

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUILHERME DURIGON COCCO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE TIRANTES PRODUZIDOS COM
CONCRETO AUTOADENSÁVEL FIBROSO MOLDADOS NA HORIZONTAL E
VERTICAL**

**Alegrete
2020**

GUILHERME DURIGON COCCO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE TIRANTES PRODUZIDOS COM
CONCRETO AUTOADENSÁVEL FIBROSO MOLDADOS NA HORIZONTAL E
VERTICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

Coorientador: Eng. Me. Pedro H. O. Jucá

**Alegrete
2020**

GUILHERME DURIGON COCCO

**ESTUDO DA RESISTENCIA À TRAÇÃO DE TIRANTES PRODUZIDOS COM
CONCRETO AUTOADENSÁVEL FIBROSO MOLDADOS NA HORIZONTAL E
VERTICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 03 de dezembro de
2020.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA

Eng. Me. Pedro H. Omena Jucá
Coorientador
UNIPAMPA

Profa. Dra. Fernanda Bianchi da Costa
UNIPAMPA

Eng. Camila Vargas Cardoso
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à Milton, Dirlei e Otávio.

AGRADECIMENTOS

Especialmente, a minha família, fonte de toda força e sabedoria. Ao meu pai, Milton, por ser meu exemplo mais fiel de honestidade e humildade. A minha mãe, Dirlei, por ser meu reduto e fonte de força nas horas mais difíceis. Ao meu melhor amigo e irmão, Otávio, pelo carinho e ser motivo de inspiração para seguir em frente.

Ao vovô Olavo, pela alegria, afeto e amor sempre disponíveis. Aos meus padrinhos: Derli, Albertina, Reges e Ronise, pelos conselhos e aprendizado. Aos demais tios e tias que tanto amo.

Ao meu primeiro irmão, Gabriel, pelo companheirismo incansável.

Ao amigo e professor Ederli Marangon, pela orientação neste trabalho e, não menos importante, pelos quatro anos de parceria e aprendizado, do qual serei eternamente grato.

Ao amigo e Coorientador Pedro H. O. Jucá, pela orientação e ajuda sem medida de esforços.

Ao amigo e professor Luis Eduardo Kostascki pela ajuda e orientação durante o curso.

Ao amigo Felipe Kulzer, pelo companheirismo, amizade e colaboração especial a este trabalho.

Aos amigos(as) Leonardo Berta, Thiago Luchetta, Fabiano Garcia, Bruno Wosniak e Cibeli Scherer por estarem sempre perto e à postos.

Aos amigos e colegas de iniciação científica: Ana Carolina Capato, Camila Cardoso, Mayara Delonzek, Nadine Cortese, Leonardo Mendonça e Rubens Meichtry e aos colegas de pesquisa: Matthews, Nadine F., Raquel, Rosiéli, Danieli D., Kevin, Gustavo e Letícia.

Aos amigos(as) e colegas de UNIPAMPA, principalmente: Bárbara, Aline, Henrique, Gian, Daniel, Mateus, Algacir, Túlio, Arilson, Carolina P., Diovana, Pedro, Priscila, Felipe K. e Ismael.

A professora Fernanda Bianchi pela avaliação e aconselhamento deste trabalho, e ao Grupo MAEC e demais professores, pelo conhecimento e ajuda.

As empresas Iccila, RITT, Builder, Arcelor Mital, Hormigon e Pedra Rosada, pelos materiais e insumos necessários para realização deste trabalho.

A todos, lhes dedico: *“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes” – Sr. Isaac Newton.*

*“O mundo é um lugar perigoso de se
viver, não por causa daqueles que
fazem o mal, mas sim por causa
daqueles que observam e deixam o
mal acontecer”*

- Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do sentido de moldagem horizontal e vertical no mecanismo de transferência de tensões em tirantes de concreto autoadensável com fibras de aço através de ensaios de tração uniaxial. Deste modo, foram realizados ensaios de caracterização, reológica por espalhamento com cone de Abrams, Anel “J”, Funil “V” e caixa “L”. A resistência à compressão, foi avaliada no estado endurecido. Ainda, no estado endurecido, foram ensaiados tirantes à tração, moldados com concreto autoadensável fibroso de dimensões 150x150x750mm, com barras de aço de 20 e 25mm, centralizadas em sua seção transversal, moldados em dois sentidos: horizontal e vertical. O processo de fissuração foi avaliado através do uso de correlação digital de imagens e a dispersão interna das fibras por tomografia computadorizada. Os resultados reológicos apontaram valores satisfatórios na qualidade da mistura para caracterizá-la como autoadensável, que apresentou valores de espalhamento por cone de Abrams maiores que 550mm, viscosidade plástica VS2 e índice de estabilidade visual IEV0. Os resultados mecânicos à compressão indicam que, quando na presença das fibras, a matriz teve ganhos de 14,84% na resistência e redução de seu módulo de elasticidade. A análise dos tirantes em estado endurecido apontou a influência do sentido de moldagem no modo de fratura das amostras. Quando moldado na horizontal, os tirantes mostraram um enrijecimento devido a orientação das fibras por efeito parede no escoamento da mistura durante o processo de moldagem das amostras. No grupo vertical, os tirantes apresentaram fissuras transversais de forma simultânea nas faces frontal e posterior, o que é resultado da aleatoriedade das fibras e da menor presença destas em posição favorável ao sentido do carregamento.

Palavras-chave: concreto autoadensável, concreto com fibras, anisotropia, sentido de moldagem, tomografia de concreto.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the influence of horizontal and vertical casting direction on the stress transfer mechanism in self-compacting fiber concrete specimens through uniaxial tension tests and the matrix cracking process. Thus, rheological characterization tests by Abrams cone spreading, Ring "J", Funnel "V" and box "L" were performed. In hardened state, cylindrical samples were evaluated for compression. The self-compacting Fiber Concrete Rods of dimensions 150x150x750mm with 20 and 25mm steel bars, centered on their cross section, were cast in two directions: horizontal and vertical, and evaluated by uniaxial tension tests. The cracking process was evaluated through the use of digital correlation of images and the dispersion and orientation of fibers by Computed tomography. The rheological results indicated satisfactory values in the quality of the mixture to characterize it as an self-compacting, presenting Abrams cone spreading values greater than 550mm, VS2 plastic viscosity and IEV0 visual stability index. The mechanical compression tests indicate that, when in the presence of fibers, the matrix had gains of 14.84% in the resistance and reduction of its longitudinal elasticity module. The mechanical results of the rods pointed influence of the casting direction in the fracture mode of the samples. When cast horizontally, the rods showed stiffening stress due to the orientation of the fibers by wall effect during the flow of the mixture in the fresh state into the form. In the vertical group, the rods showed transverse cracks simultaneously on the front and back faces, which is a result of the randomness of the fibers and the lower presence of fibers in a favorable position to the direction of loading.

Keywords: Self-compacting concrete; fiber concrete; anisotropy; casting directions of concrete; concrete tomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva Tensão de tração-deformação, para concretos com elevados e baixos volumes de fibras.....	22
Figura 2 – Processo de fissuração do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras de aço.....	23
Figura 3 – Comportamento de espécimes de CAAF submetidos a ensaios de tração na flexão.....	24
Figura 4 – Resposta a ensaios de tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras (FRCC) e compósitos cimentícios de alta performance (HPFRCC)	25
Figura 5 - Processo de fissuração com alinhamento das fibras	26
Figura 6 - Imagens da tomografia computadorizada por raios-x. a) Sem fibras b) Microfibras c) Macro fibras d) Uso de fibras na forma mista.	27
Figura 7 - Fissuração por tração	29
Figura 8 - Comportamento típico do compósito para ensaios de enrijecimento da tensão de tração.....	30
Figura 9 – Interface aço-concreto pós ensaio de tração direta.	31
Figura 10 – Distribuição das tensões de tração direta no concreto reforçado com barras de aço.	32
Figura 11 – Deformações da armadura em tirantes de concreto armado simples. ...	33
Figura 12 – Deformações da armadura em tirantes de concreto armado de alto desempenho.....	33
Figura 13 - Seção transversal típica de um concreto reforçado com fibras nas proximidades da fôrma.....	36
Figura 14 - Simulação da orientação das fibras após deslizamento da mistura.....	37
Figura 15 - Ensaio de tração na flexão. a) superfície mais lisa b) superfície mais rugosa	37
Figura 16 - Superfície do concreto após ensaio de arrancamento em barras localizadas na parte superior do elemento. a) Lançamento convencional b) Lançamento inverso.	40
Figura 17 - Formação da camada porosa sob a armação em ensaio de arrancamento	40
Figura 18 – Efeito do diâmetro da barra na capacidade mecânica do tirante.	41
Figura 19 – Efeito do reforço de fibra de aço no comportamento estrutural dos blocos de concreto reforçado.	42
Figura 20 – Desenvolvimento da deformação das barras de aço e blocos de concreto para ensaios de tração.	43
Figura 21 - Tensão x Deformação em tirantes submetidos a ensaios de tração. a) Concreto armado simples b) Concreto armado de alto desempenho.	43
Figura 22 - Curva granulométrica do agregado graúdo e miúdo	46
Figura 23 – Agente modificador de viscosidade (VMA).....	47
Figura 24 - Fibra de aço DRAMIX 65/35	48
Figura 25 – Ensaio de tração pura na fibra de aço – DRAMIX 3D 65/35 BG.	48
Figura 26 – Ensaio de tração direta na barra de aço.	49
Figura 27 - Curva média de força x deformação das barras de 20 mm e 25 mm.....	50
Figura 28 - Características geométricas das nervuras da barra de 20 mm (a) e 25 mm (b).	51
Figura 29 - Verificação do espalhamento com Cone de Abrams	53
Figura 30 - Índice de estabilidade visual da mistura pelo espalhamento em fluxo livre	53

Figura 31 – Esquema padrão do Funil “V” (medidas em mm).....	54
Figura 32 – Funil “V” utilizado no trabalho.....	54
Figura 33 – Ensaio de “habilidade passante” por Anel “J”.....	55
Figura 34 – Ensaio de Caixa “L”,.....	56
Figura 35 – Corpos de prova cilíndrico. a) Produção das amostras. b) instrumentação para ensaio de compressão axial.....	57
Figura 36 – Procedimento de moldagem. a) horizontal b) vertical	58
Figura 37 – Personalização das amostras prismáticas para análise em software. ...	58
Figura 38 – Detalhe dos strain gages.....	59
Figura 39 – Ilustração da instrumentação do ensaio de tirante.....	60
Figura 40 – Layout da instrumentação dos LVDT’s junto a barra. a) Ilustração b) Aspecto real.	61
Figura 41 – Procedimento de ensaio para amostras submetidas a tração direta.....	61
Figura 42 - Identificação das faces para o mapa de fissuras	62
Figura 43 - Tomógrafo Siemens SOMATOM Scope	63
Figura 44 - Imagens da tomografia computadorizada realizada no espécime	63
Figura 45 - Aparência do espalhamento	65
Figura 46 - Curvas típicas Tensão x Deformação das misturas.....	67
Figura 47 - Modo de fratura em ensaio de compressão. a) Sem fibras b) Com fibras	67
Figura 48 - Principais pontos típicos na análise dos tirantes.....	68
Figura 49 - Curvas típicas força (kN) x Deformação (%) para os tirantes com barra de 20mm	69
Figura 50 - Análise com DIC da curva típica do grupo C2.H.20.....	71
Figura 51 - Campo de deformação no 7º ponto de análise do grupo C2.H.20	71
Figura 52 - Análise com DIC da curva típica do grupo C2.V.20	72
Figura 53 - Campo de deformação no 7º ponto de análise do grupo C2.V.20	73
Figura 54 - Curvas típicas de deformação x tempo para os grupos C20H (a) e C20V (b).....	73
Figura 55 - Mapa de fissuras do grupo C2.V.20.....	74
Figura 56 - Ruptura por aderência na extremidade da amostra C2.V.20	75
Figura 57 - Mapa de fissuras do grupo C2.H.20.....	75
Figura 58 - estricção da barra no grupo C2.H.20	76
Figura 59 - Curvas típicas força (kN) x Deformação (%) para os tirantes com barra de 20mm	77
Figura 60 - Análise com DIC da curva típica do grupo C2.H.25.....	78
Figura 61 - Campo de deformação no 4º ponto de análise do grupo C2.H.25	79
Figura 62 - Análise com DIC da curva típica do grupo C2.V.25	80
Figura 63 - Campo de deformação no 7º ponto de análise do grupo C2.V.25	80
Figura 64 - Curvas típicas de deformação x tempo para os grupos C2.H.25 e C2.V.25	81
Figura 65 - Mapa de fissuras do grupo C2.H.25.....	82
Figura 66 - Estricção da barra no grupo C2.H.25.....	82
Figura 67 - Comportamento elástico do tirante do grupo C2.H.25, após finalização do ensaio.....	83
Figura 68 - Fissura horizontal do tirante do grupo C2.H.25.....	83
Figura 69 - Mapa de fissuras do grupo C2.V.25.....	84
Figura 70 - Vazios na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical	85

Figura 71 - Distribuição das fibras na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical	85
Figura 72 - Distribuição das fibras na seção longitudinal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical	86
Figura 73 - Zonas de orientação das fibras no tirante	87
Figura 74 - Imagem de tomografia da dispersão das fibras no tirante horizontal com barra de 20mm	88
Figura 75 - Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.20 (a) e C2.V.20 (b).....	89
Figura 76 - Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.25 (a) e C2.V.25 (b).....	90
Figura 77 - Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.20	104
Figura 78 - Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.20	104
Figura 79 - Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.25	105
Figura 80 - Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.25	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de influência no comportamento mecânico de aderência entre concreto e barra de aço	41
Tabela 2 – Caracterização da Sílica da casca de arroz.	45
Tabela 3 – Caracterização do agregado graúdo.	46
Tabela 4 - Força, deslocamento e tensões de escoamento e máximas à tração, e módulo de elasticidade das barras de aço de 20 mm e 25 mm	50
Tabela 5 – Composição do traço da mistura cimentícia.....	51
Tabela 6 – Quantitativo das amostras produzidas.	52
Tabela 7 - Resultado do espalhamento da mistura	64
Tabela 8 - Resultado de fluidez com funil "V"	65
Tabela 9 - Resultado de espalhamento em anel "J"	65
Tabela 10 - Resultado do ensaio de caixa "L"	66
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias	66
Tabela 12 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo horizontal com barra de 20mm	69
Tabela 13 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo vertical com barra de 20mm	69
Tabela 14 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo horizontal com barra de 25mm	76
Tabela 15 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo vertical com barra de 25mm	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAA – Concreto autoadensável;

CC – Concreto convencional;

CAAF – Concreto autoadensável fibroso;

SHCC – “Strain-Hardening Cementitious Composites”;

ECC – “Engineered Cement Composite”;

FRCC – “Fiber Reinforced Cementitious Composites”;

HPFRCC – “High-performance fiber-reinforced cementitious composites”;

R/C – “Reinforced Concrete”;

R/ECC – “Reinforced Engineered Cement Composite”;

FRC – “Fiber reinforced concrete”;

ELS – Estado limite de serviço;

LVDT’s – “Linear Variable Differential Transformer”;

CP-V ARI – Cimento pozolânico de alta resistência inicial;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR – Norma Técnica Brasileira;

RS – Rio Grande do Sul;

VMA – “Viscosity Modifier Agent”;

SP – Superplastificante;

ϕ - Diâmetro;

FPS – frames por segundo;

P – “Pixels”;

ρ – Taxa de armadura;

DIC – Correlação digital de imagem.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral.....	17
1.2	Objetivos específicos	17
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Concreto Autoadensável (CAA).....	18
2.1.1	Materiais constituintes	19
2.2	Influência da adição de fibras de aço à matriz (CAAF).....	20
2.3	Interação barra-concreto.....	28
2.3.1	Análise global de ruptura	28
2.3.2	Fatores de influência no comportamento mecânico da interface	33
3	METODOLOGIA	44
3.1	Materiais	44
3.1.1	Elementos cimentícios	44
3.1.2	Agregados.....	45
3.1.3	Aditivos químicos.....	47
3.1.4	Fibras de aço	47
3.1.5	Barra de aço.....	48
3.2	Produção e Métodos de Ensaio.....	51
3.2.1	Ensaio Reológicos.....	53
3.2.1.1	Espalhamento.....	53
3.2.1.2	Funil “V”	54
3.2.1.3	Anel “J”	55
3.2.1.4	Caixa “L”	55
3.2.2	Ensaio Mecânicos.....	56
3.2.2.1	Compressão Axial	56
3.2.2.2	Ensaio de tração direta em tirante	57
3.2.2.2.1	Produção das amostras	57
3.2.2.2.2	Instrumentação dos tirantes	59
3.2.2.2.3	Tomografia Computadorizada.....	62
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
4.1	Propriedades reológicas.....	64
4.1.1	Espalhamento	64
4.1.2	Viscosidade aparente com funil “V”	65
4.1.3	Habilidade passante através de caixa “L”	65
4.1.4	Habilidade passante em anel “J”	66
4.2	Propriedades mecânicas: comportamento à compressão.....	66
4.3	Propriedades mecânicas: tração com barra de 20mm	68
4.3.1	Análise das deformações.....	70
4.3.2	Interação barra de aço-matriz	73

4.3.3	Modo de fratura.....	74
4.4	Propriedades mecânicas: tração com barra de 25mm.....	76
4.4.1	Análise das deformações.....	77
4.4.2	Interação barra de aço – matriz	81
4.4.3	Modo de fratura.....	81
4.5	Tomografia computadorizada.....	84
5	CONCLUSÕES	91
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
7	REFERÊNCIAS.....	94
	ANEXO A.....	104

1 INTRODUÇÃO

Com a demanda por novas tecnologias e processos construtivos simplificados, alternativas de materiais para uso estrutural tem, cada vez mais, chamado atenção de pesquisadores e autoridades do âmbito científico. Dentro deste universo, destacam-se estruturas variadas que fazem o uso de elementos a base de cimento Portland devido sua versatilidade e relativa facilidade de aplicação em situações de usos distintos, levando a indústria e o consumidor final a apostarem em produtos com rápida execução, relação custo/benefício apropriada e alta durabilidade.

Em consequência das dificuldades de execução e compactação que eram necessárias em situações complexas de arquitetura, Okamura desenvolveu em 1986 o concreto autoadensável (CAA) (OKAMURA, OUCHI, 2003; SILVA, 2016), um novo tipo de concreto que se caracterizava por ser facilmente lançado e adensado, ter alto desempenho mecânico, bem como, por apresentar a fluidez e viscosidade necessárias mesmo em estruturas densamente armadas (CALADO, 2016).

As vantagens do CAA em comparação ao concreto comum (CC) se resumem principalmente ao estado fresco da mistura, mantendo suas propriedades mecânicas no estado endurecido em equivalência ou ligeiramente superior. Contudo, a mudança no tipo de concreto não resolve problemas ocasionados pelas solicitações de tração, onde se mantém comportando de maneira frágil.

Assim, o concreto sozinho tem sua utilização comprometida e se faz necessário associa-lo a um material que seja mais deformável e resistente aos esforços de tração, sendo mais comum o aço, posicionado nos locais estratégicos onde ocorre tração nos elementos estruturais (CARVALHO, FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O concreto armado se baseia na hipótese em que as barras de aço e a mistura trabalham de forma conjunta no regime elástico e que a avaliação de alterações no processo de deformação é fator inerente ao controle de fissuras e deformações (DYBEL, KUCHARSKA, 2019). Contudo, apesar de ser comumente considerada uma perfeita interação/ligação barra-concreto, esta situação é de difícil obtenção (KIM, YUN, 2014; HUANG et al, 2016). Fatores como relação água/cimento, tempo de hidratação, exsudação interna e orientação do lançamento

e barras de armadura, são fatores importantes para quantificar/determinar as propriedades de interface aço-concreto (HORNE, RICHARDSON, BRYDSON, 2007).

O uso de fibras tem-se demonstrado um importante aliado na alteração das propriedades mecânicas de tração, pré e pós primeira fissura, através da dissipação de tensões concentradas, manutenção da queda de tensões residuais e na melhora da adesão aço-concreto em estruturas de concreto armado (FIGUEIREDO, 2011; MARANGON, 2011; HUANG et al, 2016; CHU, KWAN, 2019). A taxa de fluxo da concretagem, o efeito parede e a geometria das fibras podem resultar em propriedades distintas de desempenho e heterogeneidade da mistura ao longo do elemento estrutural (ZERBINO, 2012; ŠVEC *et al.*, 2014), sendo o domínio da técnica do uso de fibras uma maneira econômica e viável de alcançar melhores resultados mecânicos mesmo em baixos volumes de incorporação (FERRARA, OZYURT e DI PRISCO, 2011).

Portanto, melhorar a interface aço-concreto é de vital importância sob condições de manutenção, durabilidade e segurança da estrutura, de modo que estas controlam a fissuração, retardam a degradação da ligação e dissipam com maior facilidade a energia sob condições de impacto (R. ELIGEHAUSEN, POPOV, BERTERO, 1982). Logo, determinar e estudar a influência das variações do processo construtivo nas propriedades de interação/ligação do aço com o concreto autoadensável fibroso (CAAF) torna o uso deste material mais racionalizado e eficiente, expande seu potencial e viabiliza sua aplicação em obras futuras da construção civil.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do sentido de moldagem no comportamento mecânico da interface barra de aço-concreto de tirantes de concreto autoadensável fibroso;

1.2 Objetivos específicos

- Analisar as propriedades do CAAF em estado fresco;
- Analisar a influência da presença de fibras de aço na superfície de transferência de tensões entre a armadura e o concreto;
- Investigar a anisotropia do concreto variando o sentido de moldagem e a taxa de armadura do tirante;
- Avaliar o processo de fissuração por correlação de imagens;

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto Autoadensável (CAA)

O concreto auto adensável (CAA) foi desenvolvido por Okamura em 1986, em consequência das dificuldades relacionadas a execução do concreto convencional devido à baixa disponibilidade de pessoal, dado que, para este não tivesse sua vida útil prejudicada, fazia-se necessário mão de obra qualificada (OKAMURA, OUCHI, 2003; SILVA, 2016).

Este concreto se caracteriza pela sua facilidade de moldagem sob ação gravitacional, pelo alto desempenho mecânico e por apresentar a fluidez e viscosidade necessárias para que não ocorra segregação, preenchendo totalmente a forma e atingindo total compactação mesmo em estruturas densamente armadas (BARROS, 2009; GUETTI, 2012; KHALOO et al, 2014; CALADO, 2016; PELISSER, VIEIRA, BERNARDIN, 2018). Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), as principais propriedades do CAA são a trabalhabilidade e estabilidade, sendo a dosagem e proporção otimizada dos materiais constituintes de vital importância para a qualidade da mistura, proporcionando homogeneidade e desempenho almejados.

Um correto controle de qualidade se faz necessário em razão deste concreto ser muito suscetível a perdas em suas propriedades reológicas, como fluidez, coesão e resistência à segregação, uma vez que estas têm papel fundamental no desempenho em estado endurecido (GIROTTO, 2012).

Sua distinção ao concreto convencional (CC) se dá principalmente em caráter reológico, o qual se diferencia a partir da incorporação de aditivos superplastificantes, modificadores de viscosidade (GOMES, BARROS, 2009) e adições minerais, destacando-se cinza volante, cinza da queima da casca de arroz, escória de alto forno e sílica ativa (CARNEIRO, 2018).

As vantagens quanto ao uso do CAA estão ligadas diretamente também a fins ergonômicos e de economia, visto que ruídos de concretagem são minimizados, há maior durabilidade das formas, simplificação no processo de lançamento e possibilidade de bombeamentos em grandes distâncias. Devido também a maior presença de pasta e de finos, aliada a redução no diâmetro dos agregados, torna-se possível sua aplicação em formas de pequenas dimensões, maior facilidade no

nivelamento de lajes, bem como, redução de nichos e falhas de concretagem (CALADO, 2016).

Segundo Pacheco *et al.* (2014), a aplicação do CAA pode representar aumento da produtividade; redução de custos; formas estruturais mais complexas e alta taxa de armadura; melhora do ambiente de trabalho e redução do impacto ambiental.

Entretanto, conforme explica Carneiro (2018), desvantagens surgem em relação às particularidades de execução, lançamento e manutenção que este material necessita e que possa não se equivaler ao CC, sendo ainda o preço do metro cúbico um fator de grande impacto do CAA, que se eleva em razão do uso expressivo dos aditivos químicos e adições minerais.

2.1.1 Materiais constituintes

Todos os tipos de cimento Portland podem ser usados na obtenção do CAA, porem quanto maior sua finura, maior é a indicação (REPETTE, 2011), pois a presença de finos na pasta do CAA está diretamente ligada a viscosidade e fortalecimento da distribuição granulométrica dos sólidos na mistura (KLEIN, 2008). Sendo assim, a função destes materiais é preencher os poros da pasta e vazios do concreto, melhorando o empacotamento e reduzindo a fricção inter-granular (MORAES, 2010).

O uso de sílica ativa, segundo Melo (2005), está principalmente ligado ao estado fresco do concreto, proporcionando à mistura maior coesão e estabilidade, redução da exsudação, aumento da demanda de água e fluidez do concreto, garantindo maior durabilidade à estrutura. Para Petit *et al.* (2010), a adição de cinza volante auxilia na trabalhabilidade da mistura, ocasionada principalmente pela forma esférica de suas partículas, diminuindo o atrito e reduzindo o uso de superplastificante.

Cuidados também devem ser adotados na escolha dos agregados graúdos, tendo características, como a forma dos grãos e seu volume incorporado, de suma importância e influência na dosagem (BARBOZA, 2016). Assim como em concretos convencionais, faz-se preferencialmente o uso de agregados de forma regular, sendo que para materiais mais angulares, lamelares e/ou irregular deve-se reduzir a granulometria para que a fluidez do CAA não seja comprometida (REPETTE, 2011).

Portanto, deve-se considerar que quanto maior o diâmetro do agregado, maior deverá ser a viscosidade da pasta para evitar sua segregação, além de aumentar a possibilidade de ocorrência de bloqueio que poderá ocorrer quando o concreto permear pelas restrições. Desse modo, recomenda-se o emprego de dimensão máxima característica de 9,5mm, podendo esta resultar em maior economia e desempenho do que é obtida com agregados de maiores dimensões em concretos convencionais (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOZA, 2018).

Gomes e Barros (2009) destacam que umas das características de concretos de alto desempenho é o uso indispensável de aditivos, sendo as propriedades reológicas do CAA dependentes de superplastificantes e modificadores de viscosidade. Segundo os autores, o principal objetivo do superplastificante é garantir fluidez a mistura, mantendo a trabalhabilidade mesmo com baixa relação água/cimento. Já os modificadores de viscosidade correspondem ao comportamento coesivo, aumentando a estabilidade e mobilidade do concreto. Como resultado, menos água estará sujeita a exsudação e a sedimentação será controlada, pois a pasta de cimento suportará melhor a suspensão de partículas.

2.2 Influência da adição de fibras de aço à matriz (CAAF)

As vantagens do CAA em comparação ao CC se resumem principalmente ao estado fresco da mistura, mantendo suas propriedades mecânicas no estado endurecido em equivalência (EFNARC, 2005). Assim, esta condição não resolve problemas devido a solicitações de tração neste concreto, que segue possuindo o comportamento mecânico frágil (SHIMOSAKA, 2016).

Do ponto de vista estrutural, e por ser uma rocha artificial, a principal propriedade mecânica do concreto é a resistência à compressão. Assim, quando passível de esforços de tração, este tende a um comportamento frágil, rompendo de maneira abrupta. A adição de fibras de aço à matriz cimentícia se mostra uma boa alternativa para contornar este problema, uma vez que esta melhora significativamente sua resistência ao impacto, propagação de fissuras, ductilidade e tenacidade (BENCARDINO *et al.*, 2010; SIRIJAROONCHAI, EL-TAWIL, PARRA-MONTESINOS, 2010; DOMSKI *et al.*, 2017; KAZEMI *et al.*, 2017; ABBASS, KHAN, MOURAD, 2018).

Logo, ao reforçar o compósito com fibras, há formação de uma ponte de transferência de tensões através da superfície das fissuras, controlando sua propagação e velocidade de abertura, reduzindo a concentração de tensões circundantes e minimizando-as nas extremidades do concreto (NAAMAN, 1992; BOULEKBACHE *et al.*, 2010; FIGUEIREDO, 2011). Contudo, devido a fatores como: variações de orientação, volume incorporado, geometria e uniformidade das fibras, é frequente a existência de dispersões e diferenças significativas nos resultados (BENTUR, MINDESS, 2007; DANIN, 2010; FIGUEIREDO, 2011; MARANGON, 2011; ALMUSALLAM, 2016). Segundo Bonakdar (2013), a ponte de tensão realizada pela fibra é responsável mecanicamente principalmente pela resistência à tração residual e tenacidade do concreto.

O uso de fibras tem se demonstrado um importante aliado na alteração das propriedades mecânicas de tração, pré e pós primeira fissura, através da dissipação de tensões concentradas, manutenção da queda de tensões residuais e na melhora da adesão aço-concreto em estruturas de concreto armado (FIGUEIREDO, 2011; MARANGON, 2011; HUANG *et al.*, 2016; CHU, KWAN, 2019).

Uma grande vantagem do uso de fibras em CAA se justifica por este não ser submetido a processos de compactação e vibração, o que pode causar a segregação e orientação das fibras (SHAH, FERRARA, 2008), sendo facilitado também o uso deste concreto em elementos estruturais de espessuras reduzidas mantendo a qualidade mesmo quando submetido a esforços de tração na flexão (CRISTOFOLI, 2018) Ainda, segundo Bakhshi (2014), o uso de fibras como reforço em substituição da malha de aço convencional pode representar reduções de mão-de-obra, menor potencial de erros no local de trabalho e economia no lançamento e compactação da estrutura.

Segundo Marangon (2011) e Ferrara *et al.* (2012), a orientação e concentração das fibras influencia diretamente o comportamento mecânico da estrutura, podendo aumentar o seu desempenho e tenacidade, porém se dispersada ou orientada de forma incorreta, gera efeitos indesejáveis quando submetida aos esforços aplicados.

Alferes Filho (2019) avaliou a influência do posicionamento e orientação das fibras em CAA. O autor aponta que não se pode ignorar a importância do controle de execução de elementos estruturais pois a ocorrência de orientações indesejáveis ou

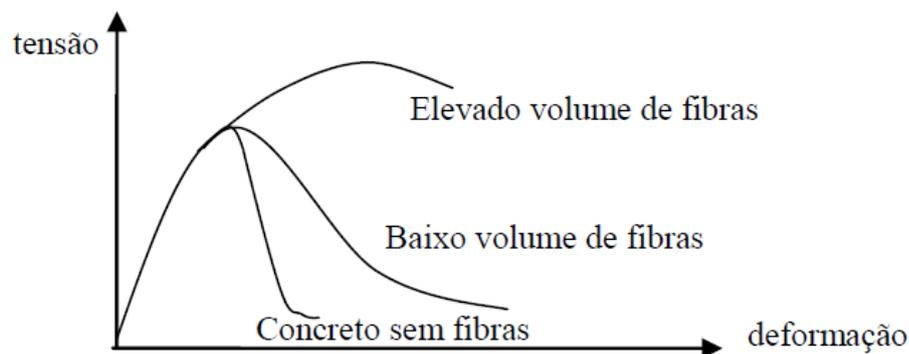
mal projetadas podem prejudicar o comportamento do CAAF, uma vez que o nível de capacidade de reforço está ligado com o padrão de fissuração estabelecido.

Segundo Guetti (2012), o uso de fibras curtas de aço confere ao CAA aumentos na resistência ao impacto, fadiga, tração e flexão, capacidade de absorção de energia e controle de fissuração, porém não apresenta aumentos significativos para esforços compressivos. Segundo ele, a utilização de fibras no CAA é beneficiada em razão do alto teor de finos neste tipo de concreto, o que melhora as propriedades de interface agregado-pasta e fibra-pasta, possibilitando uma maior capacidade de absorção de energia após o início da fissuração.

Um elevado volume de fibras pode ser prejudicial, principalmente no processo executivo e no adensamento mecânico, comprometendo a trabalhabilidade da mistura. Por outro lado, um baixo volume aumenta o nível de tensão transferido da matriz para cada fibra, podendo ocorrer o processo de arrancamento destas (SCOARI, 2005 apud GUETTI, 2012).

A influência na resposta da curva tensão de tração-deformação para diferentes níveis de incorporação de fibras é indicada por Guetti (2012) e está representada na Figura 1.

