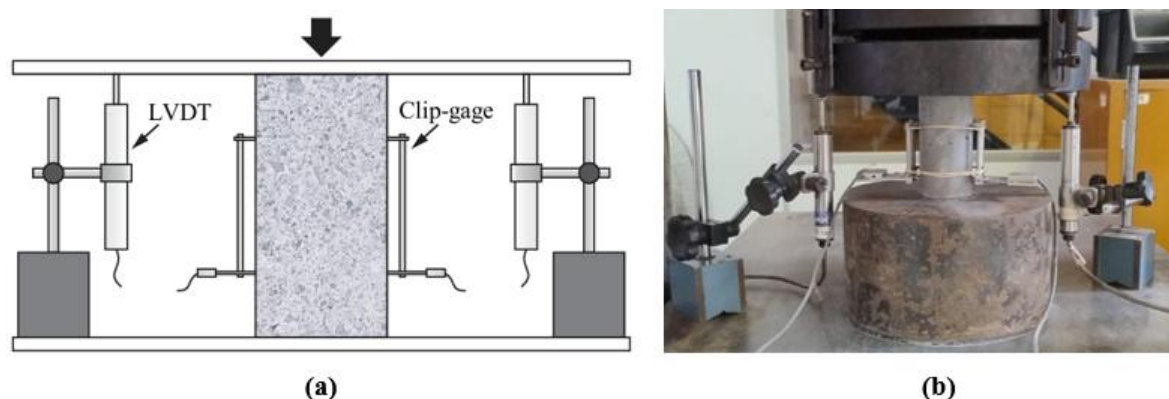
Os corpos de prova foram ensaiados após os 56 dias de idade, tendo sido mantidos em cura úmida por 28 dias.

5.2.1 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial, detalhado na Figura 5.3, foi realizado em corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, utilizando-se uma máquina de ensaio universal servo-hidráulica, com capacidade máxima de carga de 1500 kN e taxa de deslocamento de 0,005 mm/s, e foram determinados a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a curva tensão-deformação.

O trecho linear da curva tensão-deformação foi obtido por meio de dois extensômetros tipo *clip-gage* fixados na amostra, com base de medida de 50 mm, que medem o deslocamento longitudinal do corpo de prova. Já o trecho não linear da curva foi definido a partir de dois transdutores de deslocamento (LVDT), com base de medição de 100 mm, posicionados entre as placas da máquina de ensaio.

Figura 5.3 – Ensaio de compressão uniaxial



Fonte: a) Oliveira (2019) e b) elaborado pelo autor.

Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada fração de fibra, totalizando vinte amostras. Esses corpos de prova foram moldados por procedimento convencional, sem a adoção de técnicas específicas para controle ou indução da orientação das fibras.

Moldou-se os corpos em três camadas, sem a utilização de equipamentos de adensamento mecânico, como vibrador de imersão ou mesa vibratória. O adensamento foi realizado apenas por meio de leves batidas nas paredes das fôrmas, com o objetivo de promover a acomodação da mistura e a liberação de bolhas de ar aprisionadas. Esse mesmo procedimento foi adotado para os demais corpos de provas, conforme será justificado posteriormente.

O módulo de elasticidade foi calculado segundo a ASTM C469/C469M-22 (ASTM, 2022), pela Equação (5.1).

$$E_c = \frac{0,4 \cdot f_c - f_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (5.1)$$

Sendo:

- d) E_c : o módulo de elasticidade;
- e) f_c : a resistência à compressão;
- f) f_1 : a tensão de compressão correspondente à deformação longitudinal de 0,00005 mm/mm;
- g) ε_2 : a deformação correspondente à tensão de $0,4 \cdot f_c$.

A inclinação inicial da curva tensão-deformação obtida pelo clip-gage se difere da inclinação da curva obtida pelo LVDT, uma vez que o LVDT capta as acomodações entre a

máquina e o corpo de prova no início do ensaio. Assim, se corrigiu esse efeito a partir da Equação (5.2) (Osorio *et al.*, 2013).

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1,LVDT} - \left(\frac{E_{clip} - E_{LVDT}}{E_{clip} \cdot E_{LVDT}} \right) \cdot \sigma_1 \quad (5.2)$$

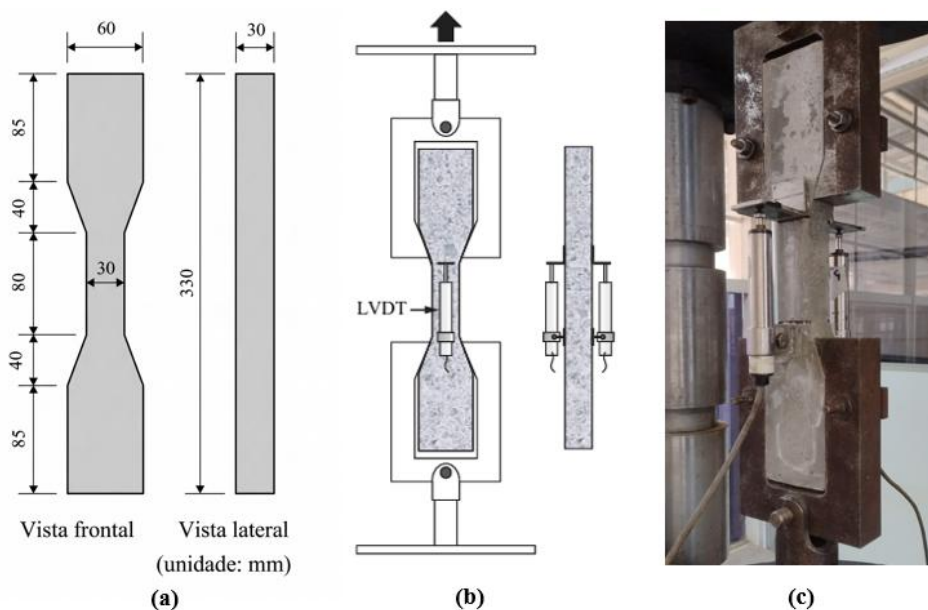
Sendo:

- a) ε_1 : a deformação longitudinal corrigida;
- b) $\varepsilon_{1,LVDT}$: a deformação longitudinal média obtida pelos LVDTs;
- c) E_{clip} : o módulo de elasticidade obtido pelo *clip-gage*;
- d) E_{LVDT} : o módulo de elasticidade obtido pelo LVDT;
- e) σ_1 : a tensão de compressão correspondente à deformação $\varepsilon_{1,LVDT}$.

5.2.2 Ensaio de tração uniaxial

O ensaio de tração uniaxial, detalhado na Figura 5.4, foi realizado em corpos de prova *dog-bone*, utilizando-se uma máquina de ensaio universal servo-hidráulica, com capacidade máxima de carga de 1500 kN e taxa de deslocamento de 0,005 mm/s, e foram determinadas a resistência à tração e a curva tensão-deformação a partir de dois LVDTs, com base de medida de 80 mm, posicionados na região central da amostra.

Figura 5.4 – Ensaio de tração uniaxial



Fonte: a e b) Oliveira (2019) e c) elaborado pelo autor.

Foram ensaiados três corpos de prova para cada fração de fibra, totalizando doze *dog-bones*. Assim como os corpos cilíndricos, essas amostras foram moldadas por procedimento convencional, sem a adoção de técnicas específicas para controle ou indução da orientação das fibras. O adensamento foi realizado por meio de leves batidas nas paredes das fôrmas, sendo a moldagem executada em camada única.

Vale destacar que, pelo *dog-bone* possuir uma região central de pequena espessura em relação ao seu comprimento, há a tendência de alinhamento das fibras durante o preenchimento da fôrma, em decorrência do chamado efeito de parede.

5.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

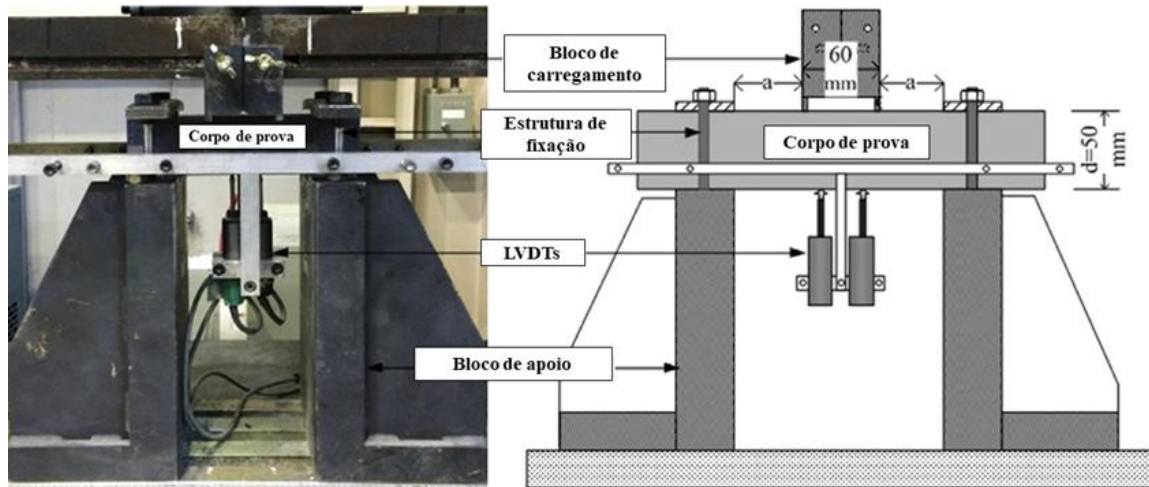
A avaliação do comportamento ao cisalhamento foi realizada por meio de um ensaio fundamentado no procedimento experimental proposto por Ngo *et al.* (2017), baseado em um sistema de carregamento em quatro pontos com extremidades engastadas.

5.3.1 Ensaio proposto por Ngo *et al.* (2017)

De acordo com os autores, a principal motivação para o desenvolvimento deste sistema de ensaio de cisalhamento para o UHPFRC reside nas limitações dos métodos de teste de cisalhamento existentes. Os métodos convencionais (como exemplo: *push-off* e *punch-through*) não conseguem refletir a resposta única de endurecimento por deformação (*strain-hardening*) e a formação de múltiplas microfissuras; propriedades essas cruciais para a resistência do UHPFRC sob cargas extremas, como sísmicas, de impacto e explosão, que frequentemente geram falhas por cisalhamento, tipicamente frágeis e catastróficas em estruturas de concreto.

O sistema é apresentado pela Figura 5.5, tendo sido projetado para criar condições favoráveis à formação de múltiplas fissuras por cisalhamento e para garantir que a ruptura do elemento ocorresse por cisalhamento, e não por flexão, além de apresentar simplicidade operacional.

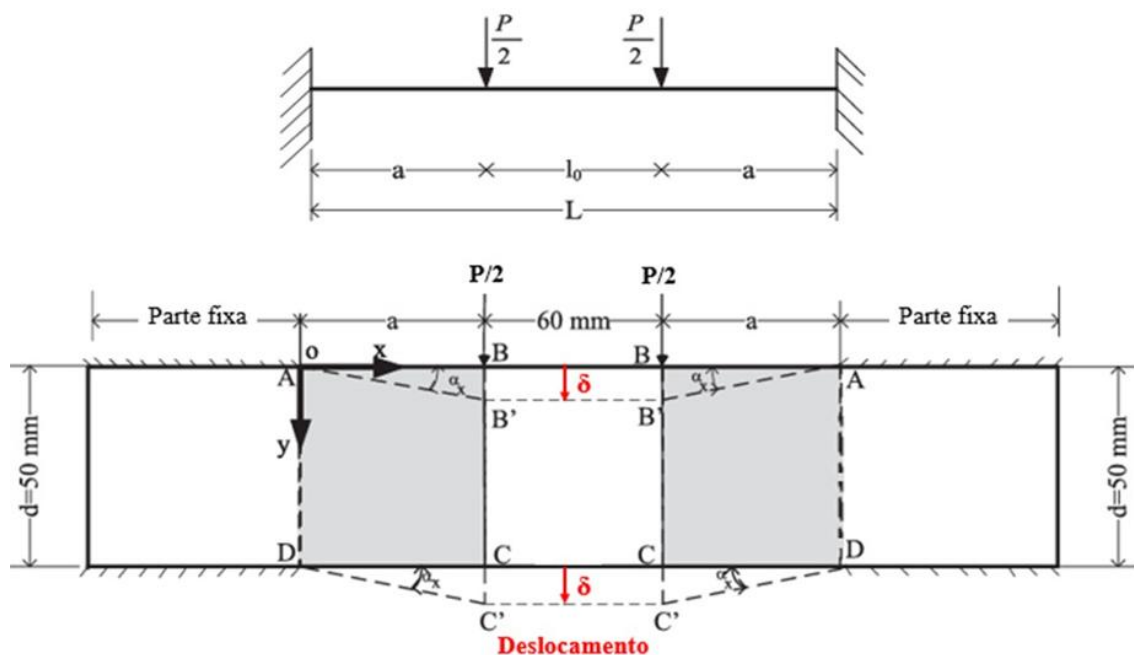
Figura 5.5 – Ensaio de cisalhamento realizado por Ngo *et al.* (2017)



Fonte: Adaptado de Ngo *et al.* (2017).

Ambas as extremidades do corpo de prova são fixadas, e a carga é aplicada por meio de dois pontos espaçados em 60 mm. À medida que a carga é aplicada, a região ABCD sofre uma deformação por cisalhamento, caracterizada pela distorção angular (γ_{xy}), definida como a alteração do ângulo entre os segmentos AB e AD. Nas condições desse ensaio, essa deformação equivale à razão entre o deslocamento vertical no centro do elemento (δ) e o vão de cisalhamento (a) nas condições desse ensaio, conforme ilustrado no esquema proposto pelos autores na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Configuração do ensaio de cisalhamento realizado por Ngo *et al.* (2017)



Fonte: Adaptado de Ngo *et al.* (2017).

Assim, a deformação por cisalhamento (γ_{xy}) e a tensão de cisalhamento na seção (τ) podem ser calculadas a partir das Equações (5.3) e (5.4), respectivamente.

$$\gamma_{xy} = \alpha_x + \alpha_y = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\delta}{a} \quad (5.3)$$

Sendo:

- a) γ_{xy} : a deformação por cisalhamento;
- b) α_x : o ângulo entre os segmentos AB e AB’;
- c) α_y : o ângulo entre o eixo y e o segmento AD;
- d) u : o deslocamento na direção x;
- e) v : o deslocamento na direção y;
- f) δ : o deslocamento vertical na parte central do elemento;
- g) a : o vão de cisalhamento.

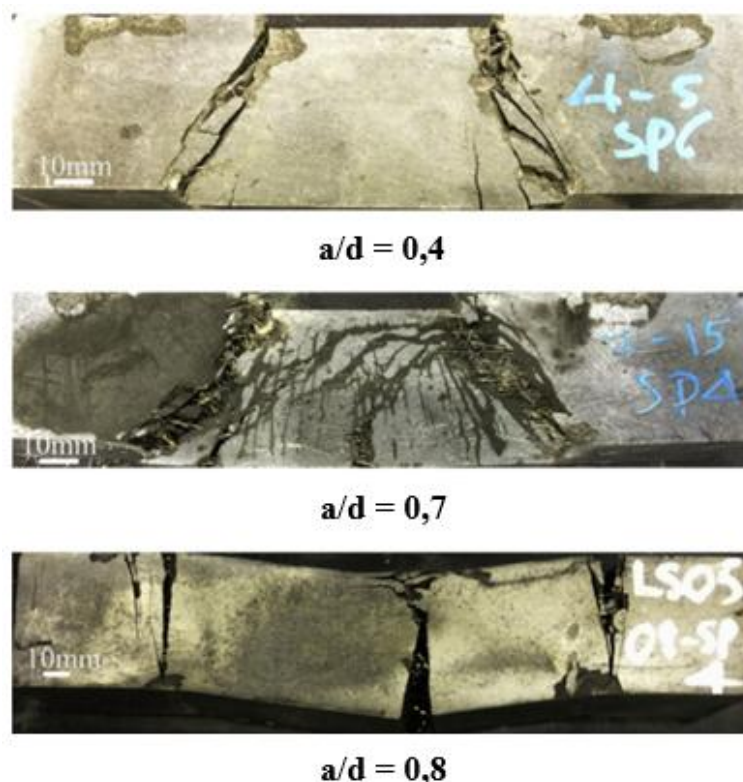
$$\tau = \frac{P}{2 \cdot b \cdot d} \quad (5.4)$$

Sendo:

- a) τ : a tensão média de cisalhamento;
- b) P : a carga aplicada;
- c) b : a largura do corpo de prova;
- d) d : a altura do corpo de prova;

Ngo *et al.* (2017) ensaiaram prismas com seção transversal 50 x 50 mm e diferentes vãos de cisalhamento; os autores verificaram que os elementos de UHPFRC sofreram, no geral, ruptura por cisalhamento quando a relação a/d estava entre 0,4 e 0,7, caracterizada pela formação das duas fissuras inclinadas principais (da borda interna da face do apoio até a borda externa da face de aplicação da carga) e ruptura por flexão para a relação a/d igual a 0,8, indicada pela formação das três fissuras verticais principais, conforme ilustrado pela Figura 5.7.

Figura 5.7 – Fissuração dos corpos de UHPFRC durante o ensaio de cisalhamento



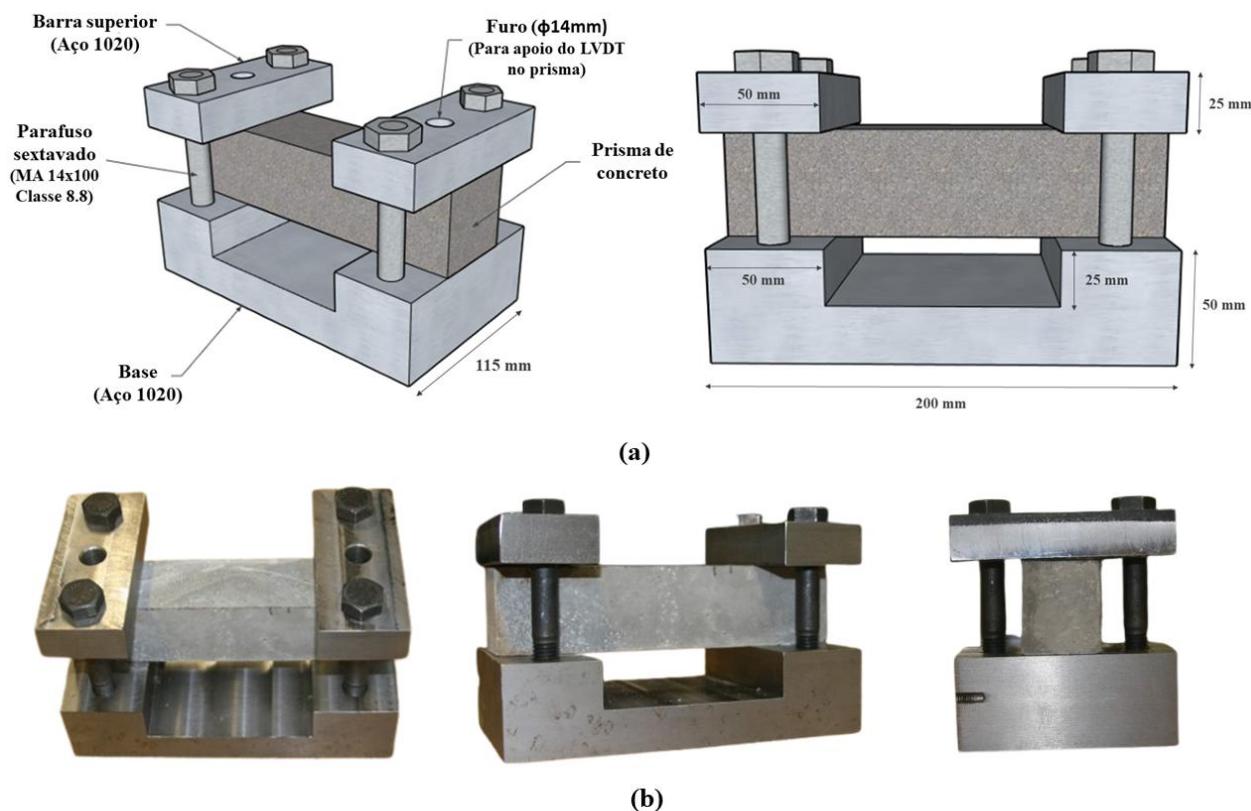
Fonte: Adaptado de Ngo *et al.* (2017).

5.3.2 Ensaio realizado e moldagem das amostras

O ensaio para avaliação do comportamento ao cisalhamento foi realizado em corpos de prova prismáticos com 50 mm de altura, 50 mm de largura e 200 mm de comprimento, conforme feito por Ngo *et al.* (2017).

A Figura 5.8 apresenta o aparato desenvolvido para a realização do ensaio. Quanto ao procedimento de montagem, os prismas eram posicionados sobre a base e fixados aos apoios por meio de uma peça superior, utilizando parafusos. O aperto dos parafusos foi realizado em sequência cruzada, com alternância entre os lados. Aplicou-se um torque final de 20 N·m, controlado por um torquímetro, em duas etapas para cada parafuso, de modo a garantir condições uniformes de fixação durante os ensaios.

