

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PEDRO HENRIQUE DE OMENA JUCÁ

**AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES E
FORMAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM
REFORÇO HÍBRIDO**

**Alegrete
2020**

PEDRO HENRIQUE DE OMENA JUCÁ

**AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES E
FORMAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM
REFORÇO HÍBRIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Ederli Marangon

Coorientador: Luis Eduardo Kostascki

**Alegrete
2020**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

J91a Jucá, Pedro Henrique de Omena
AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE
TENSÕES E FORMAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM REFORÇO HÍBRIDO / Pedro Henrique
de Omena Jucá.

124 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do
Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA, 2020.

"Orientação: Ederli Marangon".

1. Comportamento mecânico. 2. Material compósito.
3. Anisotropia. 4. Sentido de moldagem. 5.
Tomografia de concreto. I. Título.

PEDRO HENRIQUE DE OMENA JUCÁ

**AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES E
FORMAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM
REFORÇO HÍBRIDO**

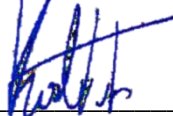
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado: 30 de julho 2020

Banca examinadora:



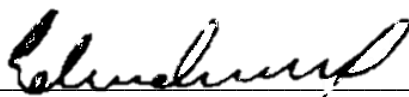
Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Gihad Mohamad
UFSM



Prof. Dr. Eduardo Bittencourt
UFRGS

Dedico este trabalho a toda minha família
de sangue e adquirida durante a vida.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por me fornecer força e fé suficiente para me manter nesse processo de construção profissional.

Agradeço a minha família, ao meu avô Mario Pontes Jucá, que esteve presente como pai, irmão, amigo em todas as etapas da minha vida, a minhas avós Iêda e Albany que estiveram ao meu lado dando suporte e atenção quando mais precisei, e estiveram fortes me motivando.

A minha mãe, Fariza, que além do trabalho árduo de mãe é minha melhor amiga e que me fornece o sopro de felicidade nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai, Mario, que me motivou como pai e como parâmetro para construção da minha carreira.

Aos meus irmãos, Letícia e João, que são duas preciosidades presentes na minha vida, sem valor estimado ou equiparado a nada conhecido, duas fontes de felicidade inesgotáveis para mim.

A Letícia Larré, minha melhor amiga que em diversos momentos foi minha psicóloga, ajudante, e forneceu tudo que sempre precisei em todos os aspectos.

Ao Thiago Amorim, que foi um irmão e um ajudante durante todo meu processo de formação.

Ao professor Ederli Marangon, que além do papel de orientador, foi amigo e colaborador em diversas etapas dessa pesquisa.

Ao professor Luis Eduardo Kostas pela orientação e pelas ajudas proporcionadas nestes anos de processo.

Aos bolsistas de iniciação científica mais dedicados e que tornaram possível a execução desta pesquisa Felipe Külzer e Guilherme Cocco.

A todos os colegas de curso, principalmente ao Maurício Thomas, Jaderson, Danilo Nogueira, Matthews, Camila, Kevin, Gustavo, Nadine, Raquel, Eduardo Pachla, Débora Bretas, Diego Perez, Dani Pozzebon, Jéssica Silveira, Luana Harbelin e Raphael Paim.

Aos meus amigos que me ajudaram nos momentos mais difíceis da minha vida, João Pedro, Hélio Junior, Lucas Fradique, Igor Pinto, João Lucas.

A CAPES, pela bolsa de pesquisa que propiciou a consecução de toda minha pesquisa.

A empresa Iccila, que me auxiliou com fornecimento de matérias de pesquisa, e principalmente ao Eng. Maurício Savolti que propiciou essa ligação entre a universidade e a empresa.

As empresas RITT, Builder, Arcelor Mital, Hormigon – Industria de Artefatos de Cimento e a Pedra Rosada, que proporcionaram insumos para realização dos processos necessários para esse trabalho.

Ao grupo MAEC, que pelos seus integrantes, promoveu dia a dia a motivação para a realização dos ensaios e estudos, me ajudando em todas as necessidades e assegurando que, essa família estaria comigo para todos os momentos.

A todos meu sincero muito obrigado!

“...Ser capaz de mergulhar, rever o
caminho. Coragem de dizer não, quando
cabe sim. Coragem de enfrentar visões
diferentes
Visões e olhares de si
Massacre memorável do ser
Caminhos tortuosos, corrigir e viver!”.

Mario Jucá

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar o mecanismo de transferência de tensões em tirantes à tração, através do processo de fissuração do concreto autoadensável com reforço híbrido, moldados na horizontal e vertical. Para alcançar os objetivos foram moldados corpos de prova cilíndricos para avaliar o comportamento à compressão axial e tirantes prismáticos para avaliar o comportamento à tração. Os tirantes possuem dimensões de 15x15x75 cm e foram moldados na posição vertical e horizontal com barras de aço de 20 e 25 mm, passantes pelo centro da seção retangular (15x15 cm). A avaliação do processo de fissuração dos tirantes foi realizada através do uso da correlação de imagens. Tomografia computadorizada foi utilizada para avaliar a dispersão das fibras e vazios, nas amostras de tirantes moldadas na vertical e horizontal. Para a moldagem dos cilindros e tirantes foi usado dois concretos autoadensáveis, sendo um sem e outro com fibras metálicas, que possuem relação de aspecto de 65. Para caracterização da fluidez, viscosidade plástica e habilidade passante dos concretos autoadensáveis no estado fresco, foram realizados ensaios reológicos utilizando a cone de Abrams, com e sem o anel “J”, funil “V” e Caixa “L. Os resultados encontrados para avaliar o concreto autoadensável no estado fresco foram condizentes com as características para esse tipo de concreto. Os valores de espalhamento são maiores que 550 mm, e o uso de fibras proporcionou o aumento da viscosidade plástica, uma vez que o tempo de fluidez medido através do funil “V”, para o concreto com fibras foi 168% maior que o concreto sem fibras. A habilidade passante do concreto com fibras, na caixa “L” e no Anel “J” demonstram que os espaçamentos entre barras para o concreto com fibras devem ser maiores que o concreto sem fibras. Nos resultados dos tirantes, foi observado que o sentido de moldagem apresenta diferenças no mecanismo de fratura dos tirantes. Os tirantes moldados na horizontal, devido a falha na aderência, apresentam formação de fissuras assíncronas nas faces, ou seja, não são passantes pela seção transversal. Por outro lado, para os tirantes moldados na vertical, as fissuras aparecem simultaneamente, ou seja, são passantes pela seção transversal. Com a adição de fibras à matriz, o comportamento para o grupo horizontal, é modificado pelo aumento do enrijecimento à tração, causada pela orientação das fibras durante o escoamento da mistura no estado fresco na fôrma. No grupo moldado na vertical com fibras, o comportamento permanece simultâneo na abertura de fissuras, com maior tenacidade, quando comparado ao grupo sem fibra.

Palavras-Chave: Comportamento mecânico; material compósito; anisotropia, sentido de moldagem, tomografia de concreto.

ABSTRACT

This research aimed to analyze the stress transfer mechanism in specimens under tensile stress, through the self-compacting concrete cracking process with hybrid reinforcement, which were casting horizontally and vertically. Aiming to achieve the purpose cylindrical specimens were tested in order to evaluate axial compression behavior and prismatic direct tension test specimens with the view to analyze their tensile behavior. The direct tension test specimens have dimensions of 15x15x75 cm and were casted in the vertical and horizontal position with steel bars of 20 and 25 mm, passing through the center of the rectangular section (15x15 cm). The process of cracking of the tie rod was verified through the use of digital image correlation. Computed tomography was used with a focus on check out the dispersion of fibers and void ratio, in the both direction of casting the specimens. Cylinders and direct tension test samples was carried out using two different mixed of self-compacting concretes, being one without fiber and the other with steel fibers, which have aspect ratio of 65. To characterize the flow, plastic viscosity and flowability of self-compacting concretes in the fresh state, rheological tests were performed using the Abrams cone, with and without the “J” ring, the “V” funnel and the “L” box. The results found from the analysis of self-compacting concrete in the fresh state were consistent with the properties for this type of concrete. The spreading values are greater than 550 mm, and the use of fibers provided an increase in plastic viscosity, since the flow time measured through the “V” funnel, for concrete with fibers was 168% higher than concrete without fibers. The self-compacting ability of fiber-reinforced concrete, in the “L” box and in the “J” ring, demonstrate that the spacing between bars for fiber-reinforced concrete must be wider than fiber-free concrete. In relation to the direct tension test specimens, it was observed that the direction of casting presents differences in the direct tension test specimens fracture mechanism. These were casted horizontally, due to the failure in adhesion, showed asynchronous cracks in the faces, that is, they are not transfer through the cross section. On the other hand, the behavior for the horizontal group, cracks appear simultaneously, that is, there is transfer of cracks through the cross section. Besides, with the addition of fibers to the matrix, the behavior for the horizontal group is modified by the increase in tensile stiffness, caused by the orientation of the fibers during the flow of the mixture in the fresh state into the form, resulting in a parallel direction of the fibers regarding the direction of the request. In the vertical casted

group adding fiber, the behavior remains simultaneous in cracking, with higher tenacity, when compared to the group without fiber.

Keywords: Mechanical behavior; cementitious composites; anisotropy; casting directions of concrete; concrete tomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva tensão de cisalhamento x escorregamento.....	21
Figura 2. Aderência por atrito.....	22
Figura 3. Aderência mecânica	23
Figura 4. – Comportamento do arrancamento de fibras de aço sem e com gancho.	24
Figura 5. Superfícies típicas do concreto após o ensaio de arrancamento.	27
Figura 6. Representação da consolidação dos vazios sob a barra no ensaio de arrancamento.	27
Figura 7. Regiões de boa e má aderência normatizadas pela NBR 6118:2014.	28
Figura 8. Influência do diâmetro da barra e o sentido de moldagem na aderência	29
Figura 9. Efeito do diâmetro da barra na aderência.....	30
Figura 10. Estádio I - estado de tensão do aço e do concreto.....	32
Figura 11. Estádio II - Fissuração e diagrama de tensões no aço e no concreto.	33
Figura 12. Configuração do aço e do concreto quando é atingida a estabilidade de fissura.	34
Figura 13. Mecanismo de engrenamento mecânico.	35
Figura 14. Processo de carregamento e esmagamento das bielas.....	36
Figura 15. Comportamento das tensões de aderência.....	37
Figura 16. Mecanismo de ligação no concreto armado com reforço de fibras.....	38
Figura 17. Deformação da matriz sem e com fibra em relação a barra de aço.....	41
Figura 18. Perfil de velocidade de escoamento de compósito.....	42
Figura 19. Orientação fibras nas fissuras da matriz.....	43
Figura 20. Cimento Portland V ARI RS.....	45
Figura 21. Cinza volante utilizada na moldagem.	17
Figura 22. Sílica da casca de arroz – Silcca Nobre SBI.	18
Figura 23. Agregado miúdo.....	19
Figura 24. Agregado graúdo.....	20
Figura 25. Curva granulométrica do agregado graúdo e miúdo.....	21
Figura 26. Sílica #325.....	21
Figura 27. Agente modificador de viscosidade - Rheomac UW 410.	22
Figura 28. Fibra de aço - DRAMIX 65/35.	23
Figura 29. Ensaio de tração da fibra metálica: (a) Visão geral do sistema e (b) ampliação para visualizar a fibra metálica.....	23

Figura 30. Ensaio de tração na barra de aço: (a) Visão geral do sistema e (b) detalhe da ruptura da barra de aço.	24
Figura 31. Curva média de força x deformação das barras de 20 mm e 25 mm.	25
Figura 32. Características geométricas das nervuras da barra de 20 (a) e 25 mm (b). ...	26
Figura 33. Cone de Abrams utilizado para verificação do espalhamento.	28
Figura 34. Índice de estabilidade visual da mistura pelo espalhamento em fluxo livre.	29
Figura 35. Funil "V" utilizado no ensaio de reologia.	29
Figura 36. Esquema utilizado no ensaio de Caixa "L".	30
Figura 37. Cone de Abrams com o anel "J".	31
Figura 38. Molas de pressão usadas para garantir a fixação do aparato usado nas leituras dos LVDT's na barra de aço.	32
Figura 39. Aparato de fixação dos LVDT's para mediação da deformação do aço.	33
Figura 40. Cola epóxi e porca utilizada para fixação dos LVDT's da Instron para medição da deformação do concreto.	33
Figura 41. Organograma da pesquisa.	34
Figura 42. Configuração dos ensaios para determinação do comportamento à compressão.	36
Figura 43. Instrumentação interna e procedimento de moldagem	37
Figura 44. Representação do ensaio de tração do tirante.	38
Figura 45. Ensaio de tração no tirante.	39
Figura 46. Procedimento de ensaio para ensaio de tração de tirante.	40
Figura 47. Identificação das faces para o mapa de fissuras.	41
Figura 48. Equipamento Siemens SOMATOM Scope.	42
Figura 49. Imagens da tomografia computadorizada realizada no espécime do grupo C2.H.20 e C2.V.20.	43
Figura 50. Espalhamento da matriz C1 (a) e C2 (b).	45
Figura 51. Curva típicas de Tensão x Deformação das misturas C1 e C2.	49
Figura 52. Modo de fratura dos corpos-de-prova da matriz C1 (a) e C2(b), submetidos ao ensaio de compressão axial.	50
Figura 53. Exemplo dos pontos analisados da curva força x deformação dos tirantes. .	51
Figura 54. Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 20 mm.	53
Figura 55. Comparação das Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 20 mm.	54
Figura 56. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.H.20.	56

Figura 57. Presença de vazios na interface de ligação inferior da barra na matriz C1...	57
Figura 58. Curva tensão de aderência x escorregamento para topo e fundos de fôrma.	58
Figura 59. Fissura de cisalhamento formada pela menor aderência na interface inferior.	59
Figura 60. Seção transversal do campo de deformação do C1.H.20.	60
Figura 61. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.V.20.	61
Figura 62. Seção transversal do campo de deformação do C1.V.20.	62
Figura 63. Presença de vazios sob a nervura da barra de 20 mm.	63
Figura 64. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.H.20.	64
Figura 65. Seção transversal do campo de deformação do C2.H.20.	65
Figura 66. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.V.20.	66
Figura 67. Seção transversal do campo de deformação do C2.V.20.	67
Figura 68. Curvas típicas de deformação x tempo dos grupos da barra de 20 mm.	68
Figura 69. Mapas de fissuras do grupo C1.H.20.	70
Figura 70. Mapas de fissuras do grupo C1.V.20.	71
Figura 71. Mapas de fissuras do grupo C2.V.20.	71
Figura 72. Panorama de fissuração por aderência na extremidade de uma amostra do grupo C2.V.20.	72
Figura 73. Mapas de fissuras do grupo C2.H.20.	73
Figura 74. Estricção da barra de 20 mm no grupo C2.H.20.	73
Figura 75. Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 25 mm.	75
Figura 76. Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 25mm.	76
Figura 77. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.H.25	78
Figura 78. Seção transversal do campo de deformação do C1.H.25.	79
Figura 79. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.V.25. Fonte: Elaboração Própria.	80
Figura 80. Seção transversal do campo de deformação do C1.V.25.	81
Figura 81. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.H.25	82
Figura 82. Seção transversal do campo de deformação do C2.H.25.	83
Figura 83. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.V.25	84
Figura 84. Seção transversal do campo de deformação do C2.V.25.	85
Figura 85. Curvas típicas de deformação x tempo dos grupos da barra de 25 mm.	86
Figura 86. Mapas de fissuras do grupo C1.H.25.	88
Figura 87. Mapas de fissuras do grupo C1.V.25.	89

Figura 88. Mapas de fissuras do grupo C2.H.25.	89
Figura 89. Estricção da barra de 25 mm no grupo C2.H.25.	90
Figura 90. Comportamento elástico do tirante do grupo C2.H.25, após finalização do ensaio.	91
Figura 91. Fissura horizontal do tirante do grupo C2.H.25.	91
Figura 92. Mapas de fissuras do grupo C2.V.25.	92
Figura 93. Vazios observados na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical.	93
Figura 94. Distribuição das fibras na seção transversal: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical.	94
Figura 96. Distribuição das fibras na seção longitudinal dos tirantes: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical.	95
Figura 97. Zonas de orientação das fibras no tirante.	96
Figura 98. Orientação das fibras no lançamento na fôrma (a) e imagens da tomografia da dispersão de fibras no tirante C1.H.20 (b).	97
Figura 99. Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.20 (a) e C2.V.20 (b).	98
Figura 100. Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.25 (a) e C2.V.25 (b). Fonte: Elaboração Própria.	99
Figura 101. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.H.20.	117
Figura 102. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.V.20.	118
Figura 103. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.20.	119
Figura 104. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.20.	120
Figura 105. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.H.25.	121
Figura 106. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.V.25.	122
Figura 107. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.25.	123
Figura 108. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.25.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação de influência de parâmetros na aderência.	30
Tabela 2. Componentes e teores equivalentes da composição da sílica da casca de arroz - Silcca Nobre SBI.	18
Tabela 3. Característica físicas do agregado graúdo.	20
Tabela 4. Força, deslocamento e tensão de escoamento e máximas, e módulo de elasticidade das barras de aço de 20 mm e 25 mm.	25
Tabela 5. Composição dos concretos utilizados: C1 sem fibras e C2 com fibras.	27
Tabela 6. Quantidade de corpos-de-prova ensaiados por configuração.	35
Tabela 7. Resultado do espalhamento das misturas.	44
Tabela 8. Resultados dos tempos de fluidez - Funil "V".	46
Tabela 9. Resultados obtidos dos ensaios da caixa "L".	46
Tabela 10. Resultados de espalhamento com anel "J".	47
Tabela 11. Dados dos ensaios de compressão axial da matriz C1 e C2.	48
Tabela 12. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.H.20.	51
Tabela 13. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.V.20.	51
Tabela 14. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.H.20.	52
Tabela 15. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.V.20.	52
Tabela 16. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.H.25.	74
Tabela 17. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.V.25.	74
Tabela 18. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.H.25.	74
Tabela 19. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.V.25.	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. ADERÊNCIA AÇO-MATRIZ	20
2.1.1. Aderência Química	21
2.1.2. Aderência por Atrito	21
2.1.3. Aderência Mecânica.....	22
2.2. FATORES DE INFLUÊNCIA NA ADERÊNCIA	25
2.3. RUPTURA DA ADERÊNCIA AÇO-MATRIZ	31
2.3.1. Análise Global.....	31
2.3.2. Análise local.....	34
2.4. ADIÇÃO DE FIBRAS	37
2.4.1. Comportamento mecânico.....	38
2.4.2. Influência da orientação das fibras	41
3. METODOLOGIA	45
3.1 MATERIAIS	45
3.1.1 Materiais cimentícios	45
3.1.2 Agregados.....	19
3.1.3 Sílica #325.....	21
3.1.4 Aditivos Químicos.....	22
3.1.5 Fibras de aço.....	22
3.1.6 Barra de aço.....	24
3.1.7 Água	26
3.2 COMPOSIÇÃO E MÉTODOS DE ENSAIO	27
3.2.1 Ensaio Reológicos	28

3.2.2	Ensaio Mecânico	31
3.2.3	Tomografia Computadorizada.....	41
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
4.1	PROPRIEDADES REOLÓGICAS	44
4.1.1.	Espalhamento - Cone de Abrams	44
4.1.2.	Medida da viscosidade através do funil “V”	46
4.1.3.	Medida da habilidade passante através da caixa “L”	46
4.1.4.	Medida da habilidade passante através do anel “J”.....	47
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS: COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO..	48
4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS: TRAÇÃO – BARRA 20 mm	50
4.3.1	Campo de deformação.....	55
4.3.2	Comportamento aço-matriz.....	67
4.3.3	Modo de fratura.....	70
4.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS: TRAÇÃO – BARRA DE 25 mm.....	74
4.4.1	Campo de deformação.....	77
4.4.2	Comportamento aço-matriz.....	85
4.4.3	Modo de Fratura.....	87
4.5.	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	92
5	CONCLUSÕES	100
6	Sugestões para Trabalhos Futuros	103
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXO A	117

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais compósitos com matriz frágil ou quase-frágil é um problema complexo e atual. Entre esses compósitos podem-se citar misturas de matrizes cimentícias, poliméricas, cerâmicas, com adição de fibras naturais, minerais, sintéticas, metálicas, entre outras. Com a síntese busca-se propriedades superiores, quando comparadas aquelas isoladas para cada elemento.