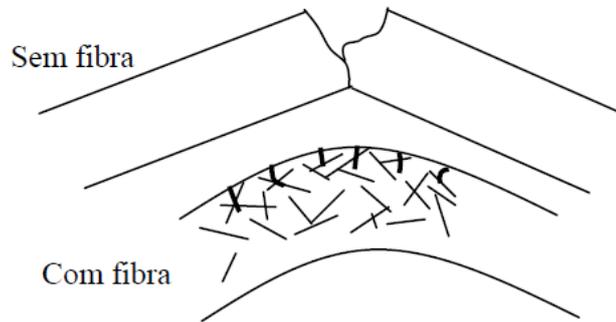
Figura 1 – Curva Tensão de tração-deformação, para concretos com elevados e baixos volumes de fibras.



Fonte: Guetti (2012).

A adição de fibras controla o surgimento de macro fissuras, que são substituídas por microfissuras com menores aberturas, pois as fibras costuram as faces da trinca na matriz de argamassa, distribuindo mais uniformemente as fissuras no volume da peça. Dessa forma, o desempenho desta transferência de tensões está diretamente ligado ao alongamento das fibras na zona fissurada e da aderência desta com a matriz (GUETTI, 2012). A Figura 2 ilustra o fenômeno supracitado.

Figura 2 – Processo de fissuração do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras de aço.



Fonte: Guetti (2012).

A interação fibra-pasta é de fundamental importância no desempenho estrutural do compósito, sendo esta interface formada por vazios que estão parcialmente preenchidos por produtos derivados da hidratação do cimento. Portanto, a densidade de poros e presença/formação de cristais de hidróxido de cálcio nela presente tendem a reduzir sua aderência conforme o aumento destes espaços e cristais. Assim, a resistência da união fibra-pasta depende principalmente do atrito entre elas, sendo que quanto mais densa for a pasta e menor a quantidade de vazios ela apresentar, maior será a aderência (GUETTI, 2012).

O uso de fibras de aço também é vinculado a substituição parcial de armadura de cisalhamento, como estribos e cintamentos, em situações que demandam altas taxas de armadura ou geometria limitada do elemento (BARROS *et al.*, 2003; NGUYEN, NGUYEN, PANSUK, 2017; LAKAVATH, JOSHI, PRAKASH, 2019).

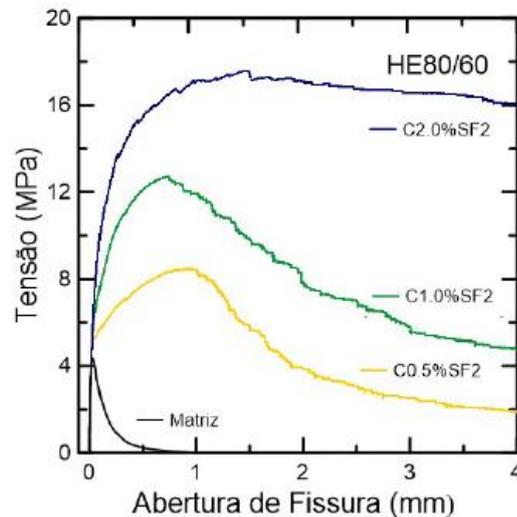
O comportamento à tração do CAAF é governado pela matriz até o surgimento da primeira fissura, sendo a fibra responsável pelo suporte da tensão pós-fissuração, levando o compósito a apresentar comportamento dúctil (VELASCO, 2008).

Segundo Marangon (2011), a adição de fibras ao CAA leva ao desenvolvimento de propriedades de resistência, podendo assim se diminuir a armadura convencional, obter um melhor controle da abertura de fissuras e boa capacidade de absorção de energia pós-pico de resistência. De acordo com o autor, fibras curtas não tem o mesmo desempenho que as longas e alinhadas no desenvolvimento da múltipla fissuração, isso porque as fibras que atravessam as

fissuras não possuem comprimento de contato suficiente para transferência de tensões para as regiões fissuradas do compósito.

Nos estudos realizados por Monteiro (2017) para comportamento à tração na flexão do CAAF em diferentes volumes de incorporação, os resultados mostraram que a adição de fibra se mostrou favorável aos principais parâmetros mecânicos, proporcionalmente ao volume de incorporação das fibras, bem como foram encontrados incrementos significativos para tensões residuais pós-pico, proporcionando maiores taxas de energia de deformação. Conforme o autor, a adição de fibras provoca uma melhora mecânica significativa após primeira fissura, sendo que independente do percentual ou tipo de fibra, as tensões residuais se propagam para altos valores de abertura de fissura, enquanto a matriz simples não apresenta tensões residuais pós-pico. Desse modo, as fibras de aço podem apresentar um comportamento de “*strain-hardening*” ou “*strain-softening*” (Figura 3), mantendo suas tensões elevadas mesmo com o aumento significativo da abertura da fissura.

Figura 3 – Comportamento de espécimes de CAAF submetidos a ensaios de tração na flexão



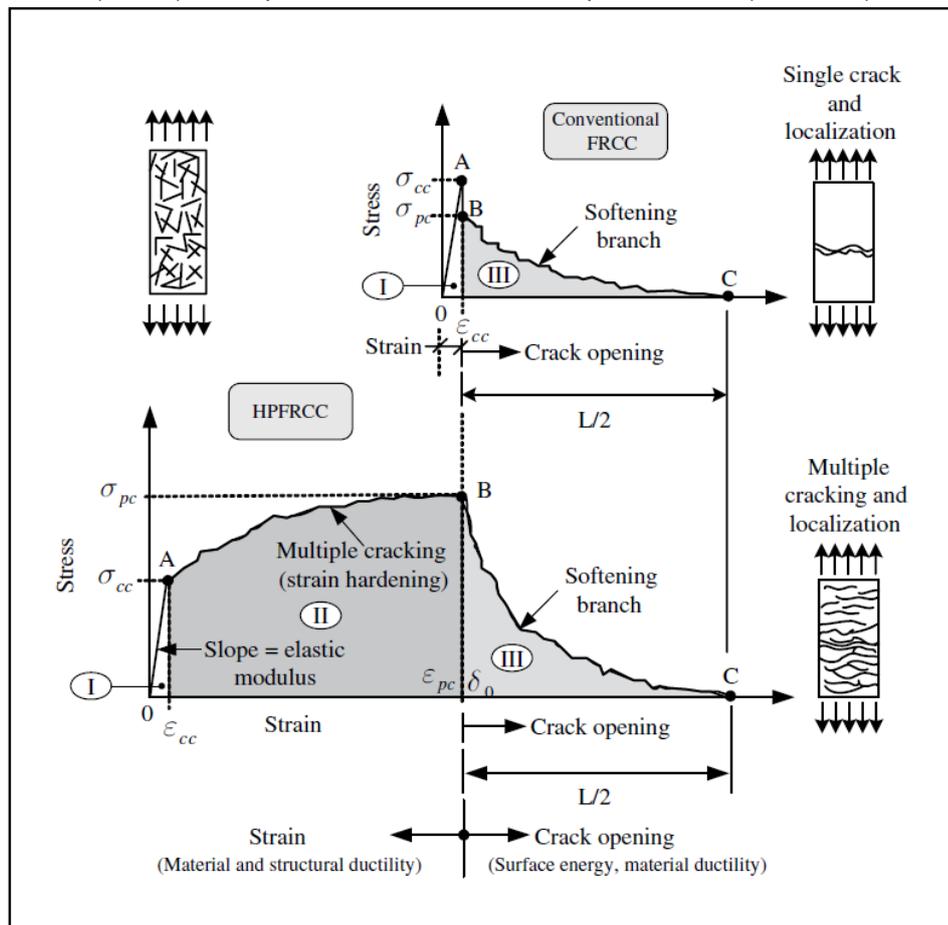
Fonte: Adaptado de Monteiro (2017).

Segundo Mündecke e Mechtcherine (2020), compósitos cimentícios de alto desempenho e que apresentam “enrijecimento de tensão” na deformação (*strain-hardening*), a exemplo dos denominados “*Strain-hardening Cement-based Composite*” (SHCC) ou “*Engineered Cementitious Composites*” (ECC), são uma classe de novos materiais que exibem uma quase-ductilidade devido a taxas

elevadas de múltipla fissuração quando submetidas a tração uniaxial. Segundo Naaman (2003), o comportamento “*strain-hardening*” em concretos de alto desempenho pode ser alcançado com uma seleção adequada dos constituintes da matriz, tipo e quantidade de fibras, mesmo que estas frações de volume sejam relativamente baixas (entre 1,5% e 2%).

Como explica Naaman (2003), compósitos cimentícios reforçados com fibras (FRCCs) e compósitos cimentícios de alta performance (HPFRCC) apresentam comportamentos iniciais semelhantes quando submetidos a ensaios de tração (Trecho 0 à A – Figura 4). Porém, a partir da primeira fissura, o HPFRCC começa a demonstrar um enrijecimento de tensões (*strain-hardening*) até alcançar deformações relativamente altas (Trecho A à B – Figura 4), enquanto o FRCC apenas sofre decréscimos de resistência e apresenta o desenvolvimento de fissura localizada (Trecho B a C – Figura 4).

Figura 4 – Resposta a ensaios de tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras (FRCC) e compósitos cimentícios de alta performance (HPFRCC)



Fonte: Naaman (2003).

Para Kunieda *et al.* (2010), a substituição do concreto reforçado comum por concretos de alto desempenho pode permitir reduções de armaduras longitudinais e transversais, uma vez que estes possuem ductilidade aprimorada e podem apresentar deformações compatíveis com a do aço.

Resultados superiores de enrijecimento de tensões e energia de fratura foram encontrados por Gonzáles *et al.* (2018) quando as amostras continham fibras dispostas em sentido favorável aos ensaios. Ao investigar experimentalmente o compósito através de ensaios de tração uniaxial e tomografia computadorizada, os autores explicam que estes acréscimos indicam que quanto maior for o fator de orientação das fibras, melhor serão os resultados mecânicos.

Resultados semelhantes foram apontados por Zhang *et al.* (2020). Após executar espécimes prismáticos com proposital orientação interna das fibras e ensaiá-los à flexão e tração direta, fatores como resistência final alcançaram melhorias de 70,6 e 66%, respectivamente. Além disso, o autor ressalta que características anisotrópicas surgem no processo de fissuração, uma vez que alinhadas em sentido perpendicular à seção transversal, a energia necessária para promover trincas aumenta e estas tendem a seguir na direção diagonal. Tal processo pode ser analisado na figura a seguir (Figura 5). Ainda, o processo de alinhamento das fibras levou a acréscimos no número e distribuição destas na seção transversal.

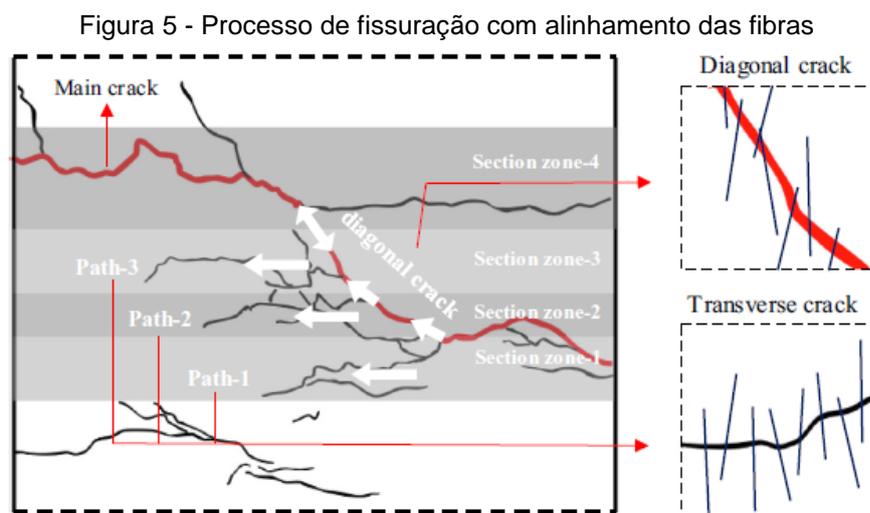


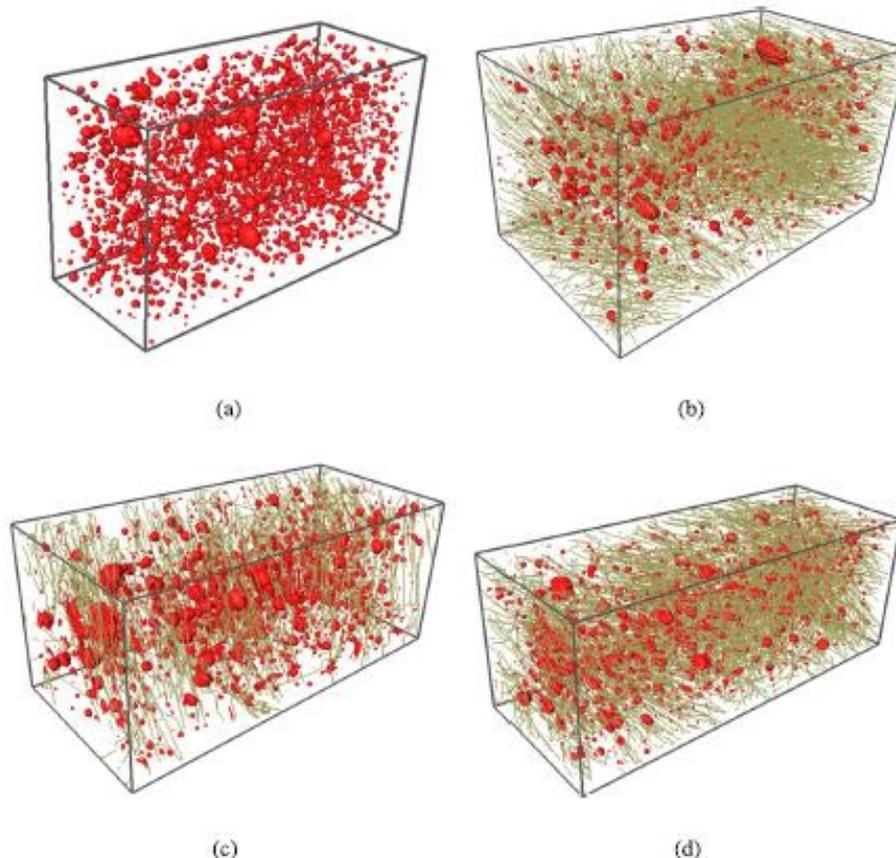
Fig. 13. The cracking behavior of the main crack region of A-TTS_{0,02H} - 0,015.

Fonte: Zhang *et al.* (2020).

Ríos *et al.* (2018) destacam que com o uso de tomografia computadorizada de raios-x também é possível explorar a distribuição, tamanho e localização da porosidade de grandes volumes de compósito com a presença de fibras de aço no interior da matriz. Seus resultados demonstraram aspectos importante para este tipo de compósito, os quais são listados abaixo:

- A porosidade foi maior e mais homogênea em matriz simples (sem fibras) (Figura 6.a), diminuindo principalmente com o uso de microfibras;
- A presença de fibras induziu a concentração e aumentou o tamanho dos poros (Figura 6.b);
- O uso de fibras longas levou a presença de poros maiores (Figura 6.c);
- A presença das fibras modificou a forma dos poros e sua esfericidade, resultado devido principalmente a distorção da matriz pelas fibras e a concentração dos poros abaixo delas (Figura 6.d);

Figura 6 - Imagens da tomografia computadorizada por raios-x. a) Sem fibras b) Microfibras c) Macro fibras d) Uso de fibras na forma mista.



Fonte: Ríos *et al.* (2018).

2.3 Interação barra-concreto

A aplicação de estruturas complexas de concreto armado ainda necessita de cuidados, uma vez que, estas trabalham mesmo em serviço, em estado de não-linearidade física e demandam de uma boa interação entre o aço e o concreto. Salienta-se a importância da aderência na propagação e abertura de fissuras, na qual é diretamente responsável por evitar flechas excessivas e rupturas localizadas (FERNANDES, 2000).

Dybel e Kucharska (2019) destacam que o fenômeno de ligação entre as barras de reforço e a matriz é a base da ideia do concreto armado como material de construção com caráter estrutural, posto que o conceito se baseia na transferência mútua de esforços entre os dois elementos, e que a avaliação de alterações no processo de deformação de ambos componentes é fator inerente ao controle de trincas e deslocamentos.

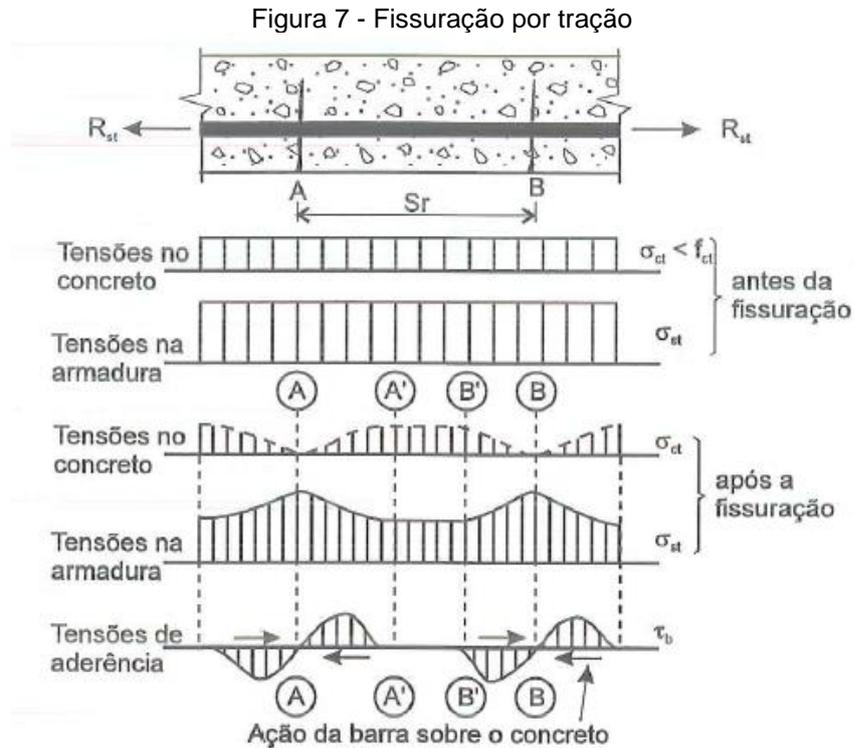
Com relação à aderência entre a matriz e a armadura passiva, BARROS *et al.* (2006 apud GUETTI, 2012) afirmou que o CAA apresenta maior aderência às armaduras do que os concretos convencionais de mesmo fator água/cimento. Segundo os autores, isto ocorre devido à microestrutura e interface agregado-pasta de o CAA serem mais densas do que aquelas observadas nos concretos convencionais.

De acordo com Van Mier (2002), a melhor maneira de determinar a relação tensão x abertura de fissura é a partir de ensaios de tração direta uniaxial. Porém, estes ensaios requerem uma configuração precisa do equipamento e amostras confeccionadas em alinhamento, para que não apresentem instabilidades e dispersões significativas, de modo a não afetar os resultados.

2.3.1 Análise global de ruptura

No concreto armado (Figura 7), segundo Fusco (1995), a aderência existente entre a barra de aço e o concreto permite que as tensões de tração possam ser absorvidas pelas armaduras. No entanto, quando ultrapassada a tensão de ruptura de tração, inicia-se o processo de fissuração e as tensões de tração no concreto se anulam, aumentando as tensões na barra de aço.

Por conseqüente, nas seções fissuradas a tensão na armadura atinge o seu valor máximo, e conforme analisamos as seções mais afastadas deste ponto, o concreto passa novamente a ser tracionado devido à aderência ainda presente e os esforços suportado pela barra diminuem (FUSCO, 1995).



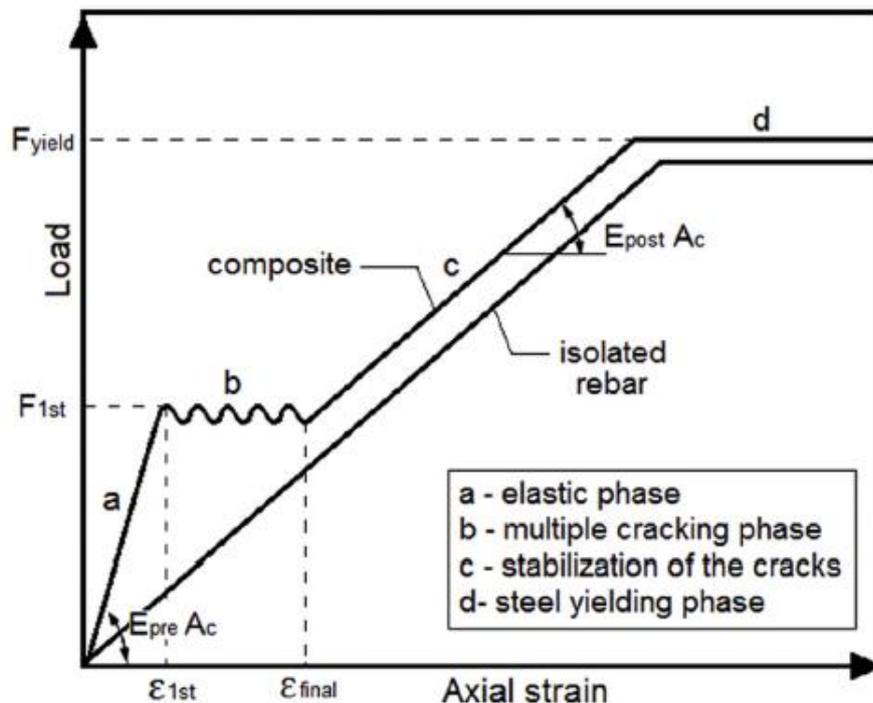
Fonte: Fusco (1995).

O comportamento do enrijecimento de tensões em tirantes de concreto com reforço simples em barra de aço pode ser descrito segundo a Figura 8, sendo dividido em 4 fases: pré-fissuração elástica, fissuração, pós-fissuração e cedência do aço. Na fase de pré-fissuração (linha elástica “a” da Figura 8), a carga é regida pelo tipo de matriz, rigidez da matriz e do aço e sobre a suposição de ligação ou interação perfeita entre as 2 partes, aço e concreto, sendo este ramo da figura regido pelo módulo elástico do conjunto. Com o início e a propagação da primeira trinca, a carga é distribuída, transferida para o aço e devolvida ao concreto por meio das propriedades da ligação e, uma vez que a tensão é suficiente, rachaduras adicionais ocorrem dependendo da natureza da ligação. A fase de fissuração múltipla (linha “b” da Figura 8) começa a partir da primeira carga de fissura (F1st) e representa a resistência à tração da matriz. Desse modo, a carga é progressivamente transferida para o reforço e a matriz ficará dividida em vários

segmentos até que não possa mais contribuir de maneira substancial para a capacidade de carga do compósito (AVESTON, COOPER, KELLY, 1971 apud RANGEL *et al.*, 2017).

Desse ponto, não há mais formação de novas fissuras e a matriz já se encontra totalmente dividida, sendo o aço quase totalmente responsável por suportar o carregamento consecutivo e a rigidez do compósito sendo basicamente orientada pelo módulo de elasticidade do aço (linha “c” da Figura 8). O aumento na carga de tração ocorre até a fase de escoamento do aço (linha “d” da Figura 8), atingindo a ruptura quando alcançado o carregamento máximo (AVESTON, COOPER, KELLY, 1971 apud RANGEL *et al.*, 2017).

Figura 8 - Comportamento típico do compósito para ensaios de enrijecimento da tensão de tração



Fonte: (AVESTON, COOPER, KELLY, 1971 apud RANGEL *et al.*, 2017).

Aprimorar o contato vergalhão-concreto é fundamental sob condições de manutenção, durabilidade e segurança da estrutura, de modo que estas controlam a fissuração, retardam a degradação da ligação e dissipam com maior facilidade a energia sob condições de impacto (ELIGEHAUSEN, POPOV, BERTERO, 1982). Entretanto, apesar de uma perfeita interação barra-matriz representar bom desempenho para estruturas de concreto armado, esta situação é de difícil obtenção (KIM, YUN, 2014; HUANG, 2016).

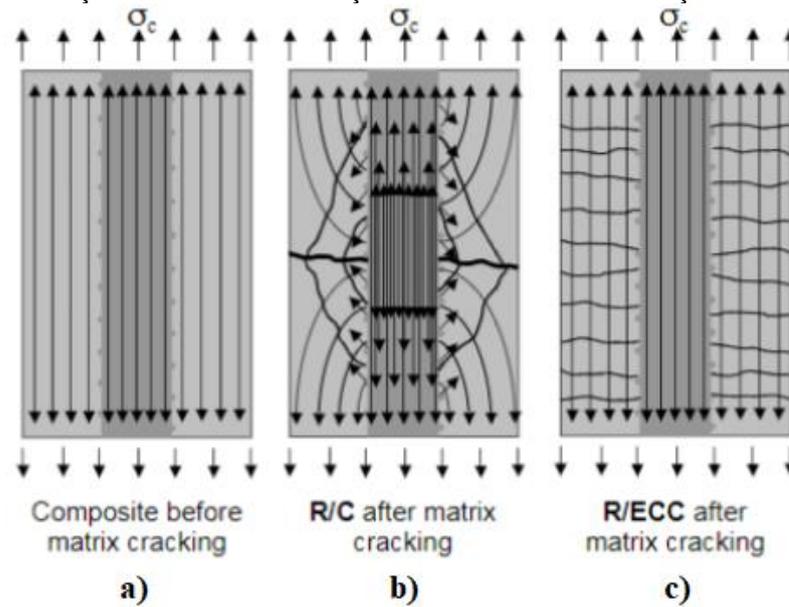
De acordo com Li (2003), o uso de compósitos de alto desempenho, como o ECC, fornece a estrutura reduzidos níveis de tensões na interface aço-compósito, uma vez que estes exibem níveis compatíveis de deformação e transmite através das fibras seus esforços, mesmo após atingir o estágio de fissuração do compósito (Figura 9.b). Contrário à isto, em compósitos simples e que não apresentam este mesmo comportamento, o concreto é descarregado em locais fissurados, o que gera sobrecargas no reforço de aço, causando deformações excessivas, alta tensão de cisalhamento na interface da ligação e fragmentação da cobertura de concreto (Figura 9.a).



Fonte: Li (2003).

A Figura 10 corrobora de forma didática e ilustrativa as etapas de ensaio e o respectivo comportamento dos compostos simples e do ECC quando submetidos à tração direta. Na parte “a” da Figura 10 é representado o fluxo de tensões dos compostos antes da fase de fissuração (estado elástico de tensões). Na parte “b” é exposto o comportamento frágil do composto simples, resultando na alta tensão localizada da barra de aço na parte fissurada da matriz, gerando alto cisalhamento e ruptura da interface. Na Figura 10.c é representado o comportamento do ECC pós fissuração, destacando a deformação compatível entre este e o aço, o que mantém a integridade do conjunto (FISCHER, LI, 2002).

Figura 10 – Distribuição das tensões de tração direta no concreto reforçado com barras de aço.



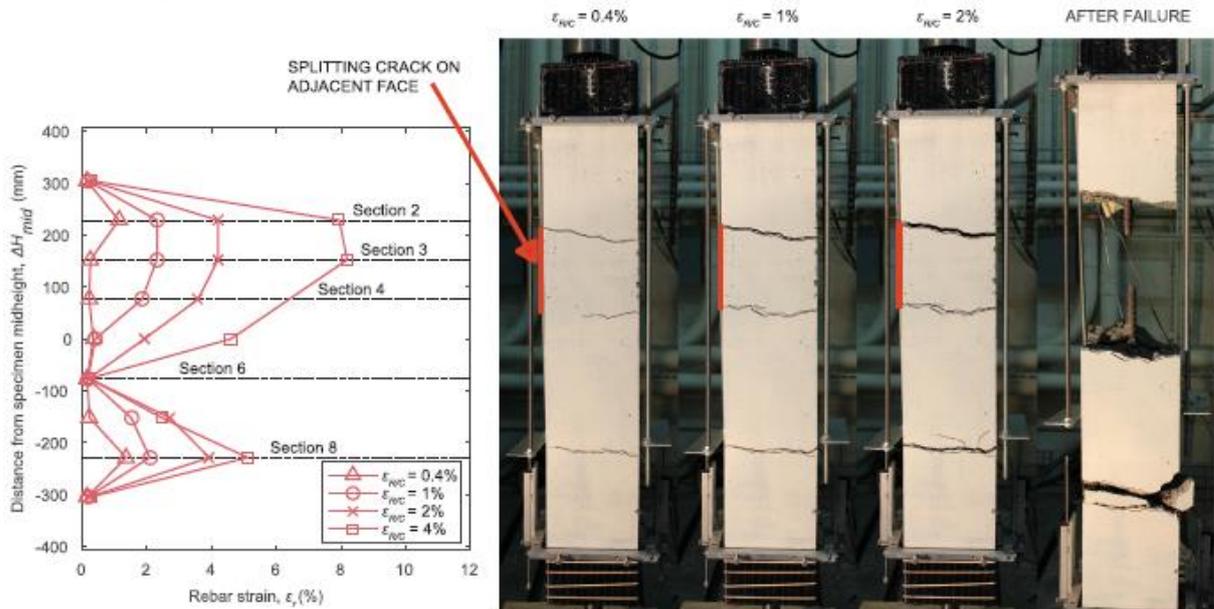
Fonte: Fischer e Li (2002).

O estudo de Kang *et al.* (2017) reafirma de forma experimental com esta avaliação supracitada. Neste, foram produzidas 10 amostras de ECC e concreto convencional reforçados com elementos longitudinais em ensaios de flexão em 4 pontos, a fim de investigar o enrijecimento de tensões em diferentes seções e taxas de armaduras. Seus resultados mostraram que o ECC, além de aumentar a resistência à tração pré e pós rendimento do reforço longitudinal, permitiu ao compósito comportamento de múltiplas fissuras localizadas e espaçadas, implicando em maior confinamento da matriz e evitando fissuras longitudinais.

Nguyen (2019) desenvolveu ensaios de tração em tirantes de concreto simples e de alto desempenho, instrumentando as barras longitudinais das amostras com strain gages espaçados em 76mm entre si, resultando em 9 pontos de medição. Segundo o autor, nos pontos em que se desenvolveram maiores fissurações do concreto, o compósito simples (Figura 11) apresentou maior intensificação da tensão na barra e desenvolveu maiores deformações. Porém, em seções que ficaram relativamente longe da ruptura, como a “Seção 6”, a matriz de concreto continuou a resistir a carga e a barra não exibiu aumentos expressivos na sua deformação.

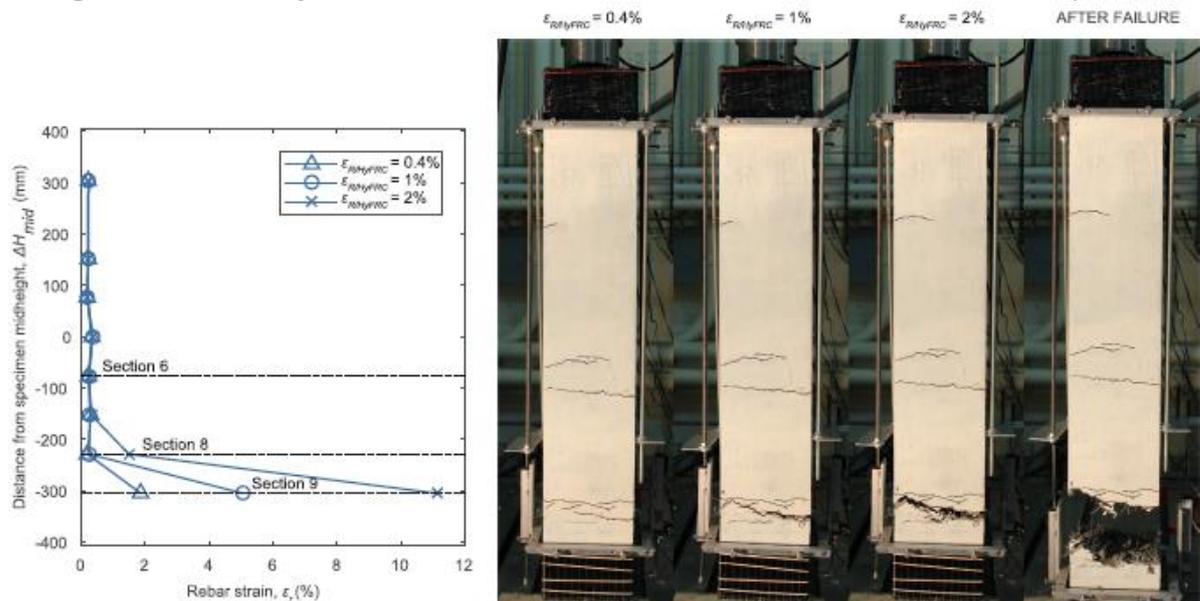
Ainda segundo Nguyen (2019), as amostras com concreto de alto desempenho (Figura 12) desenvolveram um maior número de fissuras secundárias e de geometria reduzida, resultando em uma distribuição mais uniforme das tensões na barra e maior resistência por parte da matriz.