Figura 5.8 – Aparato desenvolvido para o ensaio de cisalhamento: (a) esquema ilustrativo com identificação dos componentes; (b) configuração real

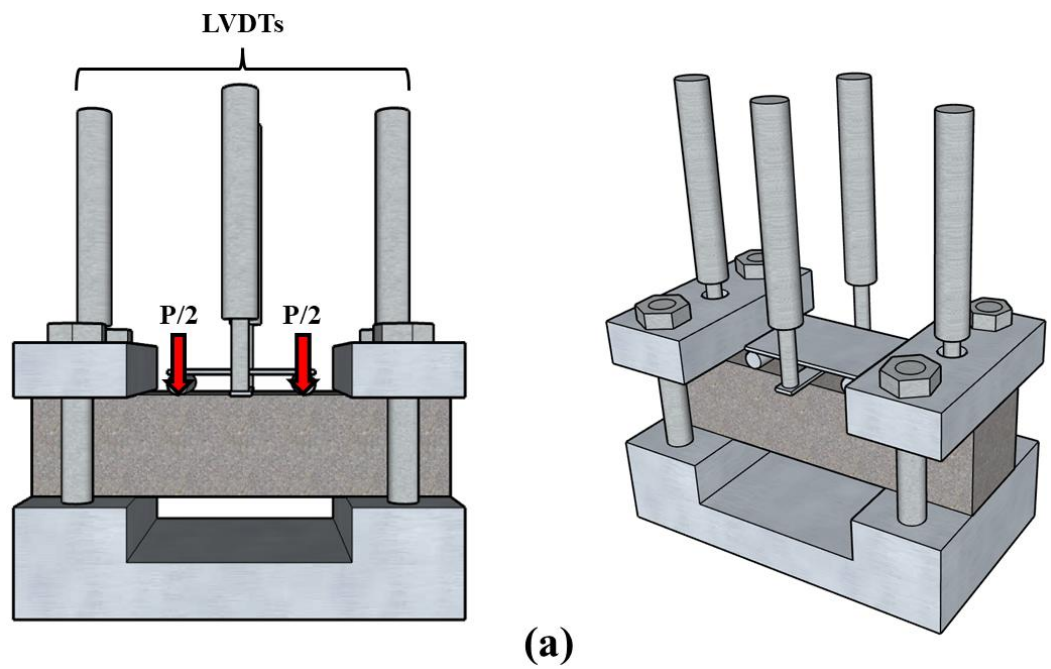


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios foram conduzidos em uma máquina universal servo-hidráulica, com capacidade máxima de 1500 kN, sob controle de deslocamento à taxa de 0,005 mm/s. A partir dos resultados, determinou-se a resistência ao cisalhamento e a curva tensão-deformação correspondente.

Essa curva foi obtida com base na leitura de quatro transdutores de deslocamento (LVDTs), sendo dois posicionados nos apoios (um em cada extremidade, junto aos furos da peça superior de fixação, pelos quais passam as hastes de medição dos transdutores) e dois na região central do prisma (um na face frontal e outro na face posterior). A Figura 5.9 ilustra a configuração do ensaio, apresentando a instrumentação empregada.

Figura 5.9 – Configuração do ensaio de cisalhamento: (a) esquema ilustrativo do sistema de ensaio; (b) montagem experimental e instrumentação utilizada.

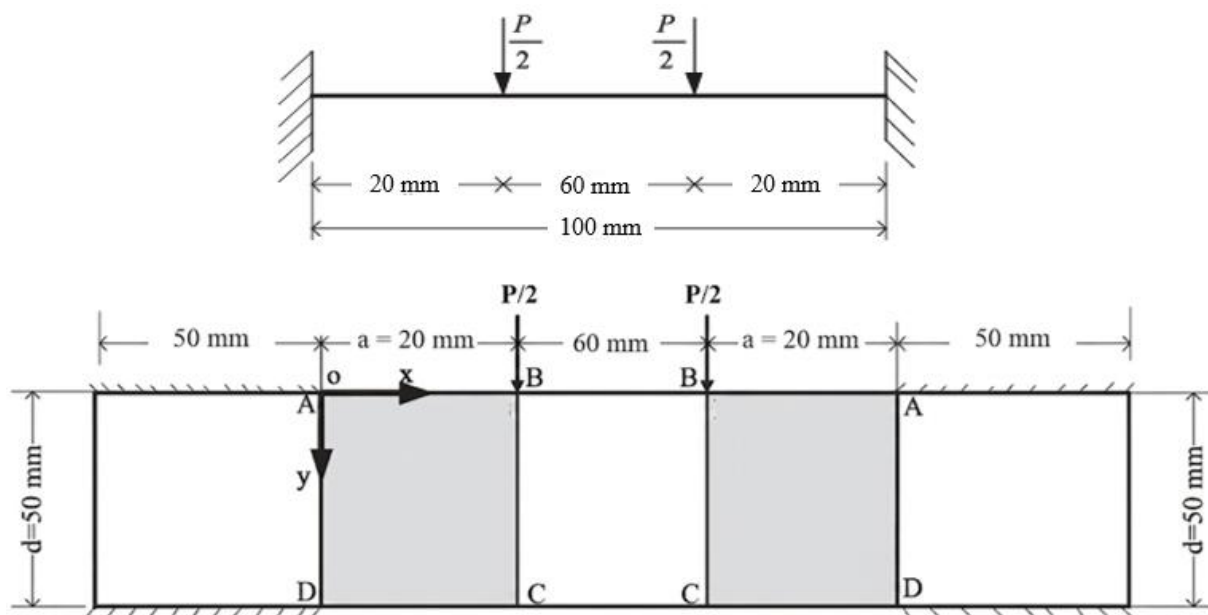


Fonte: Elaborado pelo autor.

Adotou-se elementos e uma configuração de ensaio de tal forma que a razão a/d fosse igual a 0,4, para a ocorrência de ruptura por cisalhamento, com base nos resultados reportados por Ngo *et al.* (2017).

Dessa forma, a carga foi aplicada em dois pontos espaçados em 60 mm, com um vão de cisalhamento correspondente a 20 mm, e ambas as extremidades do corpo de prova foram fixadas ao longo de um comprimento de 50 mm (vide Figura 5.10).

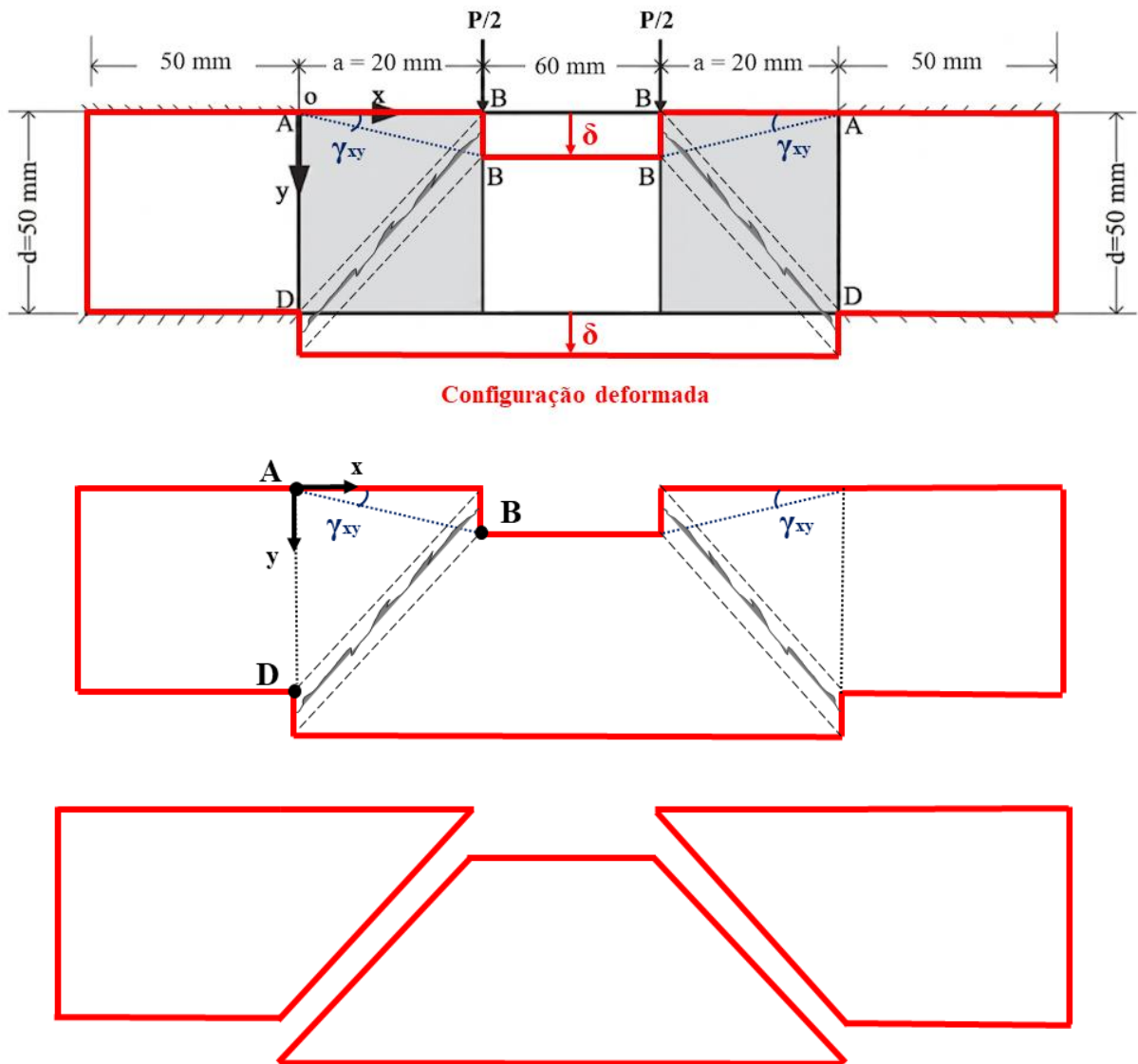
Figura 5.10 – Configuração do ensaio de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Ngo *et al.* (2017).

A Figura 5.11 apresenta um esquema simplificado da configuração deformada do corpo de prova durante e após o ensaio, ilustrando o deslocamento vertical, a distorção angular decorrente da deformação por cisalhamento e a formação da fissura diagonal.

Figura 5.11 – Esquema simplificado da configuração deformada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a deformação por cisalhamento (γ_{xy}) foi obtida a partir da Equação (5.5).

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta}{a} = \frac{L_{LVDT,C} - L_{LVDT,A}}{a} \quad (5.5)$$

Sendo:

- a) γ_{xy} : a deformação por cisalhamento;
- b) δ : o deslocamento vertical na parte central do elemento
- c) $L_{LVDT,C}$: a média dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDTs na parte central do elemento;

- d) $L_{LVDT,A}$: a média dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDTs nos apoios;
- e) a : o vão de cisalhamento, que equivale a 20 mm.

Vale destacar que foram instalados os transdutores de deslocamento nos apoios, visando monitorar e eliminar a influência de eventuais deslocamentos desses pontos durante a realização dos ensaios. Assim, o deslocamento vertical no centro do elemento foi determinado de maneira indireta, a partir da correção dos valores medidos, subtraindo-se os deslocamentos registrados nos apoios.

A Figura 5.12 apresenta o corpo de prova após a ocorrência da ruptura por cisalhamento, caracterizada pela formação de duas fissuras inclinadas principais, configurando um padrão semelhante ao modo típico de ruptura por cisalhamento observado em concretos convencionais ou à ruptura por punção em lajes de UHPFRC, segundo Ngo *et al.* (2017).

Figura 5.12 – Padrão de ruptura por cisalhamento observado no corpo de prova

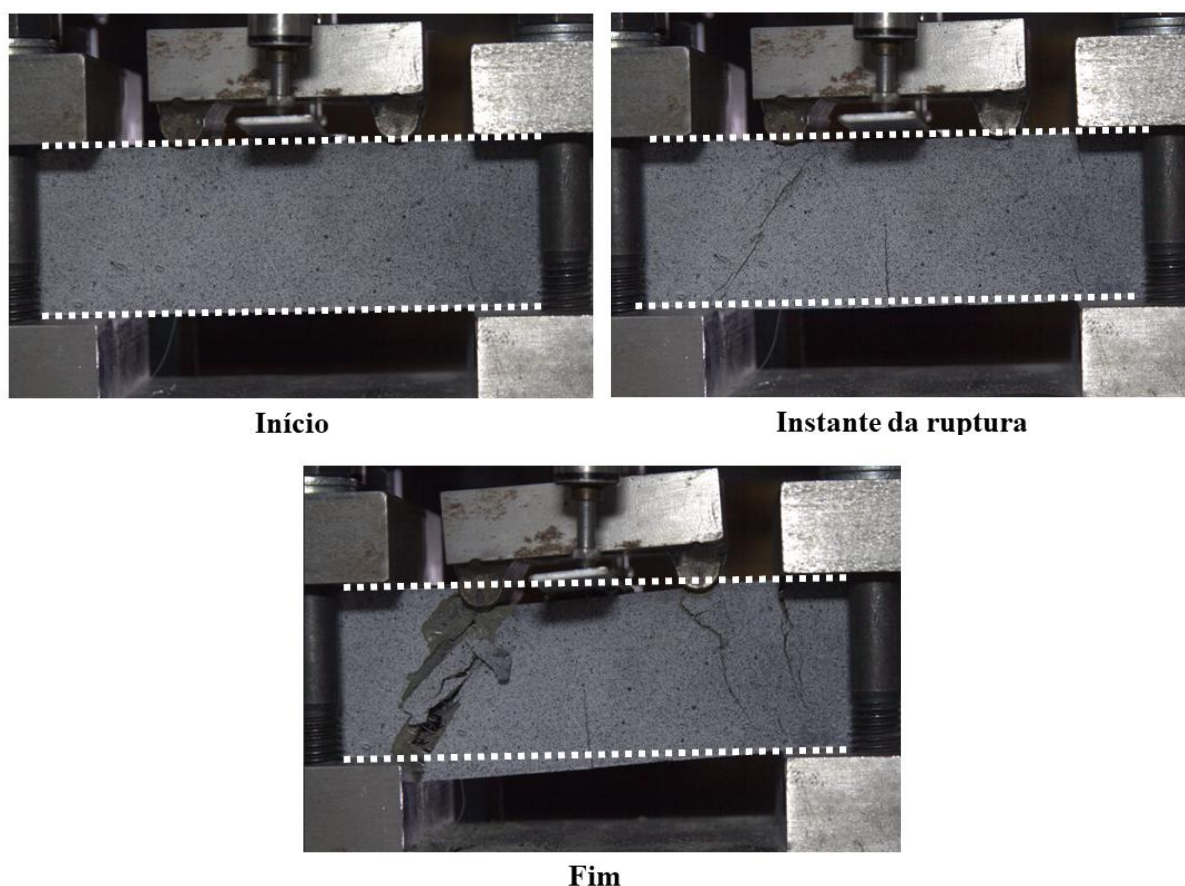


Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, como se trata de um ensaio simétrico, o método apresentou a limitação de possibilitar comportamentos não simultâneos entre os dois lados do corpo de prova, de modo que a fissuração podia se iniciar em uma das regiões antes da outra, assim como a ruptura podia ocorrer predominantemente em apenas um dos lados. Essa característica limitou a análise do processo de fissuração e da propagação das fissuras, principalmente após a ruptura, uma vez que variações locais de resistência da matriz, distribuição e orientação das fibras podiam gerar respostas assimétricas ao longo do carregamento, fazendo com que um dos lados do corpo de prova apresentasse fissuração e deformações mais pronunciadas que o outro.

De fato, esse comportamento foi observado em praticamente todos os corpos de prova, nos quais tanto o processo de fissuração quanto a ruptura não ocorreram simultaneamente nos dois lados, passando a ser governados predominantemente pela fissura diagonal de um único lado. Nesses casos, o corpo de prova passou a apresentar rotação e deslocamento de corpo rígido após a ruptura, como mostra a Figura 5.13.

Figura 5.13 – Deslocamento de corpo rígido em ruptura governada por fissura diagonal

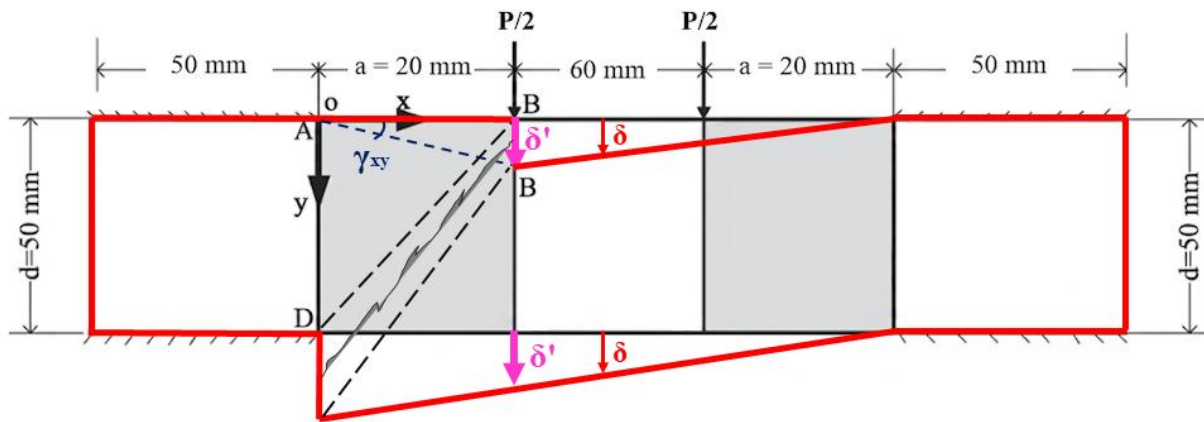


Fonte: Elaborado pelo autor.

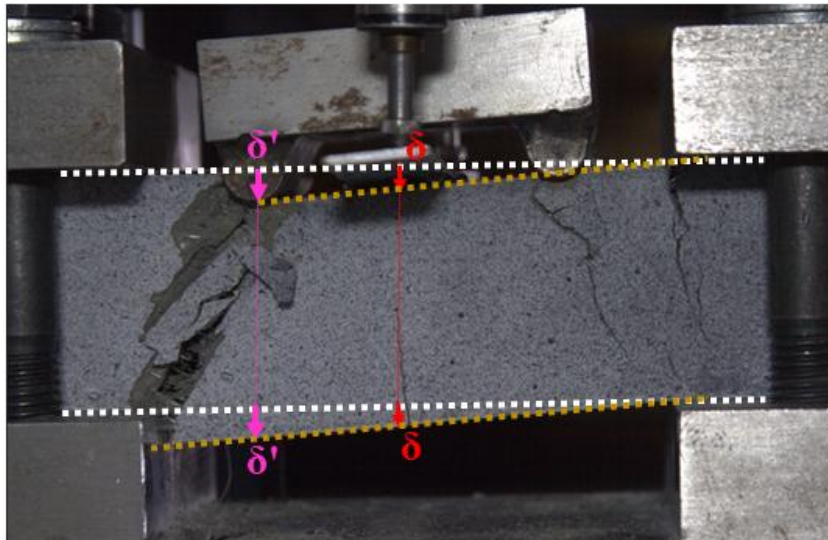
Dessa forma, a equação inicialmente apresentada (Equação (5.4)) se mostrou limitada para representar adequadamente a deformação de cisalhamento desses corpos de prova, sendo necessária a utilização de uma formulação complementar para os casos de ruptura assimétrica.

Nesses casos, a deformação pós-ruptura foi calculada a partir do deslocamento vertical na seção de aplicação da carga correspondente ao lado em que a fissura diagonal governou a ruptura, considerando o movimento de corpo rígido apresentado pelo corpo de prova (vide Figura 5.14).

Figura 5.14 – Esquema do movimento de corpo rígido após a ruptura e do deslocamento considerado para o cálculo da deformação



Configuração deformada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, nesses casos, a deformação por cisalhamento (γ_{xy}), após a ruptura, foi determinada a partir da Equação (5.6).

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta'}{a} = \frac{8}{5} \cdot \frac{\delta}{a} = \frac{8}{5} \cdot \frac{(L_{LVDT,C} - L_{LVDT,A})}{a} \quad (5.6)$$

Sendo:

- a) γ_{xy} : a deformação por cisalhamento;

- b) δ' : o deslocamento vertical na seção de aplicação da carga correspondente ao lado em que a fissura diagonal governou a ruptura;
- c) δ : o deslocamento vertical na parte central do elemento;
- d) $L_{LVDT,C}$: a média dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDTs na parte central do elemento;
- e) $L_{LVDT,A}$: a média dos deslocamentos verticais medidos pelos LVDTs nos apoios;
- f) a : o vão de cisalhamento, que equivale a 20 mm

Quanto aos prismas ensaiados, esses foram moldados de formas diferentes, se utilizando uma bisnaga (saco de confeitoiro) com abertura de 30 mm, com o intuito de se alinhar as fibras, assim como realizado por Ribeiro (2023), que obteve resultados satisfatórios quanto à orientação das fibras com esse processo.

Durante a moldagem dos prismas dessa pesquisa, a bisnaga foi mantida, então, em posição próxima à horizontal, de modo a orientar as fibras na direção do fluxo de lançamento, como a Figura 5.15 mostra. Esse procedimento foi repetido em camadas sucessivas até o completo preenchimento da fôrma.

Figura 5.15 – Esquema do processo de moldagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram moldados três corpos de prova em uma mesma fôrma (50 mm de altura, 150 mm de largura e 200 mm de comprimento), em uma configuração semelhante à concretagem de uma “minilaje” (vide Figura 5.16), para que houvesse espaço suficiente para realizar o alinhamento das fibras se utilizando o saco de confeitoiro.