Dentre as matrizes frágeis, o concreto de cimento Portland, se destaca pela sua grande aplicabilidade e pela sua boa capacidade de suportar esforços de compressão. No entanto, o concreto possui baixa resistência à tração. Para contornar esse problema e ser utilizado em elementos estruturais, barras de aço devem ser embebidas no concreto nas regiões onde existem esforços solicitantes internos de tração. Desta maneira, se obtém o denominado concreto armado.

Para fins de cálculos de dimensionamento e verificação estrutural, assim como para a modelagem dos elementos estruturais, considera-se que o concreto é um material homogêneo, e pressupõe-se que o mecanismo de ligação entre o aço e concreto é perfeito, ou seja, é considerado que as deformações específicas devido as solicitações são iguais nos dois materiais. Contudo, esta última suposição pode limitar a solução encontrada. Para melhorar as compatibilizações dos efeitos, procura-se estabelecer parâmetros de influência do deslizamento da barra em relação ao concreto através de análise teórica e prática. Então, para obter as leis constitutivas que descrevam o comportamento da ligação, as quais são usadas em métodos e modelos numéricos, são fundamentais ensaios experimentais (FERNANDES, 2000; ROSÁLES; DURAND; BEZERRA, 2017).

Assim, mesmo ao considerar a aderência perfeita entre concreto e aço, sabe-se que a configuração dessa interface é influenciada por diversos fatores, tais como, as propriedades do concreto, da superfície do elemento de reforço, da posição da barra em relação a moldagem, do tipo, da velocidade e da duração do carregamento, as quais basicamente definem o comportamento mecânico. Ainda, segundo Vieira (2008) o comportamento mecânico do concreto tem origem em sua microestrutura interna, ou seja, na interface pasta-agregado, que está associado à sua direção de lançamento e exsudação interna. Não obstante, em elementos estruturais de concreto armado, regiões sob as barras de aço apresentam uma interface porosa. Essas porosidades provenientes da exsudação interna do concreto, resultam em microrregiões de ligação frágil, que debilitam a

capacidade adesional aço-concreto, e modificam a transferência das forças de aderência (DYBEL; KUSCHARSKA, 2020).

Os mecanismos de transferência de tensões em elementos de concreto armado podem ser alterados através do uso de fibras, visando a compatibilidade de deformações ou melhoria dos mecanismos (TOLEDO FILHO *et al.*, 2014). Isso se deve a atuação das fibras como pontes de transferência de esforços e elementos de confinamento dentro do concreto, o que promove a absorção de esforços à tração e aumento da rigidez de contato pelo confinamento, proporcionando maiores taxas de absorção de energia por deformação (BENTUR; MINDESS, 2007; ZOLLO, 1997).

Esse mecanismo de ligação é regido pela configuração de aderência entre o concreto e o reforço (barras de aço e/ou fibras), que basicamente é dividida em três parcelas: aderência química, por atrito e mecânica. O conjunto destas parcelas proporcionam ao elemento tracionado a capacidade de transferência de esforços para a matriz, e vice versa.

Um modo de avaliar esse mecanismo é com a solicitação de uma barra de aço envolvida por concreto. Nessa configuração, a transferência dos esforços de um tirante para o concreto/compósito, proporciona a elucidação dos mecanismos que ocorrem dentro dessa estrutura, provocadas pelos aspectos dos três componentes de aderência na interface. Dessa forma o estudo do concreto reforçado por barra de aço (reforço primário) e fibras (reforço secundário), promove o aumento do conhecimento da interface entre a barra de aço e a matriz. Ainda, nesses ensaios é possível avaliar a relação da interface de ligação com a direção de moldagem, assim como a forma com que os esforços são transferidos entre o aço-concreto.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico e o processo de fissuração do concreto autoadensável com reforço híbrido de barras de aço e fibras metálicas, em relação ao sentido da moldagem de tirantes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Caracterizar o comportamento reológico no estado fresco através de ensaios convencionais e determinar comportamento mecânico à compressão.
- II. Avaliar através da mecânica da fratura, o processo de transferência de tensões em tirantes, da barra de aço para a matriz cimentícia, com e sem reforço de fibras metálicas;
- III. Avaliar a anisotropia provocada pelo sentido de moldagem dos tirantes, por meio de correlação digital de imagem e tomografia;
- IV. Comparar o comportamento mecânico da matriz com diferentes taxas de confinamento da barra de aço;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo se apresenta uma combinação de revisão conceitual e estado da arte dos temas relacionados a este trabalho. Assim, não somente se expõem as características mais importantes, como também se mostram as conclusões das últimas pesquisas em cada uma destas áreas.

Segundo Wei, Mandel, Said (1986), Trtik, Bartos (1999), Nemecek, Kabele, Bittnar (2004) e Bentur, Mindess (2007), as características da camada de interface e suas adjacências, são as frações mais frágeis do sistema do material reforçado, que tem seu comportamento governado pela propriedades mecânicas da zona de transição entre os materiais. Este mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e o elemento de reforço são abordados no próximo item, pelas definições das propriedades de aderência aço-matriz.

2.1. ADERÊNCIA AÇO-MATRIZ

Aderência por definição é a atração que existe na superfície de contato entre dois corpos. Quando associada a matrizes cimentícias reforçadas, a aderência tem suas tensões relacionadas com três fatores: a ligação química, que ocorre pela reação de hidratação do concreto; o atrito, definido pelo coeficiente de atrito entre os dois materiais, que decorrem da pressão que a matriz realiza no próprio reforço, seja devido à retração, confinamento ou distribuição do peso próprio; e a aderência mecânica, ocasionada pela geometria específica do elemento utilizado como reforço, que adicionam tensões de compressão ao esquema de tensão, para impossibilitar o deslizamento do elemento de reforço (ROSÁLES, 2016, ROSÁLES; DURAND, BEZERRA, 2017).

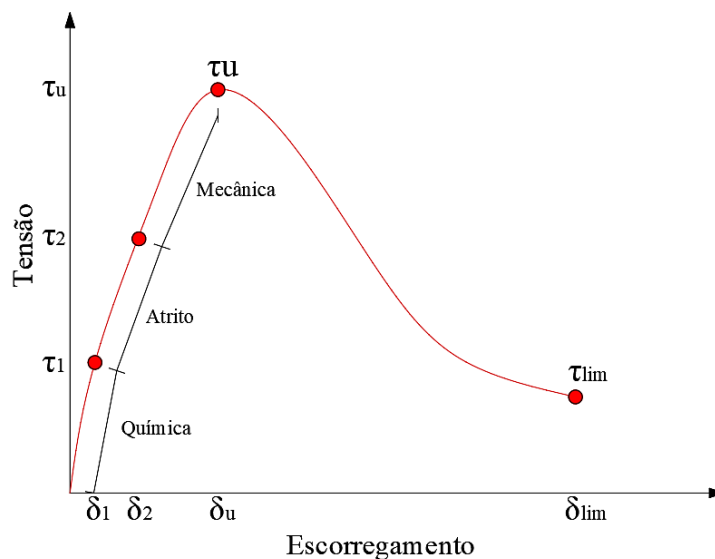
O conjunto desses fatores estabelecem o comportamento mecânico do concreto armado, que é definido pelo deslocamento relativo do reforço dentro da matriz, deslocamento este que ocorre de forma distinta em regiões de compressão e de tração. Em regiões comprimidas o aço e o concreto possuem deformações semelhantes, porém em regiões de tração, pela existência de fissuras, a distribuição de tensão e deformação são mais complexas e tem configurações proporcionais às características da matriz.

2.1.1. Aderência Química

A aderência química, pode ser também referida como aderência por adesão, resultado da ligação físico-química ocorrida durante o processo de hidratação do aglomerante. Essa aderência, possui valores relativamente baixos, quando comparados a aderência por atrito e mecânica, que é eliminada com pequenos deslocamentos entre o aço e o concreto (BANGASH, 1989, ELIGEHAUSEN *et al.*, 1983, DANIN, 2010).

Nas curvas tensão de cisalhamento versus escorregamento, obtidas em ensaios de arrancamento (*pullout*) é possível verificar a parcela adesional, na região linear, com baixíssimo deslocamento no trecho até τ_1 , como é mostrado na Figura 1.

Figura 1. Curva tensão de cisalhamento x escorregamento



Fonte: Adaptado de Da Silva, 2006.

2.1.2. Aderência por Atrito

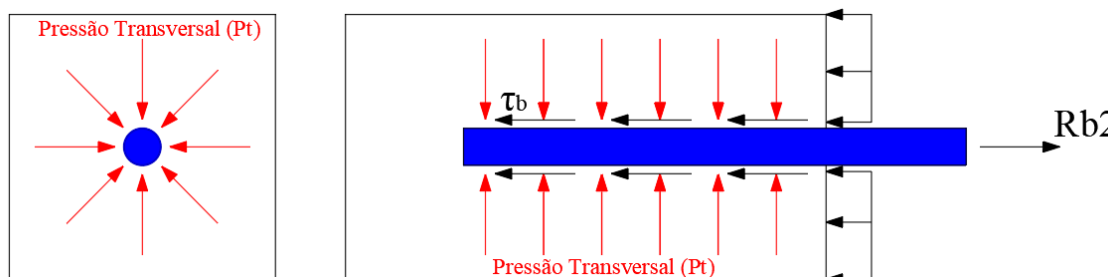
A aderência por atrito é determinada pela rugosidade superficial dos materiais, definida pelo coeficiente de atrito dinâmico que, segundo Leonhardt e Mönnig (1977), variam entre 0,3 e 0,6 em elemento com superfície lisa, como barras lisas e fibras metálicas.

Segundo Deng (2018), o efeito do atrito também ocorre pelo descolamento da ligação química, o que danifica a interface entre o aço-concreto e promove a fricção. O

mesmo autor salienta que em matrizes com reforço híbrido, esse estágio se manifesta com uma maior resistência ao arrancamento, proporcionada pelo aumento da rigidez circunvizinha ao elemento de reforço principal pelas fibras menores. Essas fibras aumentam a capacidade de suporte e ajudam a inibir o aparecimento de microfissuras, atrasando assim a formação de macro fissuras ao redor do elemento de engrenamento mecânico.

O esquema de tensões do processo de arrancamento ao longo do elemento de reforço mostrado na Figura 2, onde P_t é a pressão transversal, R_b a força de arrancamento e τ_b a tensão de cisalhamento (FUSCO, 1995).

Figura 2. Aderência por atrito.



Fonte: Adaptado de Fusco, 1995.

A aderência por atrito é limitada pelo ACI COMMITTEE 408 em valores entre 0,41 e 10 MPa, e é diretamente proporcional à pressão transversal que a matriz proporciona ao elemento de reforço. A pressão transversal está relacionada com a retração autógena do concreto, ocasionada pelo processo de hidratação, resultado da razão volumétrica dos reagentes e dos produtos hidratados do cimento, variando de 0,76, para o aluminato de cálcio, até 0,95 para reações da ferrita (FERNANDES, 2000).

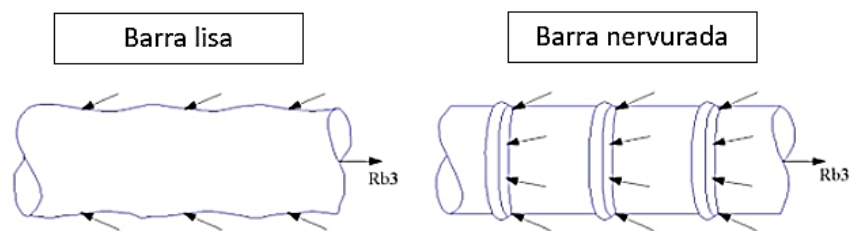
2.1.3. Aderência Mecânica

A aderência do tipo mecânica busca evitar o deslizamento dentro da matriz pela geometria do elemento de reforço. No caso das barras de aço, as nervuras proporcionam tensões de compressão promovendo o travamento no concreto (Figura 3) (FUSCO, 2015, ROSÁLES, 2016).

Em barras lisas esse travamento ocorre apenas pelas irregularidades superficiais, principalmente decorrente da oxidação do ferro (FUSCO, 1995).

Segundo Kang e Kim (2012), Oesch, Landuis e Kuchma (2019), em elementos estruturais de concreto armado, as barras e fibras metálicas podem ser consideradas elementos de reforço de diferentes tamanhos. As fibras metálicas podem ser vistas como barras de aço com comprimento extremamente pequeno e menor espaçamento entre elas, agindo como um sistema de reforço no concreto com reforço híbrido.

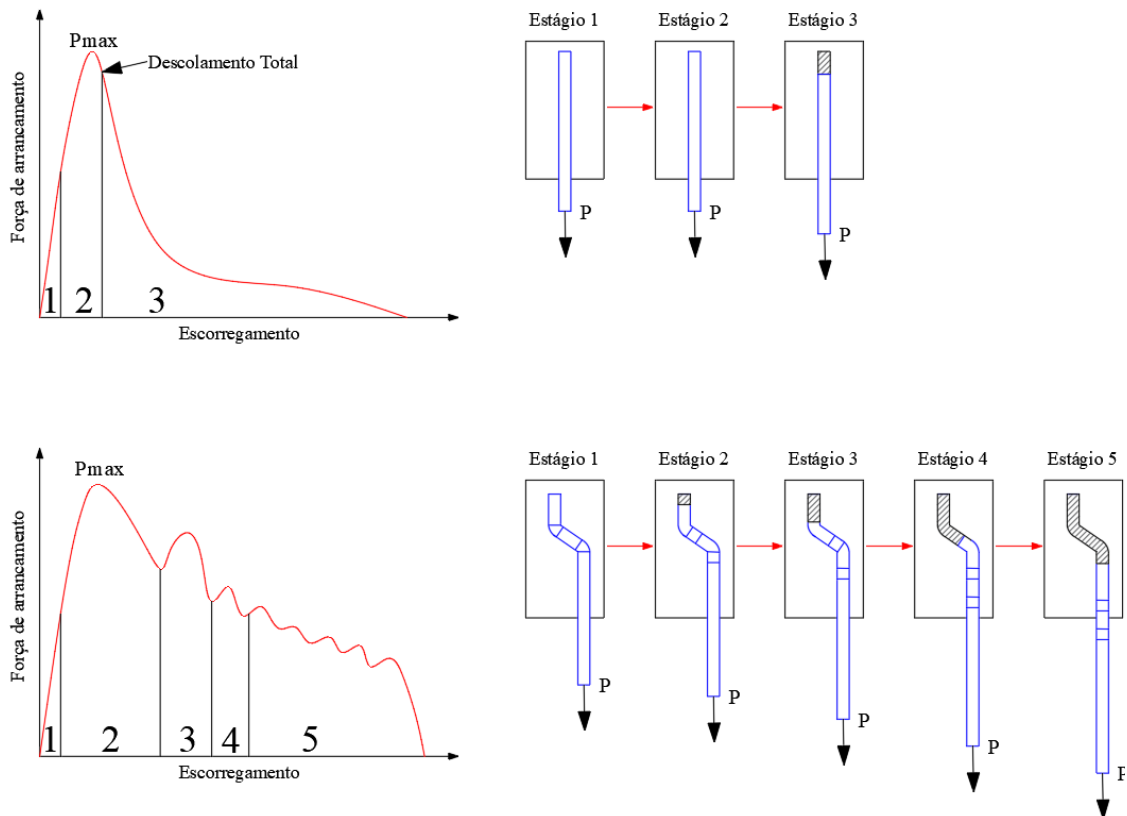
Figura 3. Aderência mecânica



Fonte: Fusco, 1995.

Em elementos com a superfície lisa, como no caso de fibras metálicas e barras lisas o travamento mecânico pode ser realizado pela presença de ganchos nas extremidades ou conformações específicas no caso das fibras, proporcionando travamento mecânico ao elemento (BENTUR; MINDESS, 2007). A diferença entre o comportamento de elementos sem e com gancho é mostrada na Figura 4.

Figura 4. – Comportamento do arrancamento de fibras de aço sem e com gancho.



Fonte: Adaptado de Deng (2018).

Comparando das duas curvas de Força x Deslocamento da Figura 4, é possível notar que a aderência mecânica (proporcionada nesse caso pelo gancho na exterminade) além de proporcionar aumento na tensão de aderência, também determina o comportamento mecânico pós-pico, sendo caracterizada pela geometria do elemento de reforço. A geometria do elemento durante arrancamento do reforço (estágio 4) causa uma resistência residual causada pela força de atrito, que possibilita maior tenacidade ao material (DENG, 2018).

Segundo Qi *et al.* (2018), o incremento de carga proporcionada pela inclusão de formas geométricas que proporcionem engrenamento mecânico no concreto, como o gancho da fibra, pode chegar a 60% da carga máxima de arrancamento. Essa melhoria é alterada quando a orientação do elemento de reforço apresenta inclinação em relação a solicitação, diminuindo à medida que o ângulo aumenta. Que pode ser causada pela introdução de esforços de flexão e atrito local.

Na NBR 6118:2014, no item 8.3.2, o acréscimo de aderência proporcionado pelas nervuras das barras de aço é de 55,5% quando comparada a barras lisas, e de 37,7% para barras entalhadas.

Qi *et al.* (2018) relata resultados interessantes, quando descobre que a força máxima ao arrancamento da fibra ocorre quando seu ângulo é de 45° em relação a linha de ação da força, em matrizes de ultra-alta resistência. Em matrizes de resistência normal, o ângulo em que ocorre a força máxima de arrancamento é de 0 a 20°

Castro (2002) e Leonhardt e Mönnig (1977), afirmam que, quanto maior a aderência maior o número de fissuras que ocasionam altas concentrações de tensões de aderência no limite das regiões de descontinuidade. As regiões de descontinuidade são delimitadas por fissuras principais e estão relacionadas à capacidade da matriz de absorver energia de deformação.

Para que se obtenha uma boa aderência, Simplício (2008) relata alguns parâmetros da geometria da barra nervurada, o espaçamento entre as nervuras não devem ultrapassar 70% do seu diâmetro nominal, e a altura da nervura seja proporcional ao diâmetro, com valores de 4% para barras de até 13 mm, 4,5% para barras de 16 mm e 5% para barras com diâmetro maiores.

2.2. FATORES DE INFLUÊNCIA NA ADERÊNCIA

Segundo Rosáles (2016), Fernandes (2000) e Leonhardt e Mönnig (1977), a variação da tensão de aderência é influenciada pelos seguintes fatores:

- Ações externas: solicitações que alteram as tensões de compressão e tração no aço;
- Fissuras: ocasionam pelo seu aparecimento a redistribuição de tensões, provocando alta concentração de tensão nas regiões de descontinuidade;
- Forças de ancoragem nas extremidades: configuração que proporcionam a transferência de tensão de aderência do aço no concreto;
- Variação de temperatura: o coeficiente de condutibilidade térmica do aço é maior do que a do concreto, o que ocasiona uma dilatação do aço dentro do concreto, podendo proporcionar valores maiores de aderência para altas temperaturas;
- Retração do concreto: todo o processo de hidratação do cimento Portland é proveniente da reação de alguns grupos químicos, os aluminatos, silicatos e a

ferrita, onde a razão entre o produto e os regentes desse processo produzem uma diminuição volumétrica, acarretando tensões de compressão no aço e de tração no concreto;

- Deformação lenta do concreto em peças comprimidas de concreto armado (pilares): Tensões de compressão surgem devido a redistribuição de tensões no concreto, devido ao encurtamento provocado pela deformação lenta.