Figura 11 – Deformações da armadura em tirantes de concreto armado simples.



Fonte: Nguyen (2019).

Figura 12 – Deformações da armadura em tirantes de concreto armado de alto desempenho.



Fonte: Nguyen (2019).

2.3.2 Fatores de influência no comportamento mecânico da interface

Pesquisas apontam que o emprego de concreto reforçado com fibras (FRC) tem demonstrado eficaz desempenho estrutural para o estado limite de serviço (ELS) em estruturas armadas, principalmente em relação ao controle de trincas e deslocamentos, servindo nesta condição como um enrijecedor de tensão. A ligação

provida da fibra serve como ponte dos esforços de tração da barra para o concreto circundante (entre rachaduras), auxiliando e melhorando a resposta do elemento de concreto armado (TIBERTTI, 2015).

Assim, combinado com a resistência residual (relaxamento de tensões) pós-fissuração, estes dois mecanismos fornecem à estrutura um padrão de fissuração diferente, caracterizado por reduções dos espaçamentos e largura da trinca (TIBERTTI, 2015).

Segundo Chao *et al.* (2009), a adição de fibras tem significativa influência no comportamento à tração do concreto. Segundo ele, em adições de nível moderado/convencional o material apresentará um comportamento de relaxamento por deformação com elevada tenacidade e absorção de energia, se comparado ao concreto simples. Porém, tendo ou não a presença de barras de aço longitudinais, uma elevada adição de fibras pode levar o compósito a desenvolver um comportamento de enrijecimento de tensões, resultando em fissuras estreitamente espaçadas e tensões pós-fissuração igual ou superior a tensão de fissuração.

Segundo Tiberti (2015), o espaçamento da fissuração para elementos armados tracionados é diretamente influenciado pela taxa de armadura passiva. Seus resultados mostram que a adição de fibra se mostra mais eficaz no controle da fissuração para taxas de reforço mais baixas, sendo que um aumento no diâmetro da barra de aço eleva também o espaçamento médio entre as fissuras, independente se o concreto é ou não reforçado com fibra.

No que diz respeito às condições de serviço, para o desenvolvimento de uma boa durabilidade, geralmente se requer proteção da barra contra a corrosão, o que pode ser alcançado através da redução da porosidade do concreto e da largura da fissura. O primeiro pode ser obtido usando uma matriz com uma baixa relação água/cimento, enquanto o último pode ser alcançado de maneira satisfatório com o uso de fibras. De fato, a adição de fibras ao concreto pode fornecer aumentos de resistência à tração residual, ligando as duas faces da rachadura e aprimorando sua tenacidade através de sua atuação na dissipação de tensões. No entanto, quando ocorrem tensões localizadas (devido a ações de flexão), elas são resistidas com mais eficiência pelo reforço localizado (barras de aço) (TIBERTI, 2014).

De acordo com Chu e Kwan (2019), pesquisas adicionais que melhorem a ligação do vergalhão com o concreto, aumentando a resistência da matriz de concreto e/ou adicionando variações diferentes de fibras, podem desenvolver um

modelo para análise e projeto estrutural de grande impacto. Em seu estudo, foram realizados testes de tração para concreto sem e com fibras de aço, com a adição variando, em volume, de 0,5 a 2%. Analisando propriedades de deslizamento da barra de aço, resistência em estado elástico e rigidez do compósito, os resultados alcançados mostram que o fator de fibra é diretamente proporcional a acréscimos na resistência máxima tanto de união aço-compósito, quanto na faixa pós-pico.

Uma análise detalhada da microestrutura das interfaces aço-concreto e agregado-concreto explica que fatores como relação água/cimento, idade de hidratação e barras com orientação e acabamento superficial variados, tem grande influência no comportamento químico e mecânico entre as partes, resultando em valores de porosidade distintos (HORNE, RICHARDSON, BRYDSON, 2007).

Deluce e Vecchio (2013) realizou ensaios de tensão uniaxial para amostras de concreto armadas longitudinalmente e com a adição ou não de fibras de aço, de modo a avaliar seu comportamento de fissuração e enrijecimento de tensões. Os testes desenvolvidos tiveram seus parâmetros variados em volumetria, comprimento e proporção de fibra, proporção e diâmetro da armadura de aço. Certas conclusões podem ser retiradas de seu estudo e são apontadas resumidamente nos itens abaixo:

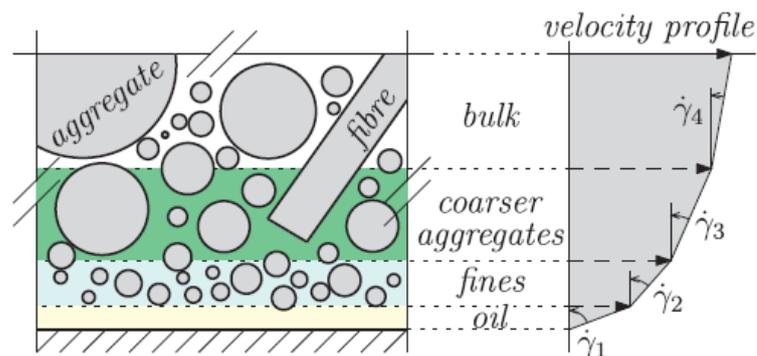
- A adição de fibras ao concreto reforçado com barras convencionais melhora a fissuração e rigidez se comparado ao concreto não fibroso;
- A capacidade de carga para tração uniaxial é significativamente maior quando há a adição de fibras;
- Tanto teor ou proporção maior de fibra reduziram os espaçamentos e larguras médias das fissuras se comparado ao concreto com reforço convencional;
- Aumento na taxa de reforço da barra de aço convencional diminuiu o espaçamento médio e largura máxima das fissuras tanto no concreto fibroso ou convencional;
- Aumentos no diâmetro da barra de reforço representaram maiores espaçamentos médios e largura máxima de fissura tanto para o concreto simples ou reforçado com fibra;

- O comprimento da fibra não teve papel significativo no comportamento pós-fissuração, desde que a fibra desenvolva uma ponte de aderência entre as fissuras;

Mudadu (2018) realizou ensaios de tração direta e indireta em CAAF com variações de dosagem, geometria e lançamento do concreto na direção horizontal e vertical. A fim de relacionar estes fatores com o estado e comportamento pós-fissuração. Seus resultados nos indicam que uma possível orientação favorável destas fibras, principalmente devido ao formato da amostra e sentido do lançamento, demonstrou aumentos de tenacidade e energia de fratura, propondo que estes fatores podem ser levados em consideração em eventuais projetos estruturais com este concreto.

A orientação da fibra e o padrão de fluxo no interior do concreto são influenciados pela forma de lançamento e/ou superfície da estrutura em que ele é moldado, gerando diferentes respostas estruturais em um mesmo elemento. Nas adjacências à forma, o chamado efeito parede leva a mistura a apresentar não uniformidade na distribuição dos grãos, o que modifica sua viscosidade e velocidade do escoamento na região (Figura 13) (ŠVEC *et al.*, 2014). Assim, o domínio da maneira como as fibras se orientam ou dispersão no interior do elemento, através do seu lançamento, poderia mostrar-se uma alternativa econômica e viável de alcançar bons resultados mecânicos mesmo com baixos volumes de fibras (FERRARA, OZYURT, DI PRISCO, 2011), porém, estes fatores não são facilmente controlados e, mesmo em amostras de natureza igual, os resultados podem se mostrar incertos e distintos (MINGUEZ, GONZÁLES, VICENTE, 2018)

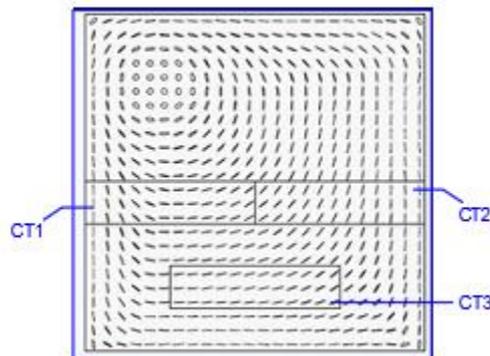
Figura 13 - Seção transversal típica de um concreto reforçado com fibras nas proximidades da fôrma



Fonte: ŠVEC *et al.* (2014).

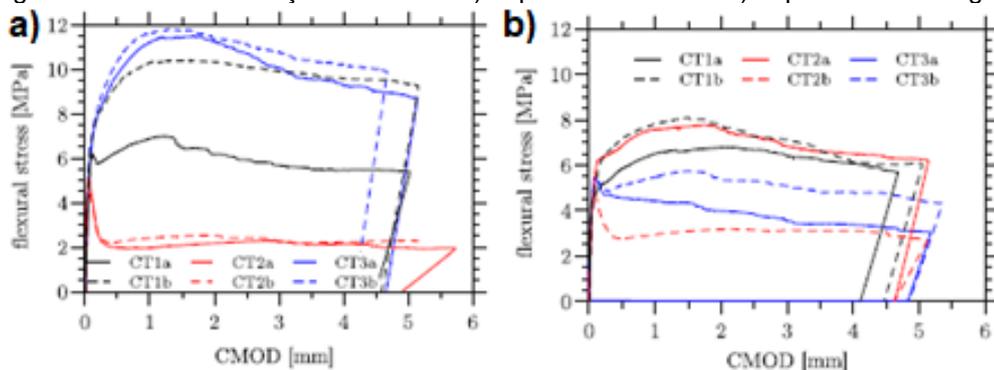
Em estudo experimental, Švec *et al.* (2014) relata possíveis orientações vinculadas a situações onde o elemento apresenta pouca profundidade, em relação a área de contato da parede, e principalmente na presença de superfícies rugosas. A Figura 14 representa de forma adaptada o posicionamento dos espécimes analisados pelo autor, enquanto a Figura 15.a (superfície lisa) e Figura 15.b (superfície rugosa) expõem resultados de ensaios de tração na flexão.

Figura 14 - Simulação da orientação das fibras após deslizamento da mistura



Fonte: Adaptado de Švec *et al.* (2014).

Figura 15 - Ensaio de tração na flexão. a) superfície mais lisa b) superfície mais rugosa



Fonte: Adaptado de Švec *et al.* (2014).

Analisando os gráficos pode-se visualizar uma maior variação entre espécimes com superfície lisa (Figura 15.a), sendo que para aqueles com as fibras ortogonais ao plano de corte transversal (CT3) os resultados alcançados são aproximadamente 5 vezes superiores a aquele cujas fibras estariam em posição mais desfavorável (CT2). Contudo, quando o lançamento da mistura se deu sobre substrato mais áspero (Figura 15.b), os resultados apresentaram menor amplitude entre os espécimes, sendo esse cenário devido a uma maior aleatoriedade das fibras junto a matriz.

Zerbino *et al.* (2012) ressalta que principalmente em elementos finos, a taxa de fluxo, efeito parede e geometria das fibras podem resultar na anisotropia e heterogeneidade da mistura ao longo do elemento, produzindo distinções de desempenho que podem ser mais significativas que aquelas resultantes entre concretos de diferentes tipos e taxa de fibras.

Mudadu *et al.* (2018), com amostras vazadas no sentido vertical e horizontal, analisou o comportamento pós-fissuração de prismas e cilindros submetendo-os a ensaios de flexão em 3 pontos e tração uniaxial. Seus resultados mostram que independentemente do tipo de ensaio, espécimes verticais prismáticos e cilíndricas que possuem semelhanças quanto a densidade de fibra e fator de orientação resultam em propriedades pós-fissuração parecidas. Porém, estes apresentam desempenho mecânico inferior as amostras horizontais, as quais foram diretamente influenciadas por uma orientação e distribuição favoráveis das fibras.

Comportamento similar foi encontrado por Torrijos, Barragán e Zerbino (2010) ao testar vigas com diferentes tipos de fibras e posições de concretagem. As vigas horizontais, além de apresentar desempenho mecânico superior aos espécimes verticais, quando fabricadas com fibras mais longas e lançamento em tubo de longo percurso, apresentam uma resposta pós-pico mais alta se comparada a espécimes com fibras curtas e lançamento padrão.

Em ensaios de arrancamento (*"pullout"*), um tirante sem fibras naturalmente apresentará trincas inclinadas e longitudinais, seguidas do deslizamento e falha da ligação barra-concreto. Na presença do reforço fibroso, há um retardo na degradação desta interface e a presença de múltipla fissuração na matriz, o que se deve a redistribuição dos esforços (CHAO, NAAMAN, PARRA-MONTESINOS, 2009), e que é diretamente ligado ao volume incorporado e a orientação das fibras, pois estas cruzam as trincas e impedem sua abertura em excesso, fortalecendo a resistência da união (ROY, HOLLMANN, WILLE, 2017). Huang *et al.* (2016) apontam que adições híbridas entre fibras de aço e polipropileno apresentam bons resultados no retardo e propagação de fissuras próximas a interface, e que essa melhoria é relacionada com o teor de fibras e a resistência à compressão do concreto.

Garcia-Taengua, Martí-Vargas e Serna (2011) apontam que o uso de fibras em ensaios de arrancamento pode ter a mesma importância para a interação barra-concreto do que o cobrimento ou diâmetro da barra. De acordo com Majain *et. Al.* (2020) e Zhao *et. al.* (2018), a adição de fibras de aço melhora o confinamento do

concreto, podendo especialmente em barras de maior diâmetro, evitar o rompimento prematuro do compósito circundante.

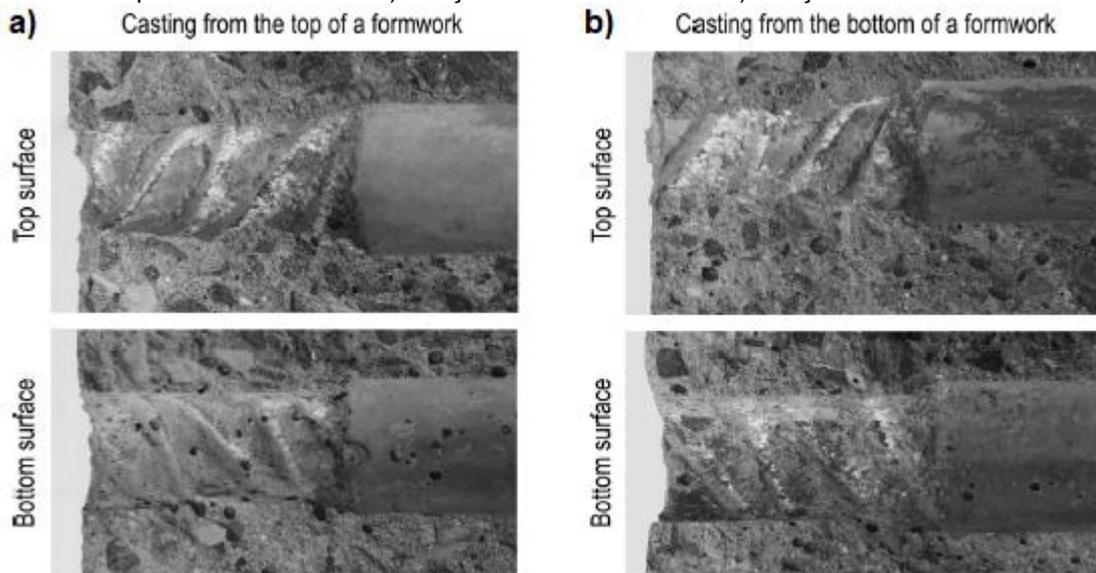
A orientação intencional das fibras realizada por Zhang *et al.* (2019) gerou aumentos na quantidade do reforço no entorno da barra, o que segundo o autor, maximizou o desempenho da transferência de tensões barra-concreto em 51%. Segundo Garcia-Taengua, Martí-Vargas e Serna (2016), melhor eficiência na interface pode ser alcançada com o uso de fibras mais curtas. Porém, conforme destacam, o principal fator determinante para um bom desempenho da ligação é a resistência à compressão do compósito.

Lee (2016) indica em seus resultados experimentais que, com a absorção de esforços residuais pelas fibras de aço, o comprimento de transpasse entre barras pode ser reduzido sem comprometer a ductilidade da estrutura. Conforme destaca Rossi *et al.* (2020), aumentos gradativos na incorporação das fibras podem fornecer melhorias na resistência da união aço-concreto e absorver parte da tensão longitudinal do reforço longitudinal, indicando que o uso dessas adições em CAA podem permitir que os comprimentos de ancoragem propostos pela NBR 6118 sejam revistos.

Contudo, apesar da tensão média da ligação barra-concreto ser efetivamente melhorada, aumentos da fração de fibras incorporada podem representar uma distribuição não homogênea de tensões, com aumentos de rigidez da ligação barra-concreto na extremidade mais próxima da carga (GAO *et al.*, 2020).

Métodos distintos de concretagem evidenciam que reduções nas bolhas de ar na superfície da barra e na sedimentação do concreto aumentam a capacidade de união entre ambos elementos. Quando lançado de forma inversa (Figura 16.b) ao convencional (Figura 16.a), a armadura superior, que normalmente apresenta desempenho menor do que as demais barras, pode demonstrar acréscimos na interação aço-concreto. Quando lançado verticalmente pelo método convencional, a sedimentação da mistura resulta numa menor área de contato entre as nervuras inferiores da armadura, resultando em menos trechos da barra transmitindo tensão (DYBEL, KUCHARSKA, 2020).

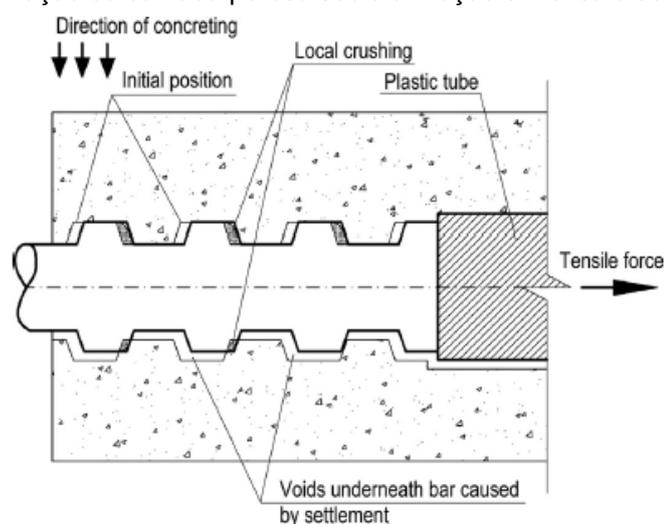
Figura 16 - Superfície do concreto após ensaio de arrancamento em barras localizadas na parte superior do elemento. a) Lançamento convencional b) Lançamento inverso.



Fonte: Dybel e Kucharska (2020).

Este fenômeno de acumulo de água, mais comum em barras localizadas em alturas consideráveis do fundo da forma, afeta principalmente misturas que necessitam de vibração mecânica, onde a sedimentação eleva parte da água em direção ao topo do elemento, formando uma interface frágil e porosa na parte inferior da barra (JIRSA, BREEN, 1981). A Figura 17 ilustra a interação barra-concreto durante um ensaio de arrancamento, representando a frágil camada supracitada.

Figura 17 - Formação da camada porosa sob a armação em ensaio de arrancamento

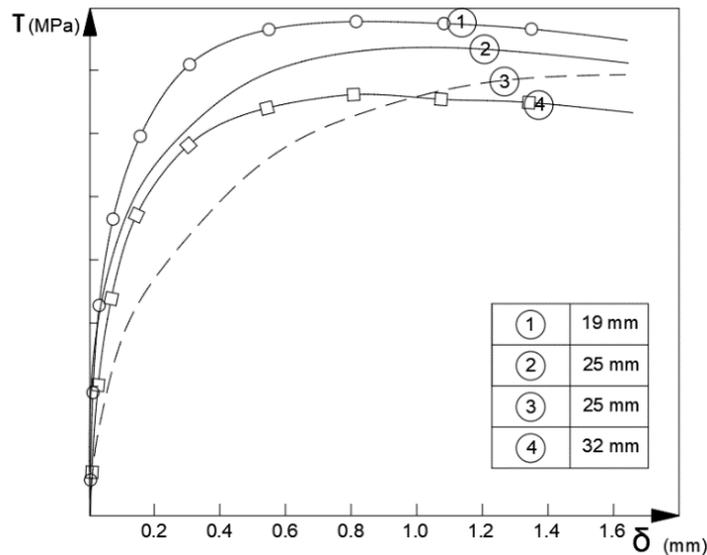


Fonte: Dybel (2019).

Os estudos de Simplício (2008) destacam acerca da influência do diâmetro da barra de aço nos resultados de aderência com o concreto, conforme pode ser

visualizado na Figura 18. Segundo ele, conforme aumenta-se o diâmetro da barra, menor se apresenta a resistência da interface barra-concreto, destacando que este comportamento é resultante de uma maior porosidade no local devido a maior retenção de água, conseqüentemente reduzindo suas capacidades mecânicas.

Figura 18 – Efeito do diâmetro da barra na capacidade mecânica do tirante.



Fonte: Adaptado de Eligehausen *et al.* (1983 apud SIMPLICIO, 2008).

Barbosa (2001) expõem de forma clara na Tabela 1 a seguir os principais fatores e seus respectivos resultados acerca da aderência concreto-barras de aço.

Tabela 1 - Parâmetros de influência no comportamento mecânico de aderência entre concreto e barra de aço

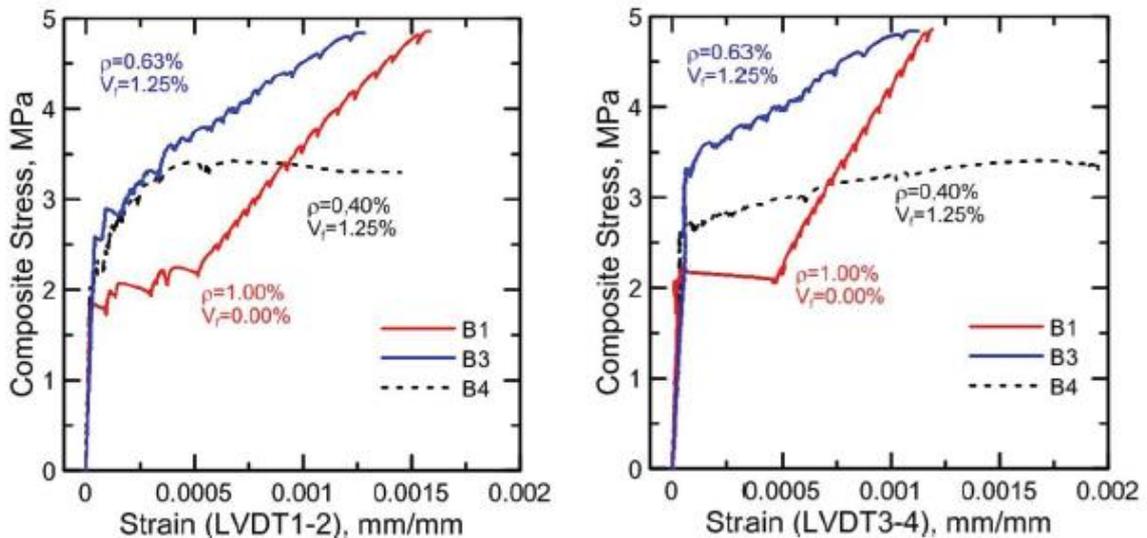
Parâmetro	Comportamento do parâmetro	Comportamento de aderência
Resistência à compressão	Aumento	Aumento
Área superficial da barra	Aumento	Aumento
Diâmetro da barra	Aumento	Diminuição
Área relativa da nervura	Aumento	Aumento
Posição da barra na concretagem	Horizontal ou Superior	Diminuição
Idade de ensaio	Aumento	Aumento
Adensamento	Aumento	Aumento
Carregamento cíclico	Aumento	Diminuição

Fonte: Adaptado de Barbosa (2001).

Em análise sob blocos, utilizando a mesma matriz de referência deste trabalho, Toledo Filho *et al.* (2014) buscou mostrar e avaliar a influência da adição de fibras de aço como possível substituição da armadura primária, que foi realizada com barras longitudinais. Foram usadas barras de reforço em taxas de armadura de 0,4, 0,63 e 1%, sendo adicionados ou não uma fração volumétrica de 1,25% de fibras. Seus resultados mostraram-se promissores quanto as melhorias que as fibras proporcionam na eficiência de transferências de tensões entre a barra e o compósito de concreto, assim como, ao se substituir parcialmente as barras longitudinais por fibras a ductilidade do bloco e sua rigidez pós fissuração aumentaram.

A Figura 19 mostra o comportamento das amostras reforçadas ou não com fibras de aço submetidas a tração direta dos blocos com diferentes taxas de armadura. Segundo o autor (TOLEDO FILHO *et al.*, 2014), as fibras melhoram a eficiência da transferência de tensão entre o compósito de concreto e as barras, resultando em maior capacidade de carga e tenacidade até uma deformação de 0,0005mm/mm.

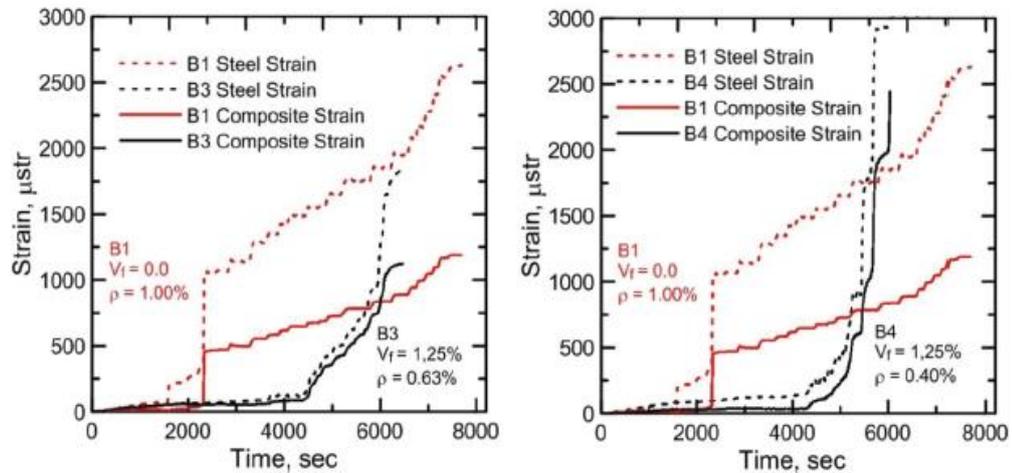
Figura 19 – Efeito do reforço de fibra de aço no comportamento estrutural dos blocos de concreto reforçado.



Fonte: Toledo Filho *et al.* (2014).

Ademais, o desenvolvimento do processo de deformação para as barras de aço e o bloco de concreto foi registrado por LVDT's e Strain Gages. Conforme observado na Figura 20, as amostras com fibras de aço apresentaram diferenças menores de deformação entre as barras e o compósito, se comparadas aos blocos apenas armados longitudinalmente (TOLEDO FILHO *et al.*, 2014).

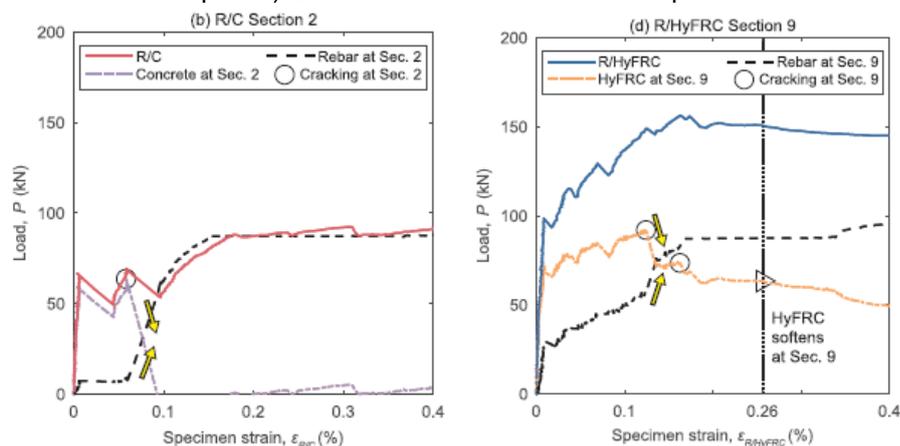
Figura 20 – Desenvolvimento da deformação das barras de aço e blocos de concreto para ensaios de tração.



Fonte: Toledo Filho *et al.* (2014).

Nguyen (2019) explica que os eventos de fissuração são identificados pela diminuição da resistência de carga no concreto ou aumento de carga na armadura. Na Figura 21.a, referente a um tirante de concreto armado simples, o autor explica que após a matriz sofrer uma descarga de tensão e não desempenhar praticamente nenhuma contribuição mecânica a amostra, o desempenho desta passa a ser regido quase por completo pelo aço. Porém, para tirantes desenvolvidos com concreto de alto desempenho (Figura 21.b) o surgimento de grandes fissuras expressa descargas parciais de tensão na matriz, uma vez que as fibras apresentam pontes de tensões entre as faces da fissura. A partir dessa etapa, segundo o autor, o comportamento de “*strain-softening*” é atingido e a capacidade de carga dessa ponte é alcançada, com a extração das fibras passando a conduzir a resistência do compósito.

Figura 21 - Tensão x Deformação em tirantes submetidos a ensaios de tração. a) Concreto armado simples b) Concreto armado de alto desempenho.



Fonte: Nguyen (2019).

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Materiais

Nesta seção são apresentadas as características, propriedades físicas e químicas dos materiais constituintes do compósito cimentício que será desenvolvido no trabalho, bem como, ferramentas utilizadas em sua produção.

3.1.1 Elementos cimentícios

Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP-V ARI RS, da marca Votorantin, para o qual realizou-se ensaio de massa específica de acordo com a normativa nacional, ABNT NBR 16605:2017, e através do método do frasco de Le Chatelier obteve-se o resultado de 2,98 g/cm³.

Cinza Volante

A cinza volante adotada é proveniente da termoelétrica Presidente Médici, e através de ensaio de massa específica determinada pelo frasco de Le Chatelier, sob orientação da normativa ABNT NBR 16605:2017, obteve-se resultado de 1,98 g/cm³.

Sílica da casca de arroz

A sílica é um material obtido através da queima da casca de arroz em temperatura controlada, resultando em um material com elevado grau de pozolanidade e ampliado uso tecnológico. Neste trabalho foi utilizada a sílica da marca Sílica Verde do Arroz Ltda, do Grupo Pilecco Nobre, a qual foi caracterizada por Silva (2019) através de difração por Raios X e tem os respectivos resultados explanados na Tabela 2

Tabela 2 – Caracterização da Sílica da casca de arroz.

Componente	Composição
Perda ao Fogo	3,50%
Dióxido de Silício - SiO ₂	91,48%
Óxido de Cálcio - CaO	0,36%
Óxido de Magnésio - MgO	0,32%
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,05%
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	0,00%
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,04%
Óxido de Potássio - K ₂ O	1,40%
Óxido de Manganês - MnO	0,32%
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	0,15%
Pentóxido de Difósforo - P ₂ O ₅	0,45%
Área Específica	21142m ² /kg

Fonte: Silva (2019).

3.1.2 Agregados

Agregado miúdo

O agregado miúdo é proveniente do município de Santana do Livramento/RS e foi adquirido através da empresa de Britagem Pedra Rosada, com sede em Alegrete/RS. Para tal, foram realizados ensaio de granulometria e massa específica, seguindo as orientações da ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR NM 52:2009, respectivamente. Os resultados do ensaio de massa específica indicaram o valor de 2,64 g/cm³. A curva granulométrica é mostrada na Figura 22. O Diâmetro máximo do agregado miúdo é de 1,18mm e Módulo de finura de 2.

Agregado graúdo

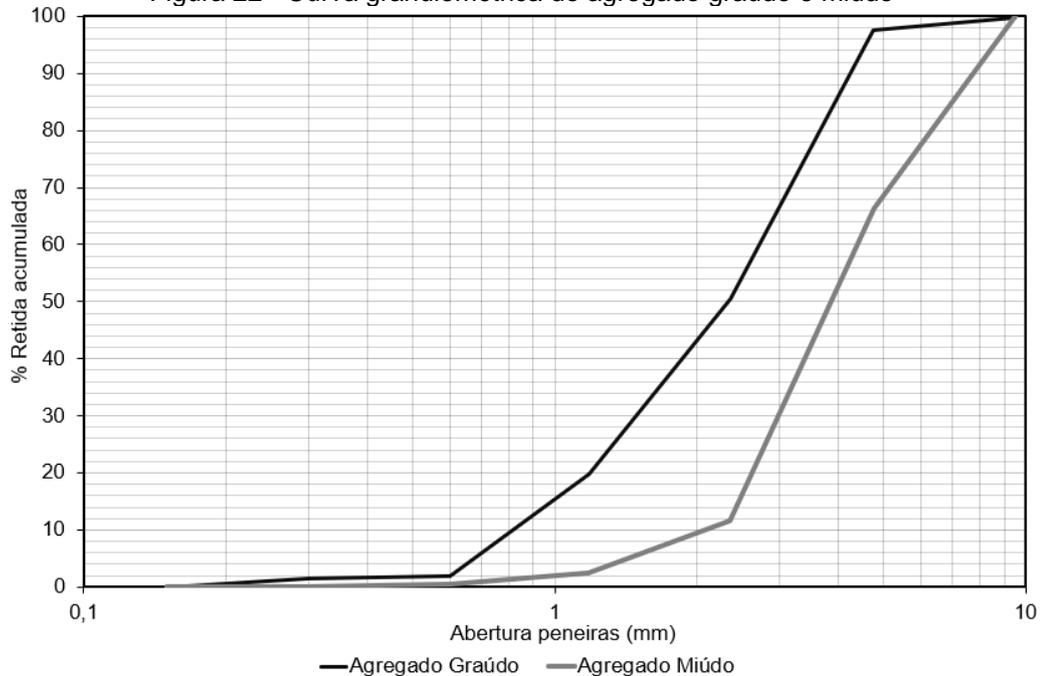
O agregado graúdo adotado para o trabalho é a brita 0, obtido através da empresa Supermix do município de Santa Maria/RS. A escolha deste material é devido a sua melhor uniformidade e similaridade ao utilizado por Marangon (2011). A caracterização deste material está apresentada na Tabela 3 e a distribuição granulométrica mostrada na Figura 22.