Figura 5.16 – Fôrma para concretagem dos prismas

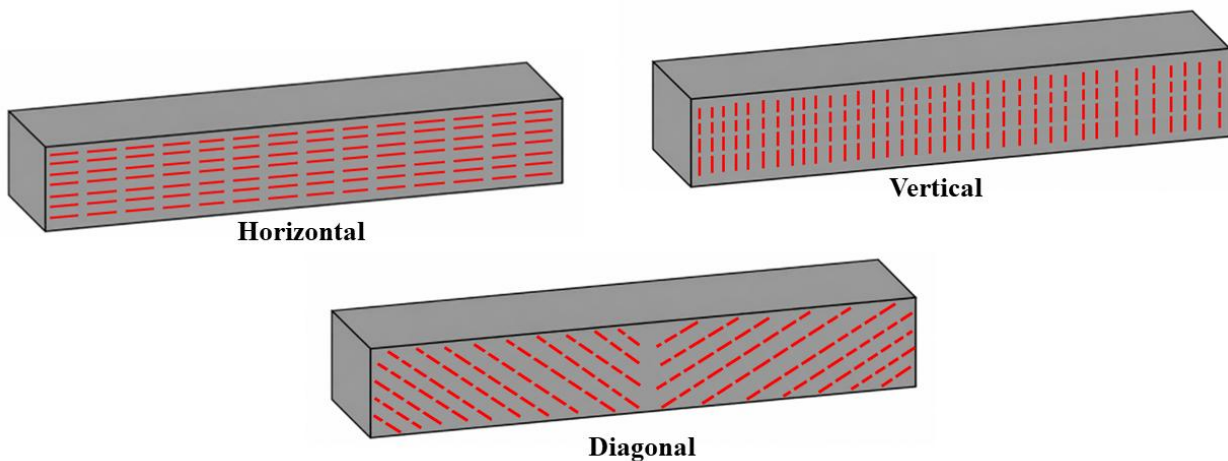


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os alinhamentos realizados são apresentados abaixo e pela Figura 5.17, sendo esquematizados pelas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20, que apresentam a visão em planta das fôrmas:

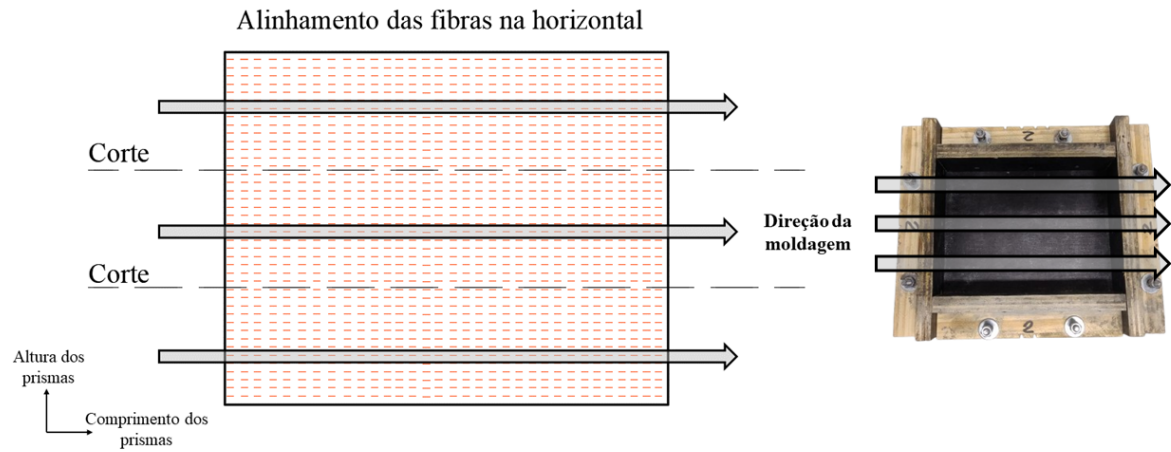
- alinhamento das fibras na horizontal, na direção do comprimento dos prismas;
- alinhamento das fibras na vertical, na direção da altura dos prismas;
- alinhamento das fibras na diagonal, formando aproximadamente 30° em relação à direção do comprimento dos prismas. Esse ângulo foi previamente demarcado na fôrma com o auxílio de um esquadro e de um transferidor, servindo como guia para o movimento da bisnaga durante a moldagem.

Figura 5.17 – Orientações propostas para as fibras



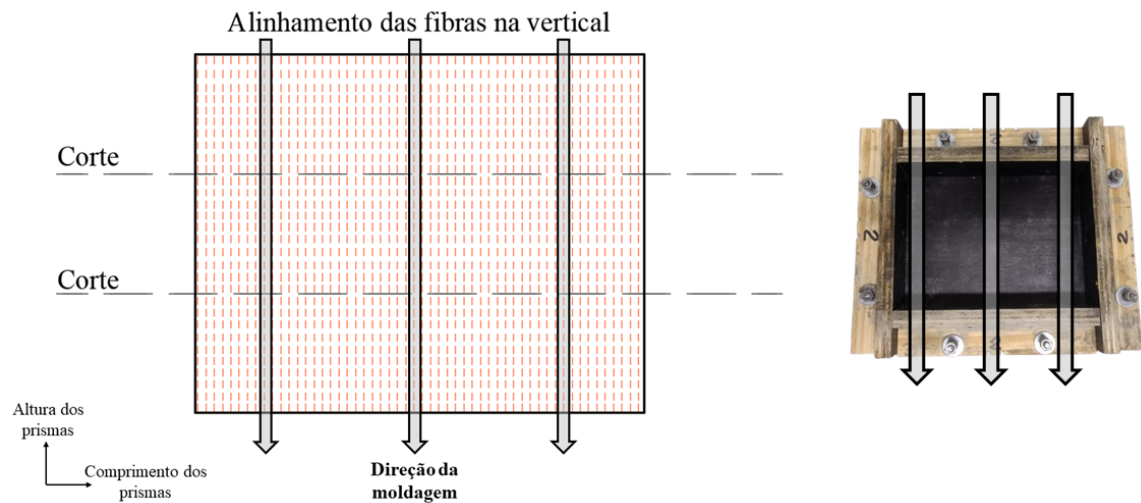
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.18 – Orientação proposta para as fibras: horizontal



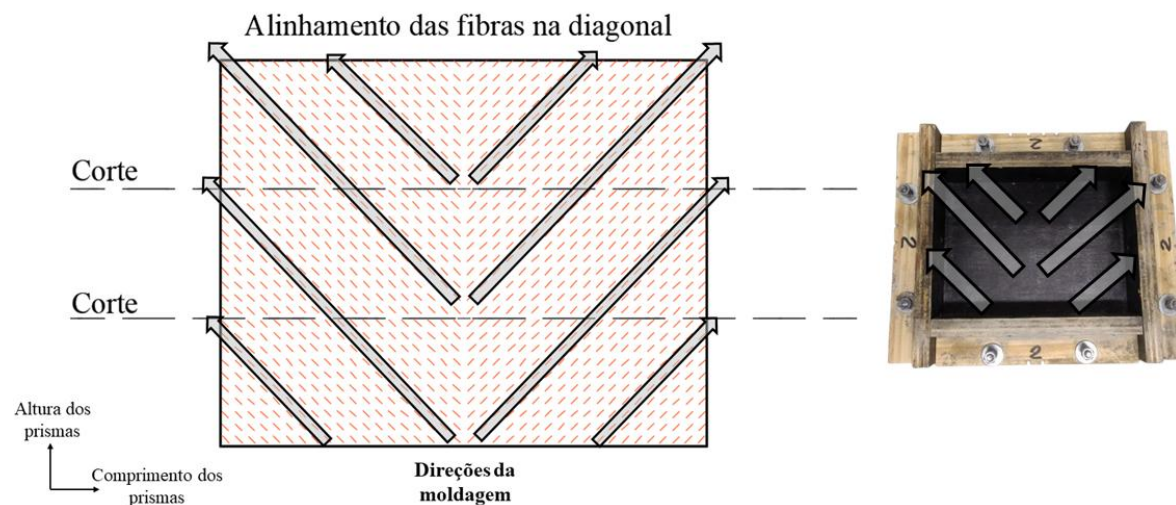
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.19 – Orientação proposta para as fibras: vertical



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.20 – Orientação proposta para as fibras: diagonal

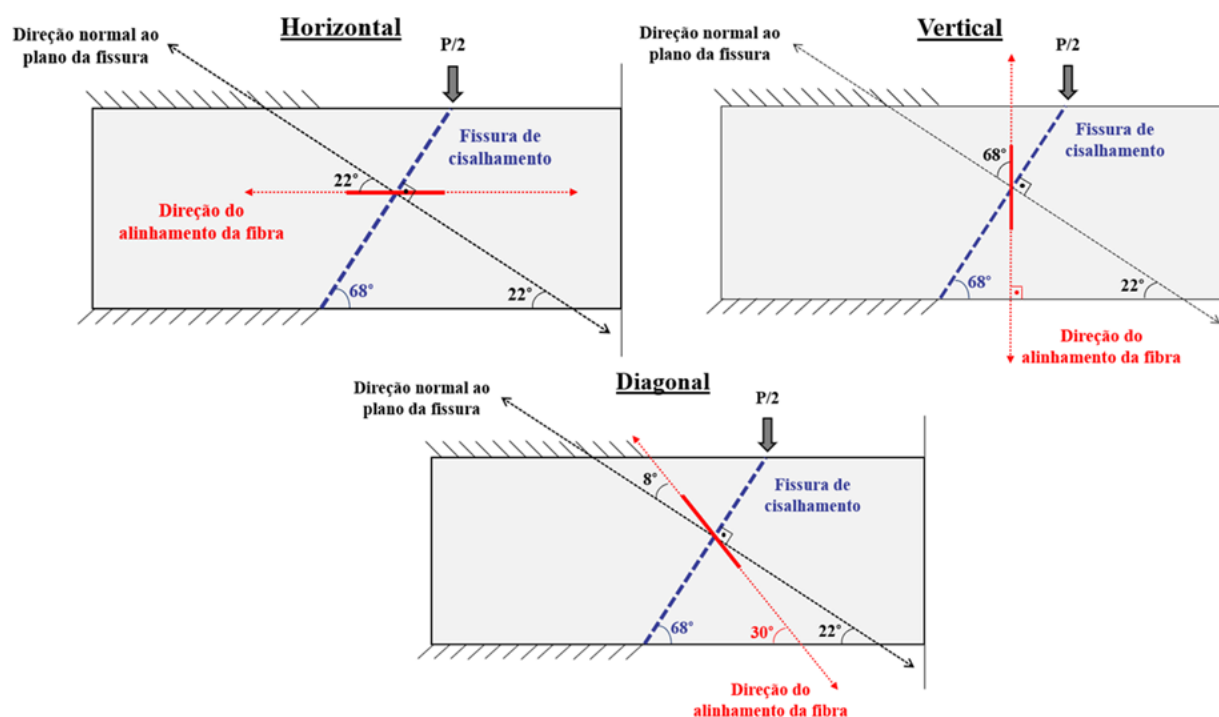


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.21 apresenta um esquema ilustrativo da orientação desejada de uma fibra para os diferentes métodos de moldagem adotados, destacando o ângulo formado entre a fibra e a direção perpendicular à fissura de cisalhamento, a qual se desenvolve de forma diagonal no elemento, estendendo-se da borda interna da região de apoio até a borda externa da face de aplicação da carga, formando aproximadamente 68° com o eixo longitudinal do prisma.

Em uma condição ideal, considerando que todas as fibras estariam perfeitamente alinhadas à direção de moldagem, as fibras na orientação horizontal formariam um ângulo de 22° com a direção perpendicular à fissura de cisalhamento, enquanto as fibras na orientação vertical formariam um ângulo de 68° , e as fibras na orientação diagonal, um ângulo de 8° . Assim, o coeficiente de orientação em relação ao plano da fissura pode ser estimado a partir do cosseno desses ângulos (Equação 4.2), resultando em 0,375; 0,927 e 0,990 para as configurações vertical, horizontal e diagonal, respectivamente.

Figura 5.21 – Esquema ilustrativo da orientação das fibras e dos ângulos em relação à fissura de cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dessas orientações, foram moldados corpos de prova sem a imposição de qualquer alinhamento das fibras. Para isso, o preenchimento da fôrma foi realizado sem o uso de bisnaga, adotando-se o procedimento convencional de lançamento do concreto com o auxílio de colher de pedreiro. Dessa forma, essa condição foi definida como padrão de orientação aleatória.

Destaca-se que o adensamento dos prismas foi realizado apenas por meio de leves batidas nas paredes das fôrmas, de modo a preservar a orientação previamente imposta às fibras, uma vez que o uso de adensamento mecânico poderia induzir sua reorientação e comprometer o padrão de alinhamento estabelecido.

Posteriormente, as peças concretadas foram devidamente cortadas em uma serra de bancada para a obtenção individual dos prismas e, em seguida, retificadas, conforme apresentado na Figura 5.21. Esse procedimento foi fundamental para assegurar o perfeito contato entre o corpo de prova e os dispositivos de carregamento, evitando concentrações localizadas de tensões e garantindo a correta transmissão das cargas durante o ensaio.

Figura 5.22 – (a) Peça concretada; (b) prismas obtidos através do corte das peças



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as frações de fibra de 0,5%, 1% e 2%, foram produzidos três corpos de prova a partir de cada um desses alinhamentos propostos (métodos de moldagem), totalizando 12 corpos de prova para cada, portanto, 36 corpos de prova de UHPFRC (vide Tabela 5.3). Já para o UHPC, foram concretadas apenas três amostras.

Tabela 5.3 – Quantidade de prismas para os teores de fibras e alinhamentos

Teor de fibras	Aleatório	Horizontal	Vertical	Diagonal
0,5%	3	3	3	3
1%	3	3	3	3
2%	3	3	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

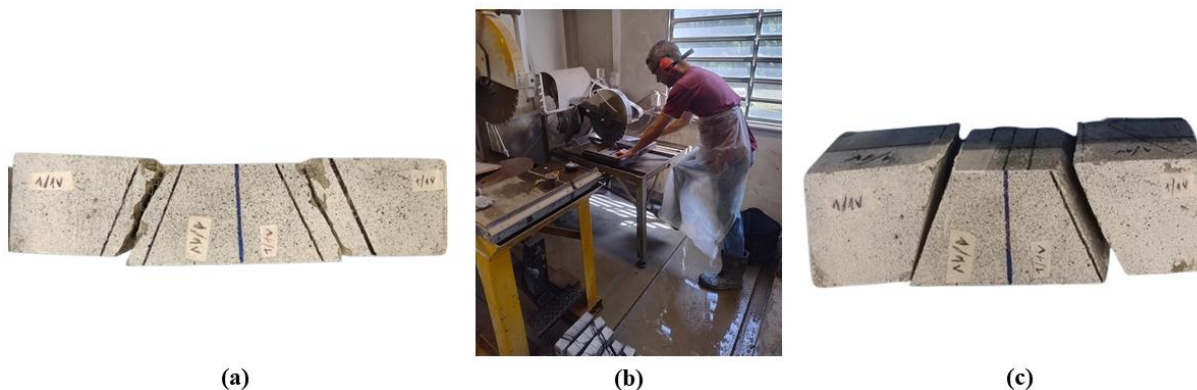
Os ensaios foram realizados em datas próximas aos ensaios de caracterização, após os 56 dias de idade. Os prismas foram mantidos nas mesmas condições de cura dos demais corpos de prova, permanecendo em cura úmida por 28 dias.

5.3.1 Análise de imagem para caracterização da orientação

Após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram devidamente demarcados para a definição das regiões de corte, posicionadas a 1 cm da região fissurada correspondente à ruptura, tanto à esquerda quanto à direita, de modo a garantir a integridade das faces a serem analisadas. As seções foram definidas paralelamente ao plano de fissuração principal (perpendiculares à direção das tensões de tração). O processo de corte foi realizado com o

auxílio de uma serra de bancada, assegurando precisão e regularidade das superfícies obtidas. A Figura 5.23 ilustra esse procedimento.

Figura 5.23 – (a) Prisma após o ensaio, com demarcação das regiões de corte; (b) realização do corte em serra de bancada; (c) prisma após o corte



Fonte: Elaborado pelo autor.

As imagens dos planos de corte foram obtidas por meio de uma câmera digital de alta resolução, sob iluminação controlada por refletores, de modo a promover contraste luminoso entre as fibras e a matriz de UHPFRC, permitindo seu adequado destaque.

Salienta-se que, mesmo para superfícies inclinadas, o eixo óptico da câmera foi mantido perpendicular ao plano de corte. Para isso, a câmera foi inclinada de modo a acompanhar a inclinação da superfície analisada, preservando a ortogonalidade entre a lente e o plano e, assim, evitando distorções geométricas, como apresenta a Figura 5.24.

Figura 5.24 – Posicionamento da câmera para superfície inclinada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de imagens foi realizada no *software* ImageJ. A Figura 5.25 apresenta as etapas dessa análise: inicialmente, as imagens foram convertidas para o formato binário e, em seguida, submetidas à análise de partículas. As fibras foram, então, aproximadas por elipses, sendo determinados seus eixos maior e menor. Assim, foi possível obter os ângulos de orientação das fibras (Equação 4.1) e o coeficiente de orientação (Equação 4.2). Como foram analisadas duas seções (uma à esquerda e outra à direita da macrofissura), o coeficiente de orientação adotado corresponde ao valor médio obtido entre ambas.

Figura 5.25 – Conversão da imagem para a análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale destacar que, como realizado por Oliveira (2019), os ruídos foram descartados por meio da adoção de uma área mínima para a aproximação das elipses, correspondente à área mínima de uma fibra, que equivale à área da sua seção transversal.

5.3.2 Correlação de imagem digital

Durante a realização do ensaio para avaliação da resistência ao cisalhamento, foi aplicada a técnica de correlação de imagem digital, com o intuito de se acompanhar o processo de fissuração e ruptura dos elementos.

Destaca-se que toda a instrumentação e o aparato experimental do ensaio foram concebidos de modo a manter livre uma das faces dos prismas, possibilitando a adequada aquisição das imagens.

Como o grau de escala de cinza é o fator para caracterizar a correlação de imagem, as superfícies dos prismas foram preparadas a partir da pulverização de tintas *spray* branco e preto, respectivamente, de modo a obter um fundo claro e pontos pretos distribuídos. Esse procedimento permitiu a formação de um padrão estocástico de alto contraste, conforme ilustrado na Figura 5.26.

Figura 5.26 – Preparação da superfície dos prismas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aquisição das imagens foi realizada por meio de uma câmera fotográfica de alta resolução, posicionada de modo a manter a lente ortogonal à superfície analisada, evitando distorções geométricas. O elemento foi devidamente iluminado por um refletor, garantindo condições adequadas de iluminação durante a captura (vide Figura 5.27).

Figura 5.27 – Arranjo experimental para a aquisição de imagens



Fonte: Elaborado pelo autor.

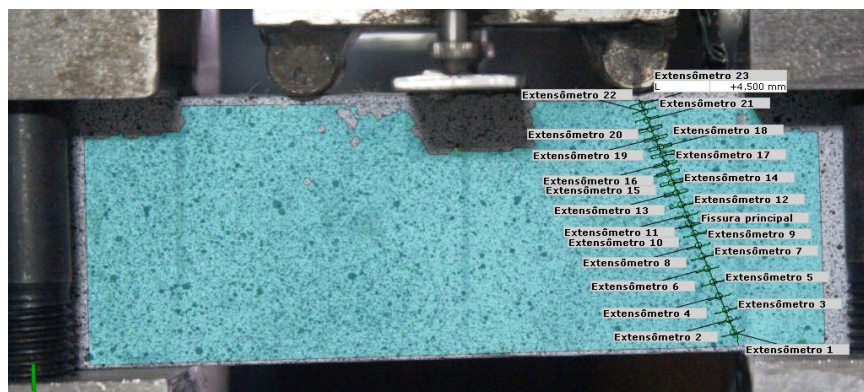
O formato de imagem utilizado foi o *.raw*, de modo a evitar perdas de qualidade, uma vez que esse formato armazena uma quantidade significativamente maior de detalhes em comparação com formatos comprimidos.

Utilizou-se o *software* ZEISS INSPECT Correlate (o antigo GOM Correlate) para a análise das imagens digitais, com a obtenção dos campos de deslocamento e deformação.

No programa, por meio da utilização de pontos auxiliares posicionados perpendicularmente à fissura principal para a definição de “extensômetros virtuais”, foi possível acompanhar a cinemática da fissura ao longo do carregamento, permitindo a obtenção da abertura entre as faces fissuradas durante o ensaio, como apresentado na Figura

5.28. A abertura de fissura foi determinada a partir da média dos valores obtidos pelos extensômetros virtuais, os quais forneciam a variação da distância entre os pares de pontos posicionados em lados opostos da microfissura.

Figura 5.28 – Exemplo de monitoramento da abertura da fissura por extensômetros virtuais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, o erro associado à medição dessa abertura de fissura foi estimado a partir da comparação entre duas imagens obtidas sob carregamento nulo e em idênticas condições experimentais.

5.3.3 Estudo e proposição de modelo com base em regressões lineares

Para avaliar a influência do teor e do alinhamento das fibras nos resultados experimentais, foram realizados modelos de regressão linear com base nos parâmetros obtidos nos ensaios. As análises buscaram identificar tendências de comportamento e avaliar a capacidade dos modelos em representar os efeitos da orientação das fibras na resposta mecânica dos concretos analisados.

As regressões foram realizadas a partir da relação entre a resistência ao cisalhamento (τ), o teor de fibras (V_f) e o coeficiente de orientação das fibras (η_θ). O modelo assume que o incremento da resistência ao cisalhamento promovido pelas fibras é proporcional tanto ao volume de fibras incorporado quanto ao seu alinhamento no interior do concreto. Dessa forma, conforme observado experimentalmente, maiores teores de fibras e orientações mais favoráveis tendem a proporcionar maiores contribuições resistentes associadas ao mecanismo de ponte de tensões.

Para cada conjunto de dados, foi ajustado um modelo linear conforme a Equação (5.7). Nesse modelo, a resistência do UHPC (sem fibras) foi adotada como parcela de referência da matriz cimentícia.

$$\tau = \tau_{UHPC} + K \cdot V_f \cdot \eta_\theta \quad (5.7)$$

Sendo:

- a) τ : a resistência ao cisalhamento;
- b) τ_{UHPC} : a resistência ao cisalhamento do UHPC;
- c) K : a constante de proporcionalidade obtida pelo ajuste linear;
- d) V_f : a fração volumétrica de fibras no concreto;
- e) η_θ : o coeficiente de orientação das fibras;

A constante de proporcionalidade foi obtida por regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados, de modo a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre as resistências ao cisalhamento experimentais e aquelas estimadas pela Equação (5.7).

Para fins de comparação e discussão, foram avaliadas duas abordagens distintas: uma utilizando os coeficientes de orientação obtidos experimentalmente e outra utilizando os coeficientes idealizados.

Após o ajuste dos modelos, foram calculados os erros quadráticos correspondentes às diferenças entre as resistências ao cisalhamento experimentais e as estimadas. A soma desses erros foi adotada como parâmetro para comparar a capacidade preditiva de cada modelo em representar a influência da fração volumétrica e da orientação das fibras sobre a resistência ao cisalhamento dos concretos analisados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados e as discussões desta pesquisa, abrangendo a análise experimental (caracterização dos concretos e o do comportamento ao cisalhamento), a análise de imagens (orientação das fibras) e a correlação de imagem digital.

6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Quanto às propriedades no estado fresco, os concretos exibiram elevada fluidez, como esperado para o UHPC/UHPFRC. Essa fluidez acentuada viabilizou o adensamento do material mediante apenas a aplicação de batidas na parede externa da fôrma, dispensando o uso de vibradores de imersão ou mesas vibratórias. Adicionalmente, observou-se que o incremento no teor de fibras reduziu a fluidez do compósito, conforme esperado.

Para o tratamento dos dados, foi adotado o Critério de Chauvenet, com o objetivo de identificar e excluir os valores discrepantes (*outliers*) que pudessem comprometer a representatividade dos resultados.

Destaca-se que foi realizada a determinação do índice de vazios conforme a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005), com o objetivo de avaliar um dos parâmetros relacionados à durabilidade dos concretos. Os resultados obtidos foram da ordem de 1% para todos os traços, valor significativamente inferior ao limite de 9% estabelecido pela ABNT NBR 17246 (ABNT, 2025). Embora, então, o aumento do teor de fibras tenha reduzido a trabalhabilidade da mistura, não foram observados impactos significativos no índice de vazios.