Stiel, Karihaloo, Fehling (2004), Zirgulis *et al.* (2015), Nguyen, Nguyen, Pansuk (2016), e Oesch, Landis, Kuchma (2019) afirmam, que o sentido de moldagem também é um fator importante na aderência. Principalmente em relação a matrizes com fibras, pois nestes casos, a direção de moldagem, influencia diretamente no processo de orientação das fibras durante o lançamento.

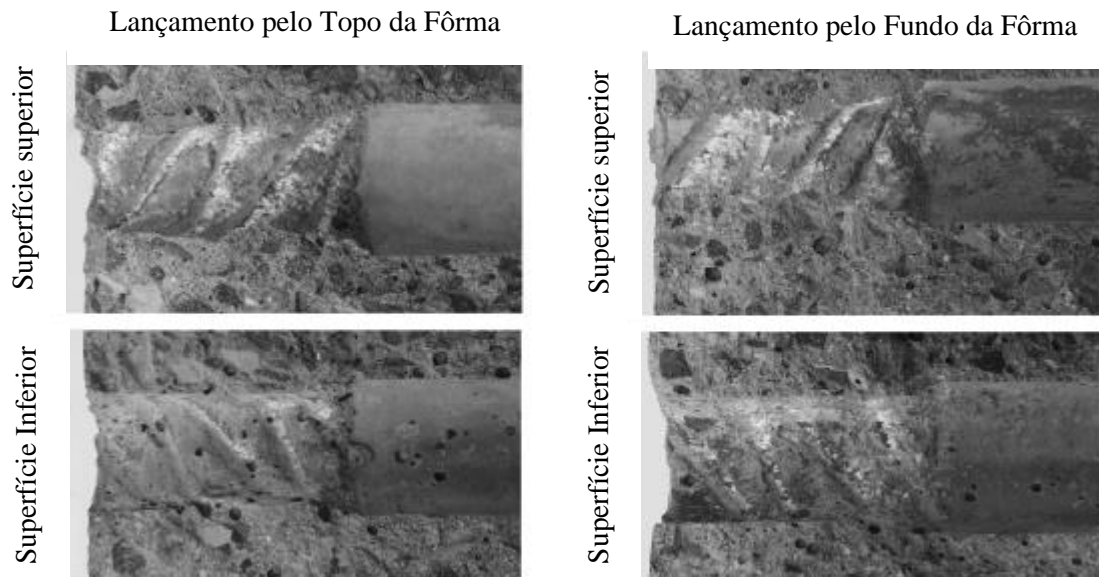
A moldagem horizontal promove o acúmulo de poros sob os vergalhões, resultado do ar aprisionado durante a mistura e da exsudação de água, que diminuem a área de contato entre os materiais, diminuindo assim a resistência de aderência.

Este fenômeno, comumente chamado de “efeito de topo de barra” (*top bar effect*), afeta principalmente misturas de concreto com vibração mecânica, uma vez que a sedimentação movimentada uma parte da água em direção ao topo do elemento e, ocasiona mais facilmente, a formação de uma interface frágil e porosa entre o concreto e a superfície inferior da barra ali localizada (JIRSA; BREEN, 1981).

Dybel e Kucharska (2020) realizaram experimentos com concretos e processos de concretagem distintos e evidenciaram que, reduções de bolhas de ar na interface aço-concreto e baixa sedimentação da mistura elevam a resistência de união dos dois elementos. Ao realizar o lançamento do compósito de forma inversa ao convencional (Figura 5), ou seja, de baixo para cima, a armadura superior do elemento demonstrou melhor cooperação com o concreto. Assim, no caso de lançamento do concreto por cima, a sedimentação da mistura causou uma redução da área de contato nas nervuras inferiores da armadura superior, resultando também em uma diminuição de trechos da barra na transferência das forças de tração.

A Figura 5 ilustra a interação barra-matriz durante um ensaio de arrancamento, representando a frágil camada posicionada na região inferior da barra.

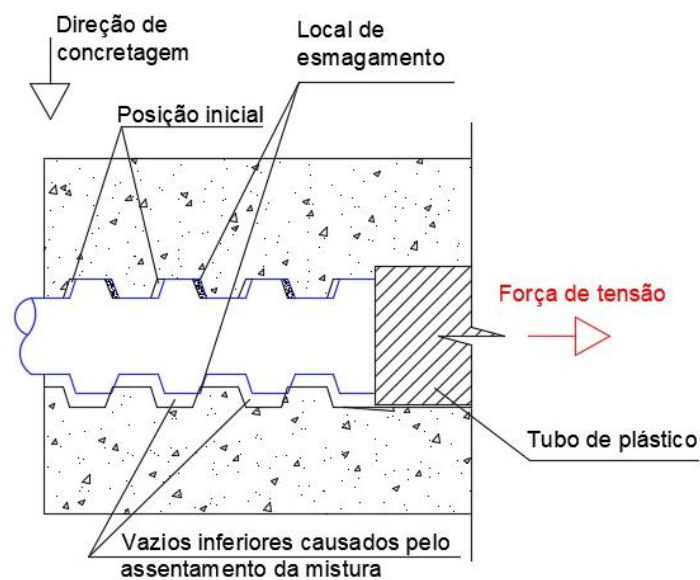
Figura 5. Superfícies típicas do concreto após o ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado de Dybel e Kucharska (2020)

A Figura 6 mostra a interação barra-matriz durante um ensaio de arrancamento, representando a camada frágil posicionada na região inferior da barra.

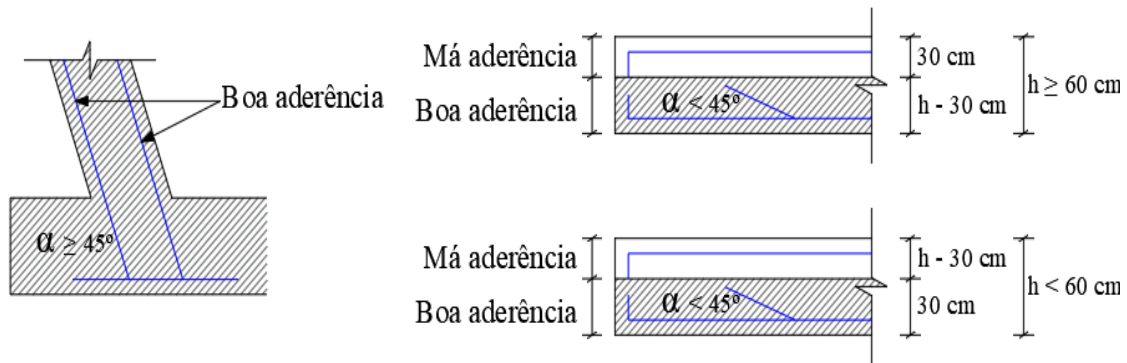
Figura 6. Representação da consolidação dos vazios sob a barra no ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado de Dybel, (2019)

A exsudação define áreas de boa a má aderência, de acordo com a profundidade que está a armadura. Isto está definido na NBR 6118:2014, item 9.3.1 a qual define regiões de boa e má aderência em relação a posição da barra durante a concretagem, como mostrado na (Figura 7).

Figura 7. Regiões de boa e má aderência normatizadas pela NBR 6118:2014.



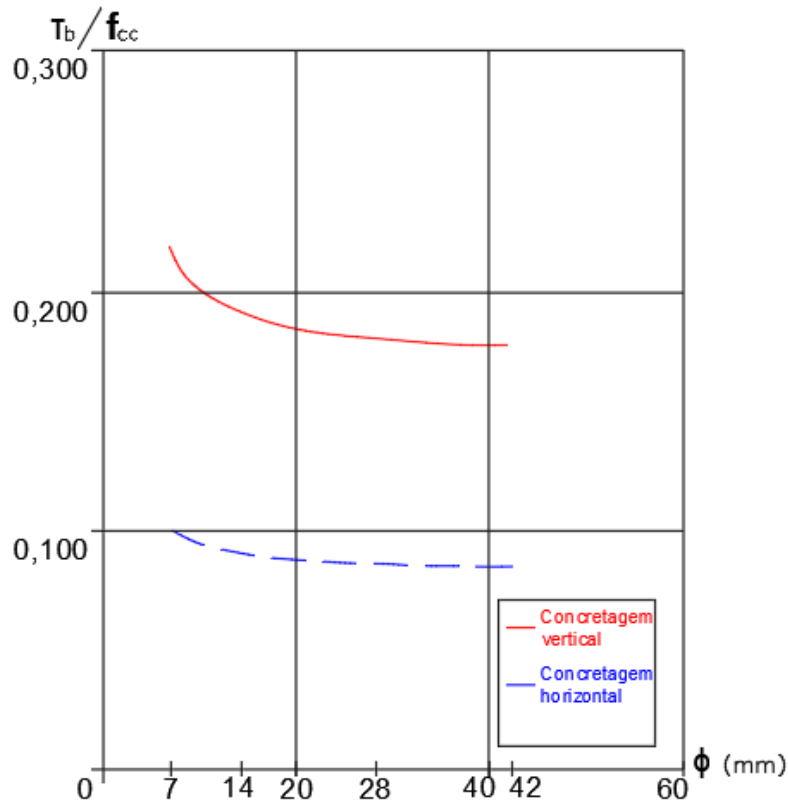
Fonte: Adaptado de BASTOS (2018).

O trecho das barras será considerado de boa aderência, segundo a NBR 6118:2014, quando estiverem nas seguintes posições:

- com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:
 - Para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
 - Para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
- em outras disposições diferentes as duas situações supracitadas devem ser consideradas zonas de má aderência.

Rehm (1961) e Castro (2002) relacionam a razão da tensão de aderência e a tensão de compressão dos elementos ensaiados com os diâmetros das barras de aço e o sentido de moldagem, como mostrado na Figura 8. Nessa figura pode-se observar que a moldagem vertical proporciona razões 100% maiores quando comparados com a moldagem horizontal.

Figura 8. Influência do diâmetro da barra e o sentido de moldagem na aderência



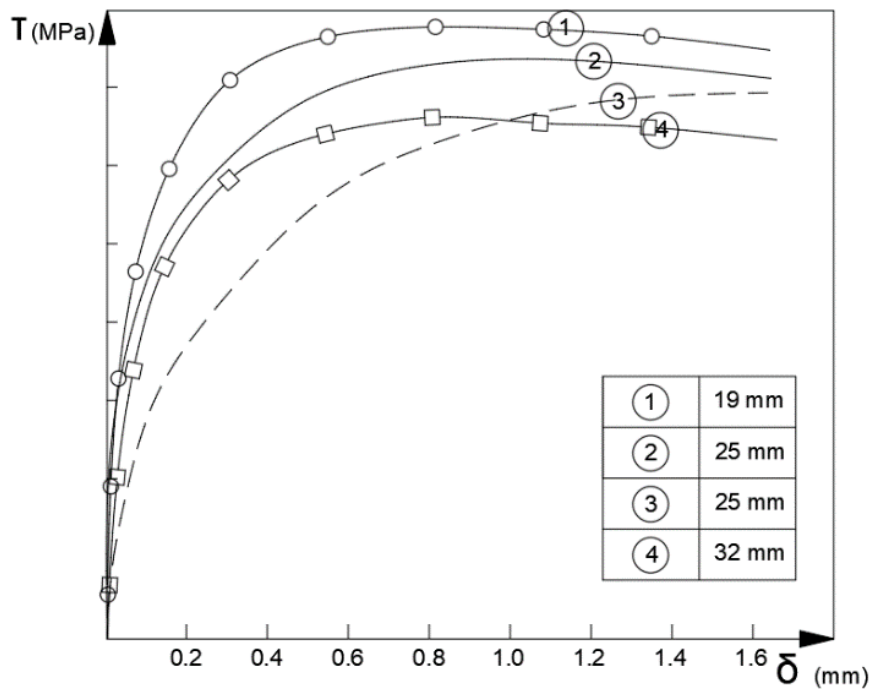
Fonte: Adaptado de REHM (1961) *apud* LEONHARDT, MÖNNIG (1977)

Simplício (2008) enfatiza uma relação inversamente proporcional entre a tensão de aderência e o diâmetro da barra. A maior retenção de água na interface do aço-concreto resulta em uma região de envoltória porosa, diminuindo assim a capacidade de resistência a cisalhamento e compressão da zona de interface da matriz.

A Figura 9 evidencia a redução da tensão de aderência em função do diâmetro da barra. Nessa figura se pode ver a influência da tensão com o diâmetro da barra para quatro barras de três diâmetros diferentes (ELIGEHAUSEN *et al.*, 1983 *apud* SIMPLÍCIO, 2008).

Nas curvas 2 e 3 (ver Figura 9), é possível observar dois comportamentos mecânicos distintos, para o mesmo diâmetro de barra, e isso ocorre pela diferença tipo de geometria de nervura presente em cada barra.

Figura 9. Efeito do diâmetro da barra na aderência



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

Segundo Barbosa *et al.* (2001), a relação entre os fatores que influenciam a resistência de aderência está presente na Tabela 1.

Tabela 1. Relação de influência de parâmetros na aderência.

Parâmetro	Comportamento do Parâmetro	Comportamento da Aderência
Resistência à compressão	Aumento	Aumento
Superfície 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 do Ensaio	Aumento	Aumento
Adensamento	Aumento	Aumento
Carregamento cíclico	Aumento	Diminuição

Fonte: Adaptado de Barbosa *et al.* (2001).

As características das barras, como a conformação superficial, diâmetro, localização e sentido de concretagem, influenciam a forma de ruptura da aderência aço-concreto. Como também influenciam na aderência o tipo e tamanho nos agregados, resistência característica à compressão do concreto, condições de confinamento e as adições na mistura, sejam elas químicas ou minerais, ou ainda pelo acréscimo de fibras como elemento de reforço (DANCYGIER; KATZ, 2012).

2.3. RUPTURA DA ADERÊNCIA AÇO-MATRIZ

Neste item, é descrito o comportamento de ruptura da aderência entre a matriz e o reforço, analisadas no elemento solicitado (análise global) e no mecanismo da interface de ligação (análise local), as quais apresentam as características principais da ruptura.

Segundo AL-JAHDALI (1997), BELO (2017) os principais tipos de rupturas de aderência, em matrizes sem adição de armadura de confinamento, são:

- Ruptura por arrancamento: considerada uma ruptura dúctil, onde a barra de aço tem o confinamento adequado da matriz, que promove o escorregamento relativo entre os materiais;
- Ruptura por fendilhamento: rompimento frágil, causado pela falha no confinamento da barra, que não suporta a tensão aplicada e promove a multi fissuração;
- Ruptura por tração: ruptura com fissuração perpendicular à solitação;
- Ruptura do aço: ocorrência de rompimento da barra, sem deslizamento, devida a grande aderência entre os dois materiais.

2.3.1. Análise Global

Para compreender o processo de ruptura de concreto reforçado com barras de aço, é necessário primeiro entender como se distribuem as tensões durante o carregamento, e o seu rearranjo na descontinuidade provocada pelas fissuras.

Qi *et al.* (2018) admite ser necessário deformações significativas para que a barra de aço transfira forças elásticas para a matriz. Esse alongamento da barra, resulta na formação de fissuras na matriz, que não detém a mesma capacidade elástica. Nessas

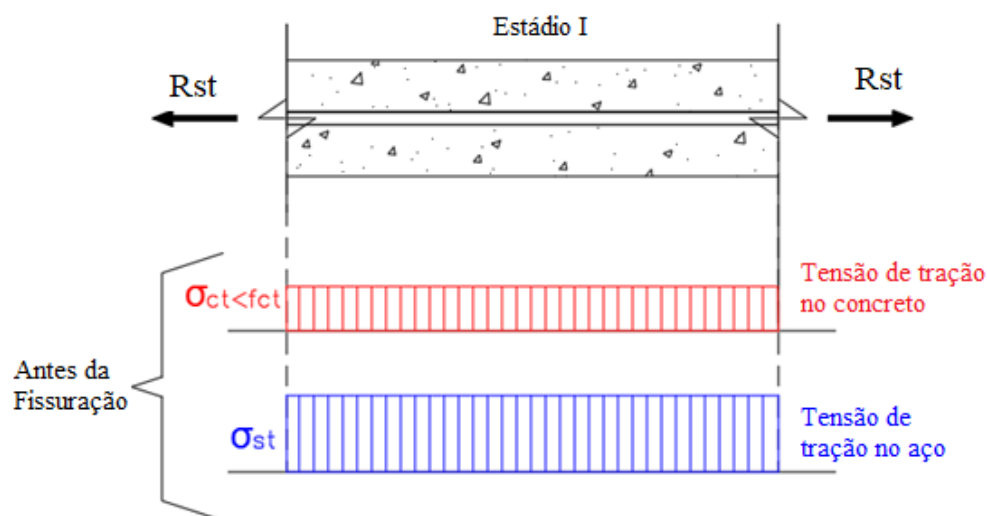
aberturas da matriz pode acontecer corrosão da barra, o que provoca redução na durabilidade da estrutura estrutural.

Como é amplamente conhecido, o concreto não tem a mesma capacidade mecânica em esforços de tração quando comparados a compressão. Ele apenas possui a capacidade de absorver uma pequena parcela de esforços de tração antes de fissurar, denominado de Estádio I, até que seja atingido a σ_{ct} (resistência à tração do concreto) (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Com o início da solicitação a tensão de tração é muito baixa, e o concreto e o aço resistem de forma solidária sem que ocorra fissuras visíveis. Isto gera um diagrama de tensão normal linear como representado na Figura 10 (FUSCO, 1995).

Este esquema de solicitação consiste na tração da barra de aço e transferência de tensão para o concreto, ou seja, na transferência de força aço-concreto, desenvolvido por Fusco (1995).

Figura 10. Estádio I - estado de tensão do aço e do concreto.



Fonte: Adaptado de FUSCO (1995).

Com o aumento do valor do esforço, para limites superiores à resistência característica do concreto a tração, formam-se fissuras visíveis no concreto. Nessa região de descontinuidade, o aço, passa a ser o material que resiste aos esforços de forma única. Entre as fissuras, o concreto continua atuando de forma solidária ao aço, através da

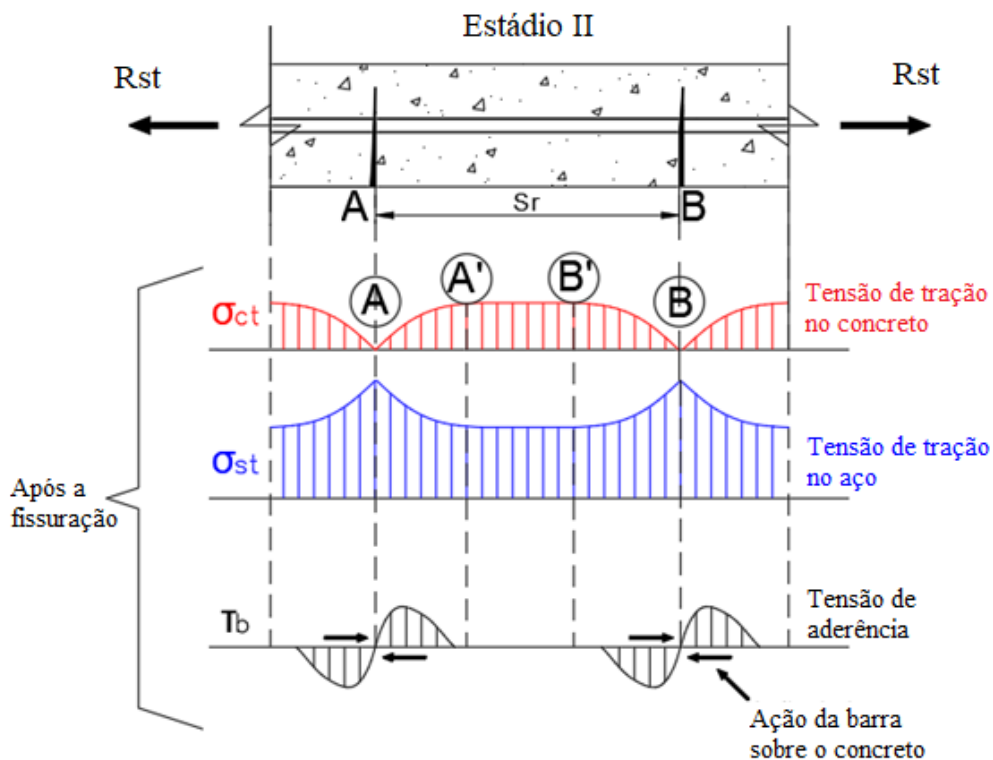
aderência, promovendo rigidez ao elemento, denominado de enrijecimento à tração (*tension stiffening*).