Tabela 3 – Caracterização do agregado graúdo.

Características	Resultados
Diâmetro máximo (mm)	9,5
Módulo de finura	5,79
Massa específica (g/cm ³)	2,7
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,54
Absorção de água (%)	3,94
Massa unitária (g/cm ³)	1,33
Teor de material pulverulento (%)	0,04

Fonte: Jucá (2020).

Figura 22 - Curva granulométrica do agregado graúdo e miúdo



Fonte: Jucá (2020).

Sílica #325

A sílica #325, adquirida da Mineradora Jundu, é um agregado miúdo proveniente da moagem de quartzo e tem seu emprego na mistura com o objetivo de auxiliar na composição dos finos e reduzir o consumo de cimento Portland, sendo responsável parcialmente pela trabalhabilidade.

Para este, foi realizado ensaio de massa específica pelo método do frasco de Le Chatelier, orientado pela ABNT NBR 16605:2017, o qual apresentou resultado de 2,68 g/cm³.

3.1.3 Aditivos químicos

Agente modificador de viscosidade

O agente modificador de viscosidade (VMA) utilizado neste estudo foi o Rheomac UW 410 de produção da empresa BASF. O mesmo se caracteriza visualmente por ter cor branca e textura de pó (Figura 23). A incorporação deste material é feita após a adição dos demais constituintes da mistura, onde está já se encontra homogeneizada. Seu objetivo é fornecer coesão à mistura, evitando que ela segregue ou exsude.

Figura 23 – Agente modificador de viscosidade (VMA)



Fonte: Jucá (2020).

Superplastificante

O superplastificante utilizado é a base de Poliacrilato e foi fornecido pela empresa RITT Empreendimentos do município de Alegrete/RS. Devido ao fato de este não ser o mesmo produto usado por Marangon (2011), necessitou-se realizar a caracterização de seu teor de sólidos, o qual resultou em uma concentração de 22,71%.

3.1.4 Fibras de aço

As fibras de aço adotadas são a DRAMIX 3D 65/35 BG (Figura 24), da empresa ArcelorMittal, possuindo características geométricas de 35mm de comprimento, 0,55mm de diâmetro e 65 de fator de forma. Segundo a fabricante, este material possui resistência característica à tração de 1345 MPa.

Figura 24 - Fibra de aço DRAMIX 65/35



Fonte: Jucá (2020).

Para fins de verificação foi realizado ensaio de tração pura na fibra, com o auxílio de uma máquina de ensaios universais Shimadzu ACX-5KN (Figura 25), no qual foi alcançado um resultado médio à tração de 1336,15MPa.

Figura 25 – Ensaio de tração pura na fibra de aço – DRAMIX 3D 65/35 BG.



Fonte: Adaptado de Jucá (2020).

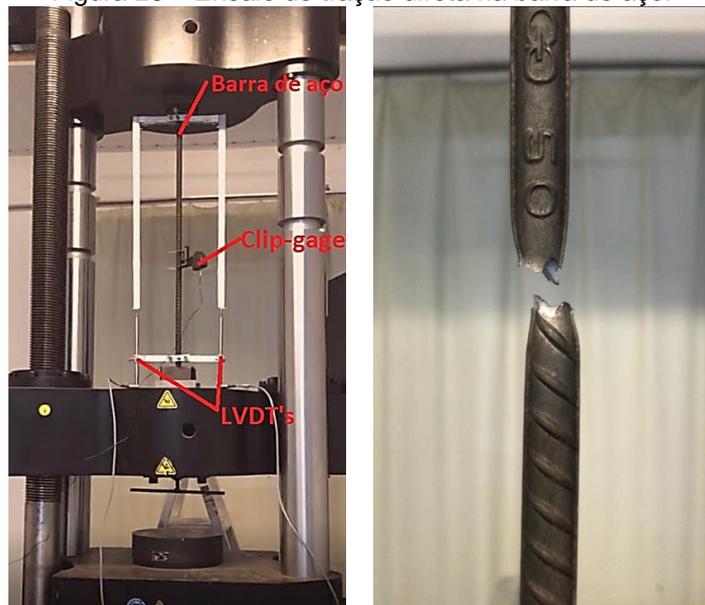
3.1.5 Barra de aço

As barras de aço utilizadas no trabalho foram doadas pela empresa ICCILA – Indústria, Comércio e Construções Ibagé Ltda, com sede no município de Santana do Livramento (RS). Estas apresentam as seguintes características:

- Marca: Gerdau;
- Classificação: CA-50, tensão de escoamento de 500MPa;
- Nervuradas;
- Diâmetro nominal: 20 e 25mm;

Foram realizados ensaios de caracterização mecânica por tração direta nas barras (Figura 26) em uma máquina de ensaios universais da marca Instron com capacidade de carga de 1500KN. A instrumentação da barra foi feita utilizando três instrumentos de leitura: 1 clip-gage da marca Instron ligado a própria máquina, em posição central da barra e com objetivo de aferir a deformação de escoamento da mesma; 2 LVDT's de 100mm ligados no condicionador de sinais Spyder, posicionados próximo as extremidades de modo a obter a deformação pós-escoamento.

Figura 26 – Ensaio de tração direta na barra de aço.



Fonte: Adaptado de Jucá (2020).

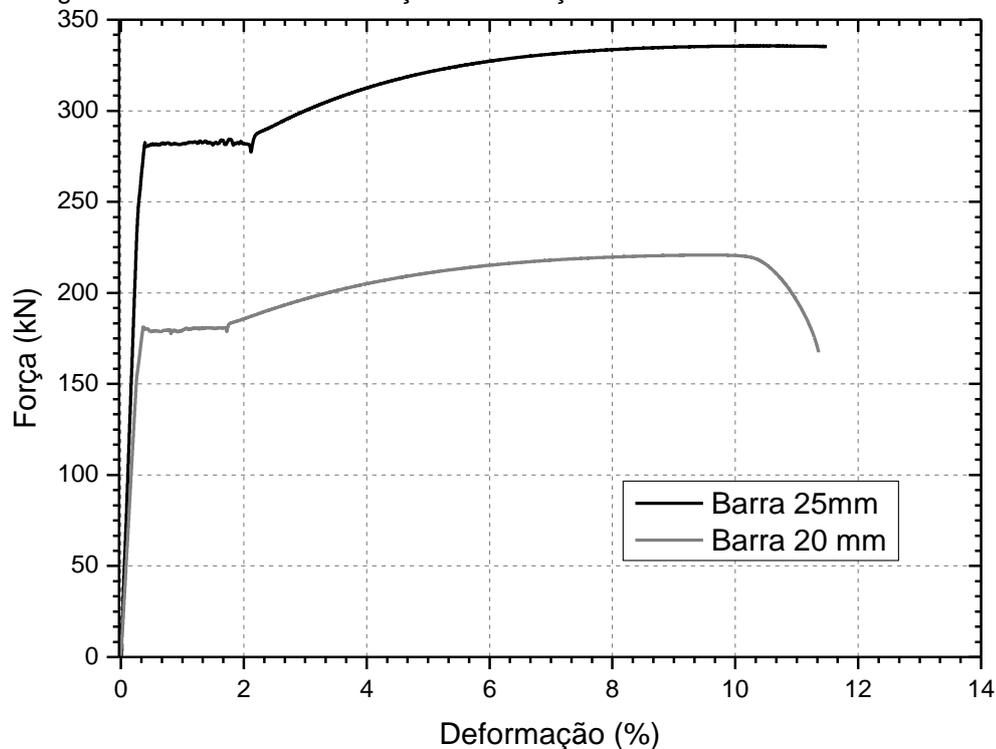
Os dados obtidos de caracterização das barras de 20 e 25mm estão apresentados na Tabela 4, enquanto a curva média de força x deformação está mostrado na Figura 27. O gráfico está mostrado como força x deformação pois os tirantes serão apresentados da mesma maneira.

Tabela 4 - Força, deslocamento e tensões de escoamento e máximas à tração, e módulo de elasticidade das barras de aço de 20 mm e 25 mm

Barra	Força de escoamento (KN)	Deformação escoamento (%)	Tensão de escoamento (MPA)	Força máxima (KN)	Deformação máxima (%)	Tensão máxima (MPA)
20 MM	182,4	0,38%	580,59	222,87	10,38%	709,43
CV (%)	0,79%	3,61%	0,79%	1,32%	11,46%	1,32%
25 MM	284,49	0,36%	579,55	335,62	13,27%	683,71
CV (%)	0,60%	4,43%	0,97%	0,87%	8,31%	1,66%

Fonte: Jucá (2020).

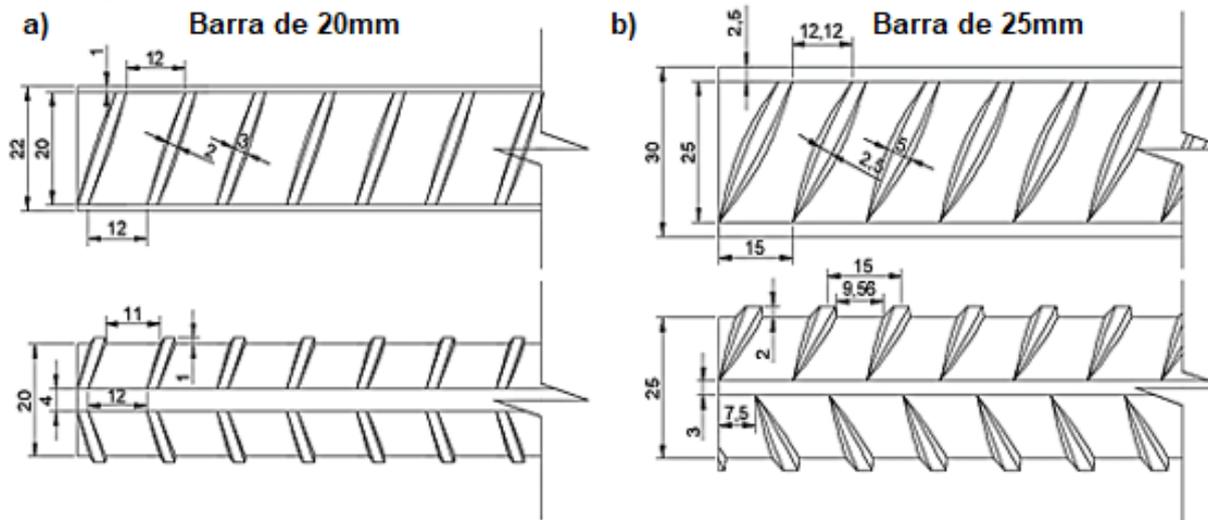
Figura 27 - Curva média de força x deformação das barras de 20 mm e 25 mm



Fonte: Jucá (2020).

Cada barra foi caracterizada geometricamente, sendo medido o tamanho e espaçamento de suas nervuras. A representação gráfica das barras com suas características geométricas está representada na Figura 28. No processo de moldagem, as nervuras foram posicionadas em direção ao topo e fundo da forma quando os espécimes foram moldados na horizontal ou direcionadas às faces frente e posterior quando moldadas no sentido vertical.

Figura 28 - Características geométricas das nervuras da barra de 20 mm (a) e 25 mm (b).



Fonte: Jucá (2020).

3.2 Produção e Métodos de Ensaio

Foram utilizados para esta pesquisa dados de referência desenvolvidos anteriormente por Marangon (2011), e realizado certas adaptações devido a disponibilidade de material do local atual do trabalho. Assim, buscou-se manter ao máximo as mesmas características reológicas ou aplicação de materiais que pudessem se aproximar aos adotados pelo autor .

A Tabela 5, expõem de forma detalhada os materiais constituintes da mistura e suas devidas proporções.

Tabela 5 – Composição do traço da mistura cimentícia.

Composição	C1	C2
Agregado graúdo (kg/m ³)	539,6	454
Agregado miúdo (kg/m ³)	930,06	930,06
Cimento (kg/m ³)	360	360
Cinza volante (kg/m ³)	168	168
Sílica #325 (kg/m ³)	70	70
Sílica da casca de arroz (kg/m ³)	45	45
Superplastificante (kg/m ³)	8	13,46
Água (kg/m ³)	160	150
Fibra de aço (kg/m ³)	-----	117
Modificador de viscosidade (g/m ³)	36	12,17
Relação A/C	0,32	0,32

Fonte: Adaptado de Marangon (2011).

Entre as principais mudanças/adaptações realizadas neste trabalho, pode-se dar enfoque a três tipos de componentes: o agregado miúdo, aos agentes químicos (VMA e SP) e a sílica da casca de arroz, que foi empregada em substituição a Sílica Ativa.

Assim, foi dosada uma mistura de concreto autoadensável com reforço de fibras de aço em taxa de incorporação de 1,5% em relação ao volume do traço, com a qual foram produzidas amostras de tirantes prismáticos de dimensões 150x150x750mm com duas taxas de armadura: $\rho:1,40\%(1-\phi 20\text{mm})$, $\rho:2,18\%(1-\phi 25\text{mm})$ e dois sentidos de moldagem do corpo de prova: vertical (paralela à barra) e horizontal (perpendicular à barra). A avaliação dos tirantes foi realizada aos 28 dias de cura.

A produção supracitada pode ser resumida a seguir, intitulando as amostras desenvolvidas com seus respectivos referenciais:

- C2.H.20: 1- $\phi 20\text{mm}$, moldada na horizontal;
- C2.V.20: 1- $\phi 20\text{mm}$, moldada na vertical;
- C2.H.25: 1- $\phi 25\text{mm}$, moldada na horizontal;
- C2.V.25: 1- $\phi 25\text{mm}$, moldada na vertical;

Ainda, foram desenvolvidos corpos de provas da mistura em formato cilindro com a mistura de referência (C1) e com o uso de fibra (C2) buscando-se a caracterização da resistência mecânica da mistura em ensaios de compressão axial aos 28 dias. A nomenclatura supracitada foi adotada devido a este trabalho fazer parte de estudo ampliado e, visando a compatibilização dos dados e resultados conjuntos, optou-se por manter a nomenclatura originalmente adotada.

Na Tabela 6 é exemplificado o quantitativo das amostras produzidas que foram avaliadas no estado endurecido.

Tabela 6 – Quantitativo das amostras produzidas.

Referencial das amostras	Geometria	
	Cilíndrico	Tirante Prismático
C1	8	-
C2	8	-
C2.H.20	-	4
C2.V.20	-	4
C2.H.25	-	4
C2.V.25	-	4

Fonte: Elaboração própria.

3.2.1 Ensaios Reológicos

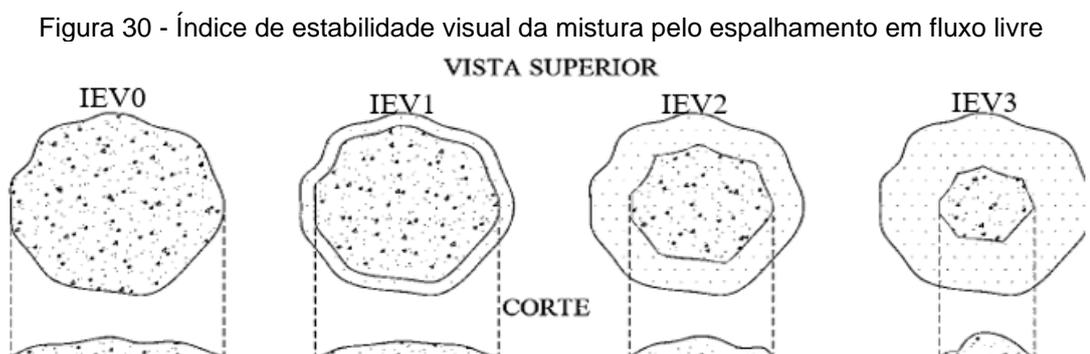
3.2.1.1 Espalhamento

O ensaio de espalhamento prescreve, através da ABNT NBR 15823-2:2017, a determinação da fluidez, em fluxo livre, sob ação do próprio peso do CAA e o tempo de escoamento para que a mistura alcance o espalhamento de 500mm. Para este trabalho almejou-se que a mistura se alcança resultado de aproximadamente 600mm, com classe SF1 (550 a 650mm), e t_{50} maior que dois segundos, sendo a viscosidade plástica aparente classificada como VS2.

Os resultados de fluidez são obtidos através de medidas perpendiculares entre si do diâmetro resultante do espalhamento total do CAA que foi preenchido no cone de Abrams (Figura 29). O índice de estabilidade (Figura 30) da mistura é avaliado por meio visual, onde índice IVE0 é considerado o concreto como homogêneo e sem segregação, sendo o ideal, e o IVE3, uma mistura sem estabilidade e com acúmulo de agregados no centro do espalhamento.



Fonte: ABNT NBR 15823-2 (2017).

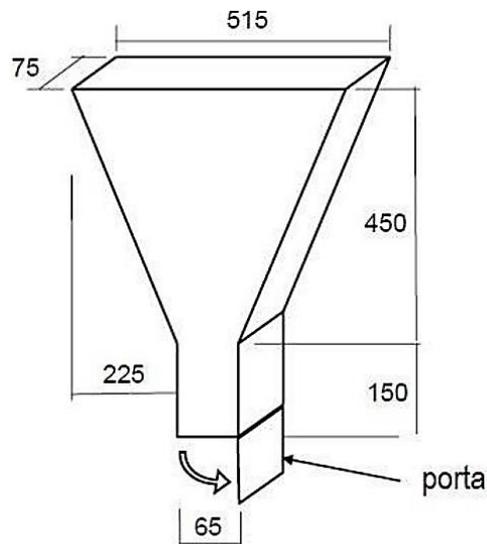


Fonte: Jucá (2020).

3.2.1.2 Funil “V”

A viscosidade da mistura também pode ser avaliada segundo o ensaio de Funil “V”, normatizado pela ABNT NBR 15823-5:2017. O processo consiste, de forma resumida, no preenchimento total do funil e posterior abertura da porta inferior, iniciando o escoamento sob ação gravitacional. O resultado final é adquirido medindo-se o tempo desde a abertura da porta e o escoamento total do CAA do interior da ferramenta. A Figura 31 e Figura 32 ilustram o esquema padrão do Funil “V” e o respectivo dispositivo disponível na execução deste trabalho.

Figura 31 – Esquema padrão do Funil “V” (medidas em mm)



Fonte: ABNT NBR 15823-5 (2017).

Figura 32 – Funil “V” utilizado no trabalho.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.1.3 Anel “J”

O objetivo deste ensaio é analisar a capacidade da mistura de fluir pela armadura no seu lançamento, sendo denominada “habilidade passante” (Figura 33). Após espalhamento da mistura, são avaliadas duas medidas perpendiculares entre si para determinação deste parâmetro.

A execução deste ensaio é normatizada pela ABNT NBR 15823-3: 2017, porém, devido à ausência de instrumento atualizado, os ensaios realizados neste trabalho seguiram as orientações da norma antiga datada no ano de 2010.

Figura 33 – Ensaio de “habilidade passante” por Anel “J”.



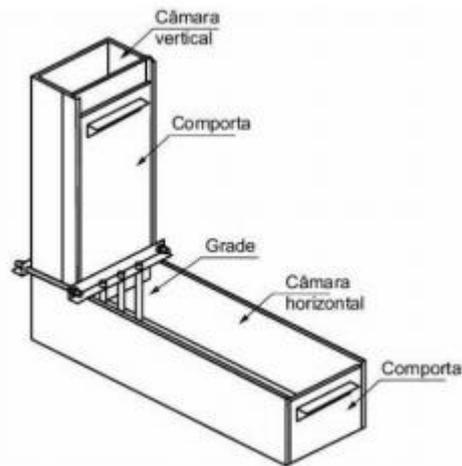
Fonte: Jucá (2020).

3.2.1.4 Caixa “L”

O ensaio de Caixa “L” (Figura 34) também é responsável por avaliar a capacidade da mistura de fluir entre as futuras armaduras dispostas no seu lançamento, avaliando assim a capacidade do concreto fluir entre elas. A metodologia do ensaio, normatizada pela ABNT NBR 15823-4:2017, consiste no preenchimento da parte vertical da caixa e na futura abertura da tampa móvel que permitirá com que o fluido escoe através da parte horizontal.

Como resultado é obtida a razão entre a altura na porção horizontal (H2) e vertical (H1) da forma, e o tempo necessário para ocorrência deste deslocamento. Assim, quanto maior a razão $H2/H1$, maior é a capacidade de fluxo do CAA.

Figura 34 – Ensaio de Caixa “L”,



Fonte: ABNT NBR 15823-4 (2017).

3.2.2 Ensaio Mecânicos

3.2.2.1 Compressão Axial

A fim de caracterizar o CAA quanto ao seu comportamento mecânico à compressão, foram desenvolvidos corpos de provas cilíndricos com dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, moldados em sentido vertical, adicionando-se ou não as fibras de aço. Estas amostras foram desmoldadas nos primeiros dias após a concretagem e mantidos em cura úmida até os 28 dias. A Figura 35.a mostra estas amostras após moldagem.

A resistência à compressão foi determinada em ensaios com velocidade de 0,05mm/min e as deformações aferidas com extensômetros do tipo clip gage da marca Instron (Figura 35.b). A máquina de ensaios mecânicos universais utilizada foi da marca Instron como capacidade de carga de 1500KN. O procedimento de ensaio seguiu as orientações da normativa ABNT NBR 5739:2018.

Figura 35 – Corpos de prova cilíndrico. a) Produção das amostras. b) instrumentação para ensaio de compressão axial.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.2.2 Ensaio de tração direta em tirante

3.2.2.2.1 Produção das amostras

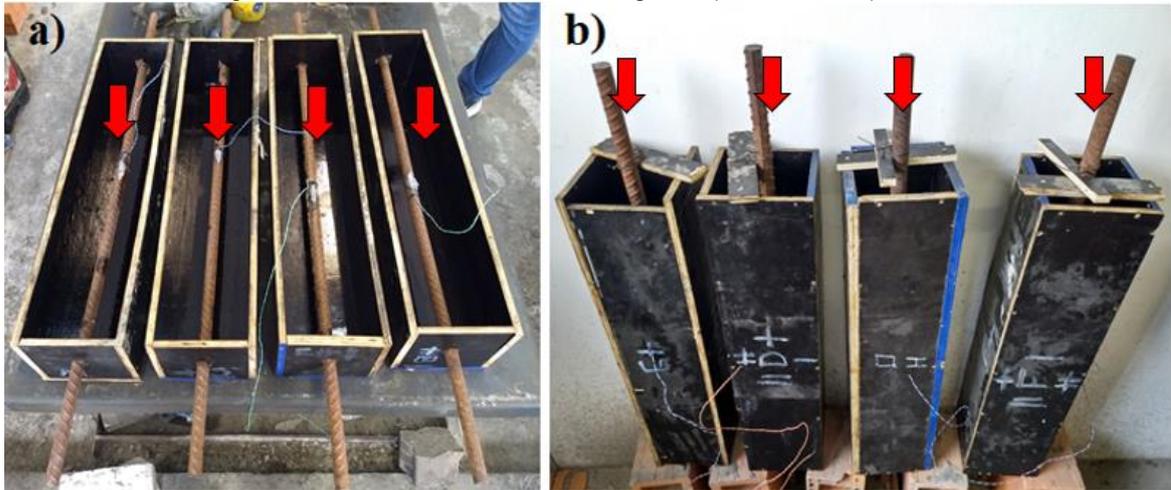
As amostras prismáticas foram produzidas com o compósito cimentício e tem dimensões de 150x150x750mm com uma armadura passando pelo centro de gravidade da seção transversal.

A moldagem dos prismas foi realizada a partir de moldes de madeira produzidos exclusivamente para estas amostras, sendo compostos por compensado naval de 1,2mm, com aberturas para a passagem da armadura nervurada e seção aberta para a direção de moldagem, perpendicular (Figura 36.a) ou paralela (Figura 36.b) a barra. O processo de concretagem das amostras foi realizado em 2 grupos, separados de acordo com a taxa de armadura.

As faces dos corpos de provas foram submetidas a uma fina camada de tinta branca, a qual é responsável por facilitar a observação do aparecimento das fissuras durante e após o ensaio. Ainda, duas faces do prisma moldado na vertical e as faces inferior e superior do prisma moldado na horizontal foram submetidas à pulverização de partículas de tinta spray na cor preto fosco. O objetivo deste processo é desenvolver um padrão estocástico (aleatório) que será analisado em vídeo, por meio do software GOM Correlate, avaliando-se os campos de deformações que

mostram como a fissuração se desenvolveu durante os ensaios. A Figura 37, ilustra este procedimento na amostra.

Figura 36 – Procedimento de moldagem. a) horizontal b) vertical



Fonte: Elaboração própria.

Figura 37 – Personalização das amostras prismáticas para análise em software.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.2.2 Instrumentação dos tirantes

A velocidade de ensaio foi dividida em dois estágios: até o limite de escoamento, onde ocorre a formação de fissuras, a velocidade de ensaio foi de 0,3mm/min até a deformação de 1%, adotando-se posteriormente 1mm/min.

Na instrumentação do tirante foram adotadas as seguintes ferramentas:

- Strain gage uniaxial de 120ohms com grade 5 mm colado no centro da barra de aço (Figura 38);
- LVDT de 100mm, para determinação da deformação da barra de aço, com comprimento de 750mm, conectados no condicionador de sinais Spyder;
- LVDT Instron, aplicados no concreto do corpo de prova para determinação da sua deformação;
- Câmera Canon, configurada para captura 720p e 30fps, para captura da face frontal do corpo de prova;
- Câmera Sony, configurada para captura 2160p e 30fps, para captura da face de fundos da forma, na moldagem horizontal, e no caso da moldagem vertical, a face inversa a aplicação do strain gage.

Figura 38 – Detalhe dos strain gages.

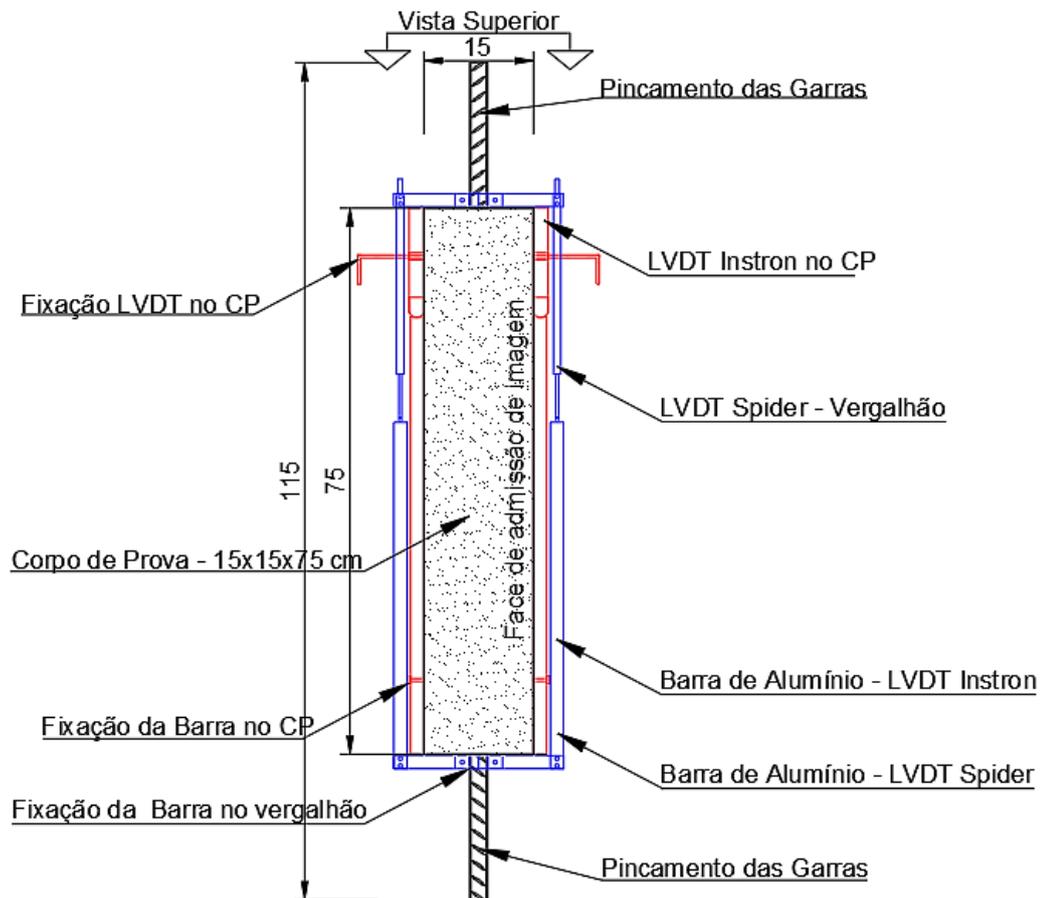


Fonte: Elaboração própria.

O quadro metálico responsável pela sustentação do LVDT Spider é formado por um sistema onde a mola garante a fixação do mesmo na barra, ficando posicionado na diagonal da seção transversal do prisma de modo a não prejudicar a captura de imagens das faces frontal e posterior. A solução encontrada é apresentada na Figura 40.

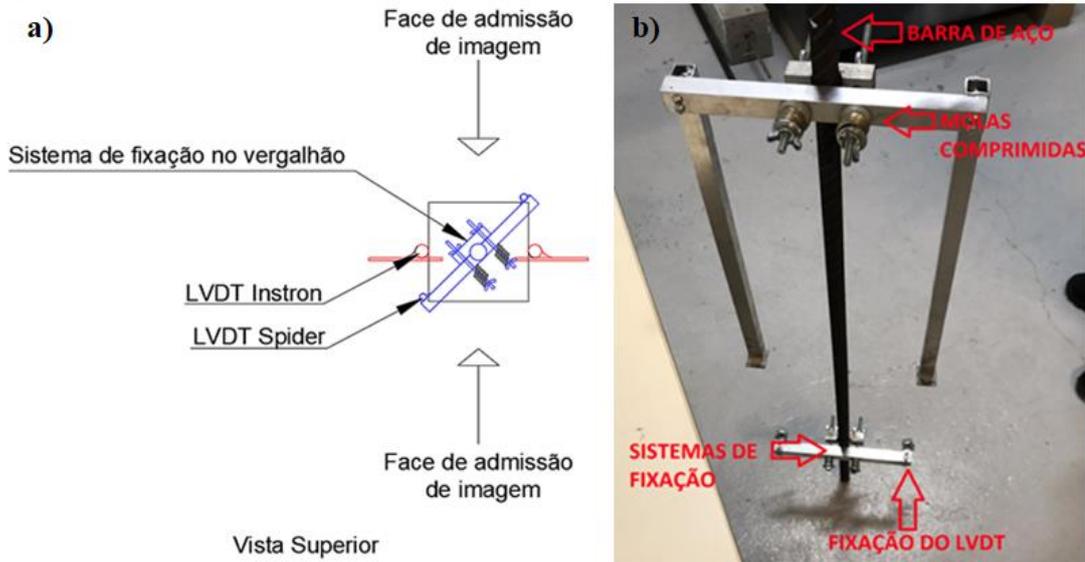
A instrumentação supracitada está ilustrada a seguir na Figura 39. Posteriormente, na Figura 41, vislumbra-se da imagem real de uma amostra já instrumentada e em posição de ensaio.

Figura 39 – Ilustração da instrumentação do ensaio de tirante.



Fonte: Jucá (2020).