6.1.1 Ensaio de compressão uniaxial

A Tabela 6.1 apresenta os valores médios obtidos para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos ensaiados.

De modo geral, os valores de resistência à compressão mostraram-se compatíveis com as faixas reportadas na literatura para concretos do tipo UHPC e UHPFRC. Além disso, todos os traços atenderam ao critério de resistência à compressão estabelecido pela ABNT NBR 17246 (ABNT, 2025), uma vez que apresentaram valores superiores a 100 MPa.

No entanto, quanto ao módulo de elasticidade, os valores obtidos variaram entre 39,2 e 42,6 GPa, situando-se abaixo da faixa de 45 a 55 GPa reportada por Fehling *et al.* (2014) para concretos desse tipo. Ainda assim, valores semelhantes têm sido observados em outros

estudos. Oliveira (2019), por exemplo, obteve módulos de elasticidade entre 44,0 e 46,2 GPa, Gidrão (2020) encontrou resultados variando de 39,6 a 42,5 GPa, enquanto Ribeiro (2023) reportou valores entre 41,2 e 47,3 GPa. Em conjunto, esses resultados indicam que a faixa apresentada por Fehling *et al.* (2014) não contempla necessariamente todas as formulações de UHPC e UHPFRC descritas na literatura.

Tabela 6.1 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade do UHPC e UHPFRC

Concreto	f_c (MPa)	E_c (GPa)
UHPC	116,2	39,17
UHPFRC-0,5%	125,7	42,51
UHPFRC-1%	119,5	41,01
UHPFRC-2%	130,8	42,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

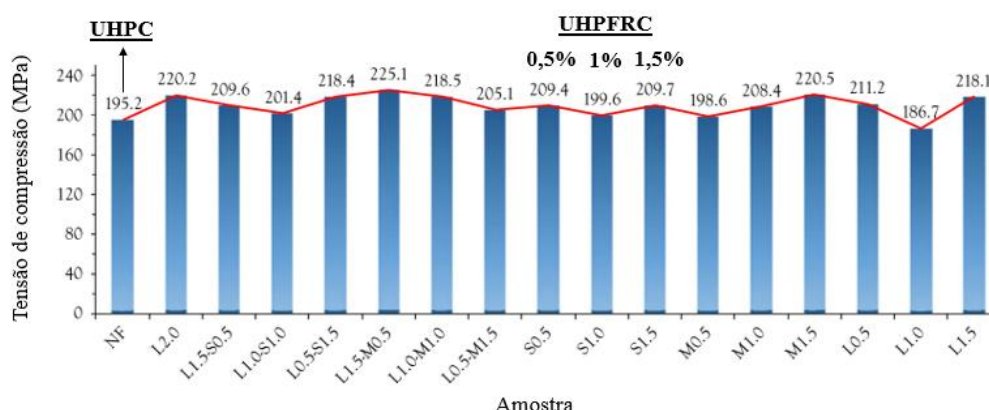
Em relação ao UHPC, observou-se que a resistência à compressão dos concretos UHPFRC-0,5%, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% apresentou acréscimos de cerca de 8%, 3% e 13%, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, os incrementos foram da ordem de 9%, 5% e 9%, respectivamente, para os mesmos teores de fibras.

Portanto, os resultados indicam que a incorporação de fibras de aço exerce influência limitada sobre a resistência à compressão e sobre o módulo de elasticidade, em concordância com as conclusões de Hoang e Fehling (2017), e Larsen e Thorstensen (2020).

Verificou-se que o aumento do teor de fibras não resultou em um crescimento monotônico da resistência à compressão, uma vez que o teor de 1% de fibras apresentou resistência inferior ao de 0,5%. Como o índice de vazios permaneceu praticamente constante entre os concretos, essa diferença pode estar associada principalmente à orientação e à dispersão das fibras, bem como à variabilidade experimental do ensaio.

O fato de o teor de 0,5% fibras apresentar resistência superior ao de 1% também foi observado por Yoo, Kim e Park (2017), que reportaram valores de 195,2 MPa para o UHPC, 209,4 MPa para o UHPFRC-0,5% e 199,6 MPa para o UHPFRC-1% (vide Figura 6.1).

Figura 6.1 – Resistência à compressão obtida por Yoo, Kim e Park (2017)



Fonte: Adaptado de Yoo, Kim e Park (2017).

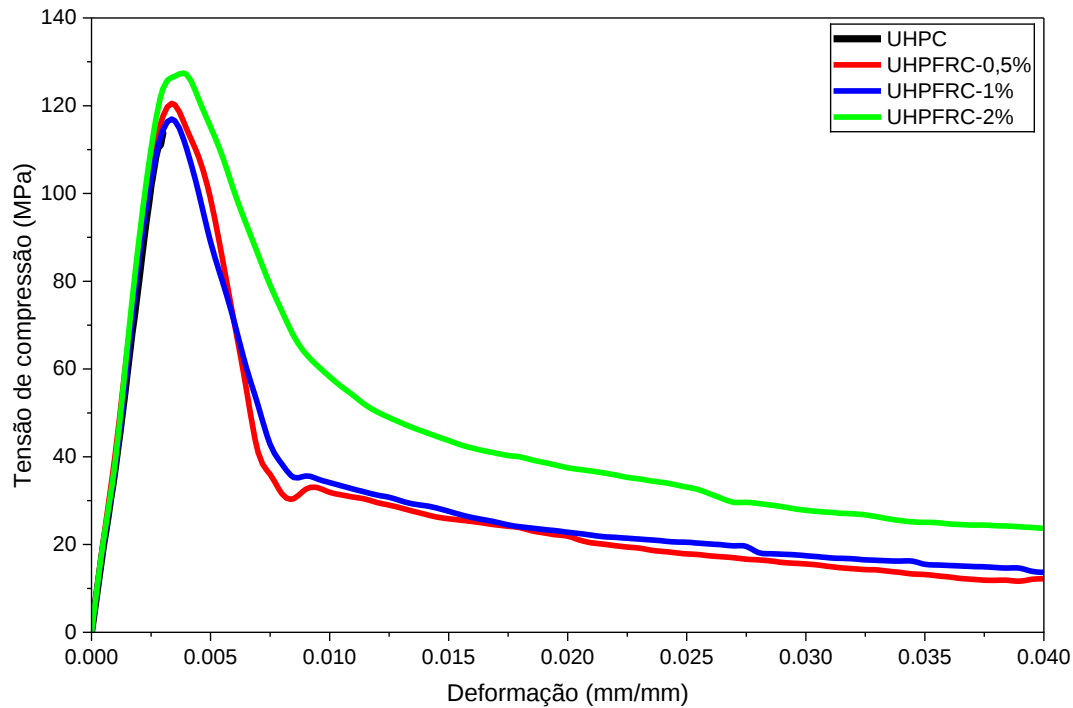
Os resultados de Vanderlei (2004), apresentados anteriormente na Figura 4.15, também indicam que a relação entre o teor de fibras e a resistência à compressão não é monotônica, sendo observadas oscilações dessa propriedade para determinados teores de fibras. Para algumas das idades avaliadas, verificou-se a redução da resistência à compressão entre os teores de 0,5% e 1% de fibras.

A Figura 6.2 apresenta as curvas médias de tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial dos concretos. Observou-se que o UHPC exibiu um comportamento praticamente linear até o pico de resistência à compressão, seguido por uma ruptura abrupta e de caráter explosivo, sem o desenvolvimento do trecho descendente.

A incorporação de fibras de aço conferiu ao material um comportamento mais dúctil, evidenciado pela presença do trecho pós-pico. Após o surgimento das fissuras, as fibras atuaram restringindo a expansão lateral do corpo de prova, o que proporcionou uma maior capacidade de deformação axial.

Conforme esperado, a incorporação das fibras exerceu pouca influência sobre o trecho ascendente da curva tensão-deformação. Em contrapartida, o trecho descendente dos concretos UHPFRC apresentou maior dispersão, atribuída à variabilidade na quantidade e, principalmente, na orientação das fibras.

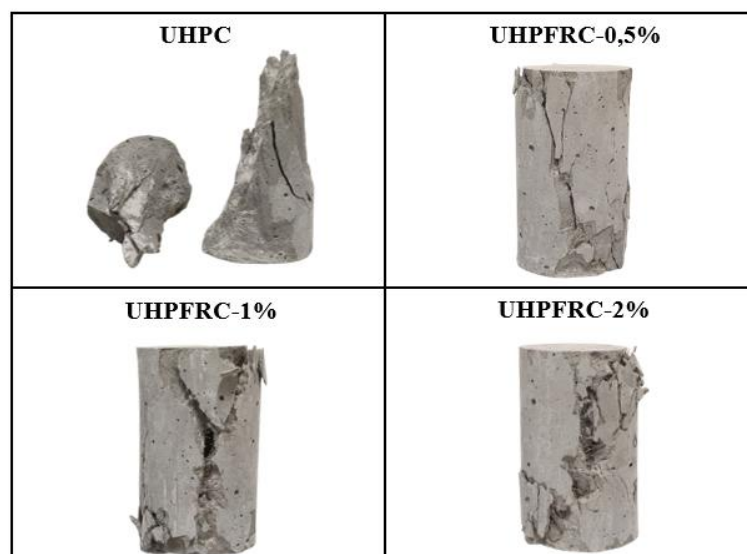
Figura 6.2 – Curva tensão-deformação na compressão uniaxial do UHPC e UHPFRC



Fonte: Elaborado pelo autor.

O padrão de falha dos concretos no ensaio de compressão uniaxial é apresentado na Figura 6.3. Observou-se que o UHPC apresentou uma ruptura típica de comportamento frágil, de caráter explosivo. Já nos UHPFRCs, as fibras atuaram como pontes de transferência de tensões nas fissuras, retardando a sua propagação e garantindo maior integridade aos corpos de prova ao final do ensaio.

Figura 6.3 – Corpos de prova após o ensaio de compressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2 Ensaio de tração uniaxial

Apresenta-se na Tabela 6.2 os valores médios obtidos para a resistência à tração (f_t) dos concretos ensaiados. De modo geral, os resultados estão dentro das faixas esperadas e reportadas na literatura para esse tipo de concreto.

Tabela 6.2 – Resistência à tração do UHPC e UHPFRC

Concreto	f_t (MPa)
UHPC	5,2
UHPFRC-0,5%	4,7
UHPFRC-1%	8,6
UHPFRC-2%	10,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A incorporação das fibras de aço no UHPC proporcionou um aumento da resistência à tração de cerca de 65% e 94% para o UHPFRC-1% e UHPFRC-2%, respectivamente. Esse acréscimo está relacionado à atuação das fibras como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, o que inibe a propagação das fissuras e, conseqüentemente, aumenta a resistência à tração do concreto. A capacidade de transferência de tensões das fibras é influenciada por vários fatores, como a quantidade e orientação das fibras. Assim, em comparação com o UHPFRC-1%, o maior aumento da resistência à tração do UHPFRC-2% pode ser atribuído a uma maior capacidade de transferência de tensões em função da maior quantidade de fibras.

Foi observado que o teor de 0,5% de fibras não foi suficiente para promover ganhos na resistência à tração, apresentando, inclusive, valor inferior ao do UHPC. Esse comportamento indica que, para esse teor de fibras, os mecanismos de transferência de tensões proporcionados pelas fibras não são suficientes para compensar os defeitos introduzidos na matriz pela sua incorporação. Nessa condição, a ruptura permanece governada pela formação de uma única fissura crítica, sem o desenvolvimento de múltipla fissuração. Conseqüentemente, a resistência torna-se fortemente dependente do defeito local mais crítico do material, que passa a controlar o processo de ruptura. Somente para teores mais elevados de fibras observa-se uma contribuição mais efetiva do mecanismo de ponte de fibras, favorecendo a formação de múltiplas fissuras e resultando em ganhos de resistência à tração.

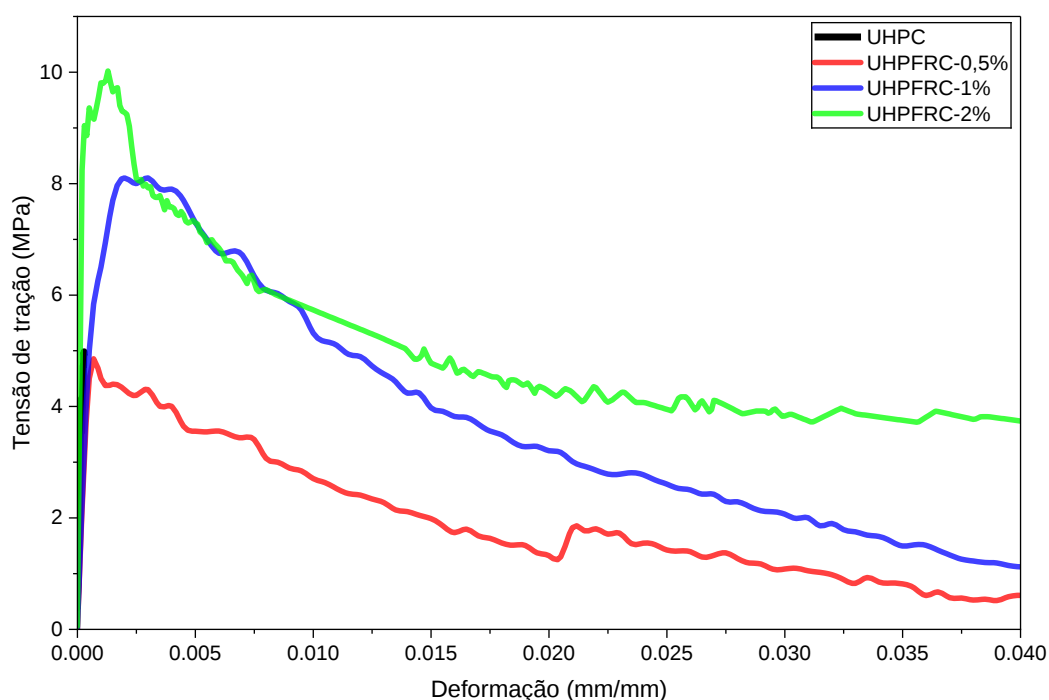
A Figura 6.4 apresenta as curvas médias de tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração uniaxial dos concretos. Observou-se que todos os materiais exibiram um comportamento praticamente linear até o surgimento da primeira fissura.

No caso do UHPC, o comportamento frágil à tração resultou em uma ruptura brusca imediatamente após a fissuração inicial. Com a incorporação de fibras de aço, o material passou a apresentar um comportamento dúctil.

Os concretos UHPFRC-1% e UHPFRC-2% exibiram um comportamento de enrijecimento após a primeira fissura, caracterizado pelo aumento da tensão de tração devido à atuação das fibras por meio do mecanismo de ponte de tensões através das fissuras. Após o pico de tensão, verificou-se o comportamento de suavização, associado ao desenvolvimento de uma microfissura e ao arrancamento progressivo das fibras.

Por outro lado, o UHPFRC-0,5% já apresentou o comportamento de suavização logo após a primeira fissura, indicando que o teor de fibras não foi suficiente para promover uma transferência eficiente de tensões.

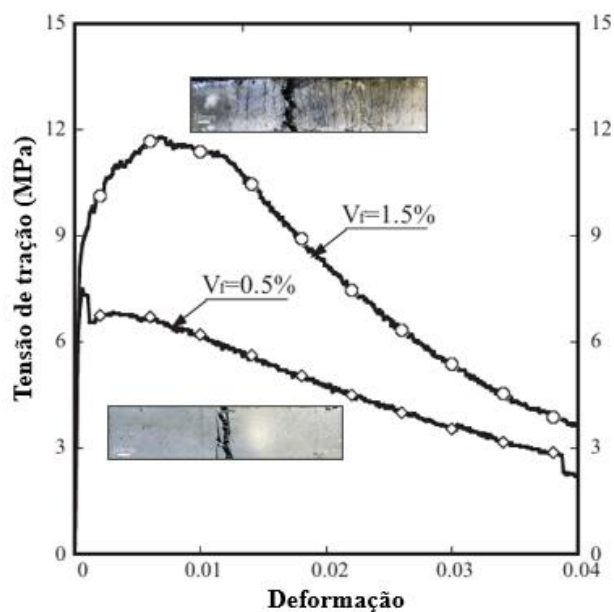
Figura 6.4 – Curva tensão-deformação na tração uniaxial do UHPC e UHPFRC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse comportamento para o teor de 0,5% de fibras também foi observado por Ngo *et al.* (2017), cujos resultados indicaram que o UHPFRC-0,5% apresentou um comportamento do tipo *strain-softening*, enquanto teores mais elevados (1,5%) resultaram em um comportamento *strain-hardening*, com formação de múltiplas microfissuras e aumentos significativos da resistência e da capacidade de deformação à tração, conforme a Figura 6.5 apresenta.

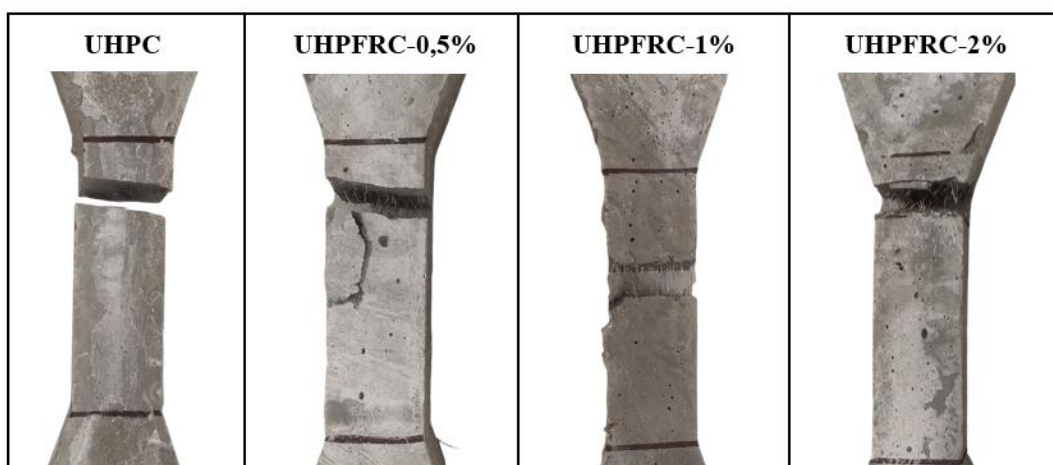
Figura 6.5 – Curva tensão-deformação na tração uniaxial obtida por Ngo *et al.* (2017)



Fonte: Adaptado de Ngo *et al.* (2017).

O padrão de falha dos concretos no ensaio de tração uniaxial é apresentado na Figura 6.6. O UHPC apresentou uma ruptura frágil, caracterizada pela formação de uma única fissura. De forma semelhante, o UHPFRC-0,5% também exibiu apenas uma fissura predominante, comportamento típico de materiais com resposta do tipo *strain-softening*. Em contrapartida, os concretos UHPFRC-1% e UHPFRC-2% apresentaram, além da macrofissura, o desenvolvimento de múltiplas microfissuras, característica associada ao comportamento do tipo *strain-hardening*.

Figura 6.6 – Corpos de prova após o ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A Tabela 6.3 apresenta os valores médios de resistência ao cisalhamento obtidos para os concretos ensaiados, enquanto a Figura 6.7 ilustra a sua variação em função do teor e da orientação das fibras.

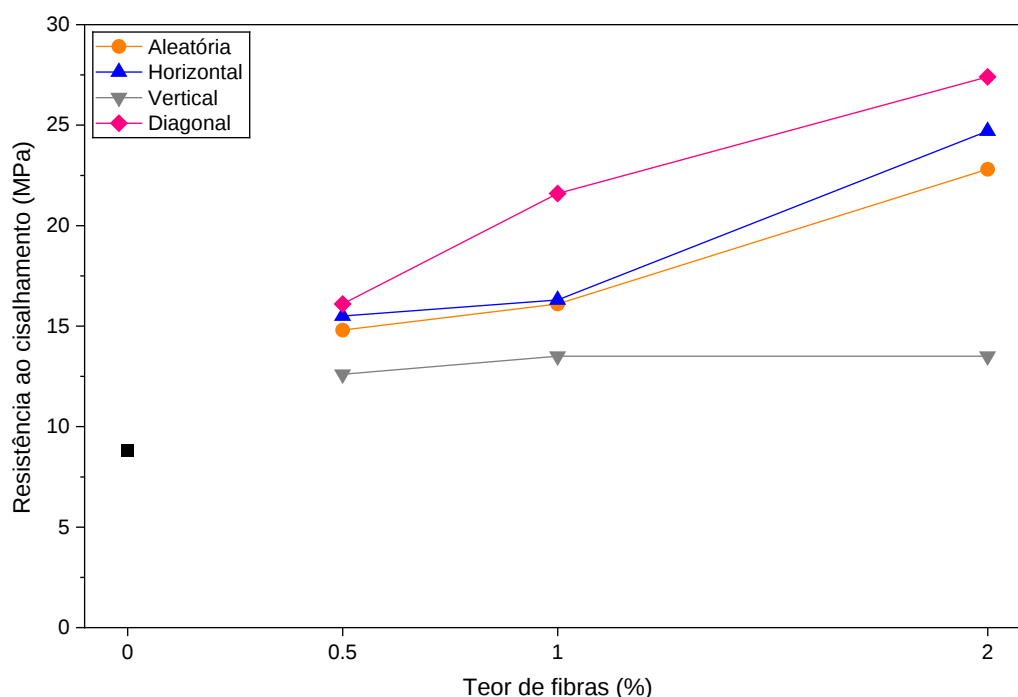
Destaca-se que a nomenclatura adotada para as orientações das fibras ao longo desta seção baseia-se na direção preferencial de alinhamento pretendida durante o processo de moldagem dos corpos de prova. Dessa forma, as interpretações e discussões apresentadas são realizadas com base nas orientações assumidas para cada condição experimental. A caracterização quantitativa efetiva dessas orientações, bem como a validação do alinhamento obtido, é apresentada na seção seguinte por meio da análise de imagens e da determinação dos coeficientes de orientação, permitindo confirmar, ou não, as tendências consideradas nesta análise preliminar.