As fissuras A e B, mostradas na Figura 11, provocam regiões de descontinuidade, com o aço agindo como elemento resistente. Adjacentes aos pontos A e B, nas regiões AA' e B'B, a aderência reforço-matriz provoca o carregamento gradativo do concreto.

Esse carregamento aumenta até ser uniforme na região A'B', a qual exprime de forma reduzida o que acontece no Estádio I, onde os dois elementos resistem de forma solidária aos esforços. Não sendo possível expandir esse comportamento para as regiões AA' e B'B, pois as deformações do aço nestas regiões são altas, e tem sua diminuição gradual pela ação da aderência mecânica.

O excesso de deformação provocado no concreto, nas regiões próximas a face A e B, ocasionam microfissuração secundária local, devido a decoesão do concreto circunvizinho a barra

Figura 11. Estádio II - Fissuração e diagrama de tensões no aço e no concreto.



Fonte: Adaptado de FUSCO (1995).

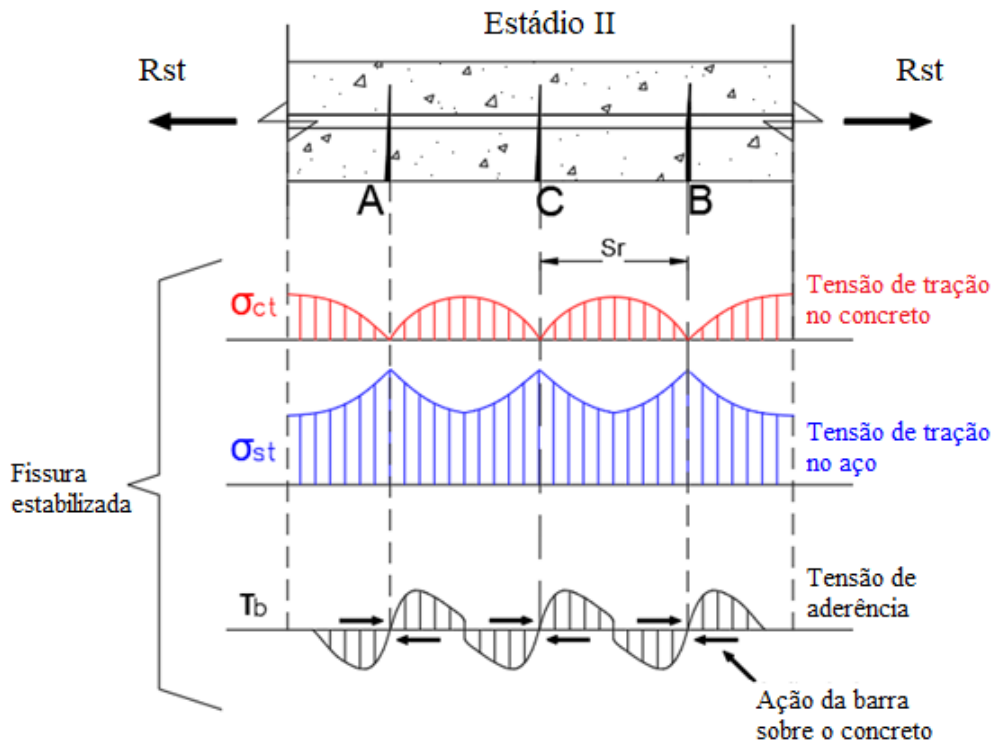
Na continuidade do carregamento, a região A'B' atinge novamente o valor da resistência de tração máxima do concreto, e inicia-se novamente o processo de fissuração

(ver Figura 12). Esse processo continua até que ocorra a estabilidade da fissura, que acontece quando a tensão de aderência não atinge o valor da resistência a tração do concreto.

O acréscimo de carga provocará o aumento na abertura das fissuras principais, e processo de alastramento das fissuras secundárias.

A formação das fissuras principais causadas pela sollicitação do aço, são resultantes do processo de microfissuração do concreto circundante, proporcionado pelos fatores de aderência, como descrito no item 2.1, fazendo-se necessário a análise local da interface aço-reforço.

Figura 12. Configuração do aço e do concreto quando é atingida a estabilidade de fissura.



Fonte: Adaptado de FUSCO (1995).

2.3.2. Análise local

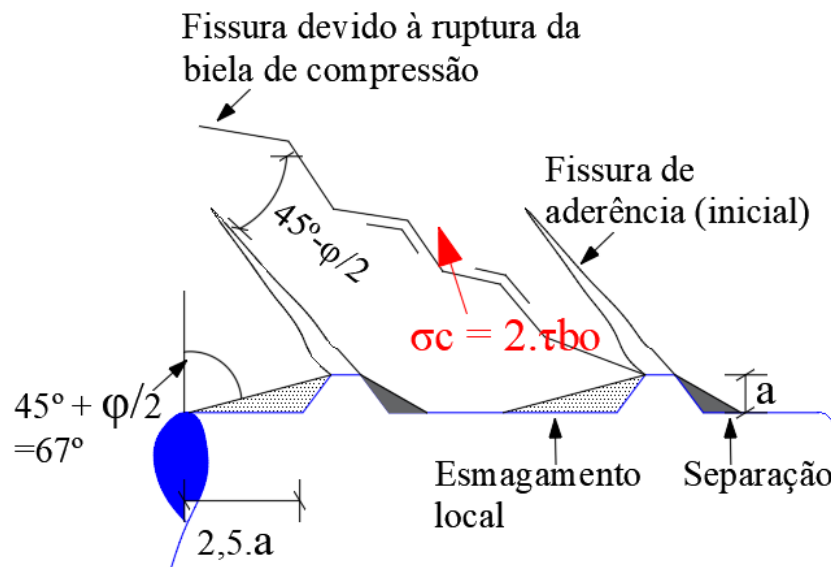
O mecanismo de ligação teórico entre o concreto e a armadura, é baseado no sistema de biela de compressão, onde as nervuras exercem uma força de compressão e esmagamento na matriz circunvizinha (TASSIO, 1979)

Na Figura 13, é possível verificar o sistema de engrenamento mecânico da nervura na matriz, que promove o rompimento das bielas de compressão.

Esse rompimento, ocorre quando a interface de ligação entre aço-matriz atinge tensão de aderência última (τ_{bu}), que forma uma fissura de aderência (inicial), e promove o esmagamento do concreto na direção solicitada (ver Figura 13). Como as nervuras são consecutivas, em um confinamento adequado, as bielas são carregadas por uma tensão de compressão de aproximadamente duas vezes a tensão de aderência última. Caso a barra não tenha o confinamento adequado, as bielas podem ser isoladas pelo processo de fendilhamento (fissuras longitudinais), que proporciona a ruptura do concreto envolta da barra, e ocasionando ruptura total da interface de ligação entre os elementos. Em vista disso, a análise do processo de fissuração torna-se um importante indicador na ruptura das bielas de compressão (TASSIOS, 1979).

Não obstante, ainda não se possui um acervo bibliográfico que represente o comportamento de rompimento das bielas através do processo de fissuração (CEB, 1982 Bulletin d'Information n.151).

Figura 13. Mecanismo de engrenamento mecânico.



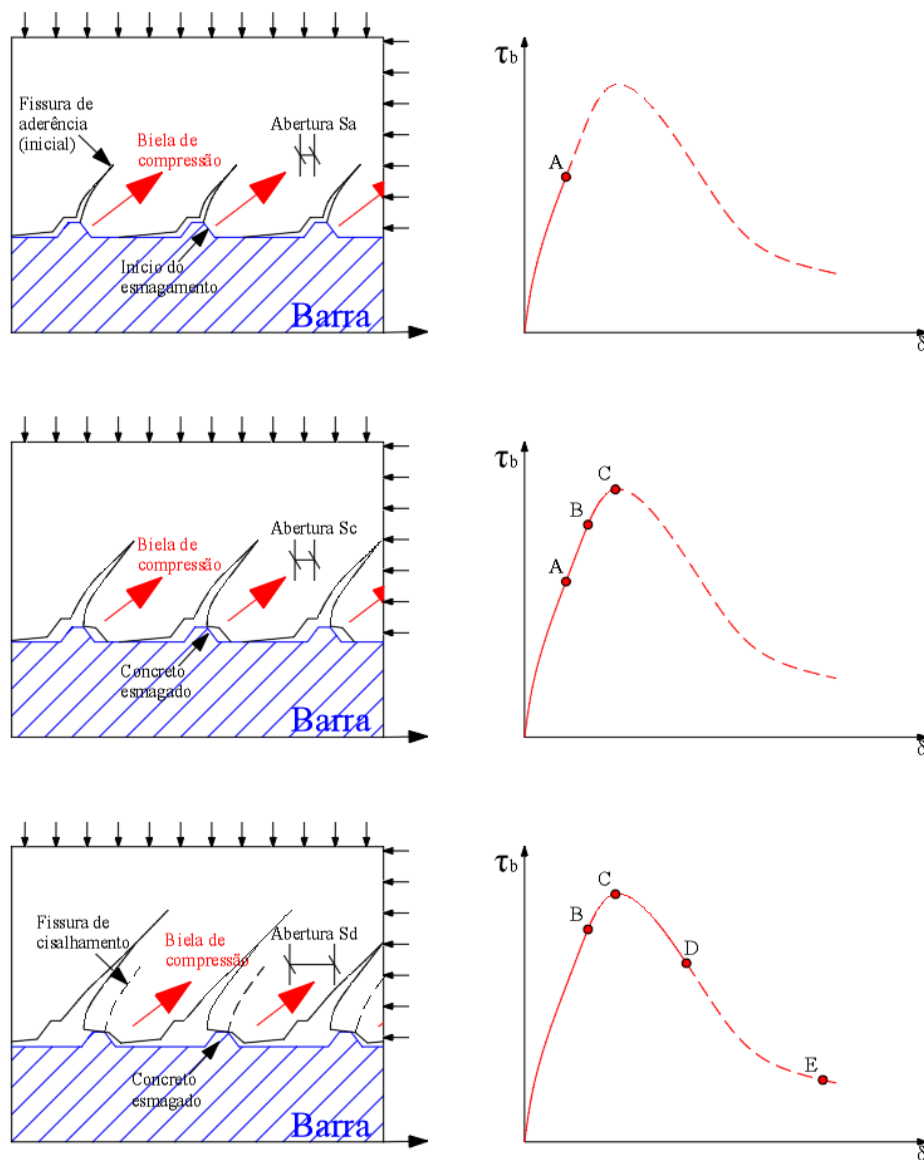
Fonte: Adaptado de TASSIOS (1979).

Fernandes (2000) explica que no ponto A da curva (ver Figura 14), devido ao esforço de tração dá-se início o processo de esmagamento do concreto e formação de regiões de compressão no sentido da solicitação. No trecho B-C, a continuidade de

carregamento provoca a propagação das fissuras de aderência. No final do trecho (ponto C), acontece a decoesão da interface entre nervuras, onde é atingido a tensão de aderência última, que resulta no início das fissuras por cisalhamento (rompimento da biela de compressão) (trecho C-D). A partir do rompimento da região entre nervuras e propagação das fissuras cisalhantes e de aderência ocorre o deslizamento dúctil da barra (trecho D-E), em relação a matriz, configurando uma ruptura por aderência.

Até que seja realizado o rompimento da biela de compressão é admitido o processo de esmagamento do concreto, como pode ser verificado no processo na Figura 14.

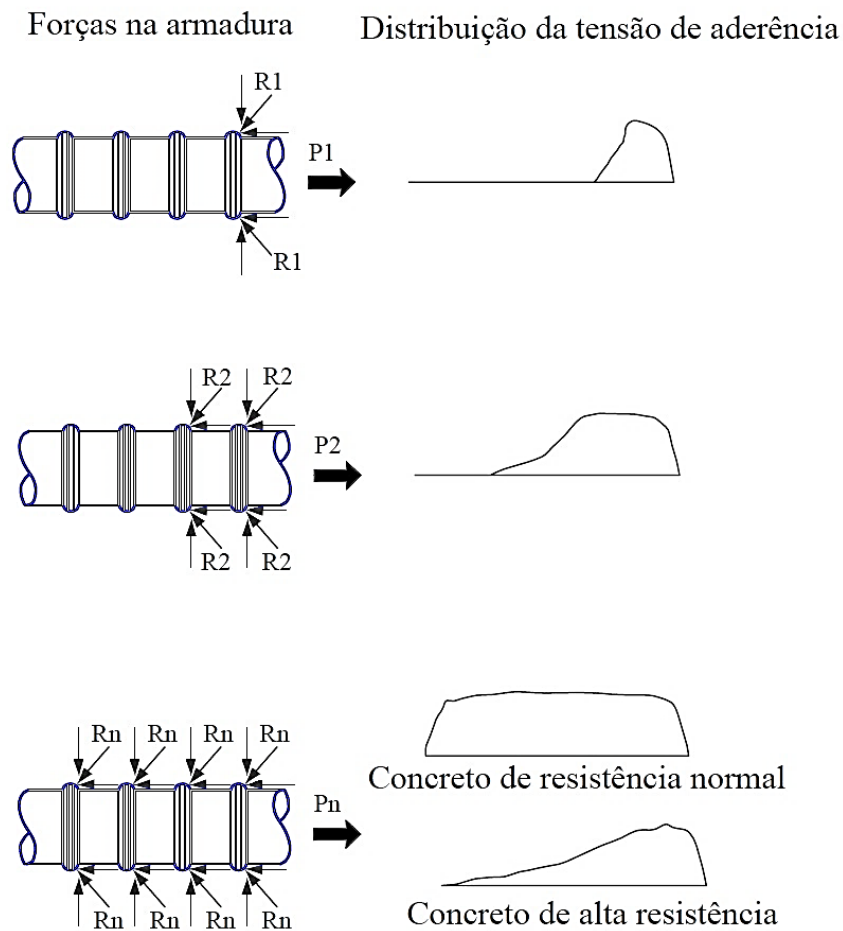
Figura 14. Processo de carregamento e esmagamento das bielas.



Fonte: Adaptado de ELIGEHAUSEN *et al.*, 1983 *apud* FERNANDES, 2000.

Em matrizes de alta resistência a distribuição de tensões que ocorre no processo de arrancamento, é concentrada próxima a extremidade do corpo de prova tracionado. Esse comportamento é justificado pela maior resistência da matriz na sollicitação da biela de compressão, como é elucidado por Azizinamini *et al.* (1993) e mostrado na Figura 15.

Figura 15. Comportamento das tensões de aderência.



Fonte: Adaptado de Azizinamini *et al.* (1993)

2.4. ADIÇÃO DE FIBRAS

Segundo Solyom, Balázs (2016) e Qi *et al.* (2018), o comportamento de arrancamento da barra podem ser alteradas pela adição de fibras curtas, em termos de tensão de aderência reforço-matriz.

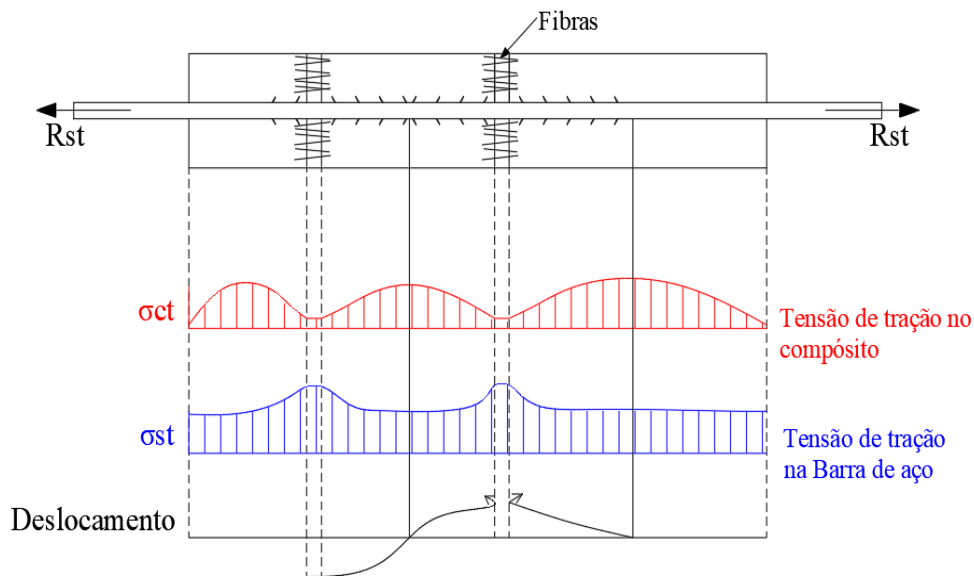
2.4.1. Comportamento mecânico

Existem diversos tipos de fibras de inúmeros materiais, que podem ser incorporadas no concreto a fim de proporcionar melhorias em propriedades específicas, dependendo do uso, que se deseja aplicar o material compósito.

As fibras tem a função de agir como ponte de transição de tensão, através de pontos de descontinuidades (fissuras) sejam elas primárias ou secundárias, melhorando as propriedades mecânicas como ductilidade, resistência à tração, tenacidade e características de deformação (BENTUR; MINDESS, 1990, ABRISHAMI; MITCHELL, 1997, DANIN, 2010).

Na Figura 16, é demonstrado o mecanismo de ação das fibras nos pontos de descontinuidade da matriz, com a transferência de tensão por meio das fibras para matriz e o processo de carregamento do material compósito até sua ação conjunta na região central de cada porção do sistema (MAZAHERIPOUR; BARROS; SENA-CRUZ, 2015).

Figura 16. Mecanismo de ligação no concreto armado com reforço de fibras.



Fonte: Adaptado de Mazaheripour; Barros; Sena-Cruz, 2015.

A adição de fibras pode ser caracterizada utilizando parâmetros como: comportamento até a primeira fissura, comportamento pós-fissuração, capacidade de deformação (pós-fissuração), número de fissuras, abertura e espaçamento das fissuras (KANG; KIM, 2012).

O comportamento até a primeira fissura é influenciado pelas propriedades da matriz, e posteriormente com o aumento do carregamento, a resposta mecânica do compósito irá depender do deslocamento relativo entre a fibra e a matriz. A área de influência de tensão, que a fibra gera na matriz circunvizinha, é obtida pela relação entre a área da seção da fibra e o volume de fibra adicionada na matriz (KANG; KIM, 2012).

Segundo Majain *et. al.* (2020) e Zhao *et. al.* (2018), a adição de fibras de aço em ensaios de arrancamento fornece melhorias no confinamento do concreto e na ligação entre barras nervuradas e o concreto circundante, podendo especialmente em barras de maior diâmetro e cobrimento insuficiente, modificar o modo de falha, que parte do rompimento prematuro do compósito para arrancamento da barra.