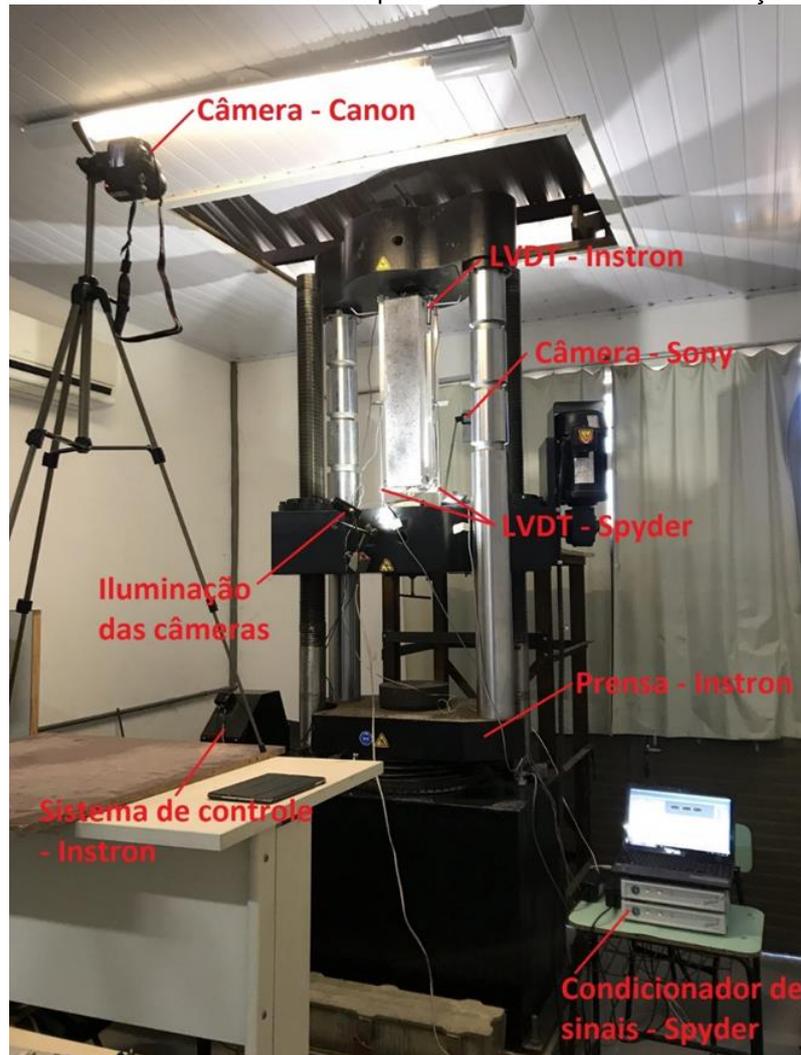
Figura 40 – Layout da instrumentação dos LVDT's junto a barra. a) Ilustração b) Aspecto real.



Fonte: Elaboração própria.

Fonte: Adaptado de Jucá (2020).

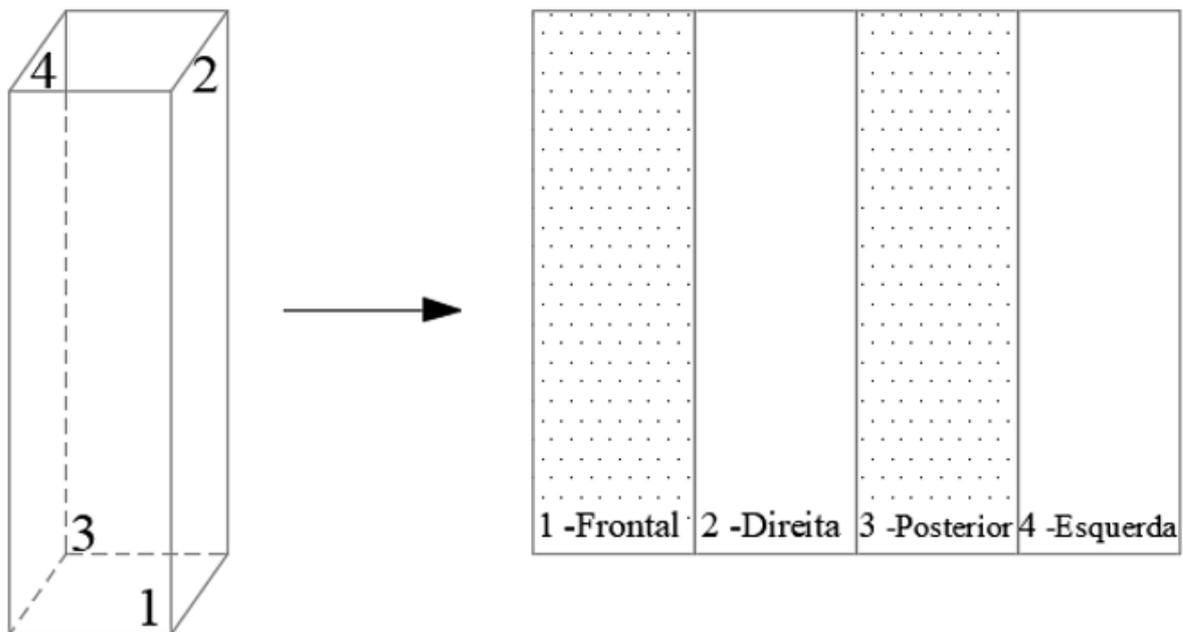
Figura 41 – Procedimento de ensaio para amostras submetidas a tração direta.



Fonte: Adaptado de Jucá (2020).

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, a área de envolvimento das armaduras passivas no estado limite de fissuração, denominada A_{cr} , não deve possuir lado maior que $7,5\phi$ do eixo da barra. Assim, para realizar a análise de fissuração dos ensaios com captura de imagem, este trabalho adotou barras de 20 e 25mm, que resultam em 25 e 16%, respectivamente, da área limite imposta pela norma. Para a montagem do mapa das fissuras, todos os lados do tirante foram analisados, sendo denominados conforme a representação na Figura 42.

Figura 42 - Identificação das faces para o mapa de fissuras



Fonte: Jucá (2020).

3.2.2.2.3 Tomografia Computadorizada

A fim de determinar a dispersão das fibras e a porosidade do elemento, 2 espécimes foram analisados por tomográfica, um moldado na vertical e outro moldado na horizontal. O procedimento foi realizado na Santa Casa de Misericórdia do município de São Gabriel (RS) em um tomógrafo Siemens SOMATOM Scope (Figura 43) com interface syngo CT VC-30 easyIQ.

As imagens foram feitas após a adaptação de um filtro com intervalo de captura na escala Hounsfield capaz de relacionar tais propriedades, posteriormente sendo feito ajustes de filtro de cores relacionados a densidade de cada material para a identificação das fases da amostra através do software syngo fastView (Figura 44).

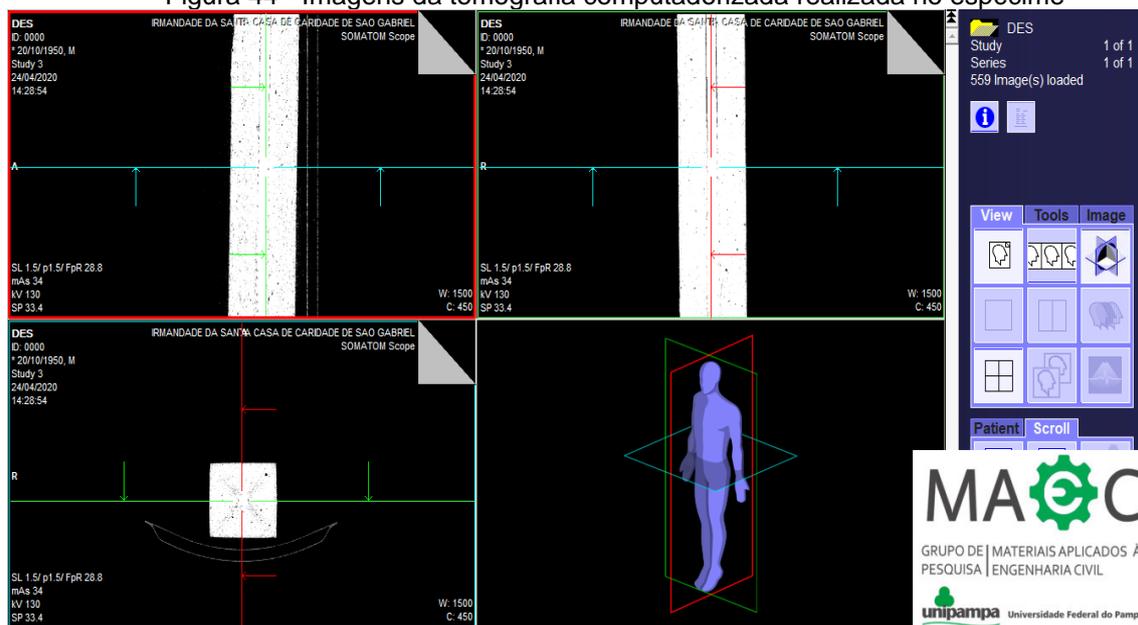
Assim, a quantidade de vazios da seção transversal em análise foi determinada com a aplicação do filtro BWParabolic08, enquanto as fibras de aço e a barra foram captadas pelos filtros HotMetal08 e WarmMetal16.

Figura 43 - Tomógrafo Siemens SOMATOM Scope



Fonte: Jucá (2020).

Figura 44 - Imagens da tomografia computadorizada realizada no espécime



Fonte: Jucá (2020).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados dos resultados dos procedimentos propostos na metodologia para as avaliações em estado fresco e endurecido da mistura. Os ensaios reológicos foram espalhamento com cone de Abrams, determinação da viscosidade aparente com funil “V”, anel “J” e caixa “L” para determinar a habilidade passante da mistura. Quanto ao estado endurecido, foram executados ensaios de resistência à compressão do traço de caracterização com e sem fibras para determinação de sua tensão e deformação máximas, módulo de elasticidade longitudinal e coeficientes de deformação lateral (Poisson). Os ensaios de tração uniaxial nos tirantes determinaram a rigidez, cargas e deformações de fissuração e escoamento, fratura através de imagens e a dispersão e porosidade relacionadas a presença das fibras na matriz.

4.1 Propriedades reológicas

4.1.1 Espalhamento

Os valores do ensaio de espalhamento obtidos através do cone de Abrams são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do espalhamento da mistura

Mistura	Teor de SP (%)	Teor de VMA (%)	Espalhamento (mm)
C2	1,12	0,0094	575

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 45 mostra a mistura ao final do ensaio, apresentando 575 mm de espalhamento. Nota-se a distribuição homogênea dos agregados e fibras, garantindo a mistura um índice de estabilidade classificado como IEV0 (ver Figura 30). De acordo com a ABNT NBR 15823:2010, a mistura pode ser enquadrada como classe de espalhamento SF1, entre 550 e 650mm, com tempo t50 maior que 2s. A viscosidade plástica aparente é classificada como VS2, o que garante o controle de segregação e/ou exsudação da mistura.

Figura 45 - Aparência do espalhamento



Fonte: Jucá (2020).

4.1.2 Viscosidade aparente com funil “V”

O resultado experimental do ensaio de funil “V” está apresentado na Tabela 8. O tempo de fluidez de 59s vai em concordância com os resultados de Marangon (2011), que alcançou 51s com 1,5% de fibras na matriz.

Tabela 8 - Resultado de fluidez com funil "V"

Mistura	Tempo de fluidez (s)
C2	59

Fonte: Elaboração própria.

4.1.3 Habilidade passante através de Anel “J”

O resultado, apresentado na Tabela 9, mostra uma redução do espalhamento de 23,47% em comparação com o ensaio de cone de Abrams (575mm). Segundo a ABNT NBR 15823:2010, a habilidade passante desta mistura pode ser classificada com a denominação PJ2, determinada a partir da diferença de espalhamento do cone de Abrams e Anel “J”.

Tabela 9 - Resultado de espalhamento em anel "J"

Mistura	Espalhamento com anel "J" (mm)
C2	440

Fonte: Elaboração própria.

4.1.4 Habilidade passante em caixa “L”

Duas configurações foram utilizadas na determinação da medida da habilidade passante com caixa “L”: sem e com três barras presentes. Os resultados estão expostos na Tabela 10. Quando usado três barras de anteparo, a recomendação é que a relação H2/H1 seja maior ou igual a 0,8, enquanto que na ausência de barras o valor deve permanecer entre 0,91 e 1.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de caixa "L"

Mistura	Relação H2/H1	
	Sem barras	III barras
C2	0,91	Bloqueio

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que na configuração com a presença de três barras a mistura não atendeu a recomendação estabelecida, pois mostrou-se bloqueada, o que vai de encontro com os resultados obtidos por Marangon (2011) para teores de 1,5% de fibras.

4.2 Propriedades mecânicas: comportamento à compressão

A seguir serão apresentados os resultados para os ensaios de compressão nas amostras com e sem fibras em idade de 28 dias.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias

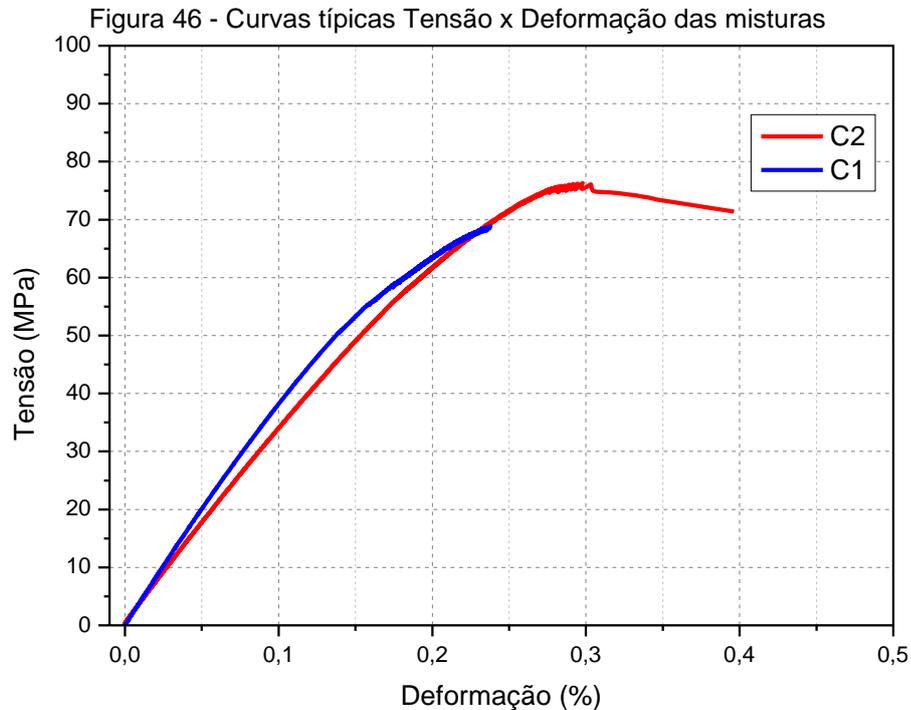
Misturas	Tensão de compressão		Deformação		Módulo de elasticidade	
	Valor médio (MPa)	CV (%)	Valor médio (mm/mm)	CV (%)	Valor médio (GPa)	CV (%)
C1	66,33	3,31%	2,21	11,69%	37,98	5,84%
C2	77,89	1,44%	2,62	9,66%	29,71	7,5%

Fonte: Jucá (2020).

Os resultados indicam que a presença de fibras elevou a tensão máxima da mistura em 14,84% em relação a matriz simples. Os valores de tensão máxima das misturas foram de 77,89 MPa e 66,33 MPa, respectivamente. Valores superiores da matriz com fibras também foram encontrados para as deformações, representando uma diferença de 15,38%, se comparada ao concreto sem fibras.

As curvas típicas de ambas misturas são mostradas na Figura 46. A redução apresentada no módulo de elasticidade da mistura com fibras pode estar associada

a perturbação granular que estas causam, resultando na elevação do índice de vazios internos, e também pelo maior teor de superplastificante usado no compósito para correção reológica, uma vez que este pode resultar na formação e aprisionamento de bolhas de ar.



Fonte: Jucá (2020).

Apesar da redução do módulo de elasticidade longitudinal, a mistura com fibras mostrou-se mais tenaz e dúctil, absorvendo maior quantidade de energia de deformação. Ao contrário disso, a mistura sem fibras desempenhou ruptura frágil, de forma brusca e altamente expansiva, comportamento este, típico de materiais frágeis de alta resistência mecânica. A Figura 47 mostra as amostras após o ensaio de compressão e serve de apoio para expressar os aspectos citados anteriormente.

Figura 47 - Modo de fratura em ensaio de compressão. a) Sem fibras b) Com fibras



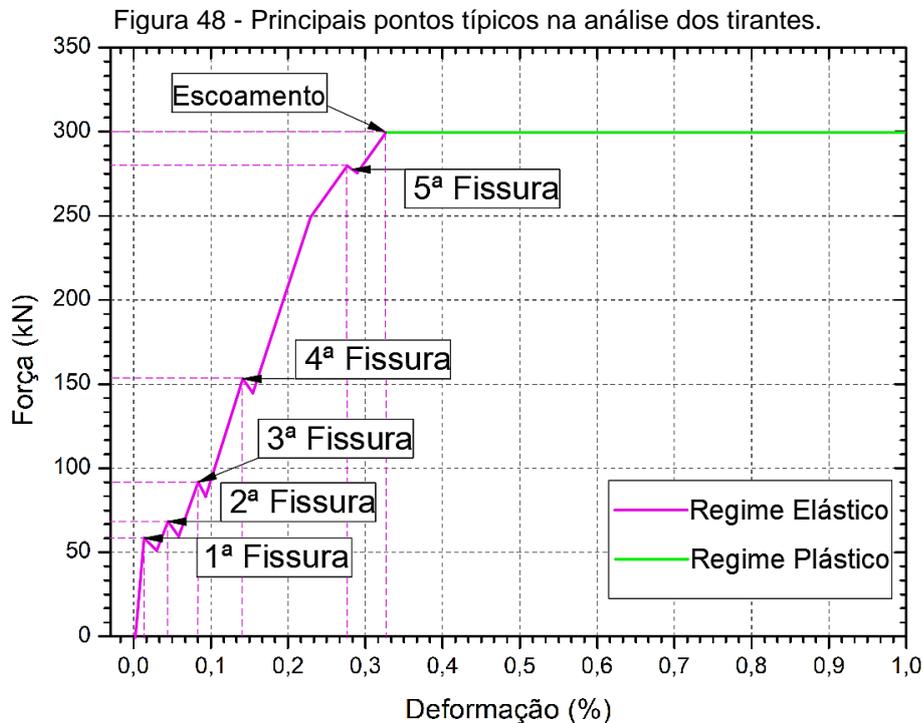
Fonte: Jucá (2020).

4.3 Propriedades mecânicas: tração com barra de 20mm

Conforme descrito no item 3.2, os ensaios de tração direta nos tirantes foram realizados com 4 exemplares, sendo na análise, adotada a curva típica de cada grupo. Para a barra de aço, afim de comparação nas figuras, foi adotada a curva média força (kN) x Deformação (%) obtidas com os resultados de três ensaios de tração direta nos tirantes.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, a máxima deformação do aço em estruturas de concreto armado deve ser de 1%, parâmetro este adotado como limite na interpretação dos dados deste trabalho.

A Figura 48 representa o método interpretativo usado na análise dos principais pontos dos tirantes, dentro do regime elástico da barra, para a avaliação do processo de abertura de fissuras e eventuais variações de inclinação da curva que indiquem fenômeno de fratura da amostra. Para tal análise serão consideradas curvas típicas, sendo os resultados médios dos grupos apresentados nas tabelas em cada sub item de análise.



Fonte: Jucá (2020).

Na Tabela 12 e Tabela 13 são apresentados os resultados médios de cada grupo de tirantes com barra de 20mm.

Tabela 12 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo horizontal com barra de 20mm

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	Módulo de Rigidez (GPa)	CV(%)
1ª FISSURA	106,889	8,37%	0,00864	36,25%	4760,941	29,34%
ESCOAMENTO	201,887	5,61%	0,077	20,40%	273,703	14,69%

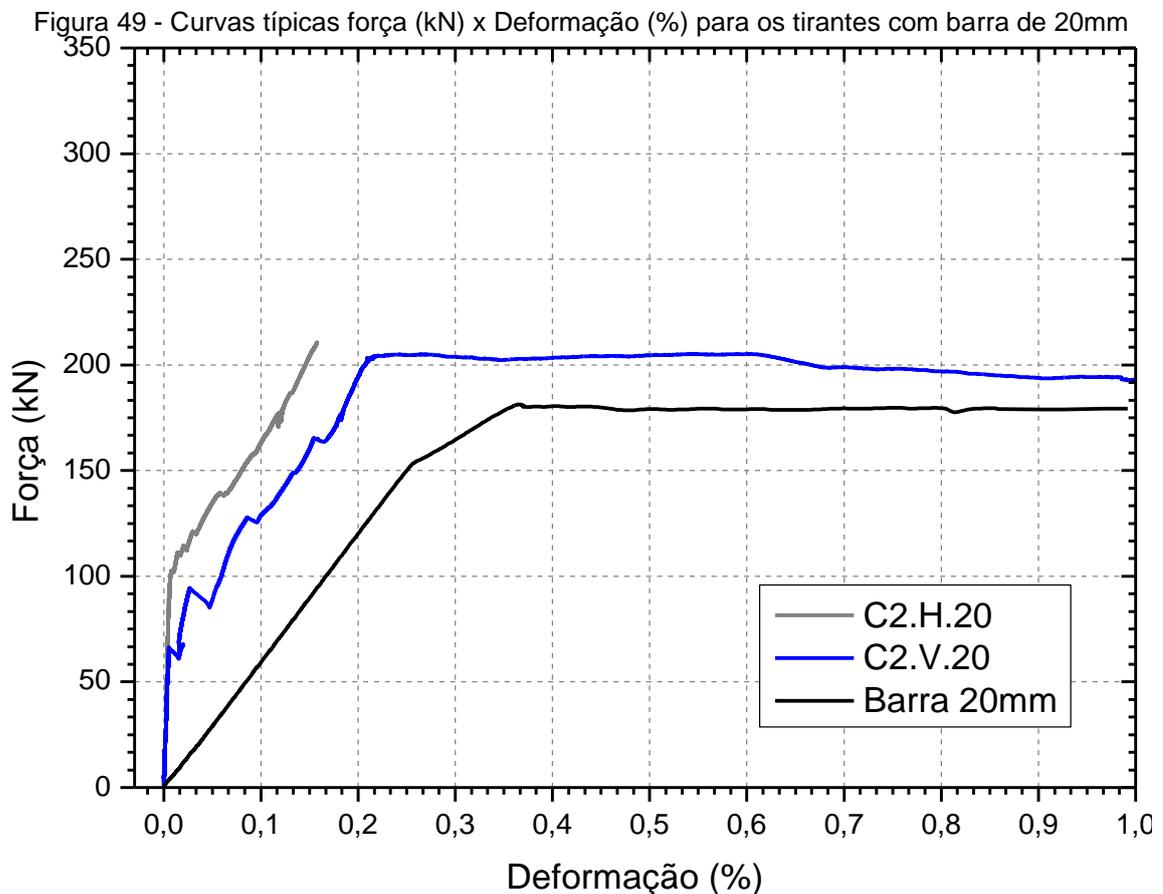
Fonte: Jucá (2020).

Tabela 13 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo vertical com barra de 20mm

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	Módulo de Rigidez (GPa)	CV(%)
1ª FISSURA	61,121	16,60%	0,006	21,12%	3185,741	16,49%
2ª FISSURA	85,038	11,59%	0,022	20,66%	747,006	10,63%
3ª FISSURA	113,186	16,96%	0,065	42,08%	381,776	29,03%
4ª FISSURA	132,06	22,59%	0,113	31,97%	246,054	9,42%
5ª FISSURA	180,436	5,96%	0,254	0,43%	185,528	6,75%
ESCOAMENTO	202,772	1,30%	0,277	23,65%	170,157	56,79%

Fonte: Jucá (2020).

Na Figura 49 são mostradas as curvas típicas de cada grupo, horizontal e vertical, com barras de 20mm.



Fonte: Jucá (2020).

Pode-se observar que no corpo de prova moldado na horizontal (C2.H.20) que o aparecimento da primeira fissura é dado com um aumento de carga, 74,86%, e módulo de rigidez, 48,45%, em relação aos espécimes verticais (C2.V.20). Contudo, no grupo vertical (C2.V.20) a redução do módulo se apresenta de maneira gradual no decorrer da fissuração e tem seu ponto crítico próximo ao valor de 246 GPa, localizado na quarta fissura, enquanto no grupo C2.H.20, essa redução ocorre logo na primeira fissura e se mantem estável até o escoamento.

O processo de fissuração nos espécimes verticais se apresenta de forma gradual e com decréscimo de sua capacidade de suportar as solicitações a cada estágio, visto que a cada evento de abertura de fissura, o módulo de rigidez é reduzido.

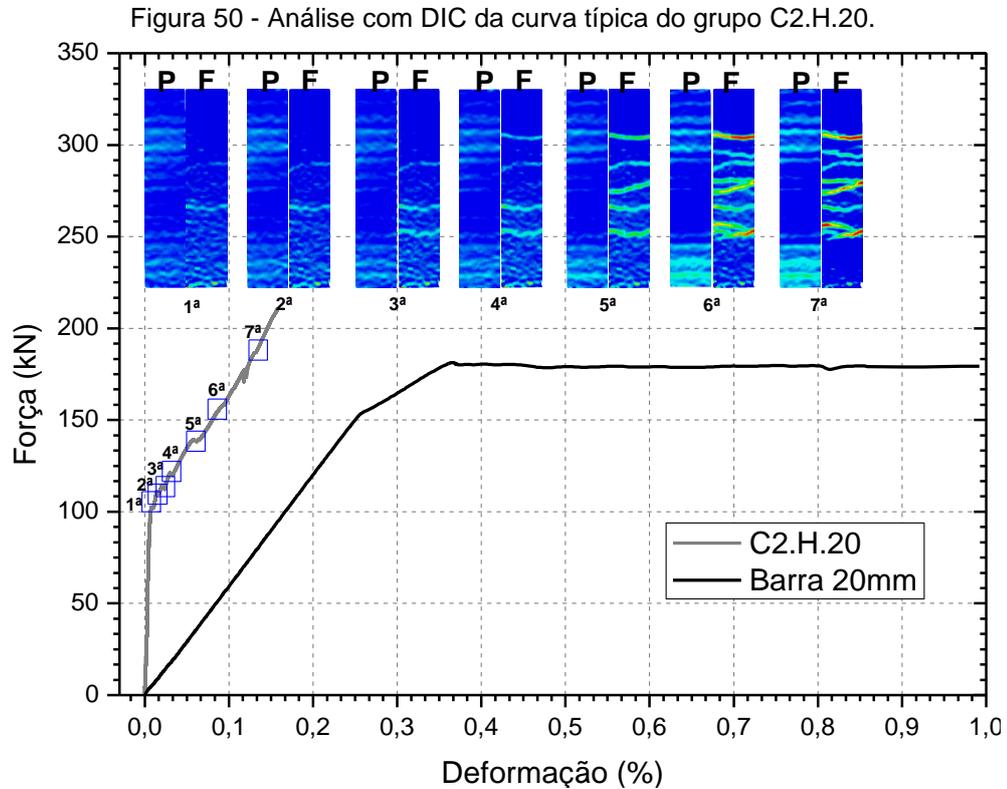
4.3.1 Análise das deformações

A partir da correlação digital de imagem (DIC) foi possível analisar o desenvolvimento do processo de fissuração dos tirantes através de pontos de interesse do ensaio que tenham desempenhado comportamento característico do fenômeno ou variação suspeita.

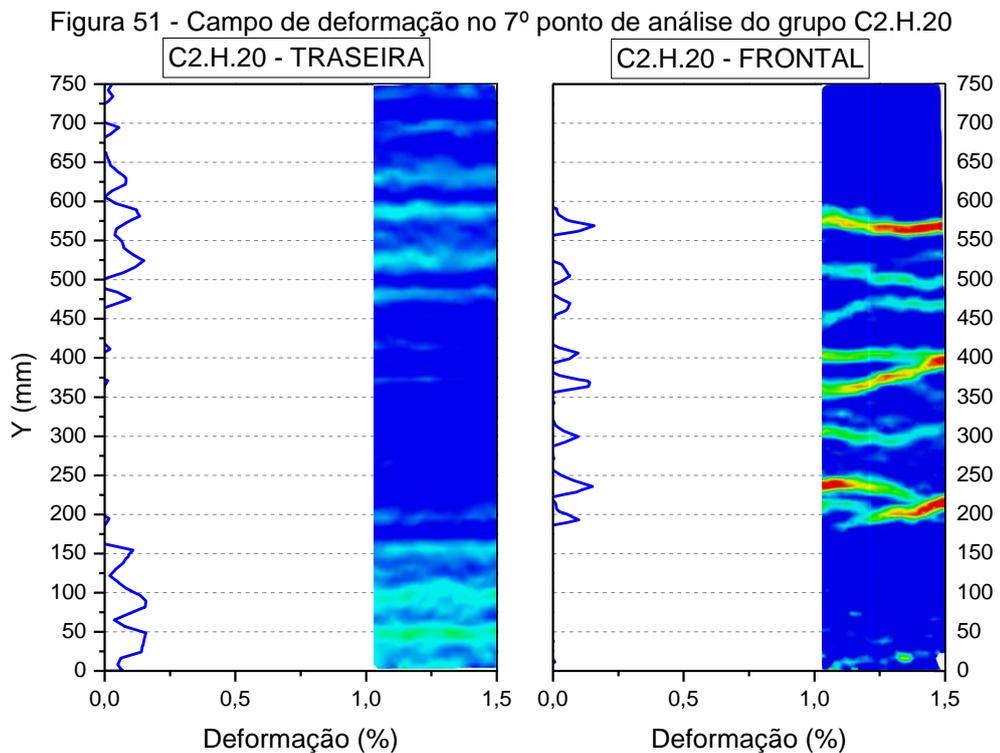
Assim, os campos de deformação da face frontal e posterior, denominadas “F” e “P”, respectivamente, foram analisados a partir das curvas típicas força x deformação. Nas amostras moldadas em sentido horizontal, “F” representa a parte superior da forma, de onde foi lançado e dado acabamento à mistura e “P” a sua posterior, ou seja, o fundo da forma. Nos tirantes lançados no sentido vertical às faces frente e posterior representam os lados para onde as nervuras transversais foram direcionadas.

A análise por DIC das amostras do grupo C2.H.20 (Figura 50) foram realizadas com uma redução de escala de 0,1% de deformação máxima devido à alta rigidez da peça, que em estado final alcançou apenas 0,077% de deformação. Portanto, os pontos analisados aqui não foram destacados na tabela de resultados médios (Tabela 12) por não representarem variações mecânicas substanciais. O 5º ponto da análise representa o início da fissuração do tirante, porém com assimetria, uma vez que, a fissura aparece apenas na face frontal. A face posterior (ou traseira) mostrará fissuras substanciais somente nas extremidades do corpo de prova, o que já foi citado por Azizinamini *et al.* (1993) sobre aderência em concretos de alta

resistência. Este comportamento pode ser melhor observado na Figura 51, que detalha o 7º ponto de análise relacionando a posição de cada fissura no corpo de prova.

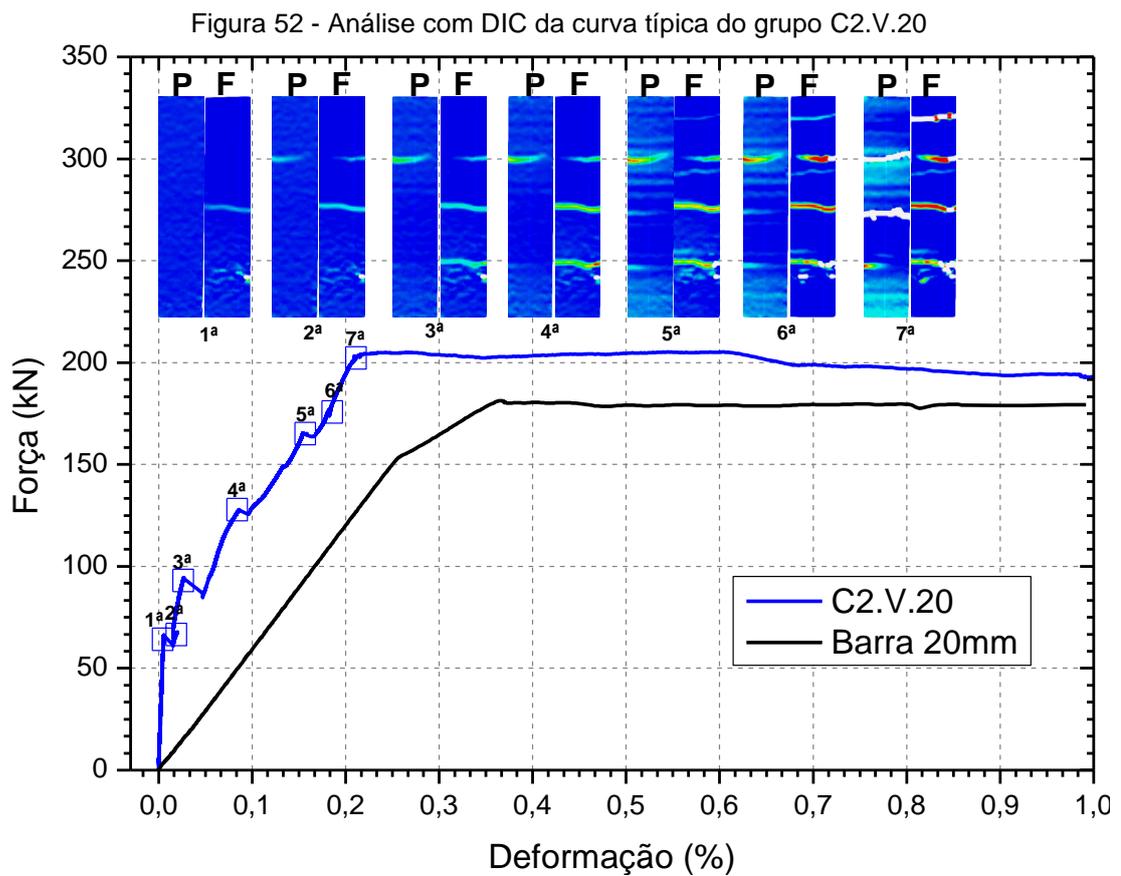


Fonte: Jucá (2020).