Tabela 6.3 – Resistência ao cisalhamento do UHPC e UHPFRC

Concreto	Orientação	τ (MPa)	Diferença (%)
UHPC	-	8,8	Referência
UHPFRC-0,5%	Aleatória	14,8	+68,2
	Horizontal	15,5	+76,1
	Vertical	12,6	+43,2
	Diagonal	16,1	+83,0
UHPFRC-1%	Aleatória	16,1	+83,0
	Horizontal	16,3	+85,2
	Vertical	13,5	+53,4
	Diagonal	21,6	+145,5
UHPFRC-2%	Aleatória	22,8	+159,1
	Horizontal	24,7	+180,7
	Vertical	13,5	+53,4
	Diagonal	27,4	+211,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.7 – Influência do teor e da orientação das fibras na resistência ao cisalhamento do UHPFRC



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar, inicialmente, que a incorporação de fibras promoveu um aumento significativo da resistência ao cisalhamento em todas as condições avaliadas quando comparadas ao UHPC, que apresentou uma resistência de 8,8 MPa.

Para o traço com 0,5% de fibras, os incrementos variaram entre 43,2% e 83,0%, evidenciando que, mesmo em baixos teores, as fibras já contribuem de forma expressiva para a resistência ao cisalhamento. Observou-se que a orientação diagonal proporcionou o maior ganho de resistência, indicando que o alinhamento das fibras em direções mais compatíveis com as trajetórias das tensões de tração favorece o mecanismo de ponte de tensões nas fissuras, aumentando a capacidade de transferência de esforços.

No caso do UHPFRC-1%, houve um aumento adicional da resistência, com valores entre 13,5 MPa e 21,6 MPa, correspondendo a incrementos de 53,4% a 145,5%. Novamente, a orientação diagonal apresentou o melhor desempenho, sugerindo maior eficiência dessa configuração na interceptação e no controle da propagação das fissuras diagonais.

Para o teor de 2% de fibras, foram observados os maiores valores de resistência em todas as orientações, alcançando 27,4 MPa na orientação diagonal, o que representa um aumento de 211,4% em relação ao UHPC. Esse comportamento evidencia o efeito combinado entre o maior volume de fibras e a orientação mais favorável em relação às tensões de tração atuantes, potencializando o mecanismo de ponte de tensões entre as faces fissuradas.

Enquanto a orientação diagonal apresentou os melhores desempenhos em todos os teores de fibras analisados, as orientações horizontal e aleatória apresentaram resultados semelhantes, com diferenças relativamente pequenas entre si e ganhos intermediários de resistência. Em contrapartida, a orientação vertical se mostrou a menos eficiente, apresentando os menores valores de resistência e reduções expressivas em comparação às demais configurações analisadas.

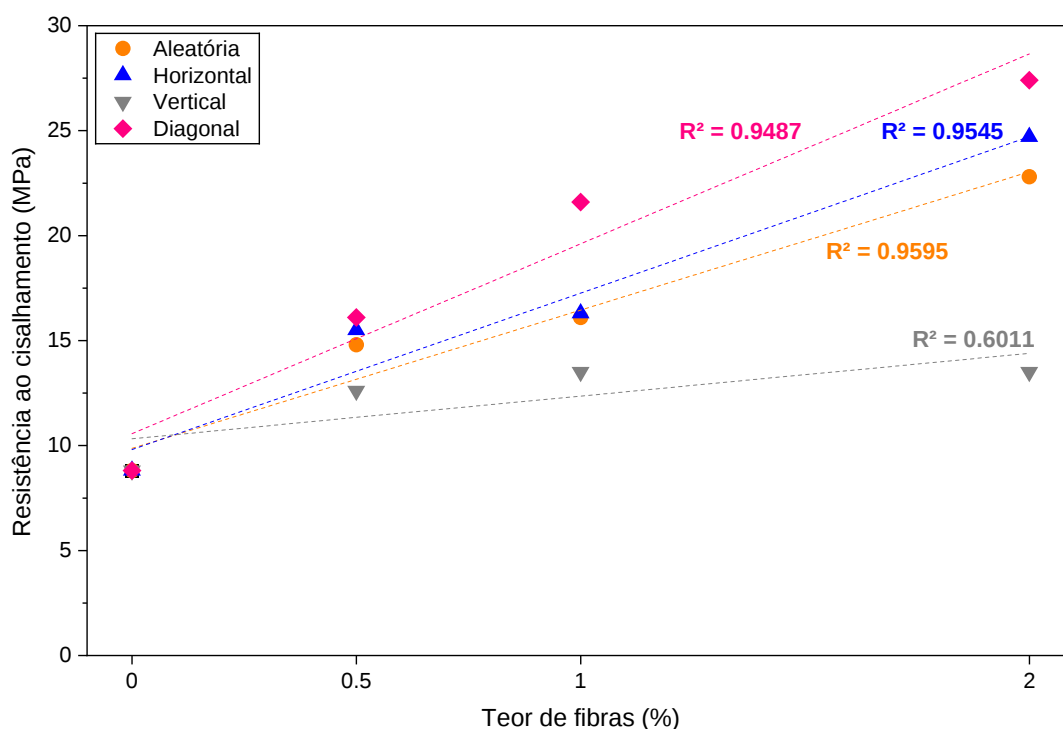
Logo, os resultados confirmam que tanto o teor volumétrico quanto a orientação das fibras exercem influência significativa no comportamento ao cisalhamento do UHPFRC, constatando-se que a orientação constitui um parâmetro particularmente relevante, uma vez que condiciona a eficiência do mecanismo de ponte de tensões e, conseqüentemente, a capacidade resistente do material.

A importância desse parâmetro torna-se ainda mais evidente ao se observar que concretos com diferentes teores de fibras apresentaram resistências ao cisalhamento bastante semelhantes sob determinadas condições de orientação, demonstrando o impacto expressivo da distribuição e do alinhamento das fibras no desempenho mecânico do compósito.

Como exemplo, o UHPFRC com 0,5% de fibras e orientação diagonal apresentou uma resistência ao cisalhamento de 16,1 MPa, valor equivalente ao obtido pelo UHPFRC com 1% de fibras e orientação aleatória, apesar deste último possuir o dobro da quantidade de fibras. De maneira semelhante, o UHPFRC com 2% de fibras e orientação vertical apresentou uma resistência de 13,5 MPa, idêntica à observada para o UHPFRC com 1% de fibras na mesma orientação, além de próxima à resistência do UHPFRC com 0,5% de fibras e orientação aleatória (14,8 MPa).

A influência do teor volumétrico de fibras sobre a resistência ao cisalhamento dos elementos de UHPFRC foi avaliada por meio de análises de correlação linear, considerando separadamente cada orientação das fibras. A Figura 6.8 apresenta a relação entre o teor de fibras e os valores de resistência obtidos, juntamente com as respectivas linhas de tendência e os coeficientes de determinação.

Figura 6.8 – Correlação entre o teor de fibras e a resistência ao cisalhamento do UHPFRC para diferentes orientações das fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, observou-se uma forte relação linear entre essas variáveis para as orientações aleatória, horizontal e diagonal, indicando que os ganhos de resistência ao cisalhamento são aproximadamente proporcionais ao aumento do teor de fibras nessas configurações.

A orientação aleatória apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9595$), indicando que aproximadamente 96% da variabilidade da resistência ao cisalhamento é explicada pelo teor de fibras. Em seguida, destacam-se as orientações horizontal ($R^2 = 0,9545$) e diagonal ($R^2 = 0,9487$), que também exibiram um excelente ajuste linear, evidenciando que o incremento do volume de fibras resulta em ganhos de resistência de forma previsível quando as fibras apresentam orientação favorável em relação ao plano de fissuração.

Em contraste, a orientação vertical apresentou um coeficiente de determinação significativamente inferior ($R^2 = 0,6011$), indicando que apenas cerca de 60% da variabilidade da resistência ao cisalhamento pode ser atribuída ao teor de fibras. Esse comportamento demonstra que, nessa configuração, a simples adição de fibras não garante aumentos proporcionais de resistência, uma vez que a orientação desfavorável em relação ao

plano de fissuração limita a eficiência do mecanismo de ponte de tensões e, conseqüentemente, a contribuição das fibras para a resistência ao cisalhamento.

A Tabela 6.4 reapresenta os resultados, realçando a influência do teor volumétrico de fibras na resistência ao cisalhamento para cada configuração de orientação analisada.

Tabela 6.4 – Influência do teor de fibras na resistência ao cisalhamento do UHPFRC

Orientação	Concreto	Diferença (%)
Aleatória	UHPFRC-0,5%	Referência
	UHPFRC-1%	+8,8
	UHPFRC-2%	+54,1
Horizontal	UHPFRC-0,5%	Referência
	UHPFRC-1%	+5,2
	UHPFRC-2%	+59,4
Vertical	UHPFRC-0,5%	Referência
	UHPFRC-1%	+7,1
	UHPFRC-2%	+7,1
Diagonal	UHPFRC-0,5%	Referência
	UHPFRC-1%	+34,2
	UHPFRC-2%	+70,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a orientação aleatória, o aumento do teor de fibras de 0,5% para 1% resultou em um ganho discreto de 8,8%, enquanto o teor de 2% promoveu incremento de 54,1% em relação ao UHPFRC-0,5%. Tendência semelhante foi observada na orientação horizontal, com aumentos de 5,2% para 1% de fibras e 59,4% para 2%.

Na orientação vertical, os incrementos foram significativamente menores, de apenas 7,1% para os teores de 1% e 2%, indicando uma baixa eficiência dessa configuração no mecanismo de ponte de tensões.

Por outro lado, a orientação diagonal apresentou os maiores ganhos, com incrementos de 34,2% para 1% e 70,2% para 2% de fibras, evidenciando que o aumento do teor de fibras é mais efetivo quando associado a uma orientação favorável à transferência de tensões nas fissuras diagonais.

A Tabela 6.5 reorganiza novamente os resultados, mas agora destacando a influência da orientação das fibras na resistência ao cisalhamento para cada teor volumétrico analisado.

Tabela 6.5 – Influência da orientação das fibras na resistência ao cisalhamento do UHPFRC

Concreto	Orientação	Diferença (%)
UHPFRC-0,5%	Aleatória	Referência
	Horizontal	+4,7
	Vertical	-14,9
	Diagonal	+8,8
UHPFRC-1%	Aleatória	Referência
	Horizontal	+1,2
	Vertical	-16,1
	Diagonal	+34,2
UHPFRC-2%	Aleatória	Referência
	Horizontal	+8,3
	Vertical	-40,8
	Diagonal	+20,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o UHPFRC-0,5%, tomando a orientação aleatória como referência, observou-se um pequeno aumento de resistência para as orientações horizontal (+4,7%) e diagonal (+8,8%), enquanto a vertical apresentou uma redução de 14,9%.

No UHPFRC-1%, a orientação horizontal manteve comportamento semelhante ao da condição aleatória (+1,2%), ao passo que a diagonal promoveu um aumento expressivo de 34,2% e a vertical reduziu a resistência em 16,1%.

Para o teor de 2% de fibras, os efeitos da orientação tornaram-se ainda mais pronunciados: a orientação horizontal apresentou ganho de 8,3%, a diagonal de 20,2% e a vertical a maior redução observada, de 40,8%.

Destaca-se que os resultados de resistência ao cisalhamento obtidos nesta pesquisa apresentaram boa concordância com os valores reportados por Ngo *et al.* (2017), os quais observaram resistências últimas médias de 7,3; 13,4 e 21,7 MPa, respectivamente, para o UHPC e UHPFRCs contendo 0,5% e 1,5% em volume de fibras. Como os autores não adotaram procedimentos específicos para indução do alinhamento das fibras durante a moldagem, a distribuição das fibras pode ser considerada predominantemente aleatória, tornando os resultados particularmente coerentes com as configurações de orientação aleatória avaliadas neste estudo.

As Figuras 6.9 a 6.12 apresentam as curvas médias de tensão-deformação de cisalhamento do UHPC e dos UHPFRCs obtidas nos ensaios realizados.

Verificou-se que o UHPC exibiu uma resposta praticamente linear até sua ruptura abrupta, sem o desenvolvimento do trecho pós-pico, caracterizando um comportamento frágil.

Para os UHPFRCs, observou-se inicialmente uma resposta aproximadamente linear, correspondente ao estágio anterior à formação de fissuras na superfície de cisalhamento. Na sequência, as curvas passaram a apresentar um comportamento não linear, associado ao surgimento e à propagação de microfissuras próximas ao plano de cisalhamento, com a atuação progressiva das fibras por meio do mecanismo de ponte de tensões. Nesse estágio, verificou-se um comportamento do tipo *strain-hardening*, caracterizado pelo aumento da resistência mesmo após o início da fissuração.

Notou-se que os concretos com maiores teores de fibras, especialmente o UHPFRC-2%, e com orientações mais favoráveis apresentaram um crescimento mais pronunciado da tensão após o início da fissuração, indicando uma maior capacidade de transferência de tensões pelas fibras e retardamento da propagação das fissuras.

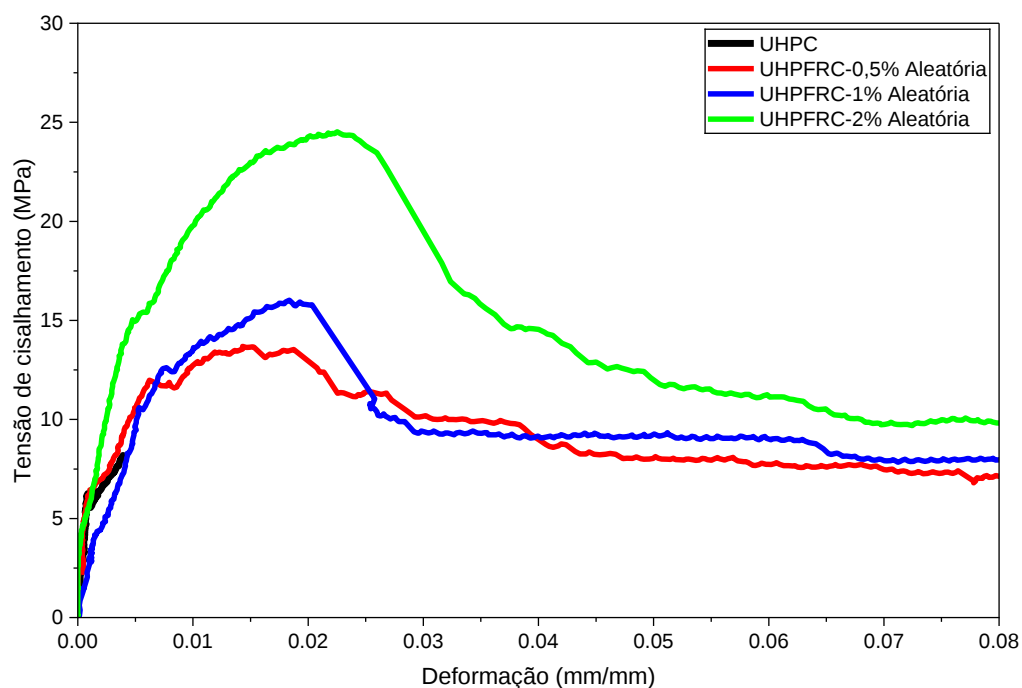
As orientações diagonal e horizontal apresentaram um maior crescimento de tensão, evidenciando um alinhamento mais favorável das fibras em relação à direção das tensões principais de tração atuantes na fissura diagonal. Em contrapartida, a orientação vertical apresentou menores crescimentos, com um comportamento menos pronunciado de endurecimento.

Em geral, esse comportamento também se refletiu na deformação correspondente ao pico de tensão, com os maiores valores sendo observados na orientação diagonal, seguidos pelas orientações horizontal, aleatória e vertical. Esse resultado indica que orientações mais favoráveis aumentaram a eficiência do mecanismo de ponte de tensões, permitindo ao material suportar maiores deformações antes de atingir a tensão máxima.

Após o pico, observou-se redução gradual da tensão de cisalhamento, associada ao aumento da abertura das fissuras e ao arrancamento progressivo das fibras. Em comparação aos valores de pico, as diferenças entre os concretos tornaram-se menos pronunciadas na região residual, evidenciando um comportamento pós-pico relativamente semelhante entre as diferentes orientações e teores de fibras.

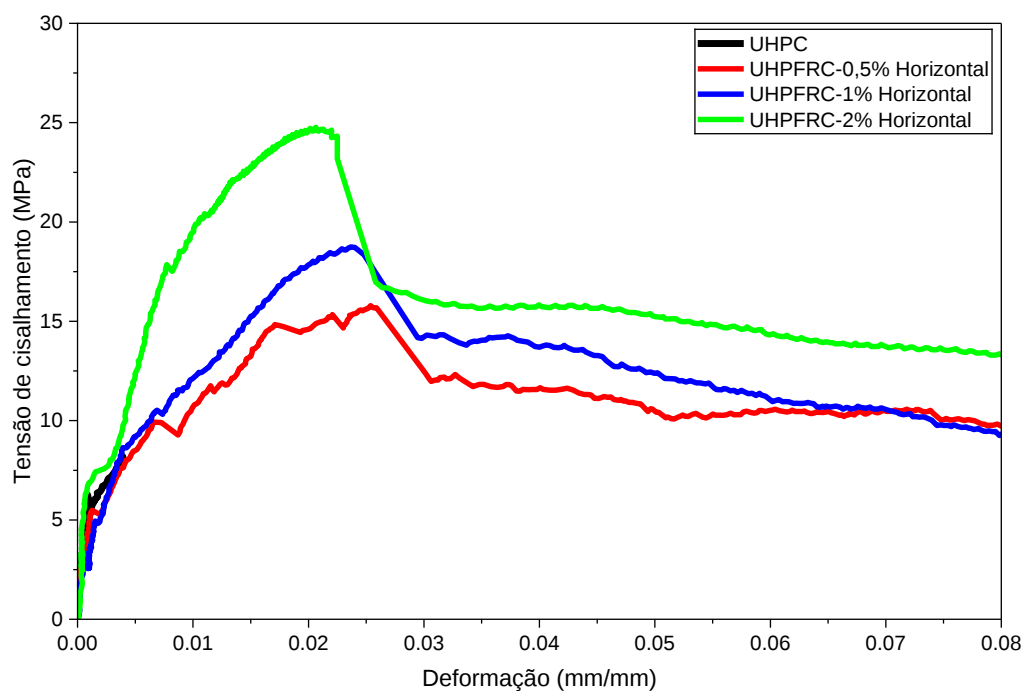
Em resumo, então, todos os UHPFRCs apresentaram curvas com formatos semelhantes e comportamento do tipo *strain-hardening*, caracterizado pelo aumento da resistência após o início da fissuração, embora com diferentes níveis de resistência e ductilidade em função do teor e da orientação das fibras.

Figura 6.9 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPC e UHPFRCs com orientação aleatória das fibras



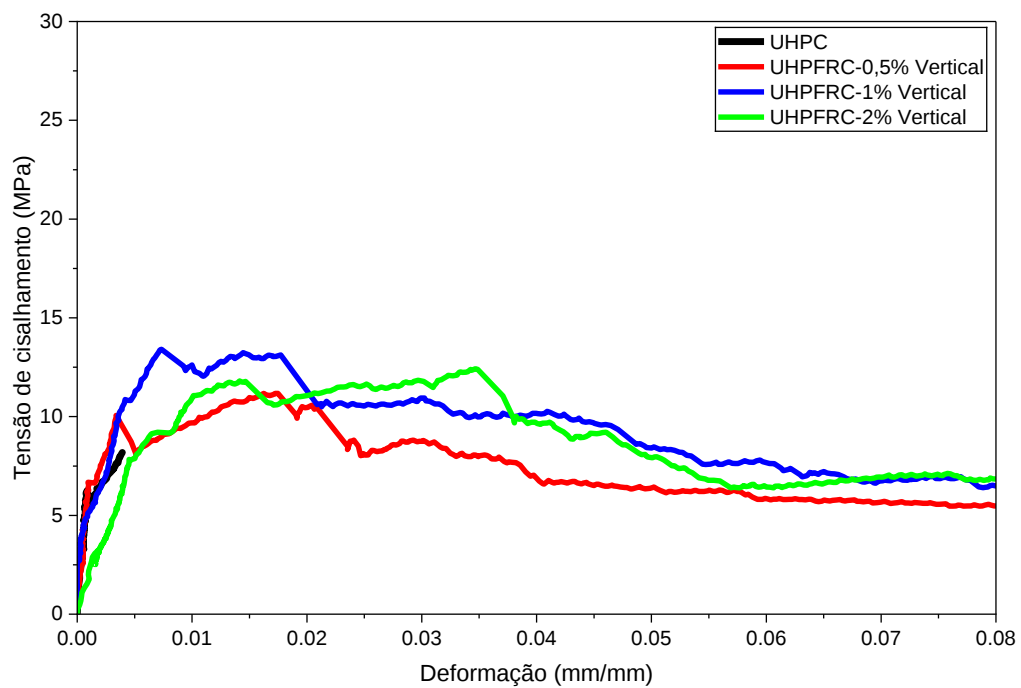
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.10 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPC e UHPFRCs com orientação horizontal das fibras



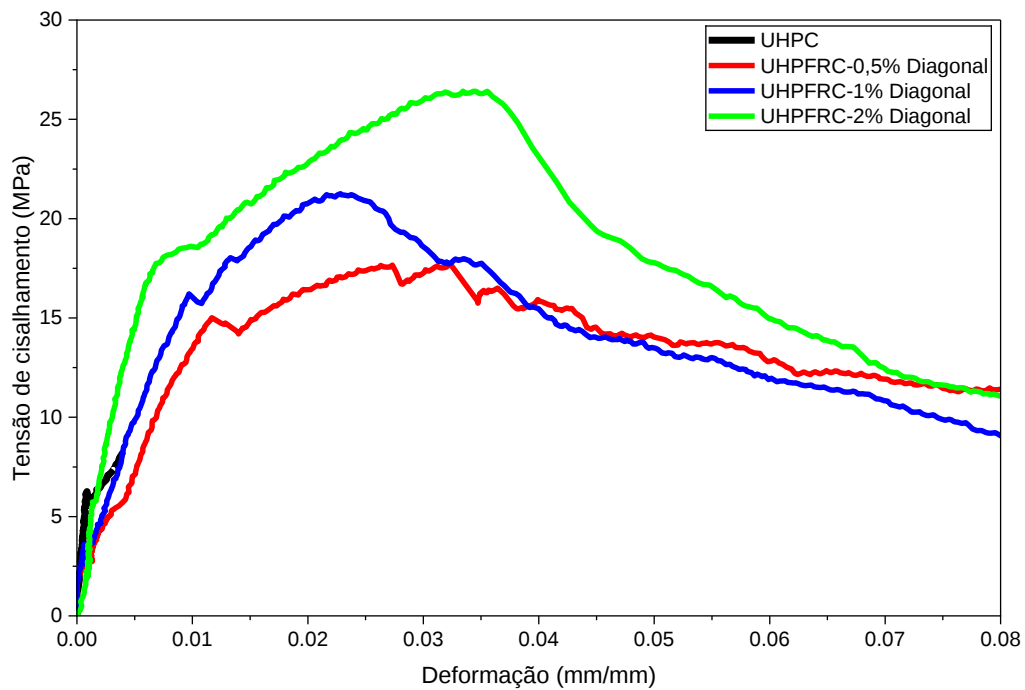
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.11 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPC e UHPFRCs com orientação vertical das fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