Contudo, segundo Gao *et. al.* (2020), 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.

Estudos experimentais realizados por Rossi *et. al.* (2020) indicam que a adição de fibras de aço no CAA pode permitir a redução dos comprimentos de ancoragem proposto pela ABNT NBR 6118:2014, uma vez que aumentos gradativos na incorporação das fibras podem fornecer melhorias na resistência da união aço-concreto. Segundo o autor, parte dos esforços pode ser absorvido pelas fibras, e a tensão no reforço longitudinal sofre reduções, independente do comprimento de ancoragem.

Ainda, ao realizar testes experimentais de arrancamento em concreto fibroso variando a geometria da fibra de aço, Garcia-Taengua, Martí-Vargas e Serna (2016) apontam que para um mesmo volume, fibras mais curtas podem resultar em maior eficiência no aprimoramento da resistência da interface aço-concreto quando comparadas ao uso de fibras longas. Porém, segundo os autores, a resistência à compressão foi identificada como fator mais determinante no desempenho da ligação entre estes elementos.

Segundo resultados alcançados por Huang *et. al.* (2016), a hibridização entre fibras de aço e polipropileno mostra-se efetiva na retardação da iniciação e propagação de fissuras junto à interface barra-concreto, levando, esta, a desempenhar comportamento mais dúctil mesmo em respostas cíclicas. De acordo com o autor, essa melhoria é acentuada na medida em que o teor de fibras e resistência à compressão do concreto aumenta.

Ao analisar a interação de barras de transpasse coladas com um concreto de alto desempenho em vigas de escala reduzidas a esforços de flexão, Lee (2016) explica que com determinados volumes de fibras de aço, o desempenho da ligação entre barras pode não demonstrar diferenças em relação a barras contínuas. Segundo o autor, a resistência à tração residual exercida pelas fibras de aço auxilia o mecanismo do transpasse, possibilitando até o uso de emendas mais curtas, mantendo um comportamento dúctil da estrutura.

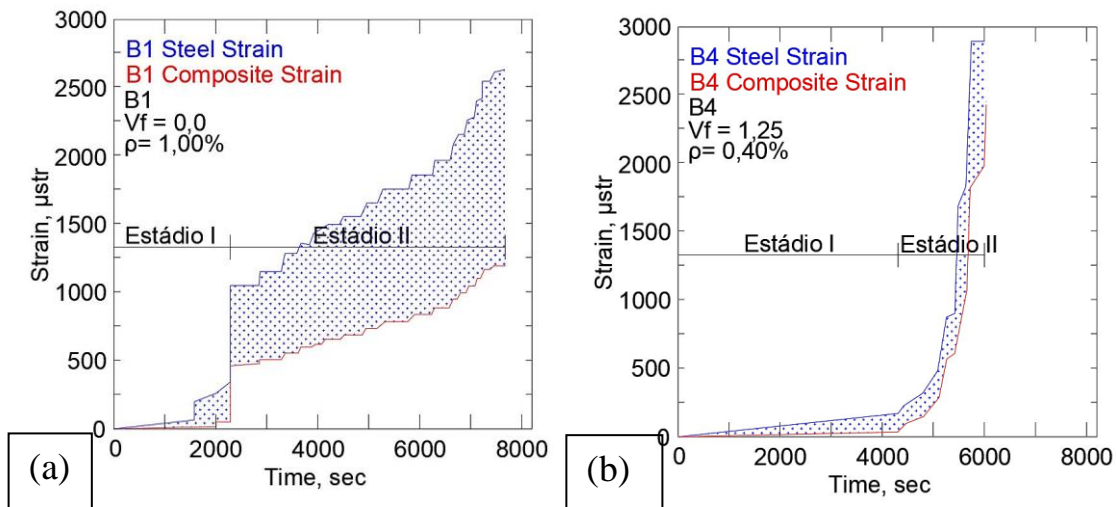
Quando um tirante de concreto de forma confinada é submetido a esforços de arrancamento com a inexistência de reforços transversais, naturalmente haverá a formação de trincas inclinadas e longitudinais e posteriormente, um grande deslizamento seguido da falha da ligação aço-concreto. Contudo, com a presença de fibras, os esforços exercidos pelas nervuras da barra são redistribuídos por toda matriz gerando múltipla fissuração e conseqüentemente, redução e retardação de danos na união entre a barra e o concreto (CHAO, NAAMAN, PARRA-MONTESINOS, 2009). Quando é aumentado o volume incorporado de fibra e/ou é realizado a orientação favorável, aumentam-se as chances de um maior número de fibras cruzarem as trincas e impedir sua abertura excessiva, resultando em uma resistência de interface mais forte e de natureza dúctil (ROY, HOLLMANN, WILLE, 2017).

Após análise de variância, em uma série de testes de arracamento, Garcia-Taengua, Martí-Vargas e Serna (2011) apontaram que o papel das fibras na ligação barra-concreto é da mesma importância que a cobertura do concreto ou o diâmetro da barra, porém o simples fato de adicionar fibras, independentemente da quantidade, melhora a ductilidade da falha da ligação.

Segundo Toledo Filho *et al.* (2014) o comportamento de materiais compósitos tende ser equivalente a deformação da barra de aço, diferentemente das matrizes sem adição de fibra, que possui menor coesão no processo de carregamento.

Na pesquisa desenvolvida pelos autores, são analisadas duas matrizes, a primeira sem fibra, e outra com adição de 1,25% de volume de fibra, com taxas de armadura de 1,00% e 0,40% respectivamente. Para a matriz fibrosa, o comportamento do corpo-de-prova age como um sistema mais homogêneo, com pequena diferença de deformação em relação a matriz-barra (ver Figura 17 (b)). Porém, na matriz com reforço de 1,00% de taxa de armadura, a decoesão a partir do início do processo de fissuração aumenta significativamente (ver Figura 17 (a)).

Figura 17. Deformação da matriz sem (a) e com fibra (b) em relação a barra de aço.



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

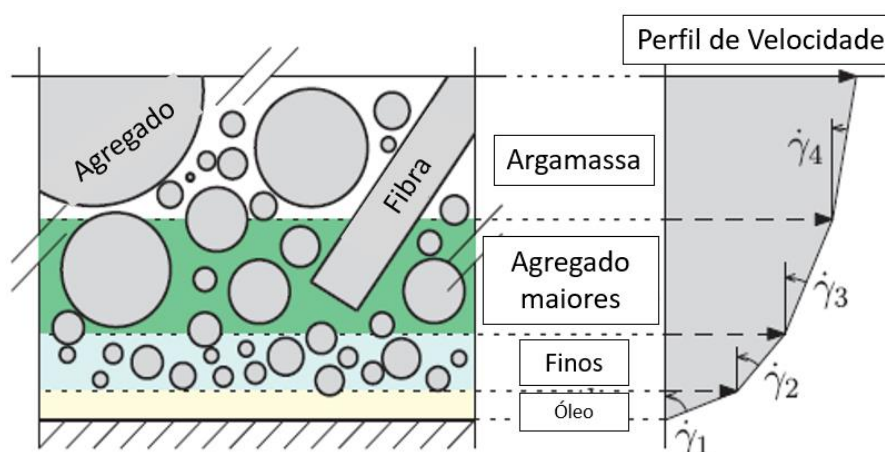
2.4.2. Influência da orientação das fibras

Além do volume de fibra o comportamento do compósito também estará ligado a posição que esta fibra está em relação ao esforço gerado na matriz, sendo essa distribuição e orientação das fibras na matriz, um dos fatores, mais importantes de influência no comportamento mecânico do compósito (ZIRGULIS *et al.* 2015)

Segundo Ferrara, Ozyurt e Di Prisco (2011), o controle da dispersão e orientação das fibras no concreto, através de suas propriedades mecânicas e de lançamento, se mostra uma maneira econômica e viável para alcançar desempenho mecânico superior em compósitos cimentícios com fibras, uma vez que isto pode acarretar em valores relativamente baixos na adição destas. Porém, de acordo com Minguez (2018), nem localização ou orientação são totalmente controladas, de modo que amostras do mesmo material e lote possuem incertezas e resultados mecânicos distintos.

Segundo Švec *et al.* (2014), o modo como o concreto é lançado e a posterior superfície em que o mesmo é acomodado, resultam distintas orientações na fibra e padrões de fluxo da mistura, podendo assim gerar divergências no desempenho dos elementos estruturais. Segundo o autor, devido ao efeito parede, a distribuição das partículas da mistura na região próxima à fôrma se torna não uniforme, modificando sua viscosidade e, conseqüentemente, a velocidade em que se desloca o concreto neste local. A Figura 18 ilustra este fenômeno.

Figura 18. Perfil de velocidade de escoamento de compósito.



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

Em seu estudo, Švec *et al.* (2014) relata que a distribuição espacial e as orientações das fibras de aço são afetadas pela superfície da fôrma, principalmente em elementos com profundidade pequena em relação a área que sofre influência do efeito parede. Segundo o autor, superfícies rugosas podem representar maior aleatoriedade, enquanto superfícies lisas permitem mais facilmente o deslocamento da mistura, e assim, permitem possíveis orientações.

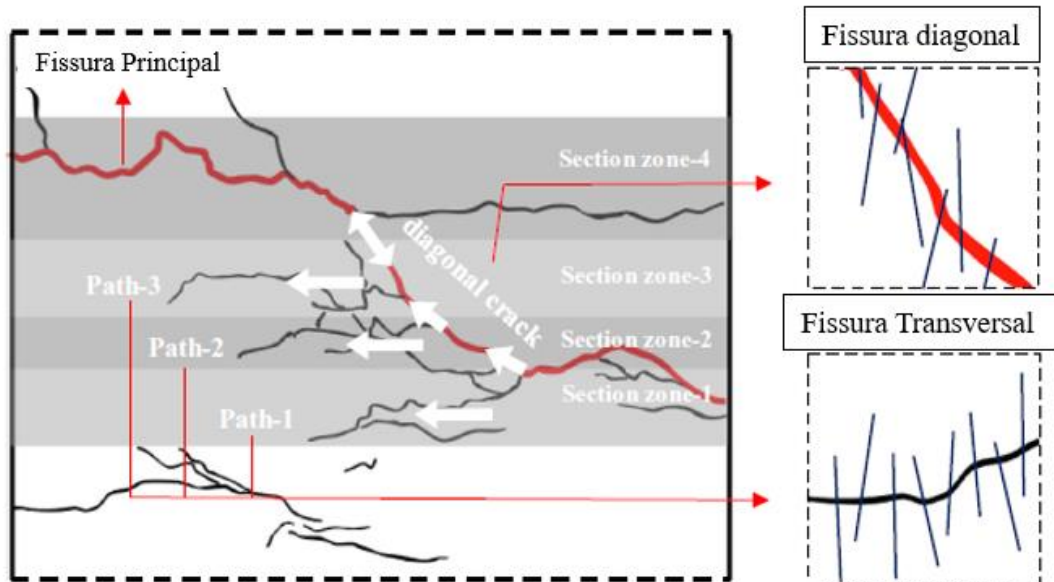
Os resultados de Boulekbache *et al.* (2010) em amostras submetidas a ensaios de flexão indicam que uma boa trabalhabilidade da mistura pode gerar orientação da fibra na direção das tensões de tração, conseqüentemente, resultando em propriedades superiores quando comparadas a misturas com baixa trabalhabilidade.

González *et al.* (2018) analisou a influência da orientação da fibra no comportamento mecânico do compósito através de ensaios de tração residual e tomográfica computadorizada. Em suma, seus resultados mostraram-se superiores quando referente as amostras cujas fibras estavam em posição favorável ao ensaio, apresentando melhoras no processo de endurecimento das tensões e energia de fratura, de modo que, quanto maior o fator de orientação do elemento, melhor foi seu desempenho.

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 (o processo pode ser visualizado na Figura 19). Ainda, o processo de alinhamento das fibras leva a acréscimos no número de fibras, distribuição e ângulo transversal uniforme na seção transversal.

Figura 19. Orientação fibras nas fissuras da matriz.



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

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 de tração uniaxial. Seus resultados mostram que independentemente do tipo de ensaio, espécimes verticais prismáticos e cilíndricos 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.

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 teores de fibras.

Uma das técnicas utilizada para verificar esses efeitos relatados por Zerbino *et al.* (2012), é a tomografia computadorizada, que Gonzáles *et al.* (2018) define como uma técnica não destrutiva que analisa a microestrutura interna de materiais com base nas propriedades dos raios-X, onde estes através de processos de varredura são registrados com diferentes direções e intensidade em todos os pontos da amostra. De acordo com o autor, sua enorme vantagem está em medir de forma exata a posição e orientação do reforço fibroso.

Outro estudo realizado por Zhang *et al.* (2019), realiza a magnetização da barra de aço, para induzir o alinhamento das fibras, que resulta em um aumento de 51% na resistência da união com o concreto, quando se é comparado a orientações randomizadas da fibra. Ao realizar a técnica, a quantidade de fibras de aço alinhadas no entorno da barra aumenta e o efeito de transferência de tensões é maximizado.

Gonzáles *et al.* (2018) define a tomografia computadorizada como técnica não destrutiva que analisa a microestrutura interna de materiais com base nas propriedades dos raios-X, onde estes através de processos de varredura são registrados com diferentes direções e intensidade em todos os pontos da amostra. De acordo com o autor, sua enorme vantagem está em medir de forma exata a posição e orientação do reforço fibroso.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Nesta seção da pesquisa são apresentadas as características dos materiais empregados para a produção do concreto autoadensável, tais como, materiais cimentícios (cimento Portland, cinza volante e sílica da casca de arroz), agregados (miúdos e graúdos), fíler (sílica 325), aditivos químicos (agente modificador de viscosidade e superplastificante), fibras metálicas, barras de aço e água.

3.1.1 Materiais cimentícios

Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CP-V ARI RS (Figura 20), da marca Votoran. A massa específica foi realizada de acordo com a norma NM 23:2001, através do método do frasco de *Le chatelier* e o valor obtido foi de 2,98 g/cm³.

Figura 20. Cimento Portland V ARI RS.



Fonte: Elaboração Própria.

Cinza Volante

A cinza volante (Figura 21) é proveniente da termoelétrica Presidente Médici, e tem massa específica de $1,98 \text{ g/cm}^3$, que foi determinada pelo frasco de *Le Chatelier* (NM 23:2001).

Figura 21. Cinza volante utilizada na moldagem.

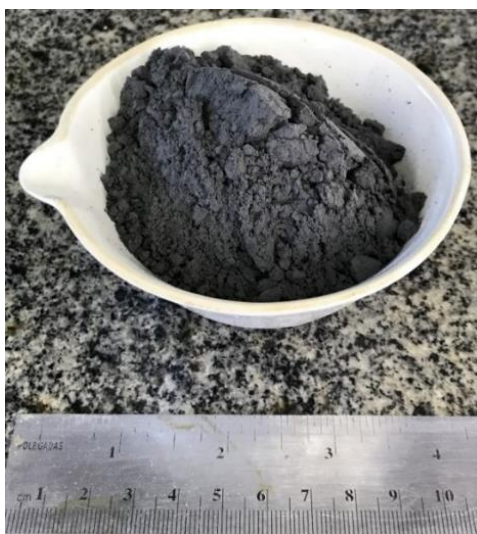


Fonte: Elaboração Própria.

Sílica da Casca de Arroz

Foi utilizado a sílica da casca de arroz Silcca Nobre SBI, da empresa SVA (Sílica Verde do Arroz LTDA) mostrada na Figura 22, que é obtida através da queima da casca de arroz com temperatura controlada em leito fluidizado, resultando em um material pozzolânico amorfo.

Figura 22. Sílica da casca de arroz – Silcca Nobre SBI.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 2 consta a composição química da sílica da casca de arroz, realizada por difração de raios X. Optou-se em usar a definição de Sílica da Casca do Arroz (SCA) devido ao seu alto teor de sílica (91,48%), sendo esta predominantemente amorfa.

Tabela 2. Componentes e teores equivalentes da composição da sílica da casca de arroz - Silcca Nobre SBI.

Componente	Teor
Perda ao Fogo	3,50%
Dióxido de Silício - SiO₂	91,48%
Óxido de Cálcio - CaO	0,36%
Óxido de Magnésio - MgO	0,32%
Óxido de Ferro - Fe₂O₃	0,05%
Óxido de Alumínio - Al₂O₃	0,00%
Óxido de Sódio - Na₂O	0,04%
Óxido de Potássio - K₂O	1,40%
Óxido de Manganês - MnO	0,32%
Anidrido Sulfúrico - SO₃	0,15%
Pentóxido de Difósforo - P₂O	0,45%
Área Específica	21142m ² /kg

Fonte: Elaboração Própria.

3.1.2 Agregados

Agregado Miúdo

O agregado miúdo (Figura 23) foi adquirido na empresa Pedra Rosada em Alegrete-RS, e é proveniente da cidade de Santana do Livramento-RS. Para sua caracterização foi realizado o ensaio de granulometria (NM 248:2001), e a sua curva granulométrica pode ser vista na Figura 23.

Figura 23. Agregado miúdo.



Fonte: Elaboração Própria.

O diâmetro máximo do agregado obtido foi de 1,18 mm e módulo de finura igual a 2,00. Como também foi realizado o ensaio de massa específica, de acordo com NBR 9776:1987 e obteve-se o valor de 2,64g/cm³.

Agregado Graúdo

O agregado graúdo que foi utilizado é comercializado como brita 0 pela empresa Supermix de Santa Maria-RS. Esse agregado (Figura 24) foi escolhido pelo seu fator de forma (alongado), importante para obtenção das propriedades reológicas adequadas a um concreto autoadensável, segundo Marangon 2011.

Figura 24. Agregado graúdo.



Fonte: Elaboração Própria.

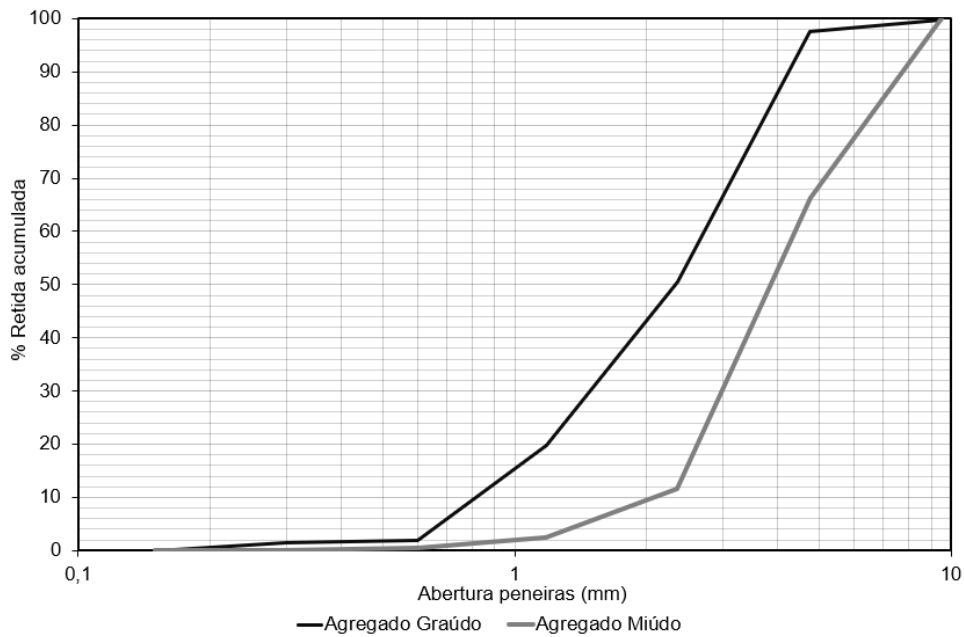
Os dados da caracterização granulométrica do agregado graúdo, juntamente com outras características físicas do agregado graúdo estão presentes na Tabela 3 e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 25.