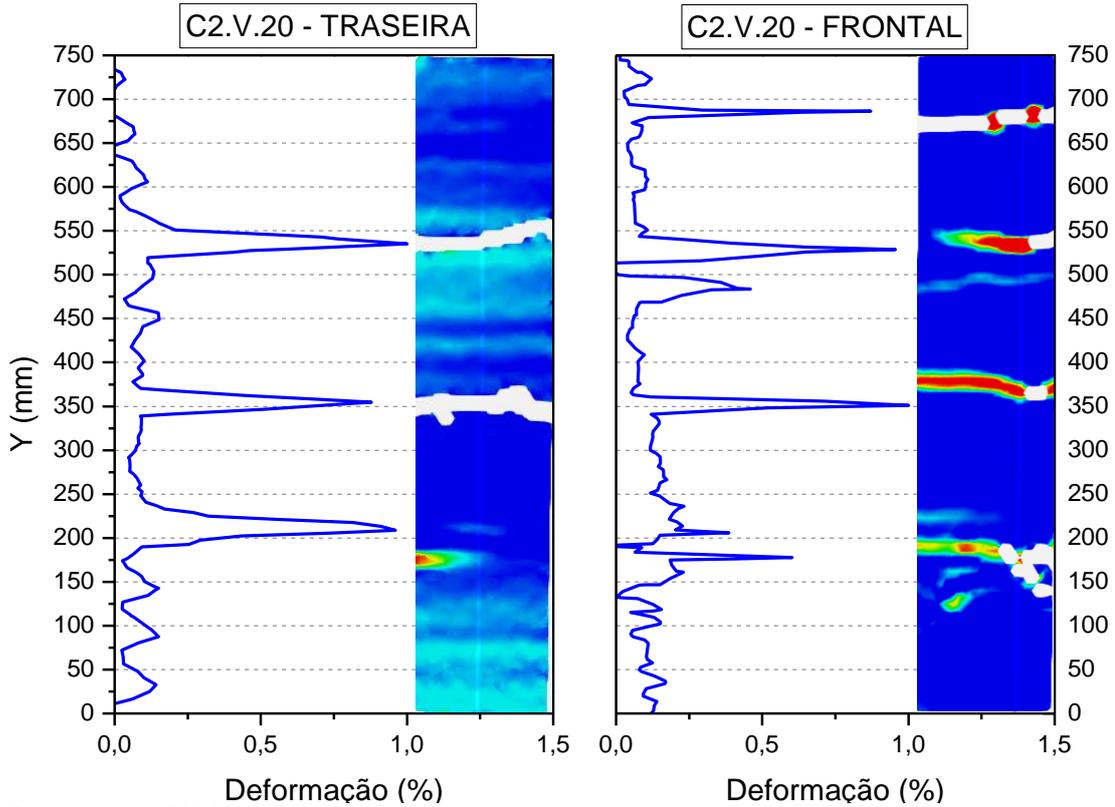
Fonte: Jucá (2020).

Nos resultados do grupo C2.V.20 (Figura 52) é possível identificar uma distribuição das fissuras entre as faces de maneira mais homogênea. É perceptível entre os grupos que há uma influência do método de lançamento no posicionamento das fibras e, na influência destas, na fissuração, pois os tirantes verticais apresentaram um número menor de aberturas e com seções praticamente equidistantes, localizadas em altura de 200, 350 e 550mm (Figura 53)



Fonte: Jucá (2020).

Figura 53 - Campo de deformação no 7º ponto de análise do grupo C2.V.20

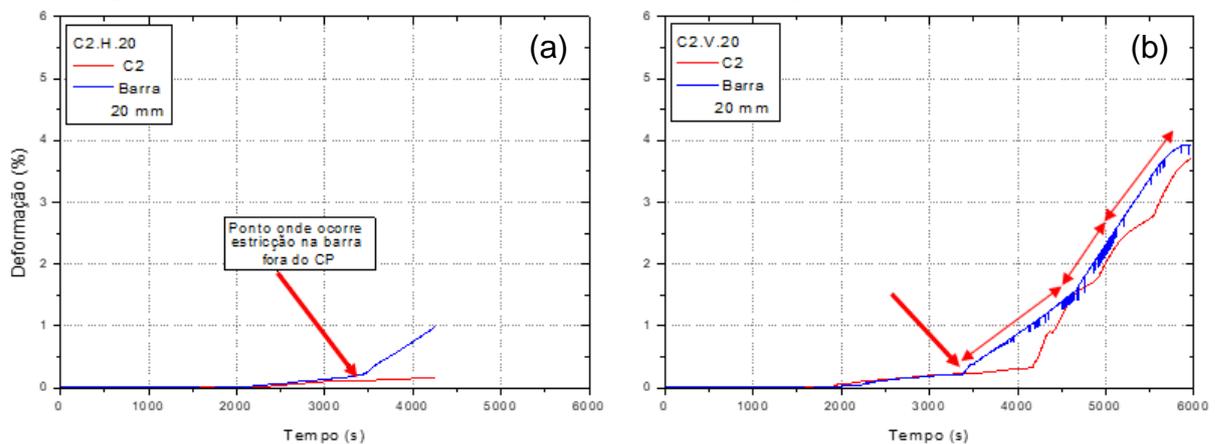


Fonte: Jucá (2020).

4.3.2 Interação barra de aço - compósito

Através da comparação da deformação individual do aço e do concreto dos tirantes no decorrer do tempo de ensaio, foi possível analisar a decoesão, ou perda da interação, entre os dois constituintes. A Figura 54 mostra as curvas típicas de deformação x tempo para os grupos C2.H.20 e C2.V.20.

Figura 54 - Curvas típicas de deformação x tempo para os grupos C20H (a) e C20V (b).



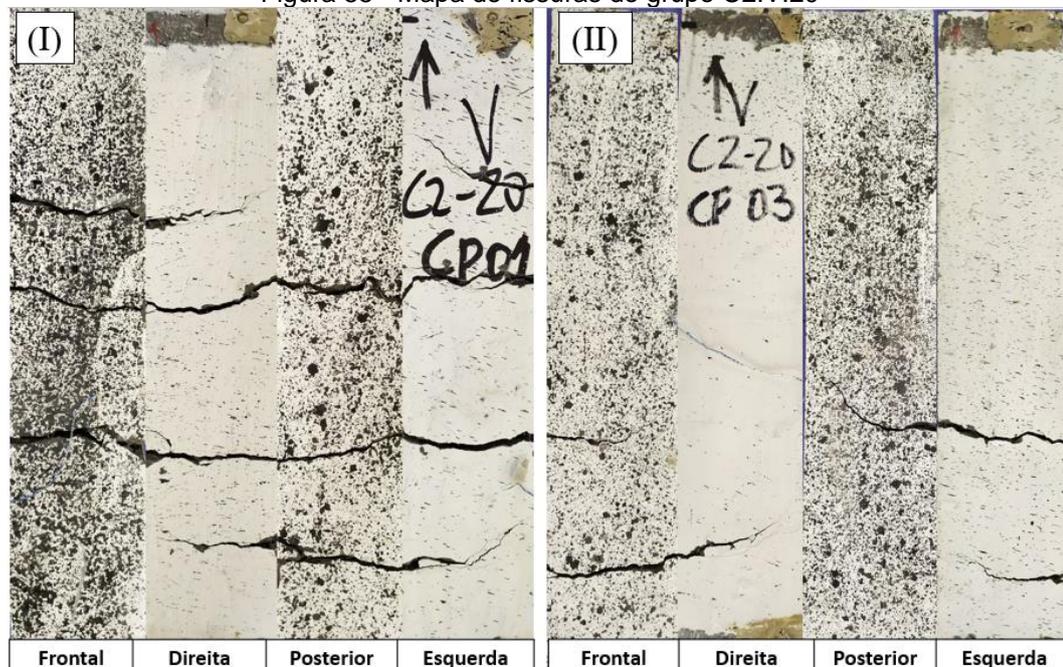
Fonte: Jucá (2020).

Deformações bem reduzidas foram encontradas para o grupo horizontal devido à alta rigidez que o compósito apresentou. É possível observar que em certo ponto as deformações se distanciam de forma brusca pois a barra sofre processo de estrição fora do tirante, o que compromete a análise conjunta entre concreto e barra de aço a partir deste instante do ensaio. Anterior a este fenômeno, pode-se perceber que ambos materiais se comportavam de maneira uniforme no regime elástico, o que indica a influência da fibra em confinar a matriz e garantir a aderência desta com a barra. O grupo C2.V.20 apresenta deformações relativas mais homogêneas entre os elementos, se afastando quando ocorre a fissuração e reaproximando-se na sequência do ensaio.

4.3.3 Modo de fratura

O grupo de espécimes verticais, C2.V.20, tem seu modo de fratura caracterizado por fissuras transversais e perpendiculares ao sentido do carregamento (Figura 55), sem apresentar fendilhamento.

Figura 55 - Mapa de fissuras do grupo C2.V.20



Fonte: Jucá (2020).

Devido ao confinamento proporcionado pelas fibras, a barra de aço sofre maiores deformações nas extremidades, causando o chamado processo de ruptura da aderência (Figura 56). Isto acontece, conforme relatado por Bentur, Mindess

(2006), Zollo (1997), Majain *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2018), devido à alta absorção de energia de deformação no confinamento em torno da barra, sendo considerado uma fratura de modo dúctil.

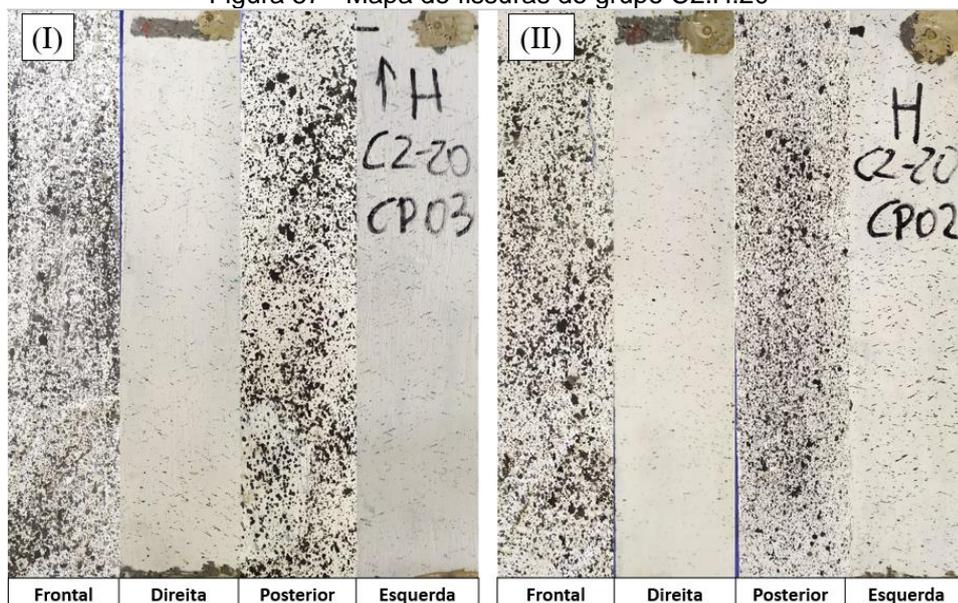
Figura 56 - Ruptura por aderência na extremidade da amostra C2.V.20



Fonte: Jucá (2020).

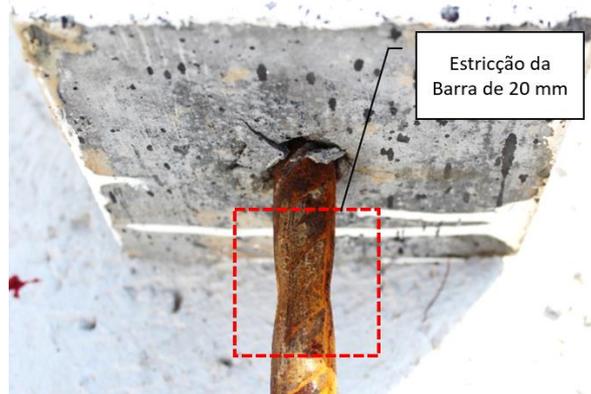
Os tirantes moldados na horizontal (Figura 57) apresentaram comportamento distinto, uma vez que, devido à elevada rigidez, as fissuras só são visíveis quando analisadas pelo DIC (olhar item 4.3.1) e há o escoamento da barra na parte externa do tirante (Figura 58). Assim, o modo de falha deste grupo é em função do estrição da barra, e não pelo seu deslizamento, o que, segundo Al-Jahdali *et al.* (1994) e Belo (2017), é devido à grande aderência entre os materiais.

Figura 57 - Mapa de fissuras do grupo C2.H.20



Fonte: Jucá (2020).

Figura 58 - estrição da barra no grupo C2.H.20



Fonte: Jucá (2020).

4.4 Propriedades mecânicas: tração com barra de 25mm

De forma análoga aos tirantes com barra de 20mm, nos itens a seguir serão apresentados os resultados de tração uniaxial nos tirantes com barra de 25mm. Nas Tabela 14 e Tabela 15 são apresentados os dados médios dos grupos horizontais e verticais, respectivamente. Quando atingida resistência de 500 MPa, a barra de aço sofre processo de mudança em seu módulo de rigidez, o que aqui será chamado de “E -Mudança”, afim de referenciar o fenômeno na análise.

Tabela 14 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo horizontal com barra de 25mm

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	Módulo de Rigidez (GPa)	CV (%)
1ª FISSURA	107,777	16,16%	0,011	33,04%	2031,321	21,36%
2ª FISSURA	140,503	21,10%	0,032	56,10%	396,636	96,86%
3ª FISSURA	200,977	52,30%	0,082	100,44%	236,82	8,64%
E - MUDANÇA	315,549	2,17%	0,161	30,69%	306,086	26,28%
ESCOAMENTO	325,125	1,92%	0,201	18,09%	49,06	21,51%

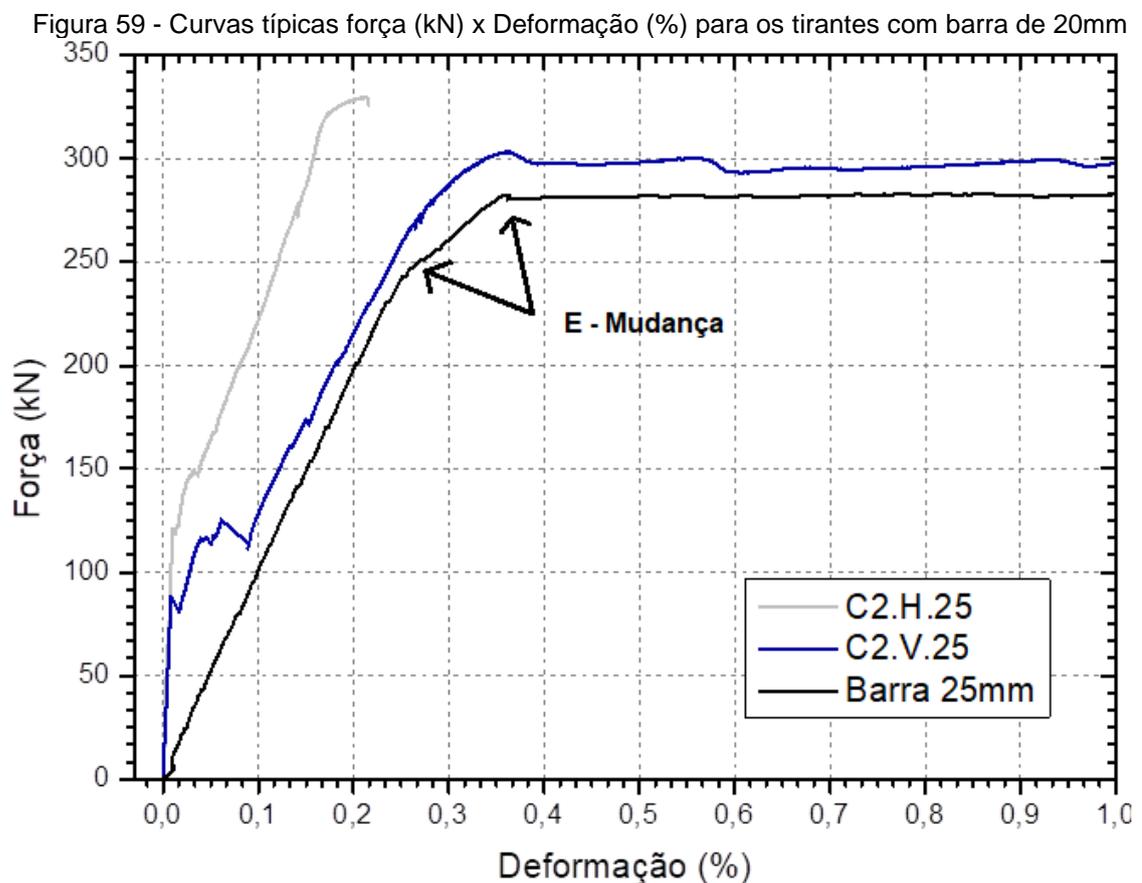
Fonte: Jucá (2020).

Tabela 15 - Resultados médios dos ensaios de tração do grupo vertical com barra de 25mm

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	Módulo de Rigidez (GPa)	CV (%)
1ª FISSURA	61,455	11,14%	0,007	14,40%	1959,19	25,02%
2ª FISSURA	86,082	24,42%	0,024	45,73%	446,534	27,17%
3ª FISSURA	136,627	8,17%	0,081	16,68%	246,586	5,36%
4ª FISSURA	169,396	8,81%	0,129	5,32%	209,192	15,62%
5ª FISSURA	187,234	5,72%	0,156	6,48%	141,318	13,09%
6ª FISSURA	199,267	-	0,179	-	212,83	-
E - MUDANÇA	269,236	19,20%	0,188	32,62%	172,592	12,06%
ESCOAMENTO	301,557	16,76%	0,247	29,97%	78,343	17,65%

Fonte: Jucá (2020)

Na Figura 59 é mostrado a curva típica dos grupos, moldados na vertical e horizontal. Percebe-se que quando comparado os dois grupos de tirantes, aqueles moldados na horizontal apresentam maiores ganhos energéticos quanto a sua deformação, o que corrobora com Torrijos, Barragán e Zerbino (2010) de que o alinhamento das fibras na direção do carregamento pode beneficiar o tirante. Os tirantes verticais apresentam valores de escoamento inferior equivalente a 26,46% em relação aos tirantes horizontais, porém, apresentam ganhos consideráveis de energia de deformação no estágio plástico.

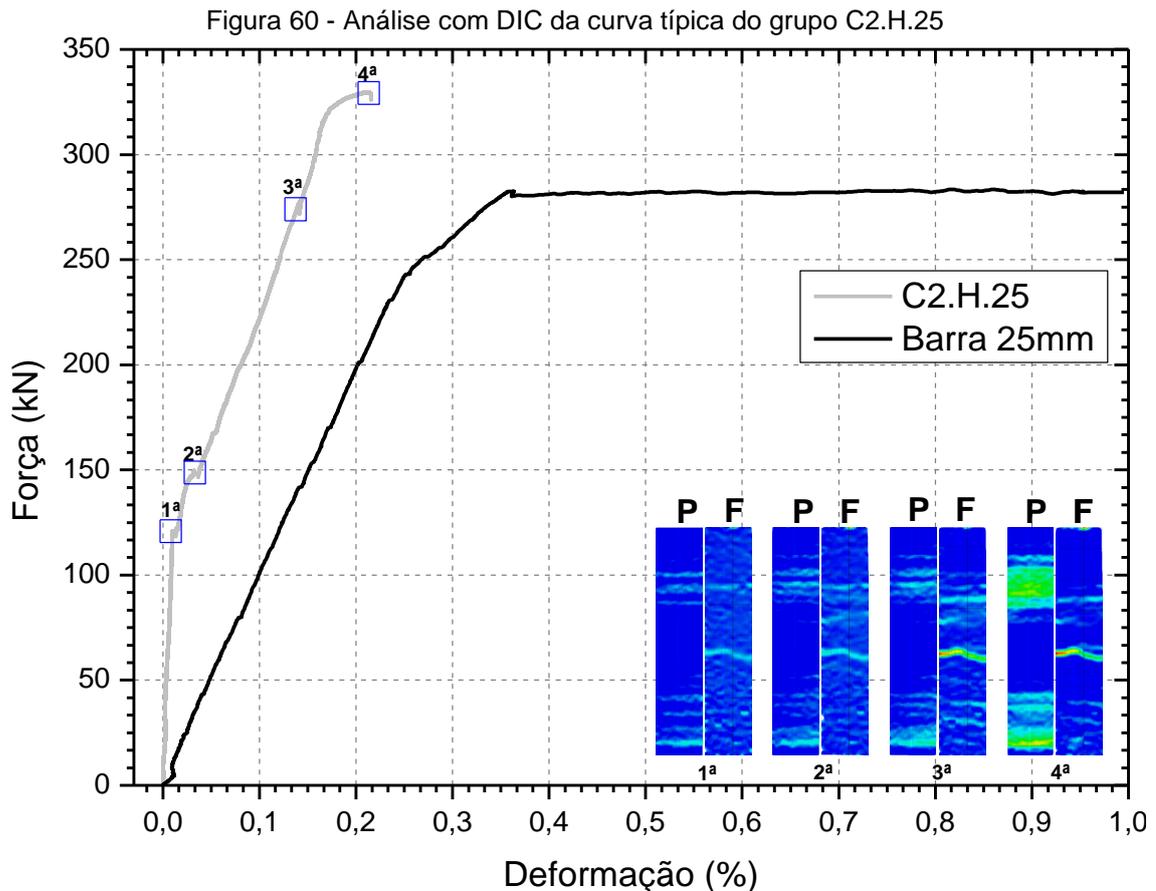


Fonte: Jucá (2020).

4.4.1 Análise das deformações

Estão relacionados a seguir os resultados de correlação digital de imagem para corpos de prova com barra de 25mm. No grupo horizontal há a estricção da barra na parte externa, fora da compósito, e altas cargas são encontradas na fase elástica, elevando a tenacidade se comparado com o grupo vertical.

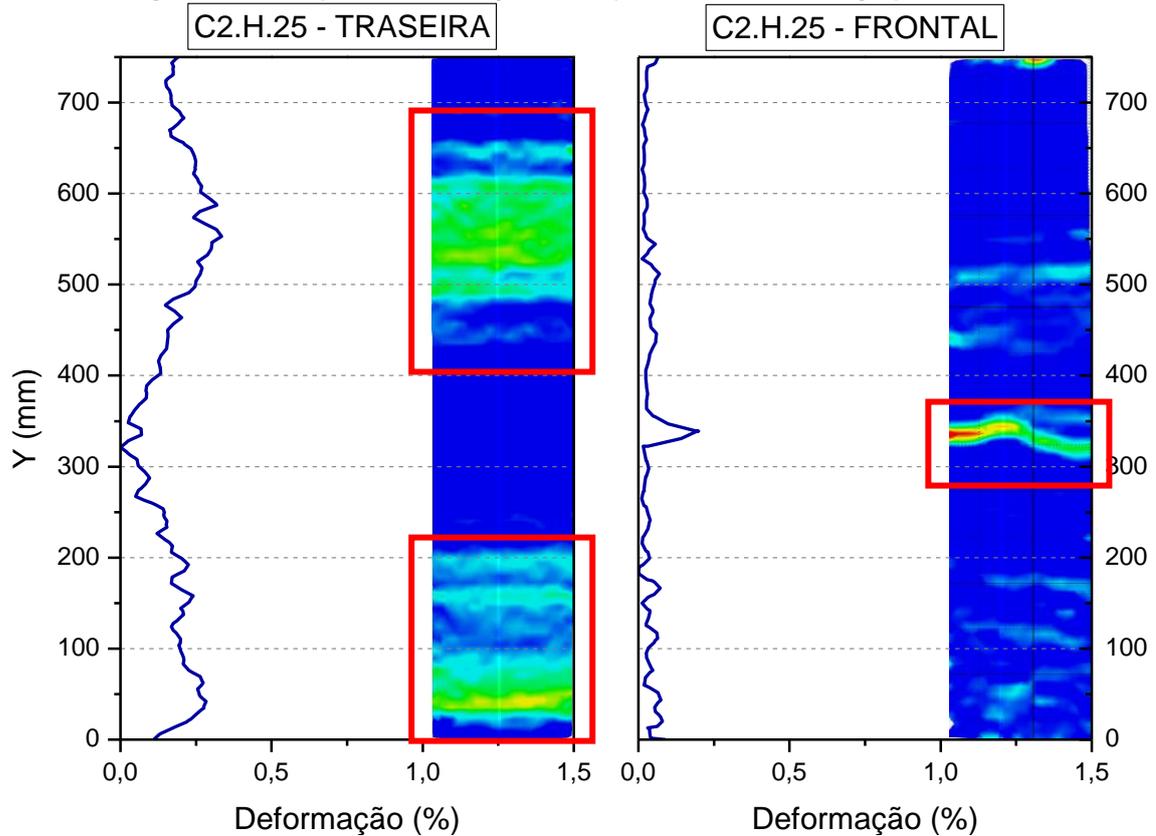
A Figura 60 mostra a análise dos pontos de interesse, que quando comparados aos do grupo C2.H.20 (olhar item 4.3.1), mostram enorme semelhanças em seus resultados, como a ausência de fissuras visíveis a olho nu (ver Figura 65 no item 4.4.3) e maiores deformações nas extremidades da face posterior. Na face frontal, por sua vez, apenas uma fissura é notada, expandindo-se de maneira progressiva até a estrição da barra, onde acaba sendo aliviada.



Fonte: Jucá (2020).

A concentração de tensões de forma não homogênea, que resultam em regiões mais deformadas, podem ser resultado da orientação e distribuição das fibras no elemento estrutural, o que aumenta demasiadamente a rigidez na ligação entre os elementos aço e concreto (GAO *et al.*, 2020). Na Figura 61 o plano de deformação no 4º ponto de interesse mostra essas regiões mais solicitadas, localizadas na altura de 50 e 550mm para a face posterior e em 350mm para a face frontal.

Figura 61 - Campo de deformação no 4º ponto de análise do grupo C2.H.25



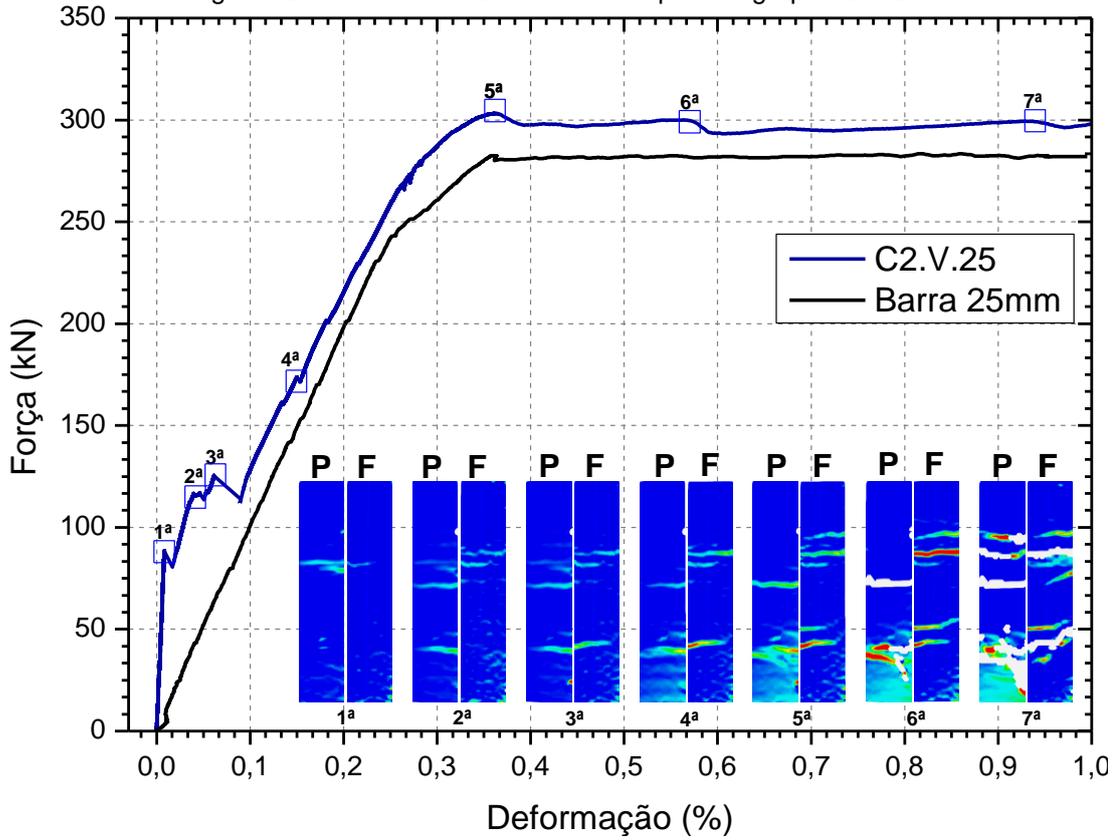
Fonte: Jucá (2020).

O comportamento dos tirantes do grupo moldado na vertical com barra de 25mm (C2.V.25) (Figura 62) apresenta elevada semelhança ao grupo C2.V.20 ao fissurar de maneira simétricas nas duas faces. Porém, devido a menor área de confinamento do grupo C2.V.25, o ganho de energia por deformação é menor e mais próximo a barra de aço, o que é deve-se ao menor enrijecimento causado pelo compósito.

Os dois grupos moldados na vertical parecem desempenhar propriedades semelhantes de absorção de energia por deformação no regime plástico, fornecendo ao tirante melhor comportamento mecânico.

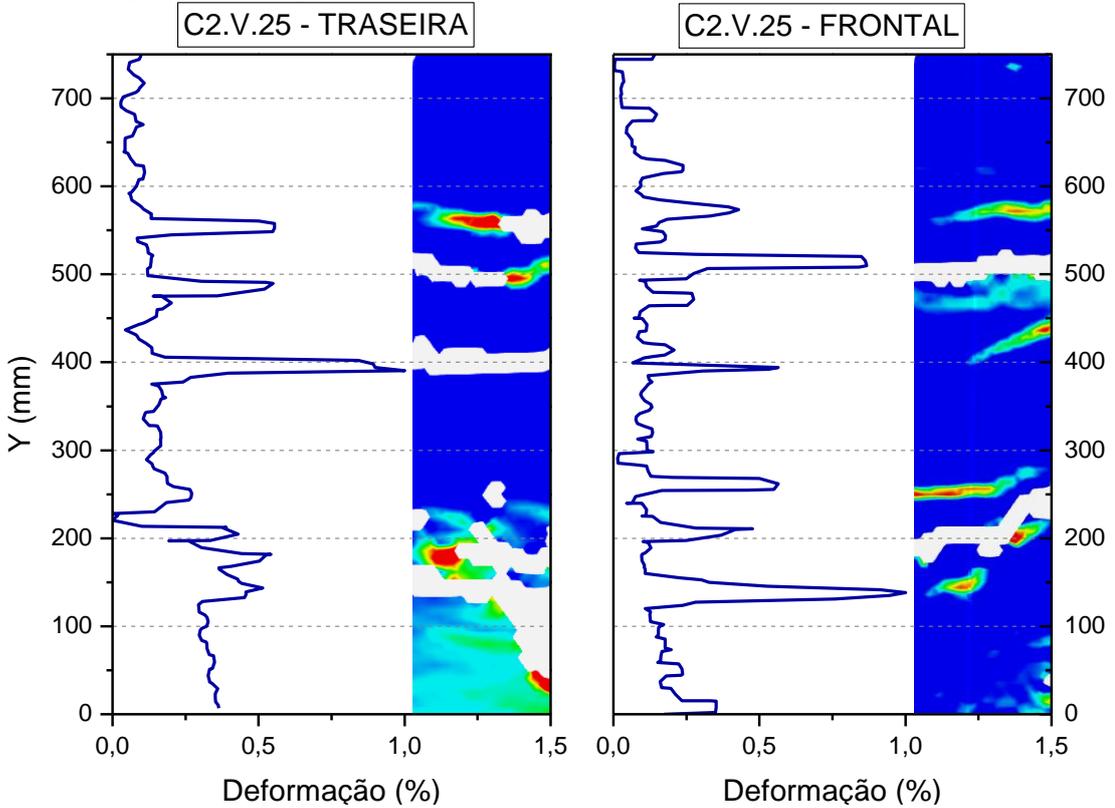
A Figura 63 mostra a simetria das fissuras nas faces do grupo C2.V.25 para os intervalos entre 100 a 250mm e 390 a 550mm.