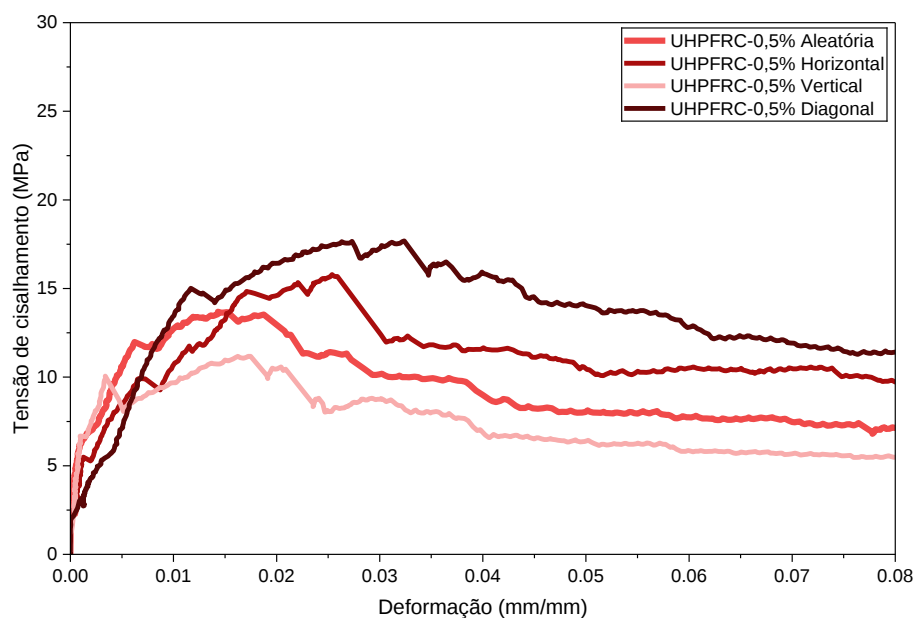
Figura 6.12 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPC e UHPFRCs com orientação diagonal das fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

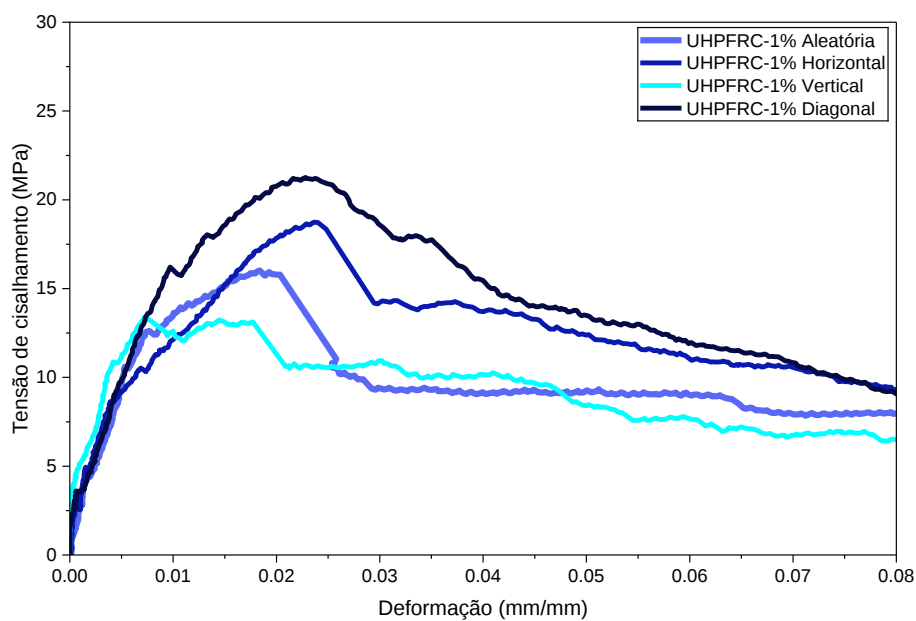
As Figura 6.13, 6.14 e 6.15 representam as curvas tensão-deformação de cisalhamento dos UHPFRCs, agrupadas em função da fração volumétrica de fibras.

Figura 6.13 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPFRC-0,5% para as diferentes orientações



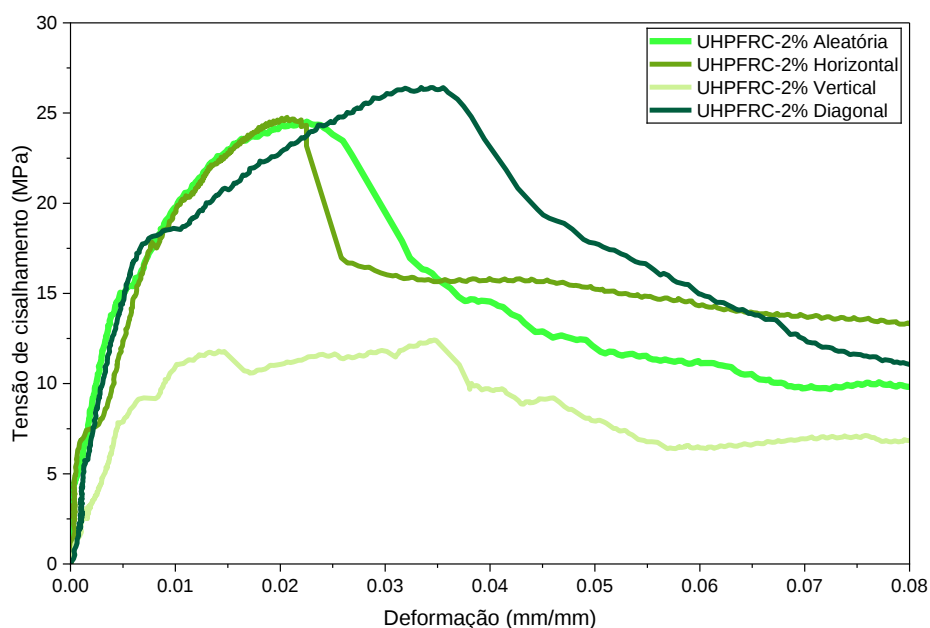
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.14 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPFRC-1% para as diferentes orientações



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.15 – Curva tensão-deformação no cisalhamento do UHPFRC-2% para as diferentes orientações

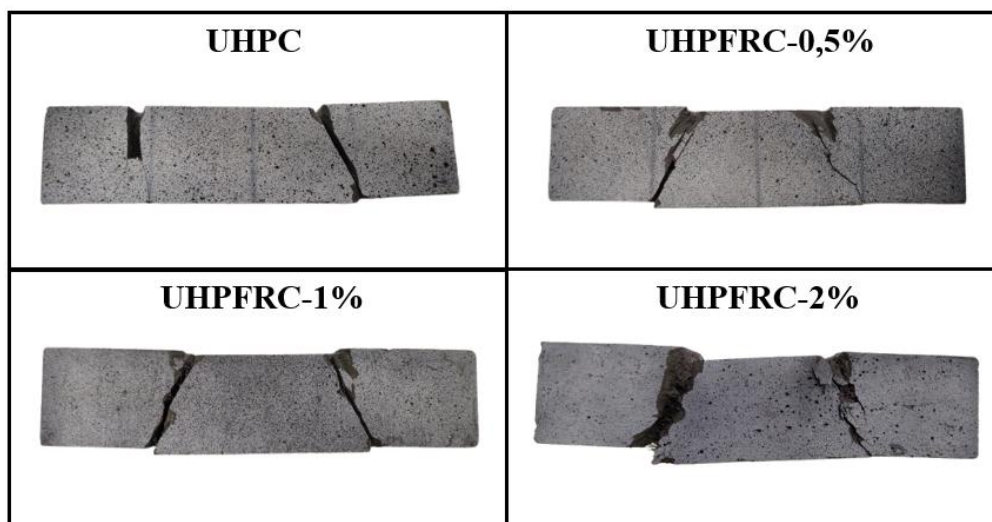


Fonte: Elaborado pelo autor.

O padrão de ruptura dos concretos nesse ensaio é apresentado na Figura 6.16. O UHPC apresentou uma ruptura típica de material frágil, com comportamento de caráter explosivo e formação predominante de uma única fissura. Em contrapartida, os UHPFRCs apresentaram, além da macrofissura (fissura principal), o desenvolvimento de múltiplas microfissuras, evidenciando uma maior capacidade de redistribuição de tensões e um comportamento associado ao regime *strain-hardening*.

Observou-se ainda que os concretos com maiores teores de fibras e orientações mais favoráveis apresentaram uma fissuração mais distribuída, com um maior número de microfissuras, indicando uma maior capacidade de transferência de tensões após a fissuração da matriz. Apesar dessas diferenças, ambos apresentaram ruptura final caracterizada pela formação de pelo menos uma fissura inclinada principal, padrão semelhante ao modo típico de ruptura por cisalhamento observado em concretos convencionais.

Figura 6.16 – Prismas após o ensaio de cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que, enquanto o UHPFRC-0,5% apresentou comportamento de amolecimento (*strain-softening*) sob tração uniaxial após a formação da primeira fissura, o material exibiu comportamento de endurecimento (*strain-hardening*) nos ensaios de cisalhamento.

Ngo *et al.* (2017) também observaram esse comportamento e atribuíram essa diferença aos distintos mecanismos de atuação das fibras em cada modo de sollicitação. Enquanto, sob tração, o comportamento é predominantemente governado pelo arrancamento das fibras, no cisalhamento a contribuição das fibras está associada principalmente ao efeito pino das fibras que cruzam as fissuras, mecanismo fortemente influenciado pela orientação das fibras em relação ao plano de fissuração.

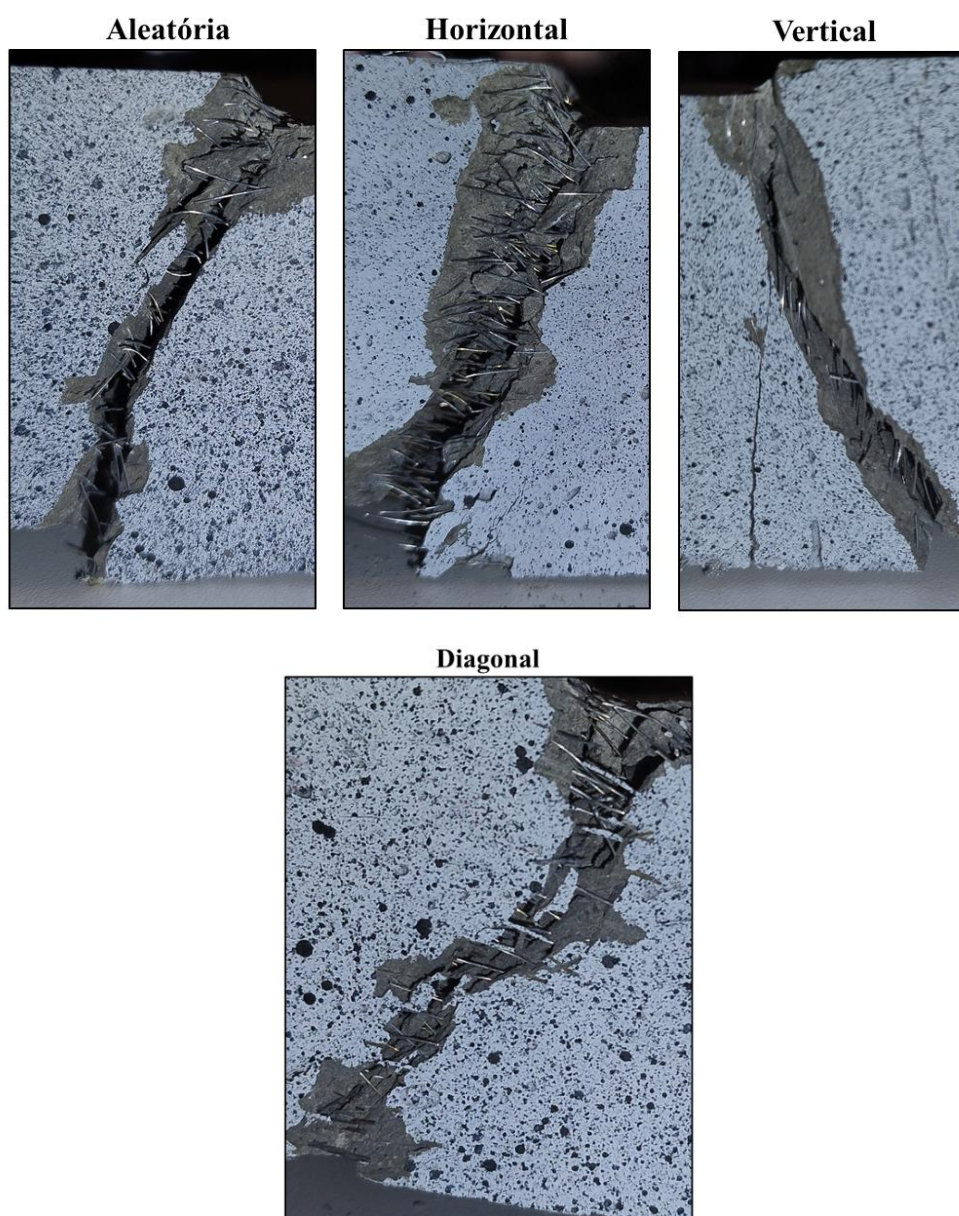
Logo, o método de ensaio proposto se mostrou adequado para a investigação da resistência ao cisalhamento do UHPFRC, sendo capaz de reproduzir o comportamento de endurecimento por deformação, acompanhado pela formação de múltiplas microfissuras, característica típica do desempenho do UHPFRC sob tração, mesmo em condições de ruptura governadas pelo cisalhamento.

Vale registrar que, embora a ruptura final tenha sido governada pelo cisalhamento, alguns prismas apresentaram, previamente à ruptura, fissuras verticais provenientes da flexão.

6.2.1 Análise de imagem para caracterização da orientação

Inicialmente, a Figura 6.17 apresenta imagens da região fissurada dos prismas ensaiados, nas quais já era possível observar visualmente a tendência de alinhamento das fibras em função da orientação previamente induzida durante a moldagem. Notou-se, então, que as fibras já apresentavam distribuições distintas para cada configuração analisada, evidenciando a predisposição de alinhamento associada a cada orientação adotada. Essas observações qualitativas constituíram um indicativo inicial de que o processo de moldagem foi capaz de induzir diferentes orientações preferenciais das fibras.

Figura 6.17 – Visualização da orientação das fibras nas faces de ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6.6 apresenta os valores médios do coeficiente de orientação das fibras determinados pela análise de imagem das faces de ruptura por cisalhamento dos prismas ensaiados.

Tabela 6.6 – Coeficiente de orientação das fibras nas faces de ruptura

Concreto	Orientação	η_θ	Diferença (%)
UHPFRC-0,5%	Aleatória	0,755	-8,0
	Horizontal	0,771	-6,1
	Vertical	0,666	-18,9
	Diagonal	0,821	Referência
UHPFRC-1%	Aleatória	0,747	-7,0
	Horizontal	0,764	-4,9
	Vertical	0,637	-20,7
	Diagonal	0,803	Referência
UHPFRC-2%	Aleatória	0,701	-11,3
	Horizontal	0,749	-5,2
	Vertical	0,646	-18,2
	Diagonal	0,790	Referência

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que a orientação diagonal apresentou os maiores coeficientes de orientação para todos os teores de fibras avaliados, variando de 0,790 a 0,821, indicando um maior alinhamento das fibras na direção normal ao plano de corte, isto é, na direção das tensões de tração atuantes.

Em contrapartida, a orientação vertical resultou nos menores coeficientes em todas as composições, com valores variando entre 0,637 e 0,666, evidenciando uma distribuição com fibras menos alinhadas à direção normal ao plano analisado.

Para a orientação horizontal, os coeficientes apresentaram valores intermediários, variando entre 0,744 e 0,771, próximos aos observados para a orientação aleatória, que variaram entre 0,739 e 0,755. Esse comportamento indica que, embora a moldagem na condição aleatória não tivesse como objetivo um alinhamento preferencial específico, o próprio processo de moldagem influenciou parcialmente a distribuição espacial das fibras, resultando em níveis de alinhamento semelhantes aos obtidos para a orientação horizontal. Tal observação está em concordância com Abrishambaf, Pimentel e Nunes (2017), que destacam que, na prática, é provável a ocorrência de uma orientação preferencial das fibras em uma determinada direção.

Os resultados, então, confirmaram que os procedimentos de moldagem adotados foram capazes de induzir diferentes padrões de alinhamento das fibras, apresentando concordância satisfatória com as orientações pretendidas experimentalmente, apesar de limitações.

Dessa forma, a caracterização da orientação das fibras permitiu validar as interpretações previamente discutidas, evidenciando que as maiores resistências ao cisalhamento estiveram associadas às condições em que as fibras apresentaram maior alinhamento com a direção das tensões principais de tração.

Os maiores valores de resistência foram observados para os prismas com orientação diagonal das fibras, os quais apresentaram os maiores coeficientes de orientação e, conseqüentemente, maior alinhamento das fibras com a direção das tensões principais de tração. Nessa configuração, as fibras apresentaram uma orientação mais ortogonal ao plano principal de fissuração, favorecendo o mecanismo de ponte de fissuras e, conseqüentemente, a transferência de tensões após a fissuração.

As orientações horizontal e aleatória apresentaram desempenhos intermediários e próximos entre si, embora a condição horizontal tenha apresentado resistência ligeiramente superior, em concordância com seus coeficientes de orientação também ligeiramente mais elevados.

Em contrapartida, a orientação vertical resultou nos menores coeficientes de orientação e, conseqüentemente, nos menores desempenhos ao cisalhamento, uma vez que o alinhamento das fibras se mostrou menos favorável em relação à direção das tensões principais de tração, ou seja, mais próximo do paralelismo em relação ao plano principal de fissuração, reduzindo a eficiência do mecanismo de ponte de fissuras.

Comentou-se que os processos de moldagem apresentaram limitações, uma vez que os coeficientes de orientação obtidos experimentalmente apresentaram desvios em relação aos valores idealizados (todas as fibras alinhadas à direção de moldagem), conforme apresentado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Comparação entre os coeficientes de orientação obtidos e idealizados

Concreto	Orientação	η_θ	η_θ idealizado	Diferença (%)
UHPFRC-0,5%	Aleatória	0,755	0,500	+51,0
	Horizontal	0,771	0,927	-16,8
	Vertical	0,666	0,375	+77,6
	Diagonal	0,821	0,990	-17,1
UHPFRC-1%	Aleatória	0,747	0,500	+49,4
	Horizontal	0,764	0,927	-17,6
	Vertical	0,637	0,375	+69,9
	Diagonal	0,803	0,990	-18,9
UHPFRC-2%	Aleatória	0,701	0,500	+40,2
	Horizontal	0,749	0,927	-19,2
	Vertical	0,646	0,375	+72,3
	Diagonal	0,790	0,990	-20,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

As moldagens na horizontal e na diagonal apresentaram coeficientes inferiores aos idealizados, com diferenças entre aproximadamente 17% e 20%, indicando que, apesar do alinhamento preferencial promovido por essas direções de moldagem, a orientação efetiva das fibras foi limitada pela dispersão natural durante o escoamento do concreto.

Por outro lado, a moldagem na vertical apresentou coeficientes significativamente superiores ao valor idealizado, com diferenças entre 70% e 78%, sugerindo que o alinhamento inicialmente induzido pelo lançamento do material foi parcialmente alterado pelos efeitos de escoamento e acomodação do concreto no interior da fôrma.

No entanto, se destaca que era possível identificar visualmente uma tendência de alinhamento vertical das fibras na região fissurada (vide Figura 6.16), de modo que eram esperados coeficientes mais próximos daqueles previstos teoricamente para essa condição de orientação.

Já a moldagem aleatória resultou em coeficientes superiores ao valor teórico, indicando que, mesmo na ausência de uma direção preferencial de orientação, ocorreu um alinhamento parcial das fibras induzido pelo processo de moldagem, predominantemente na direção longitudinal do prisma, de forma semelhante ao observado na moldagem horizontal.

Quanto ao processo de análise de imagem, destaca-se que a experiência adquirida evidenciou a grande importância da qualidade das fotografias para a correta e confiável caracterização da orientação das fibras. Verificou-se que a definição, a iluminação e contraste são fundamentais para possibilitar a identificação individual das fibras e minimizar interferências durante a etapa de segmentação.

Esse aspecto está em concordância com Duque e Graybeal (2017), que ressaltam que essa abordagem é bastante sensível à qualidade da imagem, bem como às capacidades e limitações da metodologia de análise de imagem empregada.

Essa questão se mostrou ainda mais crítica nos concretos com maiores teores de fibras, nos quais a maior concentração de fibras favorece os agrupamentos e sobreposições, dificultando a separação entre fibras adjacentes.

6.2.2 Correlação de imagem digital

A partir da comparação entre imagens consecutivas obtidas antes do início do carregamento, foi obtido um erro absoluto médio entre $3 \cdot 10^{-3}$ mm e $7 \cdot 10^{-3}$ mm para a medição da abertura das fissuras, valor compatível com aqueles reportados na literatura para aplicações semelhantes da técnica de correlação em elementos de concreto. Belbachir *et al.* (2018), por exemplo, reportaram erros entre $7 \cdot 10^{-3}$ a $12 \cdot 10^{-3}$ mm, enquanto Resende (2020) e Santos (2023) obtiveram erros da ordem de, respectivamente, $3 \cdot 10^{-3}$ mm e $4 \cdot 10^{-3}$ mm, evidenciando que os resultados obtidos no estudo se encontram dentro da faixa usualmente observada na literatura.

Na Tabela 6.8 são apresentados os valores médios da abertura de fissura correspondente ao pico da tensão de cisalhamento para os concretos ensaiados, enquanto a Figura 6.18 ilustra a influência do teor e da orientação das fibras sobre esse parâmetro, e a Figura 6.19 exemplifica o procedimento de medição realizado por meio da técnica.