Tabela 3. Características físicas do agregado graúdo.

Característica	Resultado
Diâmetro máximo (mm)	9,5
Módulo de finura	5,79
Massa específica (g/cm³)	2,7
Massa específica aparente (g/cm³)	2,54
Absorção de água (%)	3,94
Massa unitária (g/cm³)	1,33
Teor de material pulverulento (%)	0,04

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 25. Curva granulométrica do agregado graúdo e miúdo.

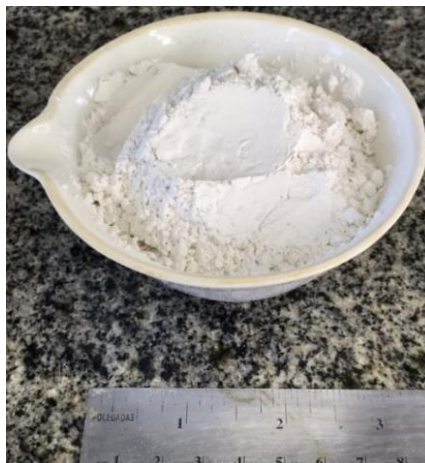


Fonte: Elaboração Própria.

3.1.3 Sílica #325

O filer comercializado como sílica #325 (Figura 26) é um material proveniente da moagem de quartzo, e tem a função o preenchimento de vãos, o qual propociona uma melhor fluidez a mistura. A sílica 325 utilizada foi adquirida com a empresa de Mineração Jundu. Foi realizado o ensaio de massa específica pelo método do frasco de *Le chatelier*, normatizado pela NM 23:2001, e obtida a massa específica de 2,68 g/cm³.

Figura 26. Sílica #325.



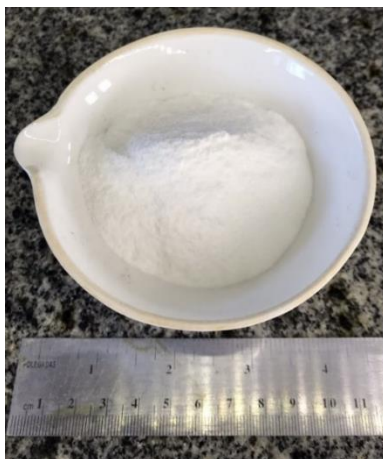
Fonte: Elaboração Própria.

3.1.4 Aditivos Químicos

Agente Modificador de Viscosidade

Foi utilizado como agente modificador de viscosidade (VMA) o Rheomac UW 410, fabricado pela empresa BASF. Com base química de polímeros de celulose com alta massa molecular, e cor branca e em pó (Figura 27). Sua aplicação foi realizada depois de adicionado todos os constituintes da mistura fornecendo a devida coesão à mistura, e com o intuito de evitar a segregação e exsudação.

Figura 27. Agente modificador de viscosidade - Rheomac UW 410.



Fonte: Elaboração Própria.

Superplastificante

O superplastificante (SP) utilizado é de base química de Poliacrilato, e foi fornecido pela empresa RITT, localizada na cidade de Alegrete. O SP possui o teor de sólidos de 22,71%.

3.1.5 Fibras de aço

As fibras de aço que foram utilizadas é a Dramix 3D 65/35 BG (Figura 28), comercializada e fabricada pela empresa ArcelorMittal. Esta fibra tem diâmetro nominal de 0,55 mm, comprimento de 35 mm e fator de forma (l/d) igual a 65.

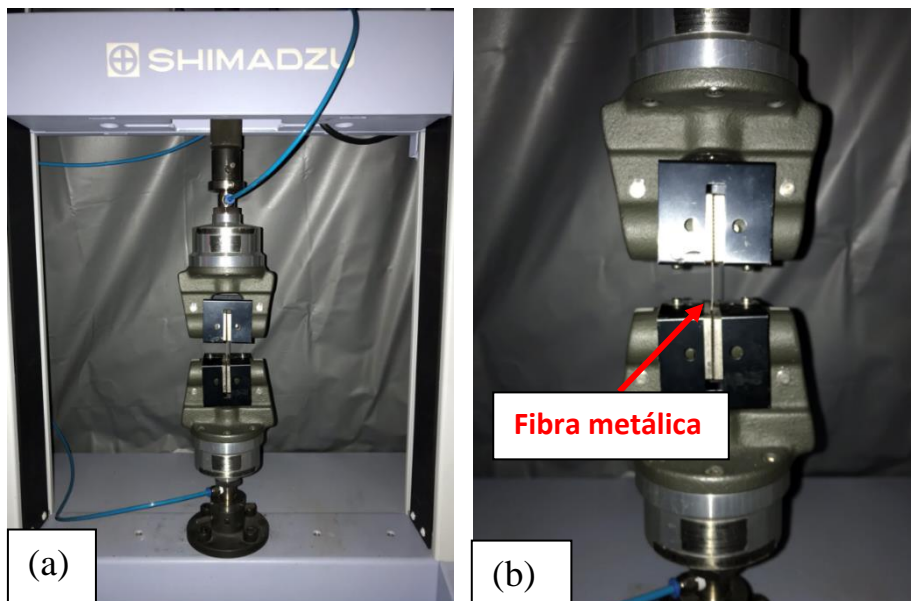
Figura 28. Fibra de aço - DRAMIX 65/35.



Fonte: Elaboração Própria.

A resistência à tração fornecida pela fabricante da fibra é de 1345 MPa. Afim de verificar essa propriedade foi realizado o ensaio de tração direta na fibra, por meio da máquina de ensaios universais Shimadzu ACX-5kN, com garras pneumáticas, conforme pode ser visto na Figura 29. A resistência à tração média obtida experimentalmente foi de 1336,15 MPa, com coeficiente de variação de 1,39%.

Figura 29. Ensaio de tração da fibra metálica: (a) Visão geral do sistema e (b) ampliação para visualizar a fibra metálica



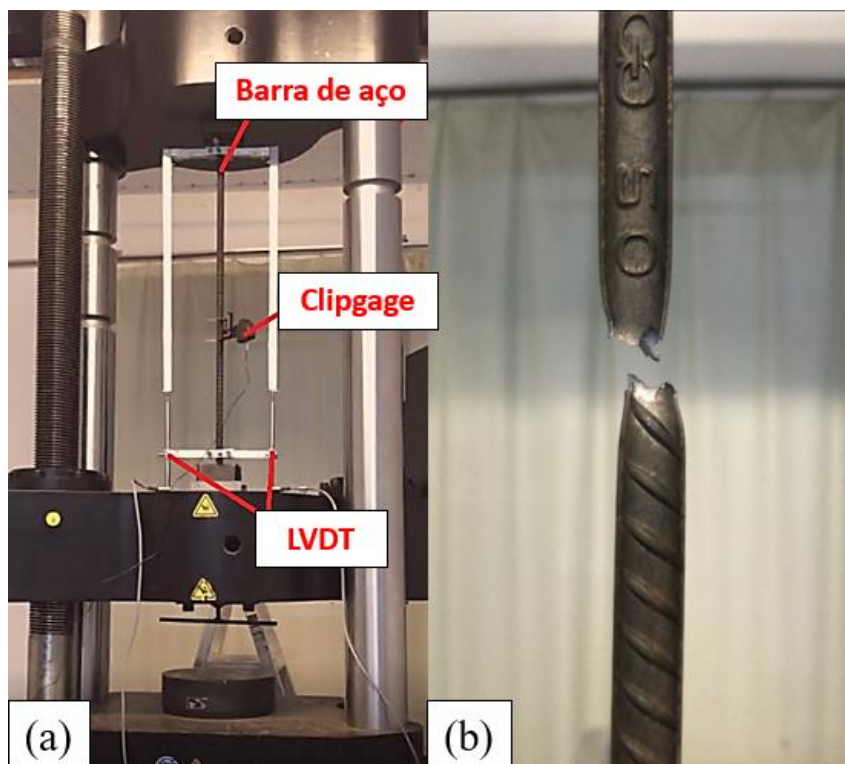
Fonte: Elaboração Própria.

3.1.6 Barra de aço

As barras de aço utilizadas no trabalho são da marca Gerdau e foram doadas pela empresa Iccila, localizada em Santana do Livramento – RS. As barras possuem diâmetros nominais de 20 mm e 25 mm, nervuras do tipo CA-50, com tensão característica de escoamento de 500 MPa.

A caracterização mecânica das barras foi realizada na máquina de ensaios universais da marca Instron com capacidade de carga de 1500 kN, conforme esquema mostrado na Figura 30 (a). Para verificar o módulo de elasticidade foi utilizado o clip-gage da marca Instron até o início do escoamento da barra (o clip-gage foi retirado nesse momento para que não sofresse nenhum dano). Para obter a curva total foi utilizado um sistema desenvolvido com barras de alumínio e LVDT's de 100 mm acoplados. Os LVDT's foram ligados no condicionador de sinais Spider, obtendo-se assim, a deformação desde o início do ensaio até o final pela média dos dois LVDT's. Na Figura 30 (b) é possível ver a ruptura típica das barras de aço ensaiadas.

Figura 30. Ensaio de tração na barra de aço: (a) Visão geral do sistema e (b) detalhe da ruptura da barra de aço.



Fonte: Elaboração Própria.

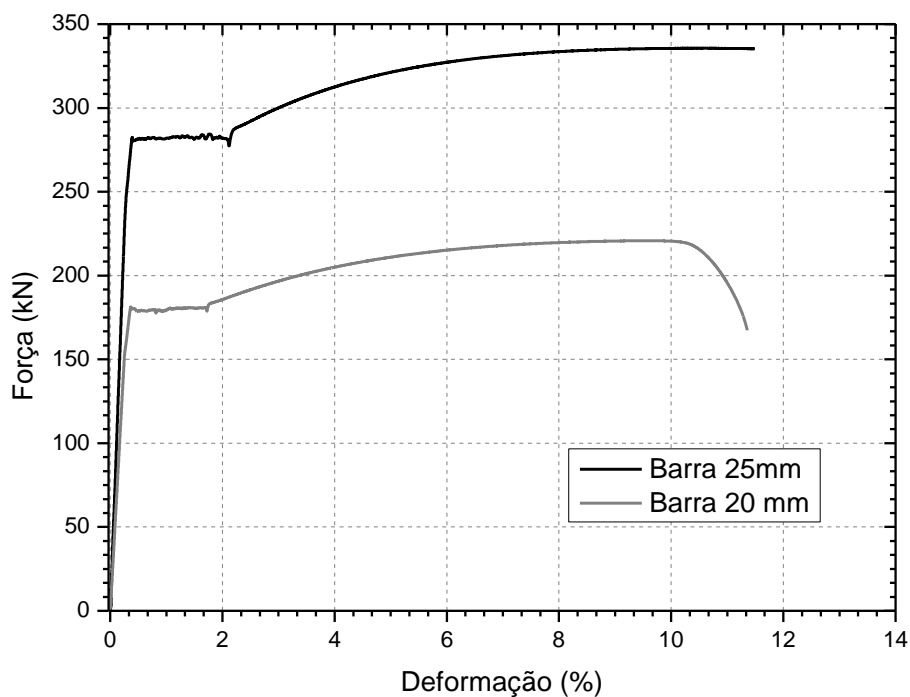
Na Tabela 4 são apresentados os dados médios da força, tensão e deformação de escoamento, o módulo de elasticidade e força, tensão e deformação máximas do ensaio de tração das barras de 20 mm e 25 mm. A curva média força x deformação presentes é mostrada na Figura 31. O gráfico será apresentado como força x deformação pois os dados dos tirantes (aço envolvido por concreto) também serão apresentados desta maneira, facilitando a comparação dos dados.

Tabela 4. Força, deslocamento e tensão de escoamento e máximas, e módulo de elasticidade das barras de aço de 20 mm e 25 mm.

BARRA	FORÇA ESCOAMENTO (kN)	DEFORMAÇÃO ESCOAMENTO (%)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	FORÇA MÁXIMA (kN)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (%)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)
20 mm	182,40	0,376%	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	0,355%	579,55	335,62	13,27%	683,71
CV (%)	0,60%	4,43%	0,97%	0,87%	8,31%	1,66%

Fonte: Elaboração Própria.

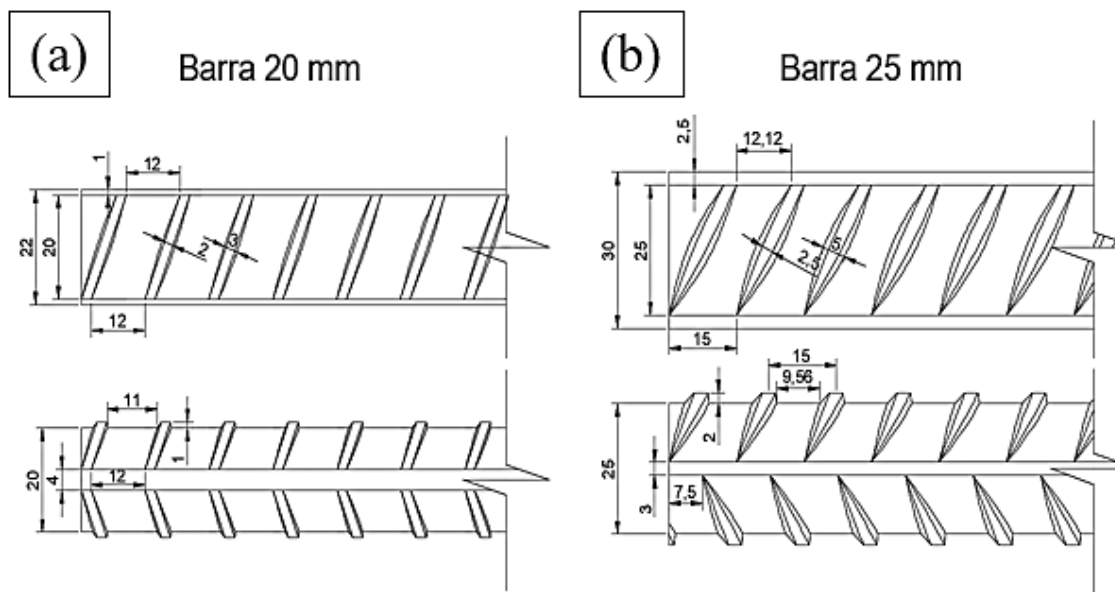
Figura 31. Curva média de força x deformação das barras de 20 mm e 25 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Também foi medido as nervuras de cada barra e a sua configuração geométrica, que tem tamanho e distribuição diferentes. A barra de 25 mm apresenta nervuras intercaladas enquanto as barras de 20 mm têm distribuição simétrica de replicação, como pode ser observado na Figura 32, que contém além da distribuição das nervuras, as dimensões geométricas das barras.

Figura 32. Características geométricas das nervuras da barra de 20 mm (a) e 25 mm (b).



Fonte: Elaboração Própria

Para a moldagem, as barras foram posicionadas com as nervuras paralelas ao topo de fôrma e fundos de fôrma, na moldagem horizontal, e para a moldagem vertical foram escolhidas as duas faces opostas para posicionamento da nervura.

3.1.7 Água

A água utilizada na produção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Alegrete no Rio Grande do Sul.

3.2 COMPOSIÇÃO E MÉTODOS DE ENSAIO

Nesta pesquisa a composição do concreto utilizada foi baseada no concreto desenvolvido por Marangon (2011). Adaptações foram necessárias, dado que os materiais possuem características específicas.

A primeira adaptação foi em relação ao agregado miúdo, pois o autor utilizou duas composições granulométricas diferentes, e devido a composição da areia utilizada nesse trabalho ser mais fina, e para se aproximar da composição original, foi usado apenas uma areia. Outras duas alterações foram em relação aos agentes químicos, com a modificação da quantidade de VMA e da quantidade do superplastificante (determinadas experimentalmente com uma mistura de teste), para que fosse obtido um espalhamento do concreto de 600 ± 50 mm, sem nenhum grau de segregação aparente. A quarta modificação foi a troca da sílica ativa pela sílica da casca de arroz. Na Tabela 5 pode ser observado a composição das misturas produzidas, sendo C1 a mistura sem fibras e a C2 a mistura com fibras de aço.

Tabela 5. Composição dos concretos utilizados: C1 sem fibras e C2 com fibras.

Composição	C1	C2
Agregado graúdo (kg/m³)	539,6	454
Agregado miúdo (kg/m³)	930,06	930,06
Cimento (kg/m³)	360	360
Cinza volante (kg/m³)	168	168
Sílica #325 (kg/m³)	70	70
Sílica da casca de arroz (kg/m³)	45	45
Superplastificante (kg/m³)	8	13,46
Água (kg/m³)	160	150
Fibra de aço (kg/m³)	0	117
Modificador de viscosidade (g/m³)	36	12,17
Relação A/C	0,32	0,32

Fonte: Adaptado de Marangon (2011).

3.2.1 Ensaios Reológicos

Cone de Abrams

O método de ensaio utilizando o cone de Abrams para ensaios em concreto autoadensável é normatizado pela NBR 15823-2:2017, que prescreve a determinação da fluidez, em fluxo livre, sob a ação do próprio peso do CAA e o tempo de escoamento para que a mistura alcance o espalhamento igual a 500 mm.

O valor de espalhamento é obtido através da média de duas medições perpendiculares do diâmetro de espalhamento, após a retirada vertical do cone de Abrams (Figura 33) totalmente preenchido do CAA, sem nenhum adensamento. Como resultados do ensaio é possível identificar a classe de espalhamento, a viscosidade plástica aparente e o índice de estabilidade visual.

Figura 33. Cone de Abrams utilizado para verificação do espalhamento.



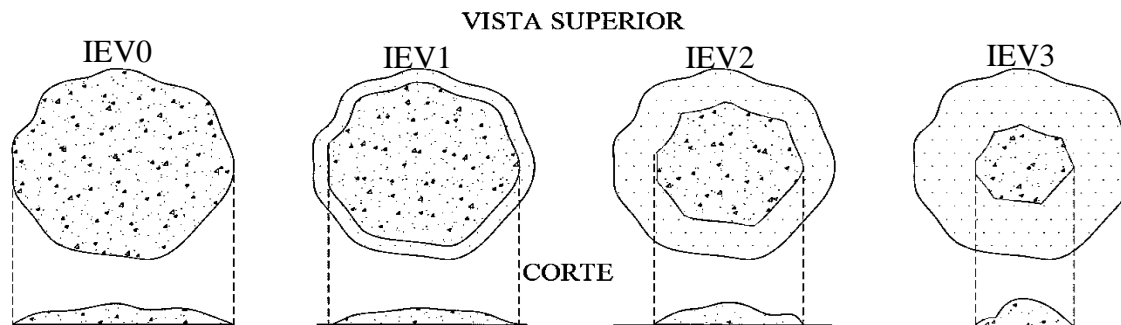
Fonte: Elaboração Própria

Nesta pesquisa foi almejado que a mistura obtivesse espalhamento semelhante ao alcançado por (MARANGON, 2011), de aproximadamente 600 mm, com classe SF1 (550 a 650 mm), e com t_{50} maior que 2 segundos, com viscosidade plástica aparente classificada como VS2, a qual possui melhor resistência a segregação.

O índice de estabilidade é classificado por meio visual, evidenciando a possível segregação e exsudação da mistura, garantindo assim a classe de homogeneidade pela distribuição no espalhamento dos agregados, como pode ser verificado na Figura 34.

Com classificação iniciando em IEV0 para concreto com homogeneidade e sem segregação, até IEV3 para misturas com concentração de agregados graúdos no centro do espalhamento, e dispersão da argamassa nas extremidades.

Figura 34. Índice de estabilidade visual da mistura pelo espalhamento em fluxo livre.