Figura 62 - Análise com DIC da curva típica do grupo C2.V.25



Fonte: Jucá (2020).

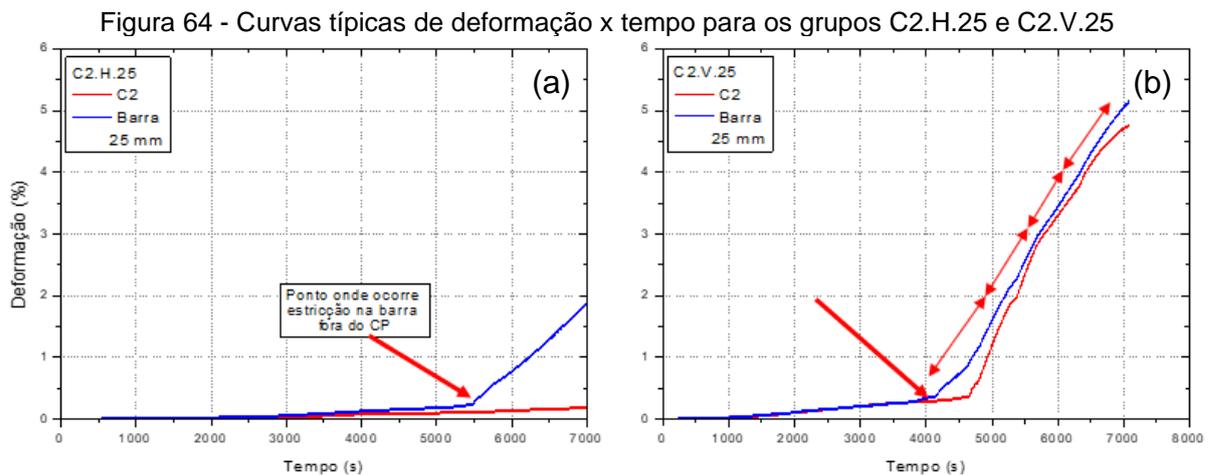
Figura 63 - Campo de deformação no 7º ponto de análise do grupo C2.V.25



Fonte: Jucá (2020).

4.4.2 Interação barra de aço – compósito

Conforme citado no item anterior, a rigidez da interação entre barra de aço e concreto do grupo C2.H.25 (Figura 64.a) é intensa até a estrição da barra, estágio em que a deformação relativa entre os elementos sofre brusca atenuação e a análise conjunta dos dados se torna inválida, pois o fenômeno acontece fora da zona de interesse do ensaio. O processo de decoesão do grupo C2.V.25 (Figura 64.b) acontece a partir da primeira fissura, localizada em aproximadamente 4000 segundos. A partir deste estágio, barra de aço e compósito se aproximam em alguns pontos devido a redistribuição de tensões causada pela aderência até que ocorra a próxima fissura e ocorra novamente o distanciamento. Este fenômeno ocorre devido principalmente à fibra, que transfere tensões nos pontos com descontinuidades e por aumentar o confinamento na região circundante a barra (MAZAHERIPOUR, BARROS, SENA-CRUZ, 2016).

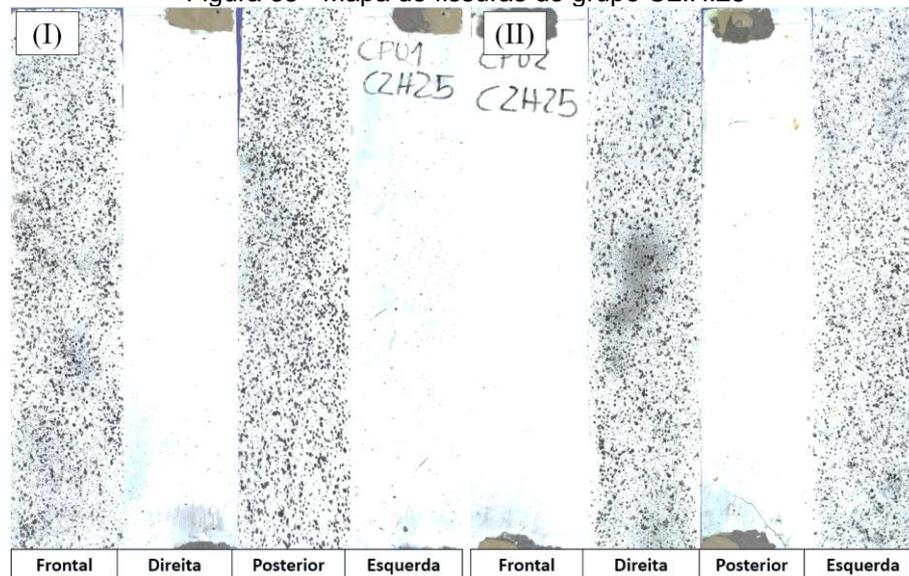


Fonte: Jucá (2020).

4.4.3 Modo de fratura

Conforme pode se observar na Figura 65, nos tirantes horizontais não é possível perceber a presença de fissuras a olho nu, apenas pela correlação digital de imagem (DIC). A estrição da barra de 25mm, fora do tirante, é mostrada na Figura 66.

Figura 65 - Mapa de fissuras do grupo C2.H.25



Fonte: Jucá (2020).

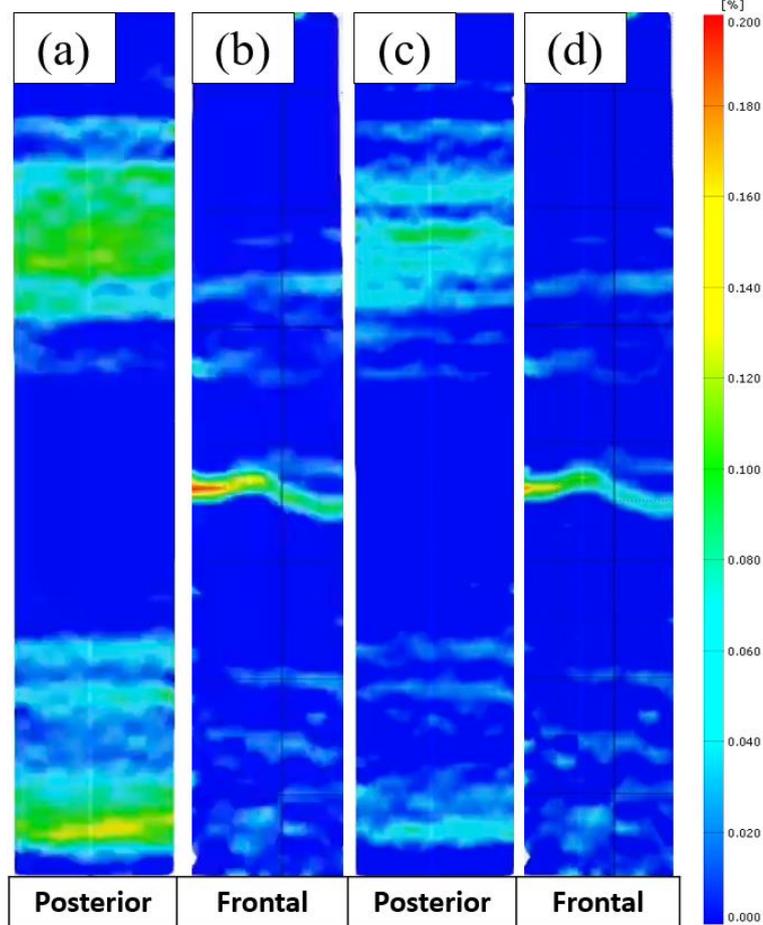
Figura 66 - Estricção da barra no grupo C2.H.25



Fonte: Jucá (2020).

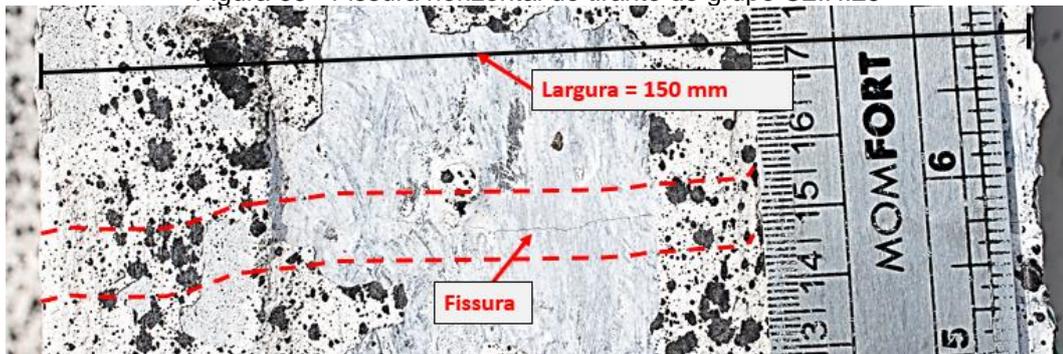
Através das imagens de DIC foi possível se observar que após a relaxação da máquina de ensaios, os tirantes horizontais sofreram uma recuperação elástica e houve redução nas deformações máximas (Figura 67). Aparentemente, a barra não atingiu o escoamento e o compósito, mesmo após o descarregamento, sofreu deformações permanentes. Na Figura 67, a face frontal (a) e posterior (b) do tirante no período final do ensaio, e frontal (c) e posterior (d) após o relaxamento da carga, são mostradas. A fissura frontal presente após o relaxamento da carga, referente ao estágio “d” da Figura 67, é mostrada na Figura 68.

Figura 67 - Comportamento elástico do tirante do grupo C2.H.25, após finalização do ensaio



Fonte: Jucá (2020).

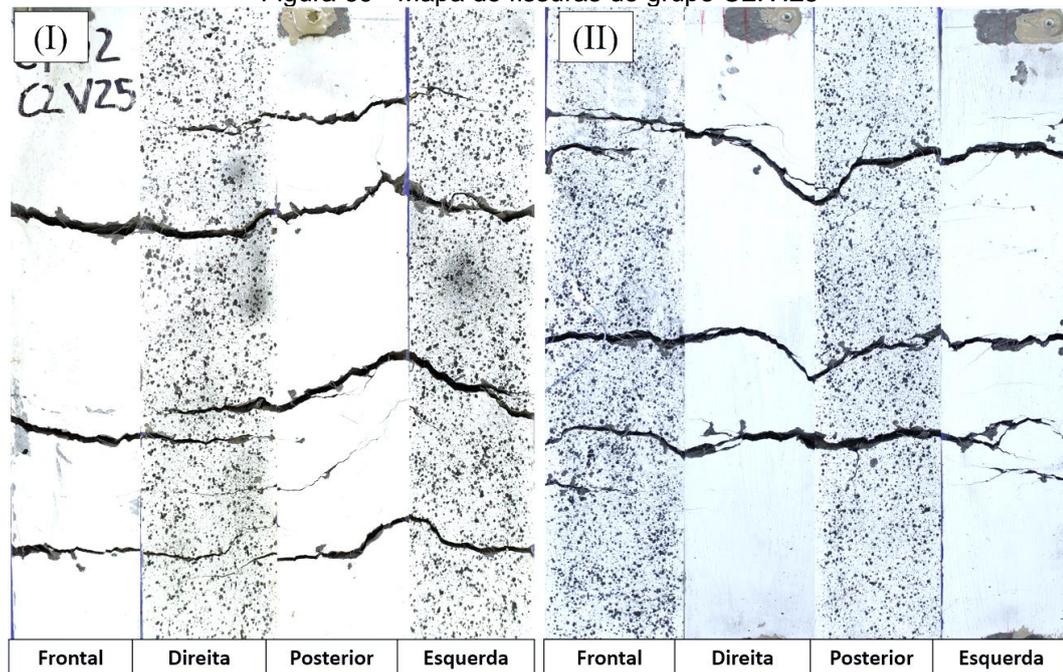
Figura 68 - Fissura horizontal do tirante do grupo C2.H.25



Fonte: Jucá (2020).

O fenômeno de simetria entre as faces de fissuração se manteve como propriedade dos grupos verticais, sendo os resultados dos tirantes de 25mm (C2.V.25), com fratura à tração no compósito, mostrado na Figura 69.

Figura 69 - Mapa de fissuras do grupo C2.V.25



Fonte: Jucá (2020).

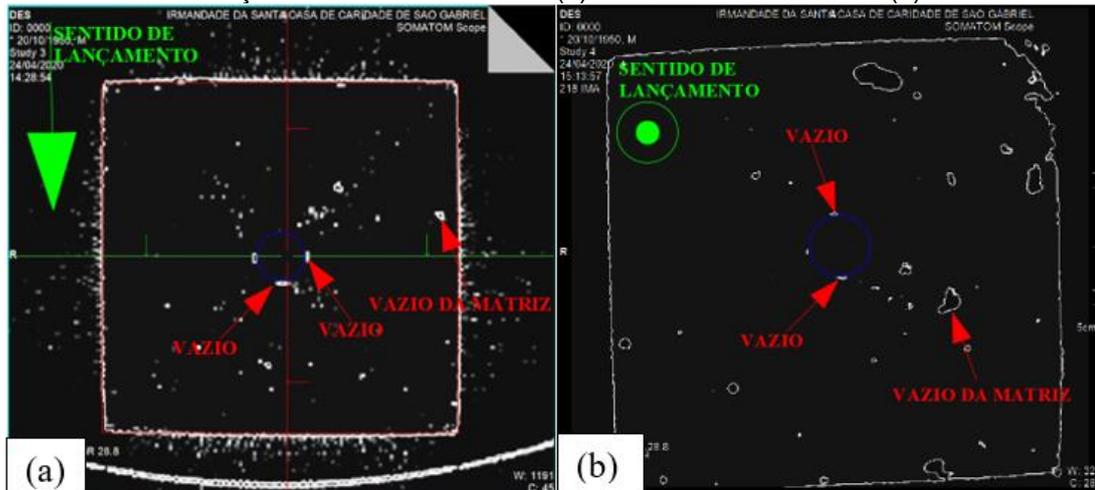
4.5 Tomografia computadorizada

Com a análise por tomografia computadorizada foi possível identificar características da dispersão das fibras e presença de vazios. Para tal tarefa, foram analisados dois tirantes com barra de 20mm, um moldado na vertical e outro na horizontal.

Na Figura 70 os vazios presentes na amostra são representados pela cor branca, assim como, os limites da seção transversal do tirante. Analisando a Figura 70.a, é clara a presença de vazios na parte inferior da barra de aço e de suas nervuras longitudinais, da mesma forma que quando observa-se a Figura 70.b, moldada na vertical, nota-se a presença de vazios de menor dimensão abaixo da nervura transversal da barra. Tais pontos de análise estão apontados por setas.

Percebe-se então que apesar da variação no sentido moldagem, a adição das fibras não influi diretamente a ponto de eliminar estes poros entre a barra de aço e a compósito, o que demonstra que as propriedades e a análise desta fase são bastante complexas, com regiões com boa ou má interação, e que isso certamente influencia no comportamento dos elementos estruturais.

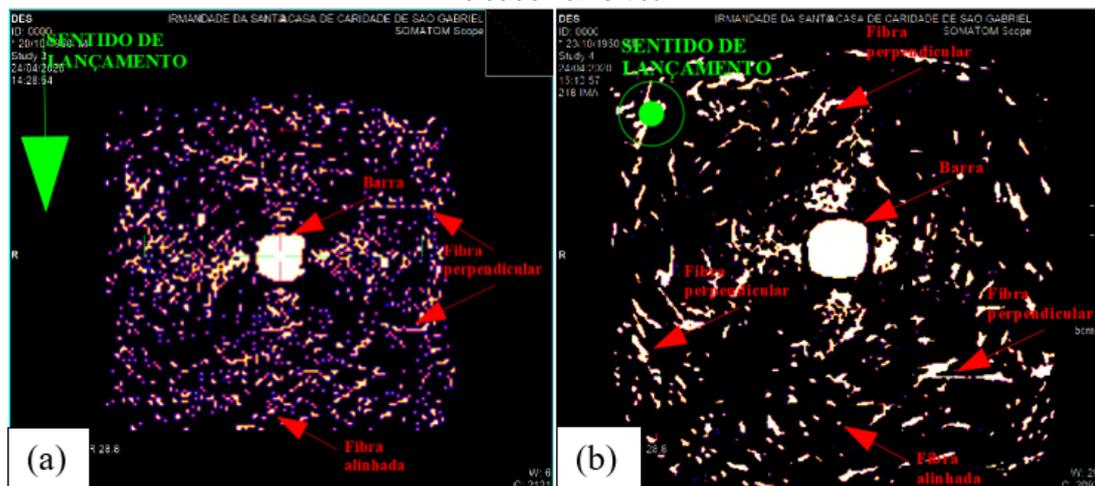
Figura 70 - Vazios na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical



Fonte: Jucá (2020).

Na Figura 71 é realizada a análise da distribuição das fibras na matriz e a influência que o sentido de moldagem causa nos tirantes. Com a mudança do filtro de densidade nota-se a presença das fibras marcadas por pontos brancos com contornos de cor azulada. Com o sentido de lançamento na horizontal (Figura 71.a) percebe-se que as fibras são representadas na seção transversal do tirante, em sua maioria, por pontos, enquanto na Figura 71.b, com sentido de lançamento na vertical, estas aparecem como “linhas”. Estas características nos mostram que quando o concreto é lançado em sentido horizontal, a maioria das fibras se posicionam de maneira paralela a barra de aço e, conseqüentemente, atuam de forma mais ativa como pontes de transferência de tensões, enquanto a seção do tirante moldado na vertical tem a distribuição das fibras de forma mais aleatória.

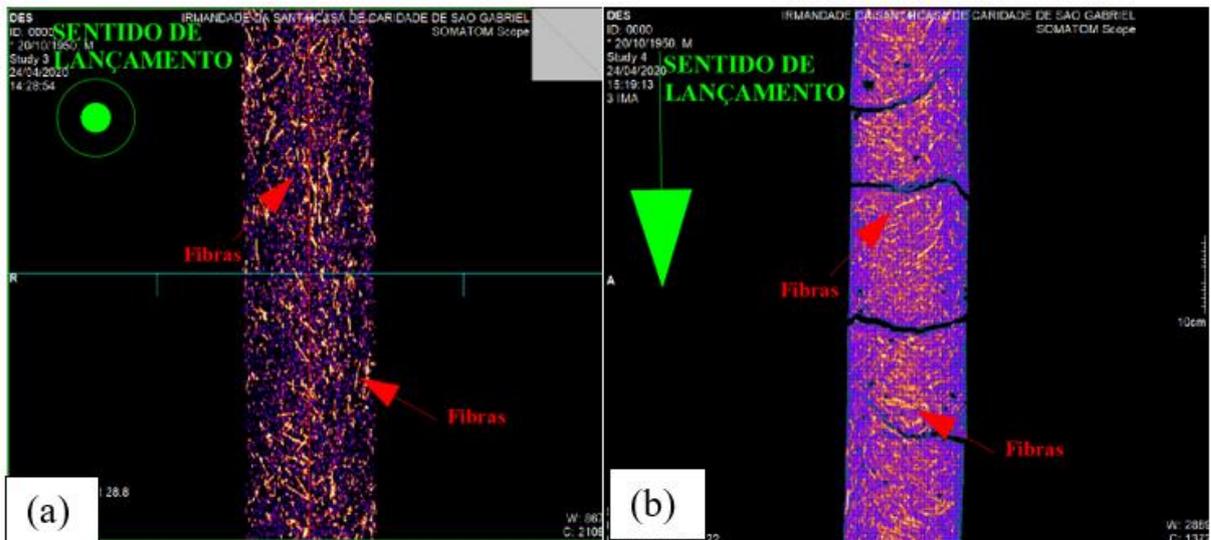
Figura 71 - Distribuição das fibras na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical



Fonte: Jucá (2020).

A maneira como estas fibras se distribuem fica mais clara quando analisadas em um corte longitudinal do tirante (Figura 72). Percebe-se que quando a mistura é lançada na vertical as fibras se posicionaram predominantemente de forma diagonal e transversal ao sentido do fluxo de concreto, o que indica a aleatoriedade (Figura 72.b). Contudo, quando analisamos o tirante moldado na horizontal o que se percebe é uma orientação também de forma diagonal e transversal, porém de maneira alinhada ao sentido do carregamento, o que contribui para o melhor desempenho do tirante. Quanto a região de borda e no entorno da barra de aço do tirante, pode-se notar um certo alinhamento das fibras próximas à estas superfícies devido a influência do efeito parede, que na passagem do fluxo da mistura gera um alinhamento das fibras na mesma direção (Figura 72.a).

Figura 72 - Distribuição das fibras na seção longitudinal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical

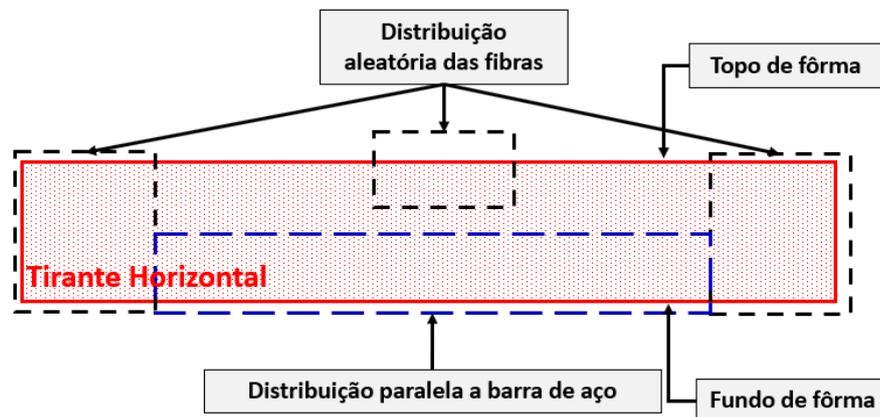


Fonte: Jucá (2020).

Assim, com a influência do sentido de moldagem na distribuição das fibras, estas tendem a se orientar de forma perpendicular ao lançamento e a favor do fluxo da mistura, o que auxilia no entendimento do modo de fratura que os grupos seguiram. Para os verticais, a melhor distribuição ou homogeneidade das fissuras, é devido à grande parte das fibras se posicionarem de forma perpendicular ao sentido do carregamento. Contrário a isso, os tirantes moldados na horizontal também apresentaram maior teor de fibras perpendiculares ao sentido de fluxo, porém agora, estas estão posicionadas favoravelmente ao carregamento e auxiliam como reforço primário e no aumento da rigidez do compósito.

Contudo, nas amostras horizontais, a distribuição das fibras não se dá de forma uniforme, apresentando perturbações localizadas em regiões específicas do tirante (Figura 73), o que auxilia na interpretação dos resultados encontrados entre face posterior e frontal dos grupos C2.H.20 e C2.H.25.

Figura 73 - Zonas de orientação das fibras no tirante



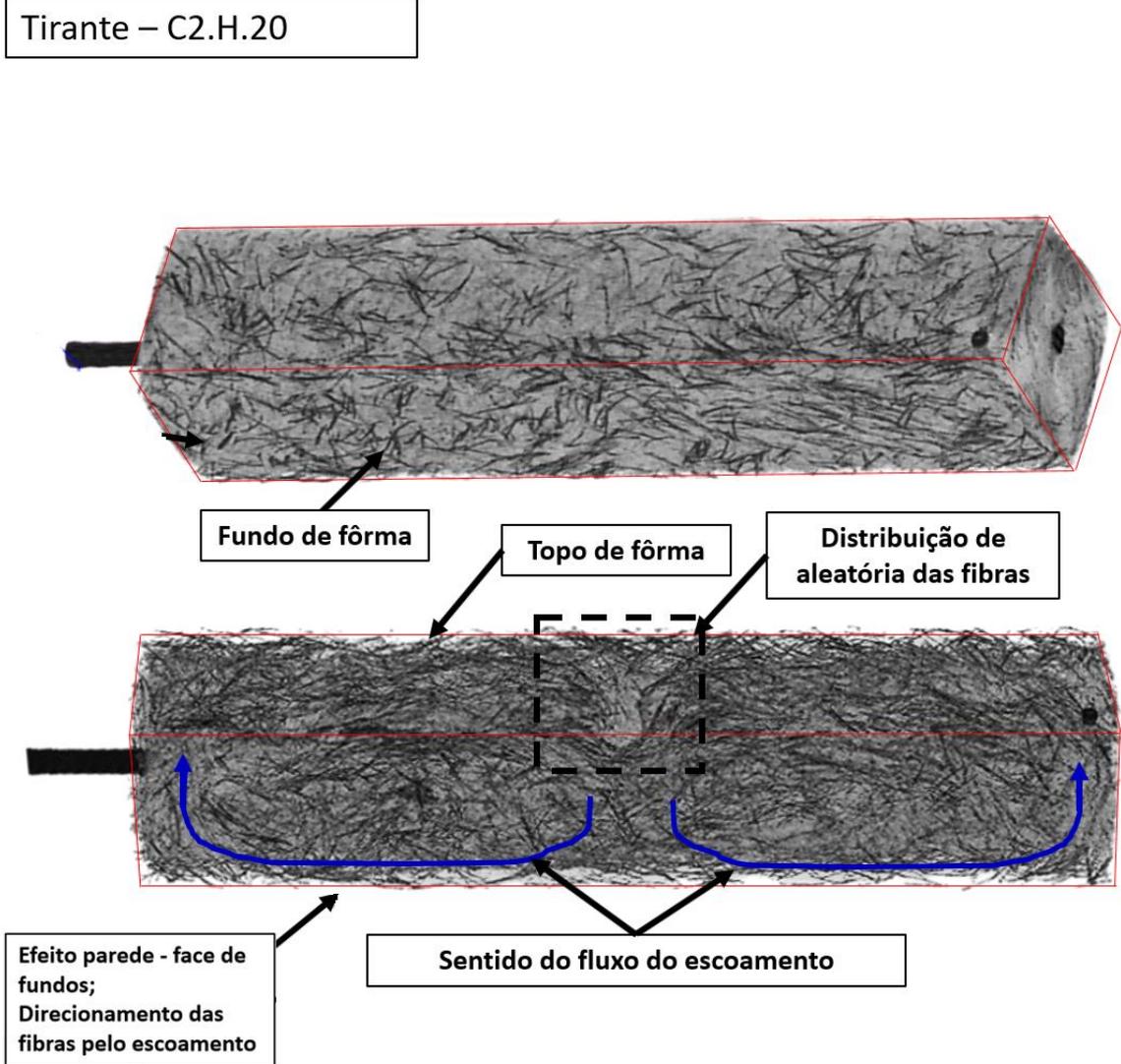
Fonte: Jucá (2020).

Como mencionado anteriormente, a mistura sofre o efeito parede das faces laterais da fôrma e direciona as fibras no sentido do fluxo, que ficam alinhadas de forma paralela as faces e tem seu direcionamento forçado, através da tensão cisalhante de escoamento, até as extremidades da fôrma (Figura 74).

Nas extremidades, após o preenchimento do fundo da forma, há a dispersão aleatória e também perpendicular das fibras em relação a barra de aço. Com boa parte da forma já preenchida, o preenchimento restante do tirante é realizado em velocidades mais lentas e em menor volume, o que não produz alinhamento do reforço fibroso.

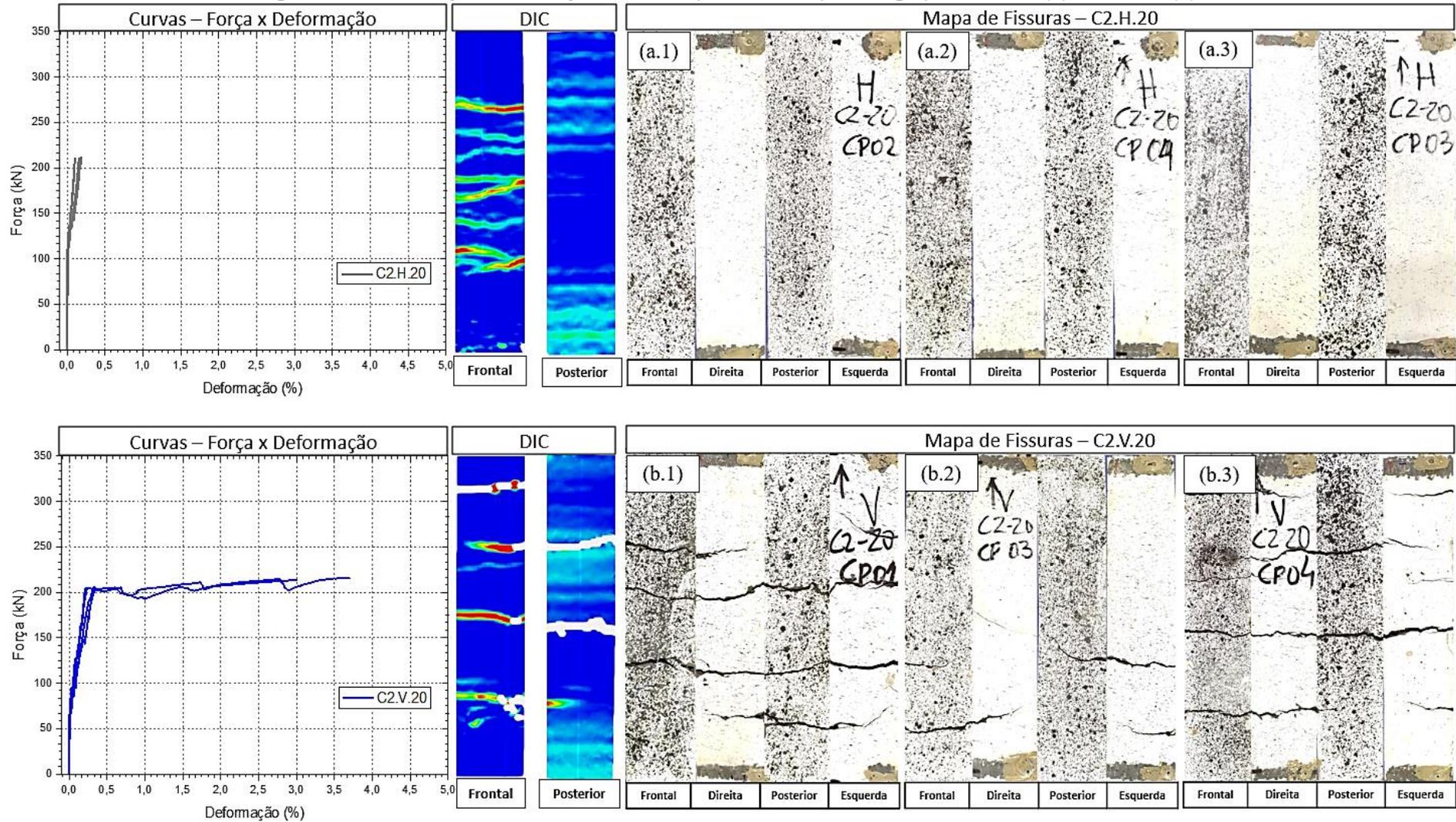
A fim de demonstrar a repetibilidade do comportamento dos grupos e mostrar tal relação entre os itens de análise aqui realizados, as curvas força x deformação dos tirantes, campo de deformação e os mapas de fissuração são mostrados a seguir. A Figura 75 é referente aos tirantes com barras de 20mm, sendo (a.1), (a.2) e (a.3) do grupo C2.H.20 e (b.1), (b.2) e (b.3) do grupo C2.V.20. Na Figura 76 são mostrados os resultados dos tirantes de 25mm, sendo (a.1), (a.2) e (a.3) do grupo C2.H.25 e (b.1), (b.2) e (b.3) do grupo C2.V.25. Com isso, o comportamento mecânico e à fratura característico de cada sentido de moldagem é considerado válido, mesmo com diferentes taxas de armadura.