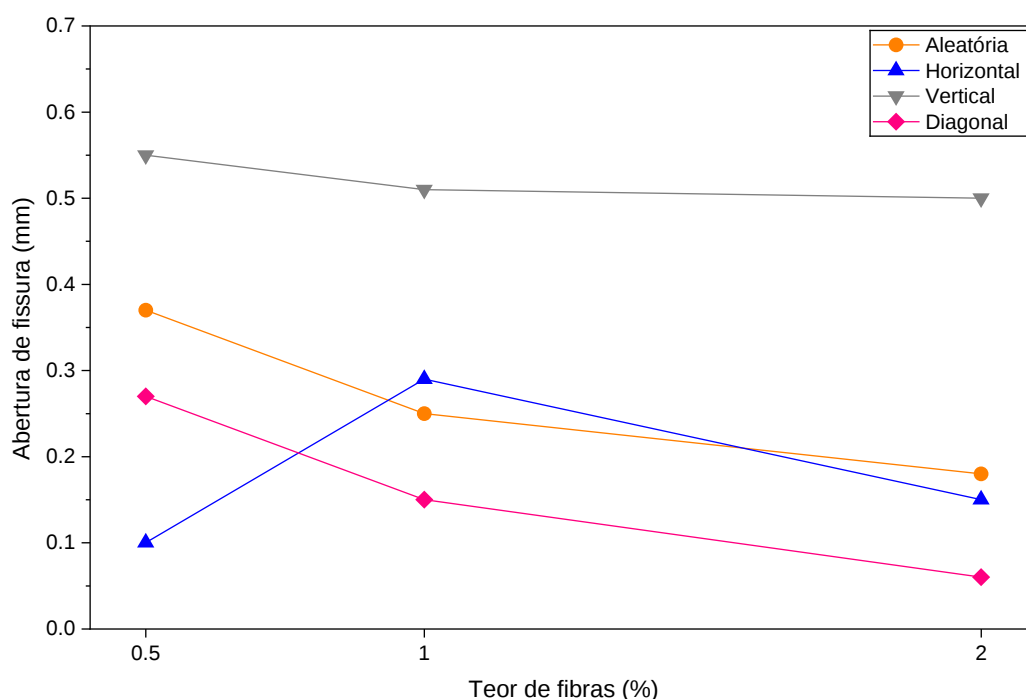
De maneira geral, observou-se que maiores teores de fibras e orientações mais favoráveis proporcionaram um maior controle da abertura da fissura diagonal responsável pela ruptura, resultando em menores valores de abertura no pico da tensão de cisalhamento. Esse comportamento indica novamente que, nessas condições, há maior eficiência das fibras na transferência de tensões através da fissura. Destaca-se, entretanto, o resultado correspondente à orientação horizontal para o UHPFRC-0,5%, que apresentou um valor discrepante em relação à tendência geral observada.

Tabela 6.8 – Abertura de fissura correspondente ao pico da tensão de cisalhamento

Concreto	Orientação	Abertura de fissura (mm)	Diferença (%)
UHPFRC-0,5%	Aleatória	0,37	Referência
	Horizontal	0,10	-73,0
	Vertical	0,55	+48,6
	Diagonal	0,27	-27,0
UHPFRC-1%	Aleatória	0,25	Referência
	Horizontal	0,29	+16,0
	Vertical	0,51	+104,0
	Diagonal	0,15	-40,0
UHPFRC-2%	Aleatória	0,18	Referência
	Horizontal	0,15	-16,7
	Vertical	0,50	+177,8
	Diagonal	0,06	-66,7

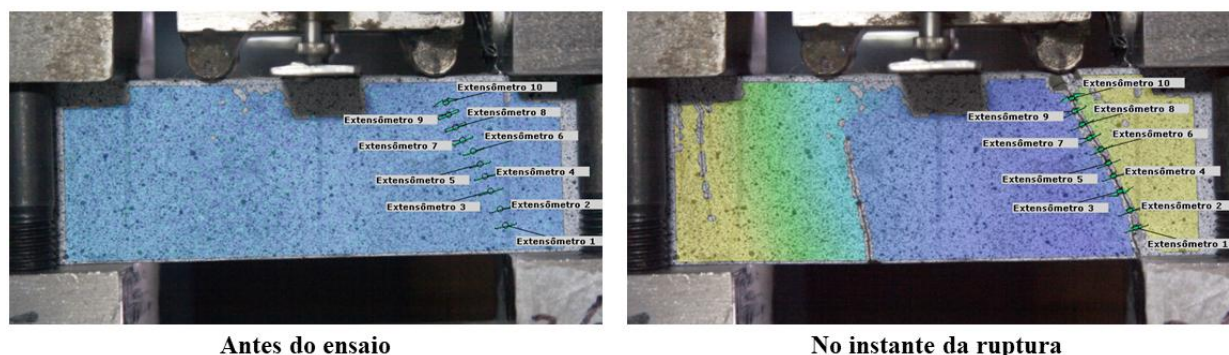
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.18 – Influência do teor e da orientação das fibras na abertura de fissura correspondente à tensão máxima de cisalhamento do UHPFRC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.19 – Determinação da abertura de fissura utilizando DIC



Antes do ensaio

No instante da ruptura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que, apesar da padronização adotada na preparação dos prismas, bem como da utilização dos mesmos equipamentos e configurações de câmera, foram observadas diferenças na qualidade do rastreamento realizado pelo programa entre os corpos de prova ensaiados.

A partir da experiência obtida durante a realização deste trabalho, verificou-se que a utilização da técnica demanda um período de aprendizado e calibração, envolvendo não apenas a preparação adequada do padrão estocástico, mas também ajustes relacionados à iluminação, posicionamento da câmera, tempo de exposição e parâmetros de aquisição. Além disso, a análise prévia dos indicadores fornecidos pelo próprio *software* mostrou-se fundamental para avaliar a qualidade da correlação e garantir resultados confiáveis.

Destaca-se ainda que a aplicação da técnica de correlação de imagem digital em ambas as faces dos prismas poderia fornecer uma representação mais completa da propagação da fissura diagonal e de sua cinemática, considerando possíveis diferenças entre as superfícies do elemento. Entretanto, devido às limitações experimentais, a análise foi realizada em apenas uma das faces do prisma.

6.2.3 Estudo e proposição de modelo com base em regressões lineares

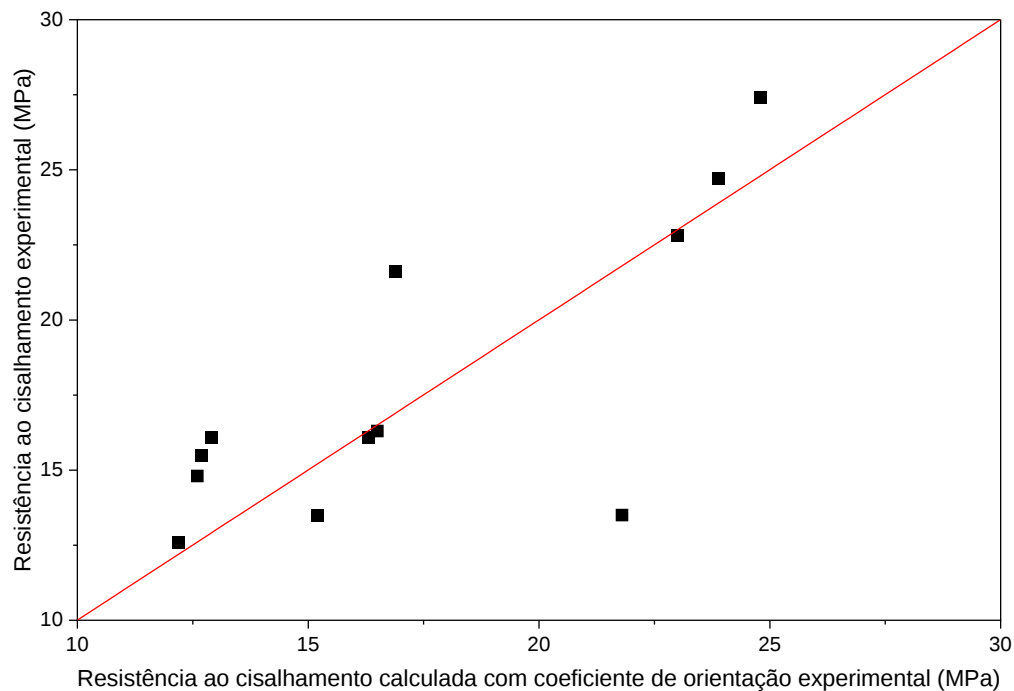
A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos para o modelo de regressão linear realizado considerando todas as orientações das fibras e utilizando o coeficiente experimental de orientação. A Figura 6.19 apresenta a comparação entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo, juntamente com a reta ideal ($y = x$), permitindo avaliar a capacidade representativa da regressão em relação aos resultados experimentais.

Tabela 6.9 – Resultados do modelo de regressão linear utilizando o coeficiente experimental de orientação das fibras ($K = 10,1$)

Concreto	Orientação	τ (MPa)	$\tau_{calculado}$ (MPa)	Erro ² (MPa ²)
UHPRFC-0,5%	Aleatória	14,8	12,6	4,78
	Horizontal	15,5	12,7	7,88
	Vertical	12,6	12,2	0,19
	Diagonal	16,1	12,9	9,95
UHPRFC-1%	Aleatória	16,1	16,3	0,06
	Horizontal	16,3	16,5	0,05
	Vertical	13,5	15,2	3,01
	Diagonal	21,6	16,9	21,99
UHPRFC-2%	Aleatória	22,8	23,0	0,03
	Horizontal	24,7	23,9	0,59
	Vertical	13,5	21,8	69,71
	Diagonal	27,4	24,8	6,98
Soma				125,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.19 – Comparação entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo de regressão linear, utilizando o coeficiente experimental de orientação das fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo apresentou um valor elevado para soma dos erros quadráticos, igual a 125,21 MPa², indicando uma capacidade limitada de representação quantitativa dos valores experimentais.

Apesar disso, o modelo foi capaz de reproduzir a tendência geral de aumento da resistência ao cisalhamento com o incremento do teor de fibras e com o alinhamento mais favorável, embora com baixa precisão.

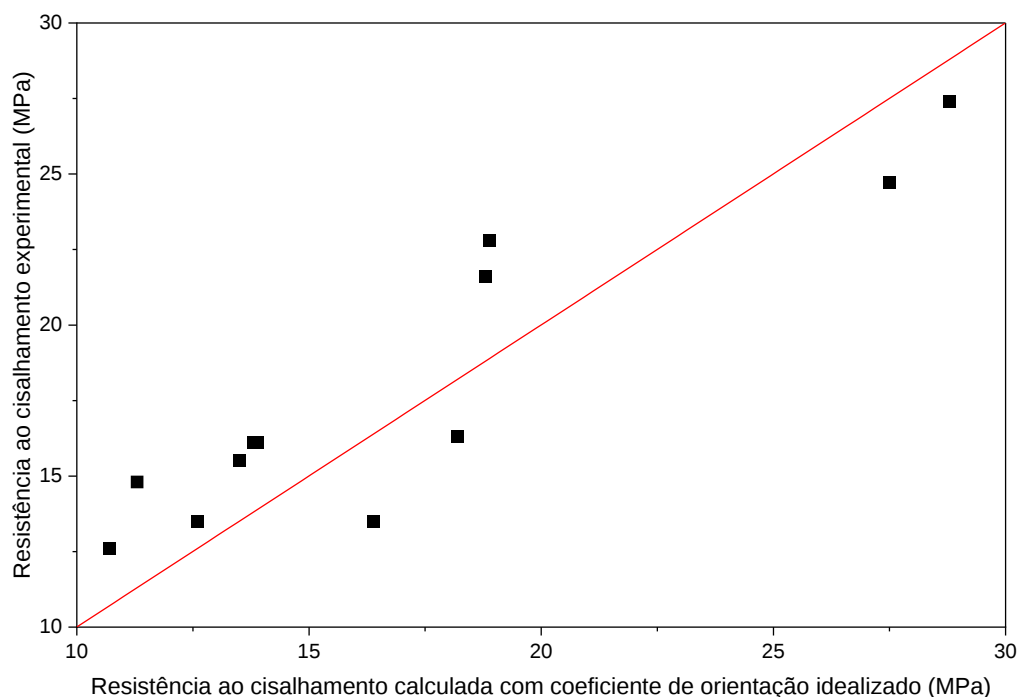
Na sequência, se apresenta na Tabela 6.10 os resultados obtidos para o modelo de regressão linear considerando novamente todas as orientações das fibras, mas se utilizando o coeficiente idealizado de orientação. A Figura 6.20 também apresenta a comparação entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo, juntamente com a reta ideal.

Tabela 6.10 – Resultados do modelo de regressão linear utilizando o coeficiente idealizado de orientação das fibras ($K = 10,1$)

Concreto	Orientação	τ (MPa)	$\tau_{\text{calculado, idealizado}}$ (MPa)	Erro ² (MPa ²)
UHPFRC-0,5%	Aleatória	14,8	11,3	12,08
	Horizontal	15,5	13,5	4,07
	Vertical	12,6	10,7	3,63
	Diagonal	16,1	13,8	5,29
UHPFRC-1%	Aleatória	16,1	13,9	5,06
	Horizontal	16,3	18,2	3,47
	Vertical	3,5	12,6	0,83
	Diagonal	21,6	18,8	7,85
UHPFRC-2%	Aleatória	22,8	18,9	15,21
	Horizontal	24,7	27,5	7,98
	Vertical	13,5	16,4	8,27
	Diagonal	27,4	28,8	1,95
Soma				75,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.20 – Comparação entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo de regressão linear, utilizando o coeficiente idealizado de orientação das fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em comparação ao modelo anterior, observou-se uma melhora significativa da qualidade do ajuste, com uma redução expressiva da soma dos erros quadráticos (75,70 MPa²), indicando uma maior concordância entre os valores experimentais e os valores estimados pela regressão linear.

Essa comparação levantou a hipótese de que determinadas condições de orientação das fibras poderiam não estar sendo adequadamente representadas pelo modelo. Assim, se buscou avaliar a influência dessas condições por meio da exclusão de algumas orientações na regressão, com o objetivo de verificar possíveis melhorias no ajuste do modelo aos resultados experimentais.

A Tabela 6.11 reúne os parâmetros obtidos em todos os modelos de regressão linear realizados para a avaliação da influência do teor e do alinhamento das fibras na resistência ao cisalhamento dos concretos analisados. Para cada modelo, são apresentados o coeficiente K e a soma dos erros quadráticos (ΣErro^2).

Tabela 6.11 – Comparação entre os modelos de regressão

Modelo	K	ΣErro² (MPa²)
Com todas as orientações e com o coeficiente experimental de orientação	10,1	125,21
Com todas as orientações e com o coeficiente idealizado de orientação	10,1	75,70
Sem a orientação aleatória e com o coeficiente experimental de orientação	10,0	120,32
Sem a orientação horizontal e com o coeficiente experimental de orientação	9,8	116,16
Sem a orientação diagonal e com o coeficiente experimental de orientação	8,9	75,34
Sem a orientação vertical e com o coeficiente experimental de orientação	11,7	37,52
Sem a orientação vertical e com o coeficiente idealizado de orientação	10,2	62,89
Com todas as orientações, com o coeficiente idealizado de orientação para a vertical e o experimental para as demais	11,2	54,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se que o modelo que desconsiderou a orientação vertical e utilizou coeficientes experimentais apresentou o melhor desempenho estatístico, com menor erro acumulado (37,52 MPa²).

Dessa forma, o modelo mostrou-se mais adequado para representar os efeitos do teor e do alinhamento das fibras na resistência ao cisalhamento dos concretos analisados, com exceção da condição de orientação vertical. Assim, este foi adotado como representação final do comportamento experimental, sendo expresso pela Equação (6.1).

$$\tau = 8,8 + 11,7 \cdot V_f \cdot \eta_\theta \quad (6.1)$$

Sendo:

- a) τ : a resistência ao cisalhamento;
- b) V_f : a fração volumétrica de fibras no concreto;
- c) η_θ : o coeficiente de orientação das fibras;

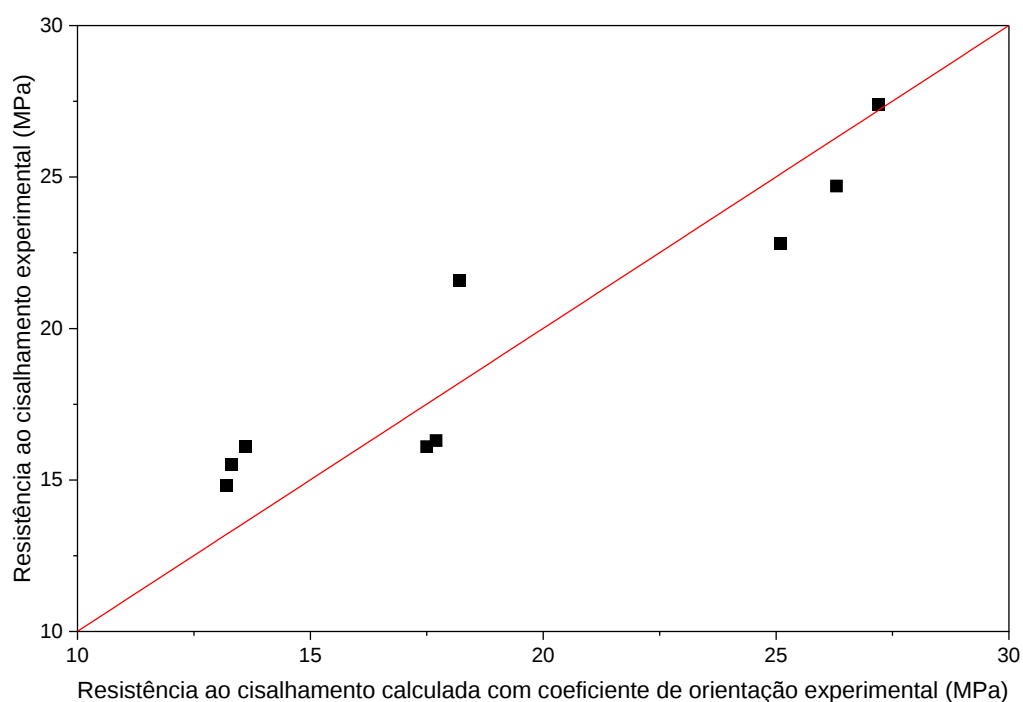
A Tabela 6.12 apresenta os parâmetros dessa regressão linear, enquanto a Figura 6.21 compara os valores experimentais e estimados pelo modelo em relação à reta ideal.

Tabela 6.12 – Resultados do modelo de regressão linear, sem a orientação vertical, utilizando o coeficiente experimental de orientação das fibras ($K = 11,7$)

Concreto	Orientação	τ (MPa)	$\tau_{calculado}$ (MPa)	Erro ² (MPa ²)
UHPRFC-0,5%	Aleatória	14,8	13,2	2,55
	Horizontal	15,5	13,3	4,86
	Diagonal	16,1	13,6	6,32
UHPRFC-1%	Aleatória	16,1	17,5	1,99
	Horizontal	16,3	17,7	1,98
	Diagonal	21,6	18,2	11,81
UHPRFC-2%	Aleatória	22,8	25,1	5,51
	Horizontal	24,7	26,3	2,45
	Diagonal	27,4	27,2	0,03
Soma				37,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.21 – Comparação entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo de regressão linear, sem a orientação vertical, utilizando o coeficiente experimental de orientação das fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que os resultados apresentados na Tabela 6.11 indicam que a condição de orientação vertical das fibras pode não ter sido adequadamente representada pelo coeficiente de orientação obtido pela análise de imagem. Esse comportamento resultou em maior dispersão entre os valores experimentais e estimados, comprometendo a capacidade preditiva da regressão.

Esse resultado reforça a discussão anteriormente apresentada acerca do coeficiente de orientação obtido para a condição de fibras lançadas na vertical, uma vez que, embora tenha sido identificada visualmente uma tendência de alinhamento vertical das fibras na região fissurada, os coeficientes experimentais apresentaram valores significativamente superiores aos idealizados.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar a influência da orientação das fibras no comportamento mecânico de elementos de UHPFRC submetidos ao cisalhamento. Para isso, foram conduzidas análises experimentais voltadas à caracterização do material, com ênfase no seu comportamento ao cisalhamento, à investigação da influência do procedimento de moldagem na orientação das fibras e à avaliação do efeito dessa orientação sobre a resposta mecânica dos elementos. Adicionalmente, analisou-se o processo de fissuração e ruptura dos elementos por meio da técnica de correlação digital de imagens.

A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dessas análises, bem como sugestões de trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa.

7.1 CONCLUSÕES

Os concretos apresentaram elevada fluidez, compatível com o UHPC/UHPFRC. O aumento do teor de fibras reduziu a trabalhabilidade das misturas, mas não influenciou significativamente o índice de vazios, que permaneceu próximo de 1%, indicando elevada compacidade e potencial de durabilidade.

No ensaio de compressão uniaxial, todos os concretos apresentaram resistências à compressão superiores a 100 MPa, atendendo aos requisitos normativos para classificação como UHPC/UHPFRC. Observou-se que a incorporação de fibras de aço exerceu pouca influência sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, sendo que os valores deste último ficaram abaixo da faixa de 45 a 55 GPa frequentemente reportada para concretos desse tipo. Entretanto, a presença das fibras foi determinante para a mudança do comportamento mecânico, conferindo maior ductilidade ao material, em função da atuação das fibras como ponte de transferência de tensões pelas fissuras.

Quanto ao ensaio de tração uniaxial, observou-se que a incorporação de 1% e 2% de fibras resultou em um aumento expressivo da resistência à tração, com comportamento do tipo *strain-hardening*, caracterizado pela formação de múltiplas microfissuras e pelo aumento da resistência após a primeira fissura. Em contrapartida, o UHPFRC-0,5% não apresentou ganhos de resistência em relação ao UHPC, apresentando um comportamento do tipo *strain-softening*, com a formação de uma única fissura e perda progressiva de resistência. Esses resultados indicam que, para teor de 0,5% fibras, os mecanismos de transferência de tensões

proporcionados pelas fibras ainda não são suficientes para compensar os defeitos introduzidos na matriz pela sua incorporação.