Fonte: Elaboração Própria.

Funil “V”

A viscosidade da mistura foi analisada pelo método do funil “V”, normatizada pela NBR 15823-5:2010. É realizado o preenchimento total do funil (Figura 35) e em seguida aberta a comporta inferior, iniciando o fluxo sob ação da gravidade. Mede-se o tempo de escoamento desde a abertura da comporta até que o concreto escoe totalmente.

Figura 35. Funil "V" utilizado no ensaio de reologia.



Fonte: Elaboração Própria

O tempo que a mistura leva para escoar totalmente, pela comporta, caracteriza a viscosidade do material, que caso leve um curto período de tempo, tem-se como resultado uma maior viscosidade, e para maiores períodos uma menor viscosidade. É possível, ainda, que ocorra o entupimento do trecho de saída pela mistura e neste caso caracteriza dificuldades no lançamento e no adensamento do CAA.

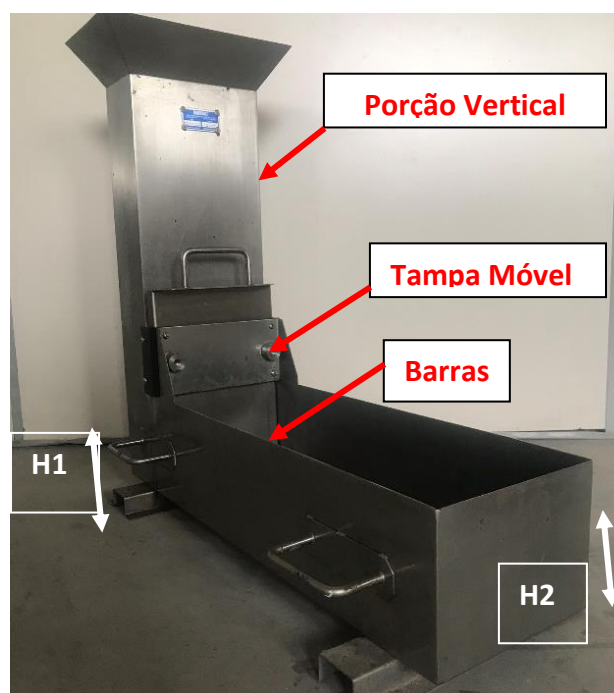
Caixa “L”

A habilidade passante da mistura é medida através do ensaio de Caixa L, normatizado pela NBR 15823-4:2017. O ensaio simula a capacidade que a mistura possui, no estado fresco, de fluir através de armaduras.

Neste ensaio é adicionado o CAA, na porção vertical da fôrma, onde é retirada a tampa móvel, possibilitando o escoamento nas configurações aplicada nas barras (Figura 36).

Como resultado é obtida a razão entre a altura na porção horizontal (H2) da forma e da vertical (H1), e o tempo resultante do escoamento. Essa razão é proporcional a facilidade de escoamento, quanto maior $H2/H1$, maior capacidade de fluxo há. O ensaio foi realizado com uma grade de 3 barras de aço como obstáculo e sem barras de aço.

Figura 36. Esquema utilizado no ensaio de Caixa "L".



Fonte: Elaboração Própria.

Anel “J”

Conforme a NBR 15823-3:2010, o anel “J” é um método que determina a habilidade passante do CAA, que consiste na realização do ensaio de tronco de cone de Abrams com aplicação do anel “J” (Figura 37), medindo-se assim duas medidas perpendiculares do diâmetro de espalhamento. Essa medida, deve-se aproximar ao espalhamento sem o anel “J”, indicando que em moldagens com armaduras, o concreto não terá dificuldade fluir e de preencher todos os vazios da fôrma.

Figura 37. Cone de Abrams com o anel “J”.



Fonte: Elaboração Própria.

3.2.2 Ensaio Mecânicos

Para a realização dos ensaios mecânicos da pesquisa, foram necessários realizar ensaios preliminares para ajustar os sistemas usados para aquisições dos dados, bem como definir como os mesmos seriam obtidos. Para isso foi definido um ensaio piloto, e a partir desses foram realizados os demais ensaios.

Ensaio Piloto

Os ensaios pilotos tiveram o intuito de realizar os testes para validar toda a esquematização, trazer as falhas que poderiam ocorrer no desenvolvimento dos ensaios, e conseguir produzir os aparatos que são necessários para realização dos testes.

A produção do aparato para a medição da deformação linear das barras de aço através dos LVDT's apresentou várias falhas até a produção de um sistema de fixação confiável. Durante os ensaios pilotos foi verificado que quando tracionado a barra após patamar de escoamento, o diâmetro da mesma diminuía e o sistema acoplado ao início de ensaio ficava folgado e se movimentava. Para restringir o movimento do aparato, foi então colocado um sistema de molas que ajustava a fixação do aparato durante todo o ensaio, como pode ser verificado na Figura 38.

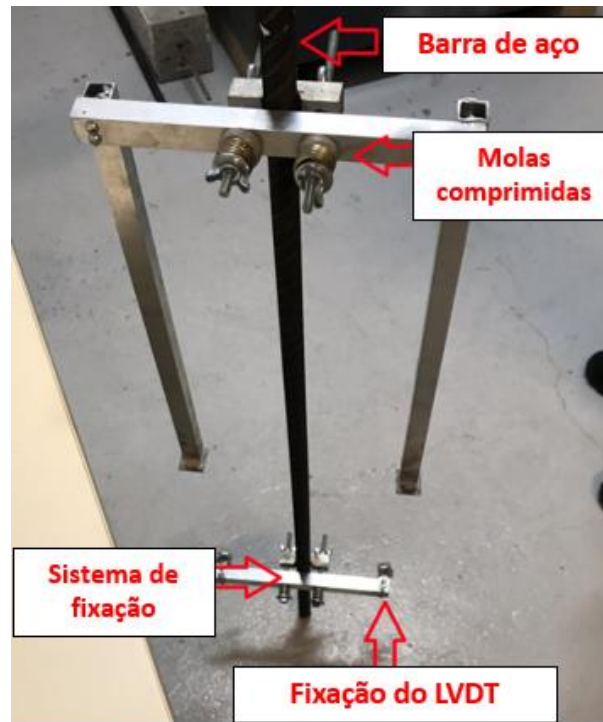
Figura 38. Molas de pressão usadas para garantir a fixação do aparato usado nas leituras dos LVDT's na barra de aço.



Fonte: Elaboração Própria.

Com a validação do sistema foi realizado a montagem e verificação da fixação do sistema, como pode ser visualizado na Figura 39.

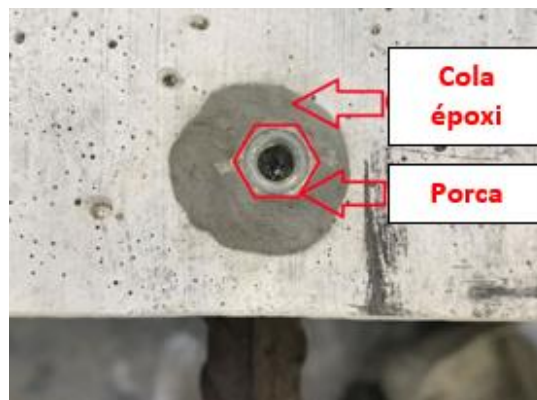
Figura 39. Aparato de fixação dos LVDT's para mediação da deformação do aço.



Fonte: Elaboração Própria.

A fixação dos LVDT's da Instron foi realizada por meio da colagem de porcas com cola epóxi (Figura 40) no tirante, para medir as deformações do concreto. Inicialmente foi feita uma tentativa por meio de furos e colocação de buchas de parafusos, o que ocasionou um ponto de falha na amostra.

Figura 40. Cola epóxi e porca utilizada para fixação dos LVDT's da Instron para medição da deformação do concreto



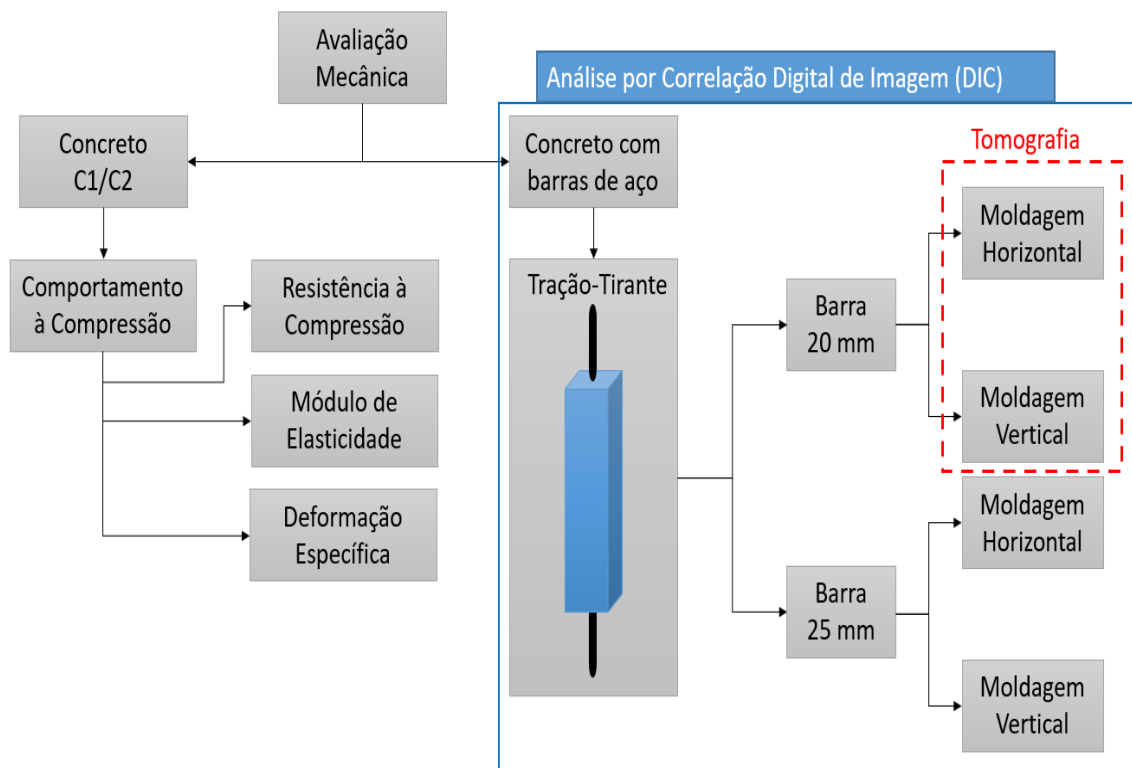
Fonte: Elaboração Própria.

A última modificação realizada através do ensaio piloto foi a pintura de todas as faces do tirante, devido à dificuldade de visualização do processo de fissuração nas faces que não estão sendo filmadas. Assim, foi aplicada tinta branca em todas as faces, possibilitando uma melhor interpretação da formação e caminho das fissuras.

Execução dos ensaios

O fluxo de ensaios mecânicos desenvolvido nesta pesquisa está mostrado de forma resumida na Figura 41.

Figura 41. Organograma da pesquisa.



Fonte: Elaboração Própria.

Na realização dos ensaios para o concreto no estado endurecido, como apresentado no organograma, foram divididos em ensaios para a matriz sem e com barra de aço, com a função de ter a caracterização do comportamento mecânico das misturas C1 e C2.

A seguir são mostrados os termos utilizados para identificar cada uma das diferenças entre as amostras. O primeiro termo refere-se à composição do concreto. O segundo termo refere-se as posições de moldagem das amostras, na vertical (V) e na

horizontal (H). O último termo é relacionado ao diâmetro da barra utilizado, sendo de 20 mm (que corresponde a taxa de armadura de $\rho:1,40\%$) e de 25 mm (que corresponde a uma taxa de armadura de $\rho:2,18\%$):

- C1: mistura sem fibra;
- C1.V.20: mistura sem fibras, moldada na vertical com 1- ϕ 20 mm;
- C1.H.20: mistura sem fibras, moldada na horizontal com 1- ϕ 20 mm;
- C1.V.25: mistura sem fibras, moldada na vertical com 1- ϕ 25 mm;
- C1.H.25: mistura sem fibras, moldada na horizontal com 1- ϕ 25 mm;
- C2: mistura reforçada com fibras
- C2.V.20: mistura com fibras moldada na vertical com 1- ϕ 20 mm;
- C2.H.20: mistura com fibras moldada na horizontal com 1- ϕ 20 mm;
- C2.V.25: mistura com fibras moldada na vertical com 1- ϕ 25 mm;
- C2.H.25: mistura com fibras moldada na horizontal com 1- ϕ 25 mm

A quantidade de amostras dos grupos ensaiados, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Quantidade de corpos-de-prova ensaiados por configuração.

Nomenclatura	Geometria	
	Cilíndrico	Prisma Uniforme
C1	4	-
C1.20.V	-	4
C1.20.H	-	4
C1.25.V	-	4
C1.25.H	-	4
C2	4	-
C2.20.V	-	4
C2.20.H	-	4
C2.25.V	-	4
C2.25.H	-	4
Total	8	32

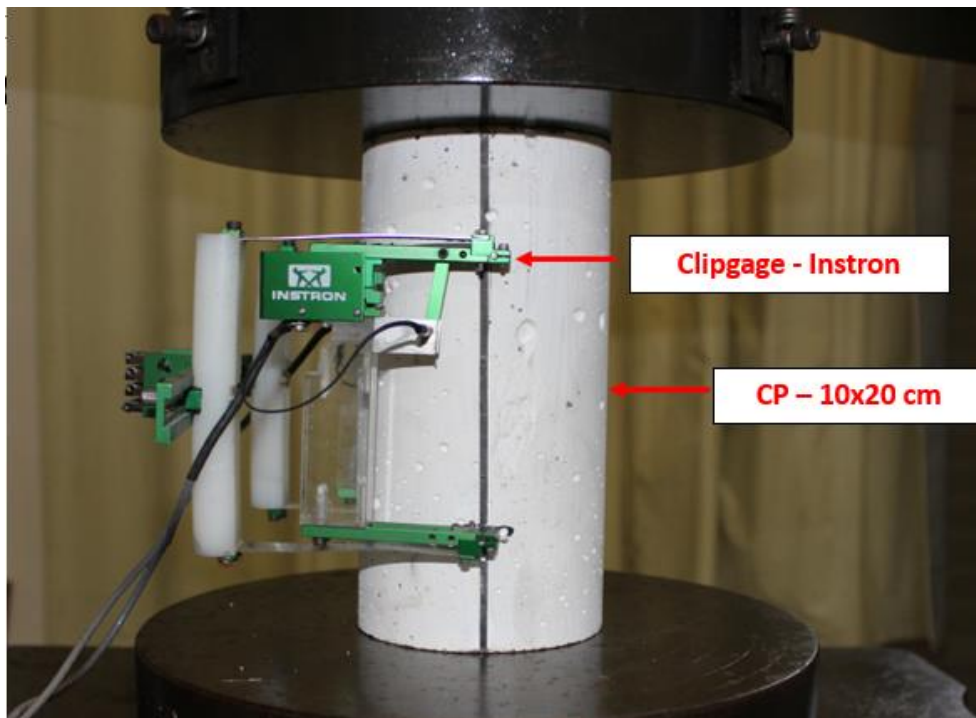
Fonte: Elaboração Própria.

Comportamento à Compressão

O ensaio para avaliar o comportamento à compressão foi realizado na máquina de ensaios universais Instron, com capacidade de 1500 kN, com corpos-de-prova cilíndricos (100x200 mm), ensaiados com velocidade de deslocamento do travessão da máquina de 0,05 mm/min, instrumentado com extensômetro do tipo clip gage, da marca Instron (conforme visto na Figura 42).

Os corpos-de-prova foram ensaiados na idade de 28 dias, sendo que até as datas de ensaio, eles permaneceram em câmara úmida com umidade relativa do ar em 90% (+/- 5%) e temperatura de 20°C (+/- 5° C). Antes dos ensaios as amostras foram retificadas a fim de garantir a regularidade das superfícies de contato com os pratos metálicos da máquina.

Figura 42. Configuração dos ensaios para determinação do comportamento à compressão.



Fonte: Elaboração Própria.

Tração direta nos tirantes

A análise para o mecanismo de transferência de esforços da barra de aço para o concreto, foi realizada pelo ensaio de tração direta no tirante, que consiste em um tirante de 150x150x750 mm com um vergalhão de 20 mm e 25 mm de diâmetro cuidadosamente posicionadas no centro da seção transversal (150x150 mm), com comprimento de 1150 mm.

As fôrmas para moldagem dos tirantes, com as duas configurações de moldagem, são mostradas na Figura 43.

Figura 43. Instrumentação interna e procedimento de moldagem



Fonte: Elaboração Própria.

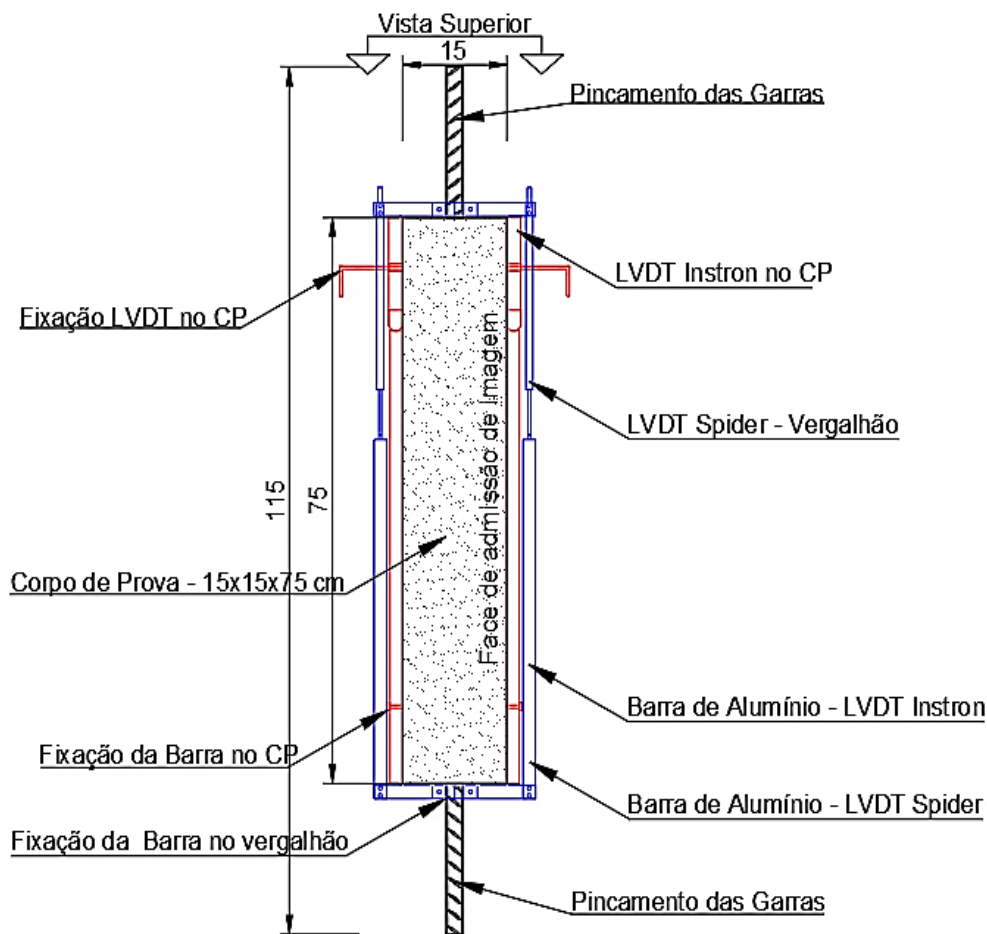
A configuração e as dimensões do tirante, podem ser vistos na Figura 44, bem como a instrumentação externa, que consiste em:

- 1 Strain gage (instrumentação interna) uniaxial de 120 ohms com grade 5 mm colado no centro da barra de aço antes da concretagem.
- 2 LVDT's de 100 mm, para determinação da deformação da barra de aço, com comprimento inicial de leitura de 750 mm, a conectados a um condicionador de sinais Spider;

- 2 LVDT's Instron de 50 mm, fixados nas porcas coladas no concreto para determinação da sua deformação;
- 1 Câmera Canon, configurada para captura 720p e 30fps, para captura da face frontal do tirante;
- 1 Câmera Sony, configurada para captura 2160p e 30fps, para captura da face posterior do tirante.