Figura 74 - Imagem de tomografia da dispersão das fibras no tirante horizontal com barra de 20mm



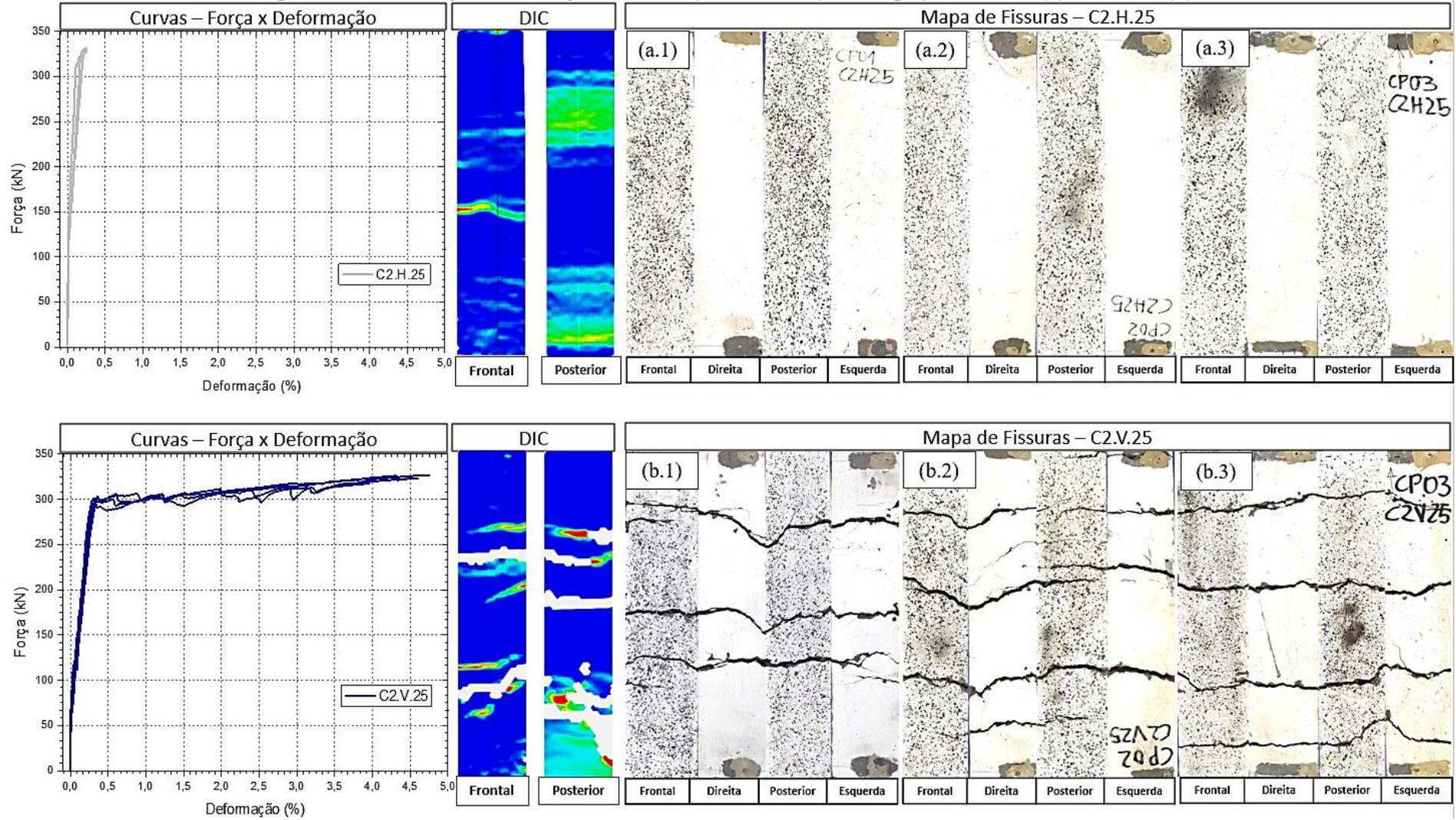
Fonte: Adaptado de Jucá (2020).

Figura 75 - Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.20 (a) e C2.V.20 (b)



Fonte: Jucá (2020).

Figura 76 - Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.25 (a) e C2.V.25 (b)



Fonte: Jucá (2020).

5 CONCLUSÕES

Com os resultados encontrados, são apresentados a seguir as características e propriedades reológicas e mecânicas do compósito e tirantes desenvolvidos neste trabalho.

Nos ensaios reológicos, a mistura se mostrou compatível quanto as suas propriedades para ser classificada com autoadensável, apresentando espalhamento classificado de acordo a norma ABNT NBR 15823:2010 em SF1 (entre 550 e 650mm), viscosidade plástica VS2, e o índice a estabilidade visual e coesão da mistura em resistir a segregação dos constituintes, e foi o IEV0.

Os ensaios de amostras cilíndricas à compressão mostraram que com a adição de fibras, a matriz aumentou sua ductilidade e tenacidade, não rompendo de forma brusca como acontece no concreto sem a presença das fibras. A matriz C1, sem fibras, apresentou resistência de 66,3 MPa e módulo de elasticidade longitudinal de 37,98 GPa, enquanto a matriz C2 tem resistência de 77,89 MPa e módulo de 29,71 GPa.

Nos ensaios de tirante, as fibras possibilitaram a transferência de tensões de tração entre as fissuras da compósito e garantiram um bom confinamento da barra de aço. Nas amostras moldadas na vertical, os tirantes apresentaram capacidade elevada de deformação em regime plástico e formação de fissuras simétricas nas faces frontal e posterior. Quando moldado na horizontal, se observou através de correlação de imagem que as pequenas fissuras se desenvolveram de forma assíncrona nas faces, comportamento este provocado pela orientação destas em sentido favorável ao ensaio e pelo efeito parede da fôrma. Assim, estas características resultaram aos elementos horizontais uma maior rigidez e enrijecimento de tensões no compósito, promovendo alta resistência mecânica e baixas deformações do tirante.

Através de análise por tomografia computadorizada nos espécimes com barra de 20 mm foi possível perceber nos elementos horizontais, uma maior orientação das fibras em sentido favorável ao ensaio e zonas de distúrbios nas faces da fôrma provocadas pela velocidade de fluxo da mistura e o efeito parede da forma. Os elementos moldados na vertical, por outro lado, apresentaram um maior número de fibras aleatórias e, especificamente, diagonais e paralelas à seção transversal do tirante, o que possibilitou a formação de fissuras transversais e simétricas. Foi

possível também a observação da presença e distribuição dos vazios na mistura e na região crítica no entorno da barra de aço. Neste espaço, os vazios se concentraram na parte inferior as barras e nervuras longitudinais no grupo horizontal, e em menor tamanho sob as nervuras transversais quando moldados no sentido vertical.

Portanto, a anisotropia pelo sentido de moldagem se confirma através da localização dos vazios na interface barra de aço-compósito e pela orientação das fibras, comprovada e analisada com o auxílio de correlação digital de imagem e tomografia computadorizada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo e caracterização do mecanismo de transferência de tensões entre o reforço longitudinal e o compósito cimentício é complexo e muitos outros trabalhos devem ser executados para adicionar e consolidar os resultados aqui apresentados. Assim, sugestões de propostas de temas e tópicos de pesquisa são apresentados nos itens abaixo:

- Realização de simulação numérica com base neste e em outros estudos sobre o tema;
- Analisar experimentalmente amostras por ensaio de arrancamento (“pullout”) para diferentes áreas de envoltória;
- Analise mecânica dos tirantes por ensaios cíclicos;
- Verificar a influência da geometria e tipos de nervuras das barras de aço nos ensaios de arrancamento;
- Analisar o efeito da hibridização de fibras na interface entre os componentes do tirante.

7 REFERÊNCIAS

ABBASS, Wasim; KHAN, M. Iqbal; MOURAD, Shehab. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 556-569, 2018.

ALFERES FILHO, Ricardo dos Santos; MONTE, Renata; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. Avaliação do grau de orientação de fibras de aço induzida na moldagem de elementos planos com concreto autoadensável. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes de. Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis. **Tese de Doutorado** – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ALMUSALLAM, Tarek et al. Analytical and experimental investigations on the fracture behavior of hybrid fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 201-217, 2016.

AL-JAHDALI, F.A.; WAFI, F.F.; SHIHATA, S. A.; **Development Length for Straight Deformed Bars in High-Strength Concrete**. International Concrete - Symposium Paper. v. 149, p. 507-522, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AVESTON, J., COOPER, G.A., KELLY, A., The properties of fiber composites, in: **Conference Proceedings of the National Physical Laboratory, IPC Science and Technology Press Ltd.**, pp. 15-26. Guildford, 1971.

AZIZINAMINI, A; STARK, M; ROLLER, J. J.; GHOSH, S. K.; **Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete**. ACI - Structural Journal. v. 90, p. 554-561, 1993.

BAKHSHI M, NASRI V. Developments in design for fiber reinforced concrete segmental tunnel lining. In: **2nd FRC international workshop (1st ACI—fib Joint workshop) on fibre reinforced concrete: from design to structural applications**, Montreal, Canada. 2014.

BARBOSA, M. P.; COSTA, O. J.; SILVA, L. M.; SALLES, F. M. Concreto autoadensável: avaliação da aderência aço-concreto através dos ensaios de determinação do coeficiente de conformação superficial das barras de aço. v. 2. - Construções em concreto. In: **46º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON**, p. II.484-II.497, Florianópolis, 2004.

BARBOZA, L. S. Estudo sobre o impacto da redução de consumo de cimento na resistência à compressão do concreto autoadensável. 2016. 172 p. **Dissertação (Mestrado)** - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

BARBOZA, Lucas da Silva et al. Produção de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e sua influência na aderência aço-concreto. **Tese (Doutorado)**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.

BARROS, A. R. de. Avaliação do Comportamento de Vigas de Concreto Auto-Adensável Reforçado com Fibras de Aço. 178p. **Dissertação (Pós-graduação em estruturas)** - Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2009

BARROS, Joaquim A. O. et al. **Possibilidades e desafios do betão auto compactável reforçado com fibras: do laboratório à aplicação real**. Universidade do Minho, 2006.

BARROS, Joaquim A. O. et al. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete (RILEM Recommendations). In: **5th International Colloquium" Industrial Floors"**. p. 547-556, 2003.

BENCARDINO, F. et al. Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 41, n. 1, p. 17-24, 2010.

BELO, Gabryela Ferreira *et al.* **Aderência entre o aço e concreto fresco em condições de concretagem submetidas a vibrações**. 2017.

BENTUR, A., MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**, 2ed, Francis and Taylor, UK, 2007.

BONAKDAR, A.; BABBITT, F.; MOBASHER, Barzin. Physical and mechanical characterization of fiber-reinforced aerated concrete (FRAC). **Cement and Concrete Composites**, v. 38, p. 82-91, 2013.

BOULEKBACHE, Bensaid et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1664-1671, 2010.

CALADO, Carlos Fernando de Araújo. Concreto auto-adensável: alternativa ao concreto convencional em climas quentes. **Tese (Doutorado)**. Programa de Doutoral em Engenharia Civil – Escola de Engenharia. Universidade do Minho, 2016.

CARNEIRO, Roberto Carlos. Análise das propriedades do concreto autoadensável com fibras de aço no estado plástico e endurecido com sílica ativa e com fíler calcário. 2018. 169 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2014. **São Carlos: EdUFSCar**, 2014.

CHAO, Shih-Ho; NAAMAN, Antoine E.; PARRA-MONTESINOS, Gustavo J. Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites. **ACI Structural Journal**, v. 106, n. 6, p. 897, 2009.

CHU, S. H.; KWAN, A. K. H. A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 103405, 2019.

CRISTOFOLI, Tiago et al. Influência da adição de fibras metálicas em concreto autoadensável no estado endurecido. In: **HAC 2018. V Congresso Iberoamericano de hormigón autocompactable y hormigones especiales**. p. 445-454. Editorial Universitat Politècnica de València, 2018.

DANIN, Alice. R. Estudo da aderência entre concreto e armadura: Análise da influência das fibras de aço. 277 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

DELUCE, Jordon R.; VECCHIO, Frank J. Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement. **ACI Structural Journal**, v. 110, n. 3, 2013.

DOMSKI, Jacek et al. Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, p. 18-28, 2017.

DYBEŁ, Piotr. Effect of bond conditions on local bond-slip relationships of ribbed bars in high performance self-compacting concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 1399-1408, 2019.

DYBEŁ, Piotr; KUCHARSKA, Milena. Effect of bottom-up placing on bond properties of high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118182, 2020

DYBEŁ, Piotr; KUCHARSKA, Milena. Experimental assessment of the casting position factor of reinforcing bars in high performance concretes (HPC, HPSCC). **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 1, p. 127-136, 2019.

EFNARC, February. Specification and guidelines for self-compacting concrete. **European federation of specialist construction chemicals and concrete system**, 2005.

ELIGEHAUSEN, Rolf; POPOV, Egor P.; BERTERO, Vitelmo V. **Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations**. 1982.

ELIGEHAUSEN, R.; BERTERO, V. V.; POPOV, E. P. **Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Tests and analytical model**. Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif., Report No. EERC, p. 23-83, 1983.

FERNANDES, Rejane Martins. A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto. 155p. **Dissertação (Mestrado)** - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2000.

FERRARA, Liberato et al. Predicting the flow-induced dispersion and orientation of steel fibers in self-consolidating concrete by distinct element method. In: **Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities, Proceedings BEFIB 2012, 8th International RILEM Symposium**. 2012. p. 1-12.

FERRARA, Liberato; OZYURT, Nilufer; DI PRISCO, Marco. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of "casting-flow induced" fibre orientation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 109-128, 2011.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. Concreto reforçado com fibras. **Tese (Doutorado)** - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FISCHER, Gregor; LI, Victor C. Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC). **Structural Journal**, v. 99, n. 1, p. 104-111, 2002.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 382p. São Paulo: PINI, 1995.

GAO, Danying et al. Bond stress distribution analysis between steel bar and steel fiber reinforced concrete using midpoint stress interpolation method. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119866, 2020.

GARCIA-TAENGUA, E.; MARTÍ-VARGAS, José Rocío; SERNA, P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 275-284, 2016.

GARCÍA-TAENGUA, Emilio; MARTI-VARGAS, Jose R.; SERNA-ROS, Pedro. Statistical approach to effect of factors involved in bond performance of steel fiber-reinforced concrete. **ACI Structural Journal**, v. 108, n. 4, p. 461-468, 2011.

GIROTTTO, L. S. Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)** – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

GOMES, Paulo César Correia; BARROS, Alexandre Rodrigues. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 165p. São Paulo: PINI, 2009.

GONZÁLEZ, Dorys C. et al. Study of the effect of the fibers' orientation on the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete from wedge-splitting tests and computed tomography scanning. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 110-122, 2018.

GUETTI, P. C. Contribuição ao Estudo das Propriedades Mecânicas do Concreto Autoadensável e do Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço. **Tese (Doutorado)**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

HORNE, A. T.; RICHARDSON, I. G.; BRYDSON, R. M. D. Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 12, p. 1613-1623, 2007.

HUANG, Le et al. Local bond performance of rebar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loading. **Construction and Building Materials**, v. 103, p. 77-92, 2016.

JIRSA, James O.; BREEN, John Edward. **Influence of Casting Position and Shear on Development and Splice Length--design Recommendations**. 1981

JUCÁ, Pedro H. O. Avaliação do mecanismo de transferência de tensões e formação de fissuras no concreto autoadensável com reforço híbrido. 155 p. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de pós-graduação em engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2020.

KANG, Shao-Bo et al. Influence of reinforcement ratio on tension stiffening of reinforced engineered cementitious composites. **Engineering Structures**, v. 141, p. 251-262, 2017.

KAZEMI, M. T. et al. Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 482-489, 2017.

KHALOO, Alireza et al. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 179-186, 2014.

KIM, Sun-Woo; YUN, Hyun-Do. Evaluation of the bond behavior of steel reinforcing bars in recycled fine aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 8-18, 2014.

KLEIN, N. S. Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto autoadensável. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

KUNIEDA, Minoru et al. Enhancement of crack distribution of UHP-SHCC under axial tension using steel reinforcement. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 1, p. 49-57, 2010.

LAKAVATH, Chandrashekhar; JOSHI, Suhas S.; PRAKASH, S. Suriya. Investigation of the effect of steel fibers on the shear crack-opening and crack-slip behavior of prestressed concrete beams using digital image correlation. **Engineering Structures**, v. 193, p. 28-42, 2019.

LEE, Jun-Ki. Bonding behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in ultra-high strength concrete with steel fibers. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 1, p. 273-281, 2016.

LI, Victor C. On engineered cementitious composites (ECC). **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 3, p. 215-230, 2003.

MAJAIN, Nelly et al. Pullout behaviour of ribbed bars in self-compacting concrete with steel fibers. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

MARANGON, E. Caracterização material e estrutural de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço. **Tese (Doutorado)** - COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

MAZAHERIPOUR, Hadi; BARROS, Joaquim AO; SENA-CRUZ, José. Tension-stiffening model for FRC reinforced by hybrid FRP and steel bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 88, p. 162-181, 2016.

MEDA, Alberto; MINELLI, Fausto; PLIZZARI, Giovanni A. Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 2930-2937, 2012.

MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de filer calcário. f. **Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

MÍNGUEZ, Jesús; GONZÁLEZ, Dorys C.; VICENTE, Miguel A. Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the

residual post-peak flexural tensile strength. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 906-922, 2018.

MONTEIRO, V. M. A., SILVA, F. A., Comportamento mecânico do concreto auto adensável reforçado com fibras de aço, polipropileno e híbridas. **Seminário de Iniciação Científica**. Pontifca Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

MORAES, C. de M. Otimização de adições minerais para produção de concreto auto adensável. 210 f. **Tese (Doutorado)** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2010.

MUDADU, Antonio et al. The effect of fiber orientation on the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete under bending and uniaxial tensile tests. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 274-288, 2018.

MÜNDECKE, Eric; MECHTCHERINE, Viktor. Tensile behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) with steel reinforcing bars. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103423, 2020.

NAAMAN, A. E. SIFCON: Tailored properties for structural performance. In: **High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**. p. 18-38. E & FN Spon New York, USA, 1992.

NAAMAN, A. E. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. In: Proc. **4th Int. RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**, p. 95-113. Ann Arbor, University of Michigan, 2003.

NGUYEN, Thuc N.; NGUYEN, Tung T.; PANSUK, Withit. Experimental study of the punching shear behavior of high performance steel fiber reinforced concrete slabs considering casting directions. **Engineering Structures**, v. 131, p. 564-573, 2017.

NGUYEN, Wilson et al. Mechanics and failure characteristics of hybrid fiber-reinforced concrete (HyFRC) composites with longitudinal steel reinforcement. **Engineering Structures**, v. 183, p. 243-254, 2019.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

PACHECO, Jéssika et al. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: **56º Congresso Brasileiro do Concreto**. Natal, 2014.

PELISSER, Fernando; VIEIRA, Alexandre; BERNARDIN, Adriano Michael. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324-332, 2018.

RANGEL, Caroline Santana et al. Tension stiffening approach for interface characterization in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 176-189, 2017.

REPETTE, Wellington Longuini. Concreto autoadensável. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1769-1806, 2011.

RÍOS, José D. et al. Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography. **Materials & Design**, v. 165, p. 107582, 2019.

ROSSI, Carlos RC et al. Development Length and Bond Behavior of Steel Bars in Steel Fiber-Reinforced Concrete in Flexural Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 1, p. 04019333, 2020.

ROY, Manish; HOLLMANN, Corey; WILLE, Kay. Influence of volume fraction and orientation of fibers on the pullout behavior of reinforcement bar embedded in ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 582-593, 2017.

SCOARI, M. R. Concretos reforçados com fibras: avaliação das propriedades mecânicas através do método da maturidade. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2005.

SHAH, S. P.; FERRARA, L. Self consolidating fiber reinforced concrete. In: **BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete**. RILEM Publications SARL, p. 641-659. 2008.

SHIMOSAKA, Tobias Jun. Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SILVA, Débora Bretas. Desenvolvimento de compósitos cerâmicos refratários silico-luminosos contendo cinza da casca de arroz e wollastonita. **Dissertação de mestrado** (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete. 2019.

SILVA, Matheus Borges. Propriedades mecânicas e retração do concreto autoadensável. **Monografia (Projeto final em engenharia civil)**. Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

SIMPLÍCIO, M. A. S. Estudo sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras. 263p. **Tese (Doutorado)** – Curso de Pós-graduação em ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SIRIJAROONCHAI, Kittinun; EL-TAWIL, Sherif; PARRA-MONTESINOS, Gustavo. Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 62-72, 2010.

ŠVEC, Oldřich 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.

TIBERTI, Giuseppe; MINELLI, Fausto; PLIZZARI, Giovanni. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 199-207, 2014.

TIBERTI, Giuseppe; MINELLI, Fausto; PLIZZARI, Giovanni. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: a comprehensive experimental study. **Cement and concrete research**, v. 68, p. 24-34, 2015.

TOLEDO FILHO, Romildo Dias et al. Effect of steel fibres on the tensile behaviour of self-consolidating reinforced concrete blocks. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, v. 2014, n. SP 310, p. 123-130, 2014.

TORRIJOS, María C.; BARRAGÁN, Bryan E.; ZERBINO, Raúl L. Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 1078-1085, 2010.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

VAN MIER, J. G. M.; VAN VLIET, M. R. A. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 69, n. 2, p. 235-247, 2002.

VELASCO, R. V., Concretos Autoadensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas. 349 p. **Tese (Doutorado)**. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ZERBINO, R. et al. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 191-200, 2012.

ZHANG, Wei et al. Bond Performance between Magnetized Rebar and Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 17, n. 12, p. 686-699, 2019.

ZHANG, Yang et al. Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118893, 2020.

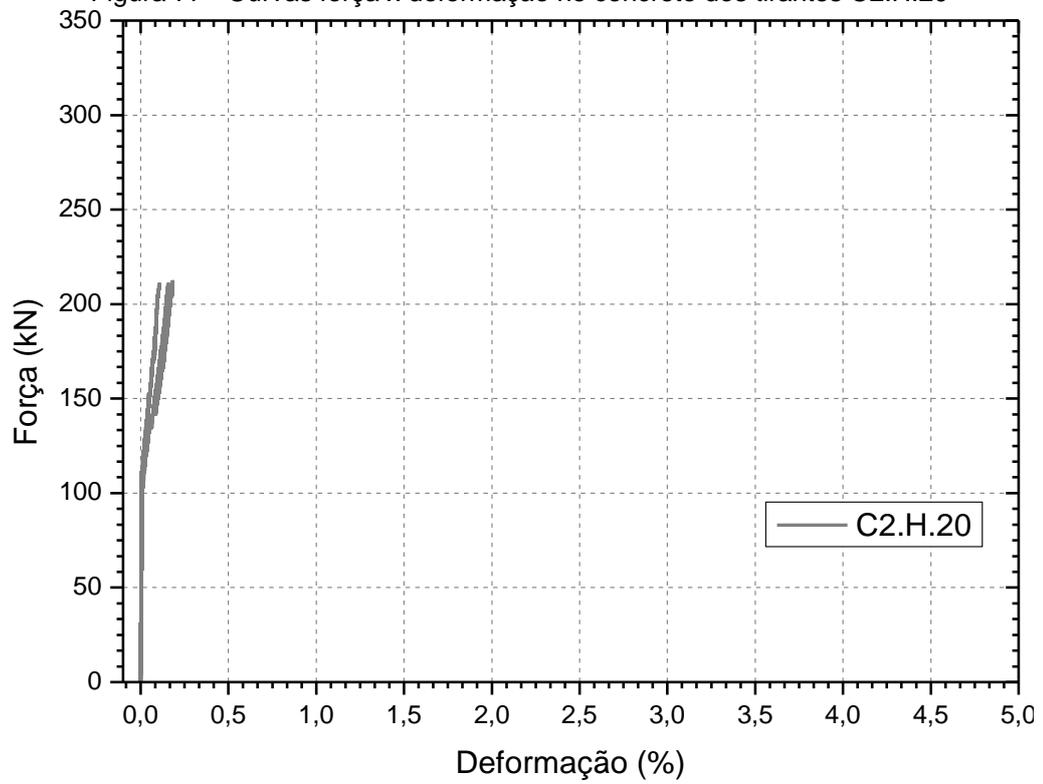
ZHAO, Mingshuang et al. Bond performance of deformed rebar in steel fiber reinforced lightweight-aggregate concrete affected by multi-factors. **Civil Engineering Journal**, n. 3, 2018.

ZHU, Wenjun; DAI, Jian-Guo; POON, Chi-Sun. Prediction of the bond strength between non-uniformly corroded steel reinforcement and deteriorated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1267-1276, 2018.

ZOLLO, Ronald F. **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development.** *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n. 2, p. 107-122, 1997.

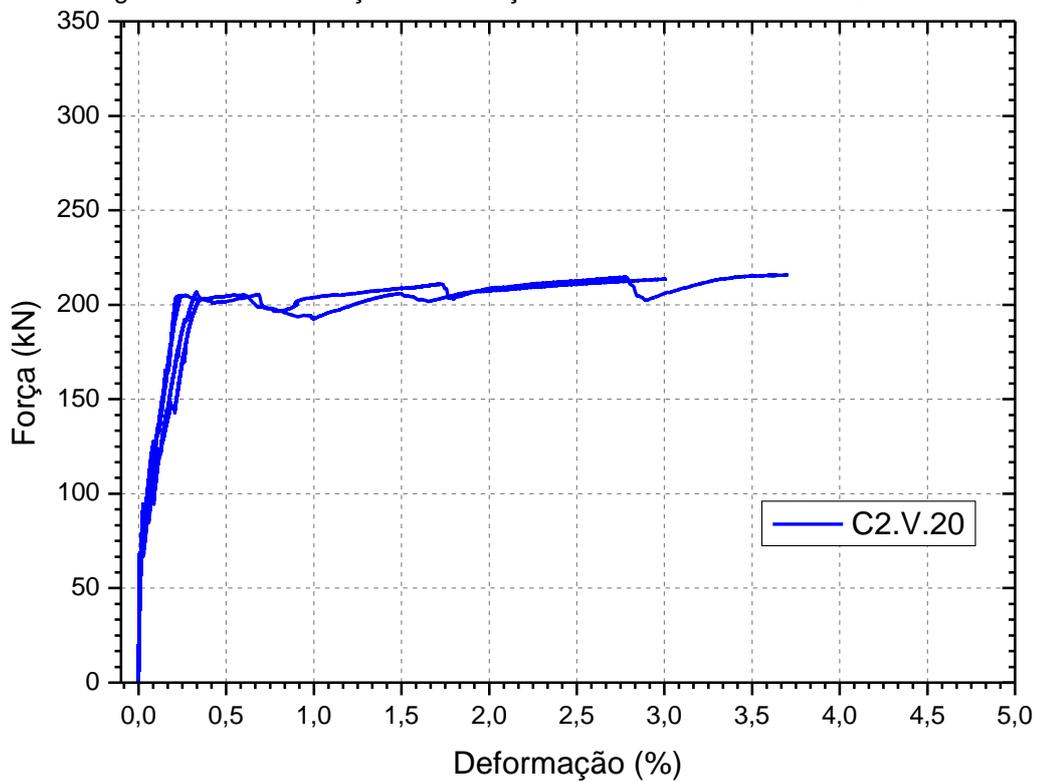
ANEXO A

Figura 77 - Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.20

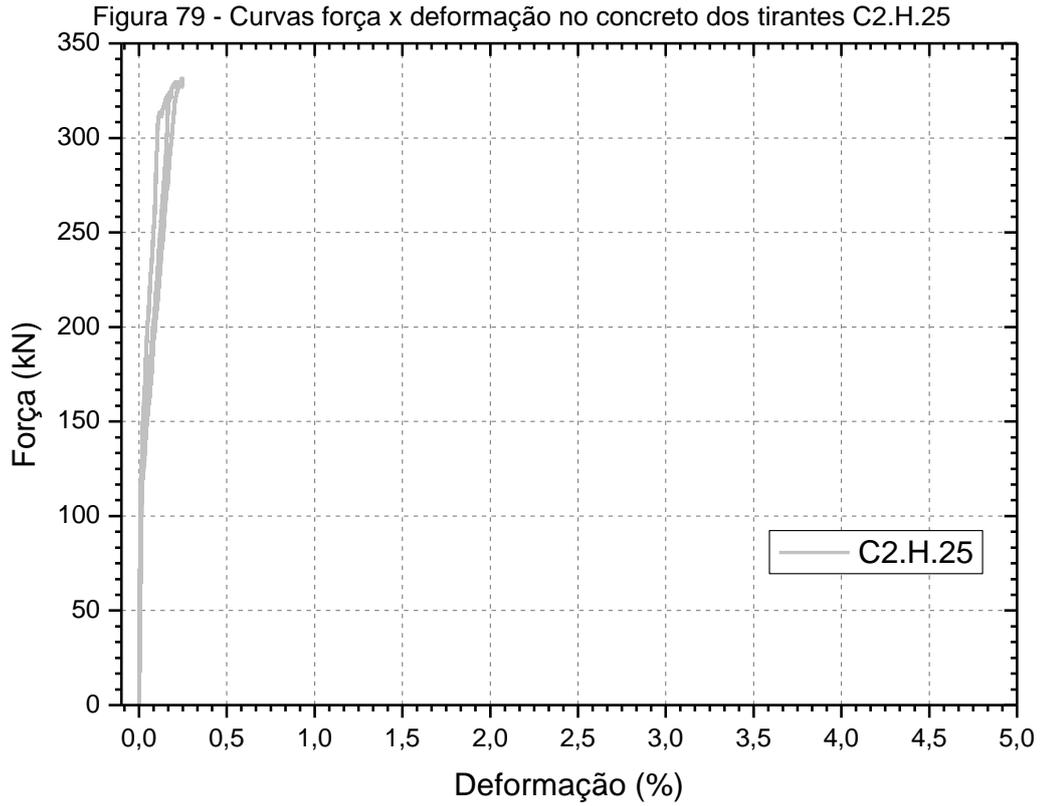


Fonte: Jucá (2020).

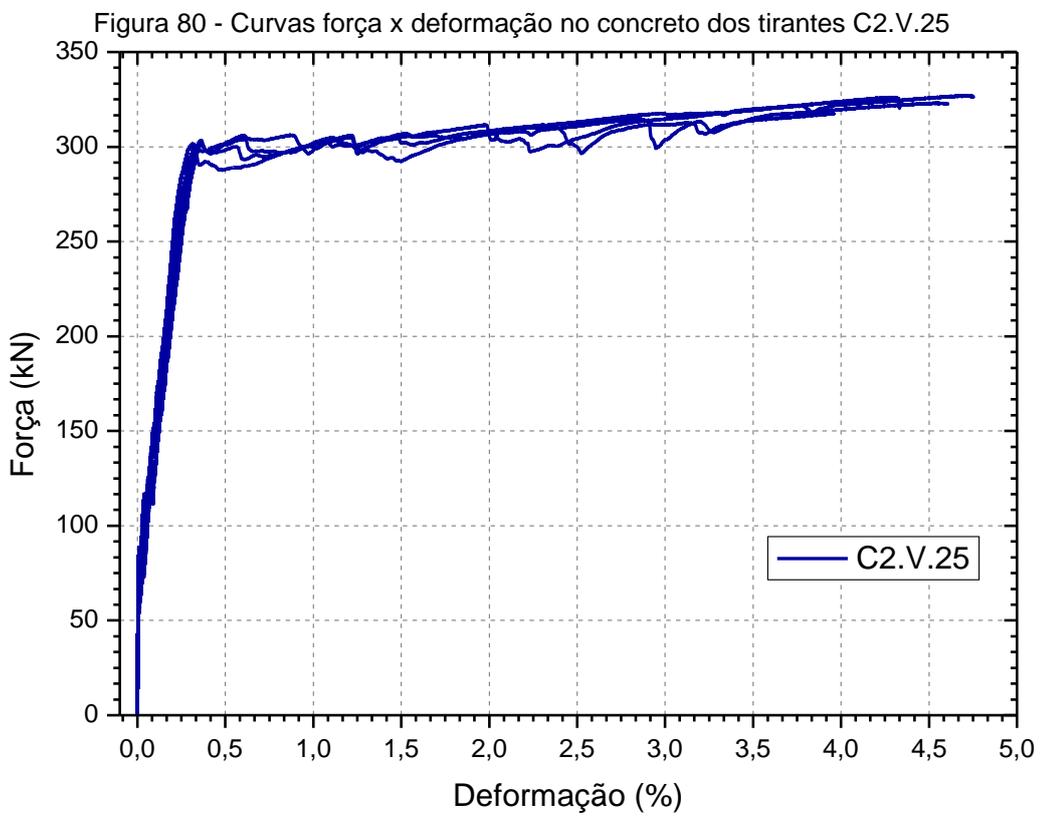
Figura 78 - Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.20



Fonte: Jucá (2020).



Fonte: Jucá (2020).



Fonte: Jucá (2020).