Quanto à resistência ao cisalhamento, observou-se que a incorporação de fibras promoveu aumentos expressivos da capacidade resistente, de forma significativamente mais intensa do que a verificada para as demais propriedades mecânicas avaliadas. Esses ganhos foram ainda maiores nas orientações mais favoráveis das fibras, isto é, naquelas mais alinhadas à direção das tensões principais de tração atuantes e, conseqüentemente, mais ortogonais ao plano principal de fissuração, evidenciando a eficiência das fibras no mecanismo de ponte de tensões através das fissuras diagonais.

Nesse contexto, observou-se ainda que diferentes combinações entre teor e orientação das fibras podem resultar em desempenhos mecânicos semelhantes, evidenciando a forte influência do alinhamento das fibras no comportamento do compósito.

A orientação diagonal apresentou os melhores desempenhos para todos os teores de fibras analisados, alcançando resistência máxima de 27,4 MPa para o UHPFRC-2%, correspondente a um aumento de 211,4% em relação ao UHPC. Esse comportamento foi corroborado pela análise de imagens, que indicou os maiores coeficientes de orientação para essa configuração, com valores entre 0,790 e 0,821, evidenciando um alinhamento mais favorável das fibras em relação à direção das tensões principais de tração e, conseqüentemente, uma orientação mais ortogonal ao plano principal de fissuração.

Em contrapartida, a orientação vertical apresentou os menores valores de resistência ao cisalhamento, associados também aos menores coeficientes de orientação, variando entre 0,637 e 0,666, indicando uma menor eficiência na transferência de tensões através das fissuras.

Já as orientações horizontal e aleatória apresentaram desempenhos intermediários, coerentes com os coeficientes de orientação também intermediários obtidos experimentalmente.

Dessa forma, a análise de imagens confirmou que os procedimentos de moldagem foram capazes de induzir diferentes padrões de alinhamento das fibras, apresentando concordância satisfatória com os resultados mecânicos observados nos ensaios de cisalhamento.

Quanto às curvas tensão-deformação de cisalhamento, os UHPFRCs apresentaram comportamento do tipo *strain-hardening* sob cisalhamento, caracterizado pela formação de múltiplas microfissuras e pelo aumento da resistência após o início da fissuração, em

contraste com o UHPC, que apresentou comportamento frágil, com ruptura abrupta e formação predominante de uma única fissura.

De forma geral, maiores teores de fibras e orientações mais favoráveis proporcionaram maiores crescimentos de tensão após a fissuração, maiores resistências e maiores deformações no pico de tensão, indicando maior eficiência na transferência de tensões e no retardamento da propagação das fissuras.

Após o pico de resistência, observou-se uma redução gradual da tensão de cisalhamento associada ao aumento da abertura das fissuras e ao arrancamento progressivo das fibras, com comportamento residual relativamente semelhante entre os diferentes concretos analisados.

Portanto, o método de ensaio adotado mostrou-se adequado para a investigação da resistência ao cisalhamento do UHPFRC, desde que sejam observados cuidados relacionados à preparação dos corpos de prova, em especial à retificação das faces para garantir o adequado contato com o dispositivo de ensaio, ao controle do torque de aperto dos parafusos por meio de torquímetro, ao alinhamento do dispositivo de ensaio e à instrumentação utilizada, fatores essenciais para assegurar a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Nessas condições, o método foi capaz de reproduzir o comportamento de *strain-hardening*, mesmo em situações de ruptura governadas pelo cisalhamento.

A partir da aplicação da técnica de correlação de imagem digital, observou-se que maiores teores de fibras combinados a orientações mais favoráveis contribuíram para um controle mais eficiente da abertura da fissura diagonal no instante da ruptura. Esse comportamento evidencia a maior capacidade de transferência de tensões pelas fibras através da fissura, refletindo em menores aberturas no pico da tensão de cisalhamento.

Entre os modelos de regressão linear avaliados, aquele que desconsiderou a orientação vertical das fibras e utilizou coeficientes experimentais apresentou o melhor desempenho estatístico, com menor erro acumulado, demonstrando melhor capacidade de representar a tendência dos resultados experimentais. A partir dessa relação, foi proposta uma equação empírica para a estimativa da resistência ao cisalhamento em função do teor de fibras e do coeficiente de orientação das fibras.

Os resultados dos modelos indicaram que a condição de orientação vertical pode não ter sido adequadamente representada pelo coeficiente de orientação obtido por análise de imagem, contribuindo para maior dispersão dos dados e redução da capacidade preditiva do modelo. Esse comportamento reforça a discussão anteriormente apresentada acerca da orientação vertical, uma vez que os seus coeficientes experimentais apresentaram valores

significativamente superiores aos idealizados, apesar da tendência visual de alinhamento das fibras nessa direção.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para o prosseguimento desta pesquisa e para trabalhos futuros incluem:

- a) realização de outros ensaios de cisalhamento, empregando diferentes geometrias de corpos de prova e metodologias experimentais, com o objetivo de avaliar a influência da orientação das fibras e possibilitar comparações entre diferentes procedimentos de ensaio e metodologias de avaliação da resistência ao cisalhamento;
- b) estudo e comparação de diferentes métodos de moldagem capazes de induzir alinhamentos preferenciais das fibras, incluindo técnicas como variação da direção de lançamento, vibração controlada, moldagem em camadas e aplicação de campos magnéticos. A partir dessas análises, recomenda-se o desenvolvimento de metodologias mais eficientes para o alinhamento das fibras em função da orientação desejada, podendo inclusive resultar na concepção de dispositivos ou sistemas aplicáveis em escala prática para controle da orientação das fibras em elementos de UHPFRC;
- c) realização de estudos numéricos do ensaio de cisalhamento desenvolvido nesta pesquisa, com o objetivo de comparar os resultados numéricos com o comportamento experimental observado, considerando diversos fenômenos relacionados ao comportamento do UHPFRC sob tração, tais como arrancamento das fibras, teor e orientação das fibras, efeito de grupo e resistência da matriz, em continuidade às linhas de investigação atualmente desenvolvidas pelo grupo de pesquisa.
- d) expansão dos estudos para elementos estruturais em escala real, como vigas, lajes e ligações, de modo a avaliar a influência da orientação das fibras no comportamento estrutural global, nos mecanismos de fissuração e na capacidade resistente dos elementos sob cisalhamento;
- e) investigação experimental da contribuição do efeito pino das fibras para o comportamento mecânico e a resistência ao cisalhamento do UHPFRC;
- f) avaliação de modelos teóricos preditivos, incorporando de forma explícita os parâmetros de orientação e teor de fibras investigados neste estudo, bem como a realização de investigações voltadas à correlação entre os coeficientes de orientação

obtidos por análise de imagens e o comportamento mecânico do UHPFRC sob cisalhamento, buscando contribuir para o desenvolvimento de parâmetros e metodologias que auxiliem na previsão do desempenho estrutural do material.

- g) investigação mais aprofundada da representatividade do coeficiente de orientação para as condições com fibras mais alinhadas ao plano de corte (perpendiculares à direção normal do plano), visando identificar eventuais limitações do procedimento de análise de imagens na caracterização da orientação das fibras.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17246**: Concreto de ultra-alto desempenho. Rio de Janeiro, 2025.
- ABRISHAMBAF, A.; PIMENTEL, M.; NUNES, S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 28-40, 2017.
- ABRISHAMBAF, A.; PIMENTEL, M.; NUNES, S. A Meso-mechanical model to simulate the tensile behaviour of ultra-high performance fibre-reinforced cementitious composites. **Composite Structures**, v. 222, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110911>.
- ACKER, P.; BEHLOUL, M. Ductal® technology: A large spectrum of properties, a wide range of applications. In: Proc. of the Int. Symp. on UHPC Kassel, Germany. 2004. p. 11-23.
- AKHNOUKH, A. K.; BUCKHALTER, C. Ultra-high-performance concrete: constituents, mechanical properties, applications and current challenges. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>.
- ALTO preço, altíssima durabilidade: o que falta para que o concreto de ultra alto desempenho (UHPC) seja mais utilizado no Brasil. Concrete Show Digital, 6 nov. 2023. Disponível em: <https://digital.concreteshow.com.br/oconcreteshow/alto-preo-altssima-durabilidade-o-que-falta-para-que-o-concreto-de-ultra-alto/>. Acesso em: 13 maio 2026.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Ultra-high-performance concrete**: an emerging technology report. Farmington Hills: ACI, 2018. (ACI 239R-18).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C469/C469M - 22**: Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken, 2022.
- BACHE, H. H. Densified cement/ultra fine particle based materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 2., 1981, Ottawa. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 1981.
- BAQERSAD, M.; SAYYAFI, E. A.; BAK, H. M. State of the art: mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Civil Engineering Journal**, v. 3, n. 3, p. 190-198, 2017.
- BARNETT, S. J *et al.* Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. **Materials and Structures**, v. 43, n. 7, p. 1009–1023, 2010.

BAYARD, O. **Approche multi-échelles du comportement mécanique des bétons à ultra hautes performances renforcés par des fibres courtes**. 2003. Thesis (Ph.D.) – École normale supérieure, Cachan, 2003.

BELBACHIR, A. *et al.* Size effect on the contribution of the aggregate interlock mechanism in reinforced concrete beams without shear reinforcement. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 24, n. 9, p. 1363–1380, 2018.

BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de correlação digital de imagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2017.

BERNIER, G.; BEHLOUL, M. Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique des BPR. In: COLLOQUE INTERNATIONAL FRANCOPHONE SUR LES BÉTONS RENFORCÉS DE FIBRES MÉTALLIQUES, 2., Toulouse, 1996. **Procédure [...]**. [S.l.:s.n.]. p. 233-240.

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; KENDALL, K. Flexural strength and porosity of cements. **Nature**, v. 289, p. 388–390, 1981.

BOULEKBACHE, B. *et al.* Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. **Construction and Building Materials**, v.126, p. 253-262, 2016.

CASAGRANDE, C. A. **Desempenho de microfibras de aço funcionalizadas com silanos em concreto de ultra-alto desempenho**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CASSOL desenvolve e executa a passarela pré-fabricada de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC). Cassol Pré-fabricados, 28 fev. 2024. Disponível em: <https://www.cassol.ind.br/blog/institucional/cassol-desenvolve-e-executa-a-passarela-pre-fabricada-de-concreto-de-ultra-alto-desempenho-uhpc>. Acesso em: 13 maio 2026.

CAVILL, B.; REBENTROST, M.; PERRY, V. Ductal® - an ultra-high performance material for resistance to blasts and impacts. **Australian Journal of Structural Engineering**, v. 7, n. 1, Jan. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/13287982.2006.11464962>.

CUNHA, V. M. C. F. **Steel fibre reinforced self compacting concrete (from micro mechanics to composite behaviour)**. 2010. Thesis (Ph.D.) – University of Minho, Portugal, 2010.

DILS, J.; BOEL, V.; SCHUTTER, G. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 455-463, 2013.

DU, J. *et al.* New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). **Composites part B: engineering**, v. 224, p. 1–31, 2021.

DUCTAL. **Material e aplicações**. 2015. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Ductal_solucoes_usos_UHPs_LafargeHolcim.pdf. Acesso em: 13 maio 2026.

DUQUE, L. F. M.; GRAYBEAL, B. Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 1-17, 2017.

FAUSTMANN, S.; KRONAU, M.; FISCHER, O. Direct tensile tests on steel fiber reinforced concrete with focus on wall effect and fiber orientation. **Materials and Structures**, v. 57, n. 185, p. 1-19, 2024.

FÁVERO, R. B. **Caracterização mecânica de material compósito cimentício avançado à base de pós reativos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2016.

FEHLING, E.; LEUTBECHER, T.; BUNJE, K. Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, Kassel, 2004. **Proceedings [...]**. Kassel, 2004. p. 327-338.

FEHLING, E. *et al.* **Ultra-high performance concrete UHPC: fundamentals, design, examples**. Berlin: Ernst, 2014.

FERREIRA, M. D. C. **Análise inversa utilizando o método dos elementos de contorno e correlação de imagens digitais**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GEHRI, N.; MATA-FALCÓN, J.; KAUFMANN, W. Refined extraction of crack characteristics in large-scale concrete experiments based on digital image correlation. **Engineering Structures**, v. 251, pt. A, Jan. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113486>.

GIDRÃO, G. M. S. **Estudo numérico e experimental do comportamento cíclico de vigas I protendidas de concreto de altíssimo desempenho**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

GIONGO, J. S. **Concreto armado: análise das resistências de seções transversais de elementos estruturais**. São Carlos: EESC/USP, 2017.

GOLEWSKI, G. L. Comparative measurements of fracture toughness combined with visual analysis of crack propagation using DIC technique of concretes based on cement matrix with a highly diversified composition. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 121, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103553>.

GRAYBEAL, B. A.; BABY, F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, n. 110-M17, p. 177-186, 2013.

HABEL, K. **Ultra-high performance fibre reinforced concretes UHPFRC: an overview**. 2004. Thesis (Ph.D.) – Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2004.

HOANG, A. L.; FEHLING, E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 790–806, 2017.

HOSINIEH, M.; AOUDÉ, H.; COOK, W. D.; MITCHELL, D. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under pure axial loading. **Engineering Structures**, v. 99, p. 388-401, 2015.

HU, A. *et al.* Tensile characteristics of ultrahigh-performance concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, n. 6, p. 314–324, 2017.

HUANG, H.; GAO, X.; TENG, L. Fiber alignment and its effect on mechanical properties of UHPC: an overview. **Construction and Building Materials**, v. 296, Aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123741>.

HUNG, C.; LEE, H.; CHAN, S. Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes. **Composites Part B**, v. 158, p. 269-278, 2019.

HUO, L. *et al.* Constitutive model of steel fiber reinforced concrete by coupling the fiber inclining and spacing effect. **Construction and Building Materials**, v. 280, n. 4, Apr. 2021. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.122423](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122423).

INTERNATIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION SOCIETY. **A Good practices guide for digital image correlation** – standardization, good practices, and uncertainty quantification committee. 2018.

KANG, S.; KIM, J. The Relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC). **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1001-1014, 2011.

KIM, J.; YOO, D. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, p. 213-223, 2019.

KIMURA, A. E. *et al.* **Estruturas de concreto armado**. São Paulo: IBRACON, 2022. v.1.

KRAHL, P. A. **Instabilidade lateral de vigas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras com ênfase em fases transitórias**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

KRAHL, P.; GIDRÃO, G.; CARRAZEDO, R. Compressive behavior of UHPFRC under quasi-static and seismic strain rates considering the effect of fiber content. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 633-644, 2018.

LARSEN, I. L.; THORSTENSEN, R. T. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119459, 2020.

LEE, Y.; KANG, S.; KIM, J. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2030-2041, 2010.

LI, V. C.; WANG, Y.; BACKER, S. Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. **Composites**, v. 21, n. 2, p. 132-140, 1990.

LIANG, L. *et al.* Experimental and theoretical study on the shear behavior of CFRP bar-reinforced UHPFRC beams considering orientation and volume fraction of steel fibers. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 24, n. 1, p. 1-18, 2024.

MCCORMICK, N.; LORD, J. Digital image correlation for structural measurements. **Nuclear Engineering International**, v. 57, n. 693, p. 28–31, 2012.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENG, W. N.; KHAYAT, K. H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, Apr. 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002212.

MU, R. *et al.* Effect of the orientation of steel fiber on the strength of ultra-high-performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 406, Nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133431>.

NGO, T. T. *et al.* Shear resistance of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 246-257, 2017.

OLIVEIRA, C. O. **Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

OSORIO, E.; BAIRÁN, J. M.; MARÍ, A. R. Lateral behavior of concrete under uniaxial compressive cyclic loading. **Materials and Structures**, v. 46, p. 709-724, 2013.

OTTONI, T. P. **Correlação digital de imagens: perspectivas para a análise da deformabilidade de peças estruturais de concreto**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

PÁEZ SEPÚLVEDA, D. Y. **Simulação numérica em mesoescala do comportamento à flexão do UHPFRC: influência da razão de aspecto, fração volumétrica e orientação das fibras**. 2025. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

PARK, S. H. *et al.* Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 172-184, 2012.

REBENTROST, M.; WIGHT, G. Experience and applications of ultra high performance concrete in Asia. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE*, 2., 2008, Kassel. **Proceedings [...]**. Kassel: Kassel University, 2008. p. 19-30.

RESENDE, T. L. **Contribuição dos mecanismos resistentes à força cortante em vigas de concreto armado sem e com fibras de aço**. 2020. 253 p. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

RIBEIRO, P. O. **Contribuições para um modelo constitutivo para o concreto de altíssimo desempenho com fibras**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

RIBEIRO, P. O.; KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R. Calibration of group effect parameters through genetic algorithms for micromechanical modeling of UHPFRC. **Composite Structures**, v. 280, p. 1–14, 2022

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.

ROSAS, J. D. L. **Implementação de um sistema para medição das deformações no plano pela técnica de correlação digital de imagem**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Porto, 2019.

ROY, D.; GOUDA, G.; BOBROWSKY, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 2, n. 3, p. 349–366, 1972.

SANTOS, A. H. A. *et al.* Estudo do efeito de escala utilizando correlação de imagem digital. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 3, p. 323-340, 2015.

SANTOS, L. C. D. **Análise do comportamento à força cortante do concreto reforçado com fibras de aço**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

SCHMIDT, M.; FEHLING, E. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH- AND HIGH-PERFORMANCE-CONCRETE*, 7., 2005, Washington, DC. **Proceedings [...]**. Washington, DC.: ACI, 2005.

SDS. 2026. Disponível em: <https://www.cnsteelfiber.com/>. Acesso em: 15 maio 2026.

SHAH, A. A.; RIBAKOV, Y. Recent trends in steel fibered high-strength concrete. **Materials & Design**, v. 32, n. 8-9, p. 4122-4151, 2011.

SHI, C. *et al.* A Review on ultra high performance concrete: part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741-751, 2015.

SILVA, A. R. **Avaliação da influência do confinamento e da adição de fibras metálicas na resistência e ductilidade de pilares curtos produzidos com concreto de ultra alto desempenho.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

SKARŽYŃSKI, Ł.; SYROKA, E.; TEJCHMAN, J. Measurements and calculations of the width of the fracture process zones on the surface of notched concrete beams. **Strain**, v. 47, n. s1, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00605.x>.

SMRKIC, M. F.; KOSCAK, J.; DAMJANOVIC, D. Application of 2D digital image correlation for displacement and crack width measurement on RC elements. *Građevinar* 2018, 70, 771–781.

SOBUZ, H. R. *et al.* Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 251–261, 2016.

SONG, Q. *et al.* Key parameters in optimizing fibres orientation and distribution for Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 17-27, 2018.

SPASOJEVIĆ, A. **Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design.** 2008. Thèse (Docteur) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2008.

SUN, W. *et al.* Numerical and digital image correlation study of the flexural behavior of prestressed ultra-high-performance concrete beams made from locally available materials. **PCI Journal**, v. 69, n. 1, p. 22-39, 2024.

ŠVEC, O. *et al.* Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. **Cement and Concrete Composites**, v. 50, p. 60–72, 2014.

TAMBUSAY, A.; SURYANTO, B.; SUPROBO, P. Visualization of shear cracks in a reinforced concrete beam using the digital image correlation. **International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology**, v. 8, n. 2, 2018. DOI: 10.18517/ijaseit.8.2.4847.

TOUTLEMOND, F. *et al.* Twenty years-long French experience in UHPFRC application and paths opened from the completion of the standards for UHPFRC. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UHPC MATERIALS AND STRUCTURES*, 2., 2018, Fuzhou. **Proceedings [...]**. Fuzhou: [s.n.], 2018. (UHPFRC2018-CHINA).

TORREGROSA, E. C. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties.** 2013. Thesis (PhD) – Universitat Politècnica de València, València, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. *In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. 2 v., Cap. 36, p. 1283-1325.

ULTRA high performance concrete se apresenta como ótima opção para obras brasileiras. Concrete Show Digital, 4 set. 2024. Disponível em: <https://digital.concreteshow.com.br/produtos/ultra-high-performance-concrete-se-apresenta-como-tima-opo-para-obras-brasileiras/>. Acesso em: 13 maio 2026.

VANDERLEI, R. D. *et al.* **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VOO, Y. L. *et al.* Application of ultra high performance fiber reinforced concrete – the Malaysia perspective. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**, v. 3, n. 1, p. 26-44, 2012.

WANG, D. *et al.* A Review on ultra high performance concrete: part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 368-377, 2015.

WELTER, N. V. C. **Estudo do reforço estrutural com o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras.** 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2021.

WEN, C. *et al.* Influence of fibers on the mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete: a review. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 1–32, 2022.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E. Fracture energy of UHP-FRC under direct tensile loading. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, 2010, Seoul. **Proceedings [...]**. Seoul: Korea Concrete Institute, 2010. p. 65-72.

WILLE, K. *et al.* Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1825-1838, 2014a.

WILLE, K. *et al.* Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. **Cement & Concrete Composites**, v. 48, p. 53-66, 2014b.

WU, P. *et al.* Investigation of shear performance of UHPC by direct shear tests. **Engineering Structures**, v. 183, p. 780-790, 2019.

WU, Z. *et al.* Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 103, p. 8-14, 2016.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 97-109, 2016.

YANG, J. *et al.* Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: a review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition), v. 9, n. 3, p. 363-387, 2022.

YOO, D.; LEE, J.; YOON, Y. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. **Composite Structures**, v. 106, p. 742–753, 2013.

YOO, D.; KANG, S.; YOON, Y. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. **Construction and Building Materials**, v.64, p.67-81, 2014.

YOO, D. *et al.* Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites Part B: Engineering*, v. 58, p. 122–133, 2014.

YOO, D. *et al.* Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different fiber lengths and placement methods. **Cement and Concrete Composites**, v. 63, p. 51–66, 2015.

YOO, D. Y.; KIM, S. W.; PARK, J. J. Comparative flexural behavior of ultra-high performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 219–229, 2017.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29-39, 2014.

YUDENFREUND, M. *et al.* Hardened portland cement pastes of low porosity. **Cement and Concrete Research**, v. 3, p. 279–293, 1972.

ZHANG, H. *et al.* A Discrete-continuum coupled finite element modelling approach for fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 106, p. 130-143, 2018.

ZHOU, B.; UCHIDA, Y. Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 164-177, 2017.

ZHOU, B.; UCHIDA, Y. Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking behaviour in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 66-75, 2017.

ZHOU, Z.; QIAO, P. Tensile behavior of ultra-high performance concrete: analytical model and experimental validation. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 842–851, 2019.