Para a realização deste ensaio foi necessária a aplicação de dois tipos de câmera, pois a profundidade de campo, para a captura das imagens, nas duas faces é diferente. Na face frontal não há limitação de captura, porém na face posterior há uma distância reduzida entre a máquina de ensaio e a parede do laboratório, o que impossibilitou a utilização de outra câmera do tipo Canon pela necessidade de uma profundidade de campo maior do que a existente.

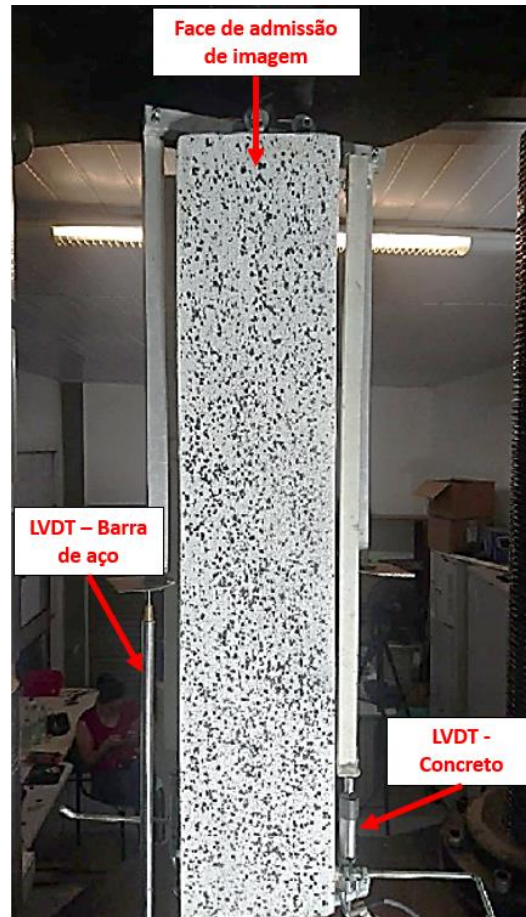
Figura 44. Representação do ensaio de tração do tirante.



Fonte: Elaboração Própria.

O esquema idealizado de ensaio na Figura 44, resultou no procedimento real executado da Figura 45.

Figura 45. Ensaio de tração no tirante.



Fonte: Elaboração Própria.

Através dos resultados de ensaios da máquina Instron, dos dados do sistema de condicionador de sinais Spider, em conjunto com as capturas de vídeo das duas faces do tirante, foi possível analisar por correlação digital de imagem, o comportamento de fissuração da amostra. Todo o sistema de ensaios é mostrado na Figura 46.

Figura 46. Procedimento de ensaio para ensaio de tração de tirante.



Fonte: Elaboração Própria.

A velocidade do travessão da máquina para o ensaio nos tirantes foi realizada em dois estágios: a primeira de 0,3 mm/min, para identificação do comportamento da amostra no processo de fissuração; e a segunda de 1 mm/min quando entrado no patamar de escoamento da barra de aço. Essas velocidades foram definidas com base nos trabalhos de Deluce, Lee, Vecchio (2012) e Lárusson, Fischer, Jönsson (2012).

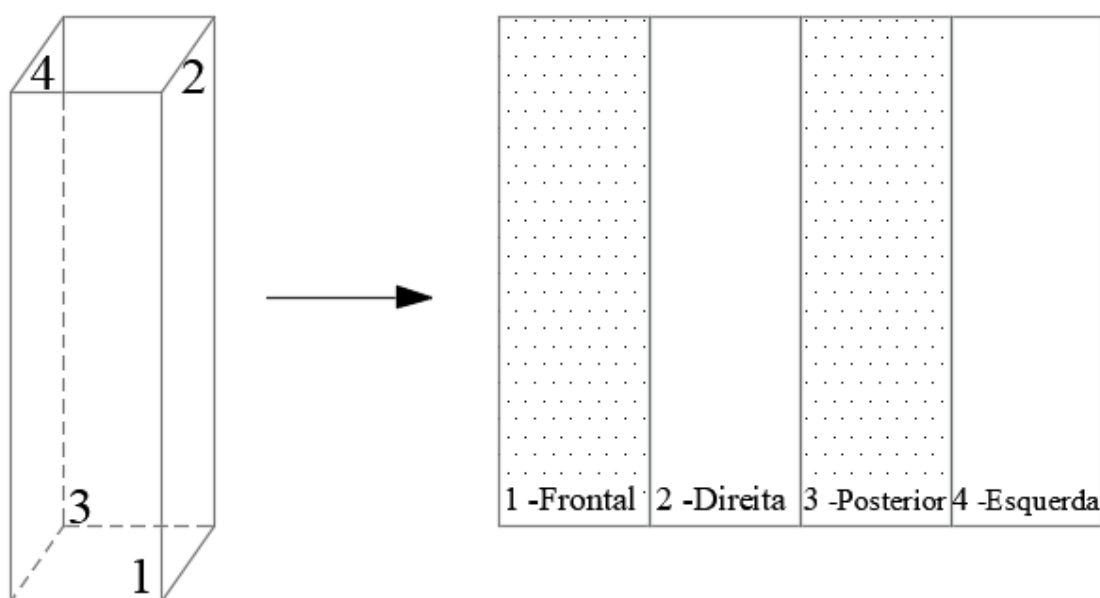
A NBR 6118:2014, no item 17.3.3 – Estado limite de fissuração, define a área de envolvimento, construída por um retângulo cujos os lados não devem ter a distância maior

que $7,5\Phi$ do eixo da barra, como a área de envolvimento para o grupo de elementos das armaduras passivas, denominado Acr.

Portanto a região de envolvimento do concreto para as barras nesta pesquisa, seria de 900 cm^2 e $1406,32 \text{ cm}^2$, para a barra de 20 mm e 25 mm respectivamente. Nesta pesquisa a área aplicada para ambas as barras foi de 225 cm^2 , relação de área aplicada de 25%, para a barra de 20 mm, e 16% para a barra de 25 mm.

Após os ensaios foram montados mapas de fissuras, pela captura de todas as faces do tirante, para análise do modo de fratura, iniciando pela face frontal, depois pela face direita, face posterior e pôr fim a face esquerda, como mostrado nas Figura 47.

Figura 47. Identificação das faces para o mapa de fissuras.



Fonte: Elaboração Própria

3.2.3 Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada foi realizada em dois tirantes do grupo C2, para verificar a dispersão das fibras e a porosidade referente ao sentido de lançamento do concreto.

A tomografia foi realizada na Santa Casa de Misericórdia de São Gabriel – RS, em um tomógrafo Siemens SOMATOM Scope (Figura 48), operado pela interface syngo CT VC-30 easyIQ.

Figura 48. Equipamento Siemens SOMATOM Scope.



Fonte: Elaboração Própria.

Para que fosse possível realizar a captura da imagem 3D do tirante com peso específico tão alto, quando comparado com o material padrão para o qual a máquina foi desenvolvida para realizar, foi necessário fazer a verificação de que filtro poderia prover a captura com o devido contraste e resolução do material compósito.

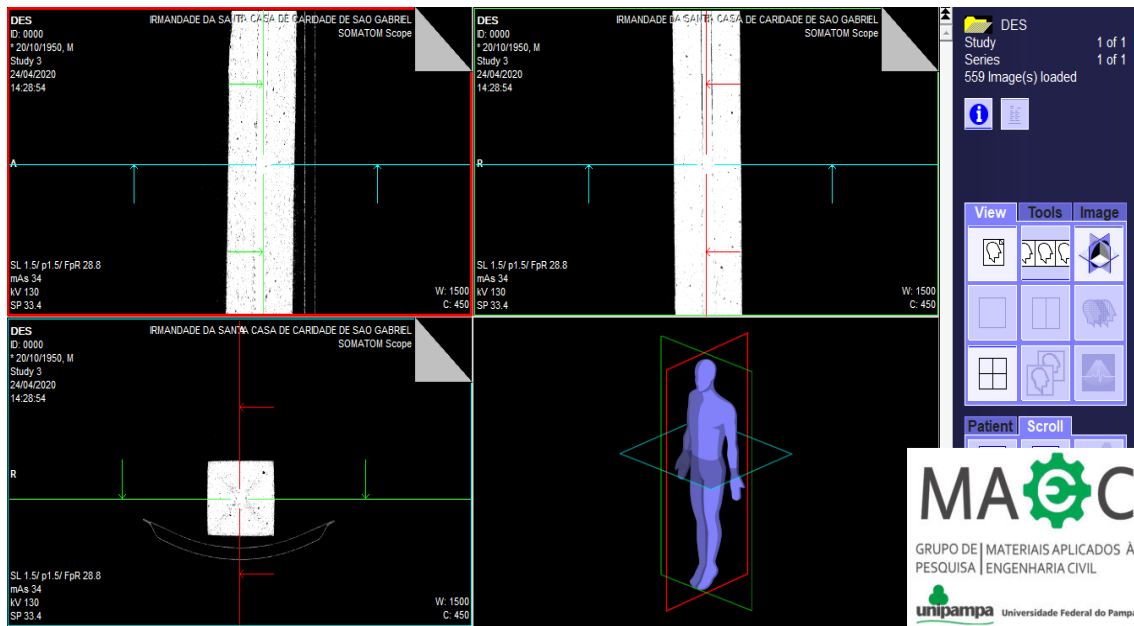
Segundo Scheibel *et al.* para ossos humanos femorais a densidade média óssea é $1,127 \text{ g/cm}^3$ e ossos da região cervical de $0,768 \text{ g/cm}^3$, e as amostra tem peso específico de $7,96 \text{ g/cm}^3$ para o aço, e para o concreto de cerca de $2,4 \text{ g/cm}^3$.

Uma adaptação de filtro foi realizada para definir o intervalo de captura na escala de Hounsfield (escala quantitativa que descreve a radiodensidade), que possibilitasse a inspeção dos vazios presentes na matriz do tirante, e a dispersão das fibras.

Posteriormente a captura das imagens, foram realizados processos de melhoria do conjunto de varredura, com filtros de cores associados a densidade do material, para que ficasse possível a identificação de cada fase dos materiais através do software syngo fastView.

A tomografia computadorizada, está dividida em três planos de visualização x-y-z, que são representados nos três cortes existentes na estrutura física humana (Figura 49) apenas como elemento de referência.

Figura 49. Imagens da tomografia computadorizada realizada no espécime do grupo C2.H.20 e C2.V.20.



Fonte: Elaboração Própria.

É necessário a aplicação de filtro na seção transversal da amostra para coloração dos constituintes da varredura. Desta forma, primeiramente foi analisado a quantidade vazios presente na seção transversal, com varredura no plano “x”, para essa inspeção, foi aplicado um filtro BWPArabolic08.

A comparação das seções transversais com os grupos foi realizada com as mesmas configurações de admissão e filtros, utilizando o corte no centro do tirante, e mesmo sistema de varredura.

Para análise das fibras metálicas, foram utilizados os filtros HotMetal08, e WarmMetal16, que possibilita a exclusão da matriz, e visualização apenas de materiais metálicos, como a barra de aço e as fibras.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios reológicos das matrizes autoadensáveis com e sem fibra de aço. Os ensaios reológicos realizados foram: espalhamento para determinar a fluidez, segregação e exsudação utilizando o troco de cone de Abrams; funil “V” para analisar a viscosidade aparente e pôr fim a caixa “L” e o anel “J” para determinar a habilidade passante. Ainda, são apresentados os resultados obtidos das propriedades mecânicas, que foram avaliadas nos concretos autoadensáveis com e sem fibras. Foram determinados o comportamento à compressão e a avaliação do comportamento de tirantes (de aço envolto por concreto). No comportamento à compressão foi possível determinar a tensão máxima, deformação máxima, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos concretos. Nos ensaios de tirantes, foi possível determinar a rigidez, forças e deformações de fissuração, força e deformação de escoamento e o processo de fratura através de imagens. Ainda, as propriedades do estado endurecido foram avaliadas através de imagens de tomografia computadorizada para verificar a influência da dispersão das fibras nos concretos e os vazios de interface barra/concreto.

4.1 PROPRIEDADES REOLÓGICAS

4.1.1. Espalhamento - Cone de Abrams

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos do espalhamento através do uso do tronco de cone de Abrams, referentes as duas misturas C1 e C2.

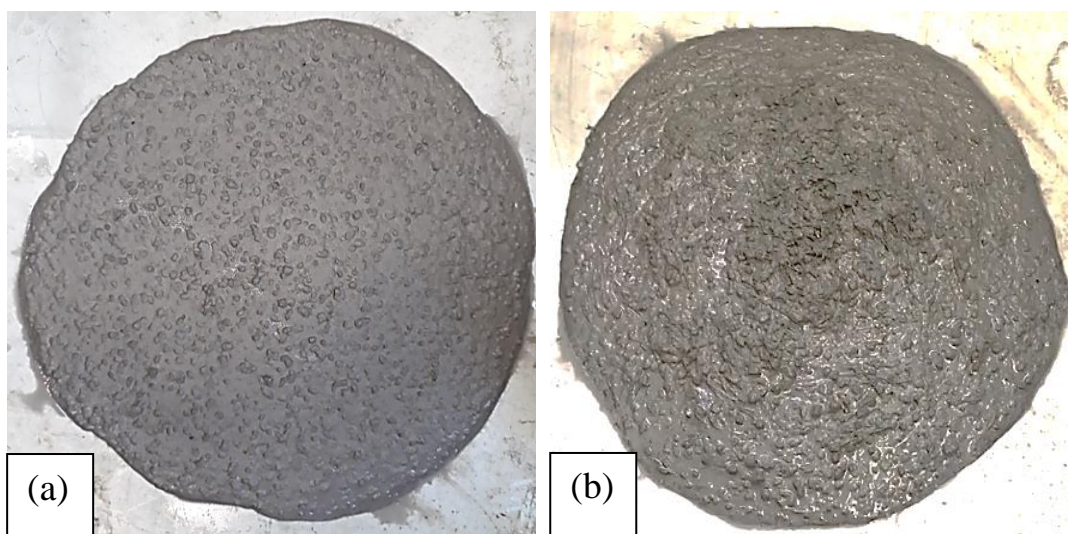
Tabela 7. Resultado do espalhamento das misturas.

MISTURAS	TEOR DE SP (%)	TEOR DE VMA (%)	ESPALHAMENTO (mm)
C1	0,67	0,028	615
C2	1,12	0,0094	575

Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 50 é possível ver uma imagem ao final do espalhamento obtido para os concretos autoadensáveis C1 (a) e C2 (b).

Figura 50. Espalhamento da matriz C1 (a) e C2 (b).



Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados de espalhamento obtidos (ver Tabela 7), apresentam diâmetros de 615 mm e 575 mm, para a matriz sem e com fibra, respectivamente. Diferença essa, justificada pela adição de fibras na mistura C2, responsáveis pela redução na trabalhabilidade.

Para que a mistura C2, obtivesse o espalhamento próximo da mistura de referência de Marangon (2011), foi necessário a adição de 59,8% de superplastificante a mais, para a mistura C1, e a redução de 33,57% de VMA. A correta dosagem de VMA e SP, garantiu às misturas, resistência a segregação, e restrição na formação de novelos de fibras na mistura C2, o que possibilitou a distribuição homogênea das fibras e agregados, do centro do diâmetro de espalhamento até as bordas (ver Figura 50). Esses espalhamentos apresentam índice de estabilidade visual classificada como IEV0, acordo com o item 3.2.1.

Como mencionado no item 3.2.1, os resultados apresentaram, segundo a NBR 15823:2010, classe de espalhamento SF1, entre 550 mm e 650 mm, com tempo t50, maior que dois segundo. A viscosidade plástica aparente apresentou é classificada como VS2, que confirma a correta distribuição dos componentes, sem apresentar segregação e/ou exsudação.

4.1.2. Medida da viscosidade através do funil “V”

Os dados experimentais resultantes dos ensaios de fluidez no funil “V”, são apresentados na Tabela 8

Tabela 8. Resultados dos tempos de fluidez - Funil "V".

MISTURAS	TEMPO DE FLUIDEZ(s)
C1	22
C2	59

Fonte: Elaboração Própria.

A mistura C1 apresentou tempo de fluidez de 22 segundos, tempo considerado reduzido quando comparado com a matriz C2, que apresentou um aumento de 168%, totalizando o tempo de fluidez de 59 segundos. Esses valores, apresentam concordância com os dados referência a pesquisa de Marangon (2011), que obteve para a mesma matriz sem fibra, o tempo de 16 segundos, e 51 segundos para matriz com teor de fibras de 1,5%. Ainda, é possível concluir que a adição de fibras proporcionou aumento da coesão, ou seja, viscosidade da mistura C2 em relação a mistura C1. Esse fato também foi observado por Marangon (2011).

4.1.3. Medida da habilidade passante através da caixa “L”

Os resultados obtidos dos ensaios utilizando a caixa “L” são apresentados na Tabela 9, com duas configurações, a primeira sem a presença de barras, e a outra com a presença de três barras.

Tabela 9. Resultados obtidos dos ensaios da caixa "L"

MISTURAS	RELAÇÃO H2/H1	
	Sem barras	III Barras
C1	1,00	0,92
C2	0,91	Bloqueio

Fonte: Elaboração Própria.

É recomendado para concretos autoadensáveis que a relação entre H2 e H1, seja maior ou igual a 0,80, quando usado 3 barras de anteparo. Quando não é utilizado barras de aço como anteparos, os valores devem estar compreendidos entre 0,91 e 1,00

Então, é possível observar, que de acordo a Tabela 9, somente a configuração com três barras de aço não atendeu aos limites estabelecidos para a mistura de concreto com fibras C2. Marangon (2011) também obteve bloqueamento para a mistura contendo 1,5% fibras na configuração de três barras de aço como anteparo.

4.1.4. Medida da habilidade passante através do anel “J”

Os resultados do espalhamento utilizando o anel “J”, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados de espalhamento com anel "J".

MISTURAS	ESPALHAMENTO COM ANEL "J" (mm)
C1	570
C2	440

Fonte: Elaboração Própria.

Os valores obtidos após o espalhamento da mistura C1 foi de 570 mm, que representa boa capacidade de fluidez da mistura, se comparado com o valor obtido do espalhamento do cone de Abrams, ou seja, sem o anel. A redução do espalhamento foi de 7,31%, o que pode ser considerado aceitável, dada a classificação da norma NBR 15823:2010 para concreto autoadensáveis, que classifica em SF1, quando o espalhamento encontra-se entre 550 mm e 650 mm.

Para a mistura C2, o valor de espalhamento final foi de 440 mm, que se comparado com o espalhamento sem barras (575 mm) a redução é de 23,47%, e em relação a mistura C1, uma redução de 22,80%.

De acordo com a classe de habilidade passante pelo anel “J”, da NBR 15823:2010, a mistura C2 apresente denominação PJ2.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS: COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados de comportamento à compressão das matrizes C1 e C2. Os corpos de prova de compressão foram ensaiados na idade de 28 dias.

A Tabela 11 apresenta os resultados médios de tensão, deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de variação dos ensaios de compressão.

Tabela 11. Dados dos ensaios de compressão axial da matriz C1 e C2.

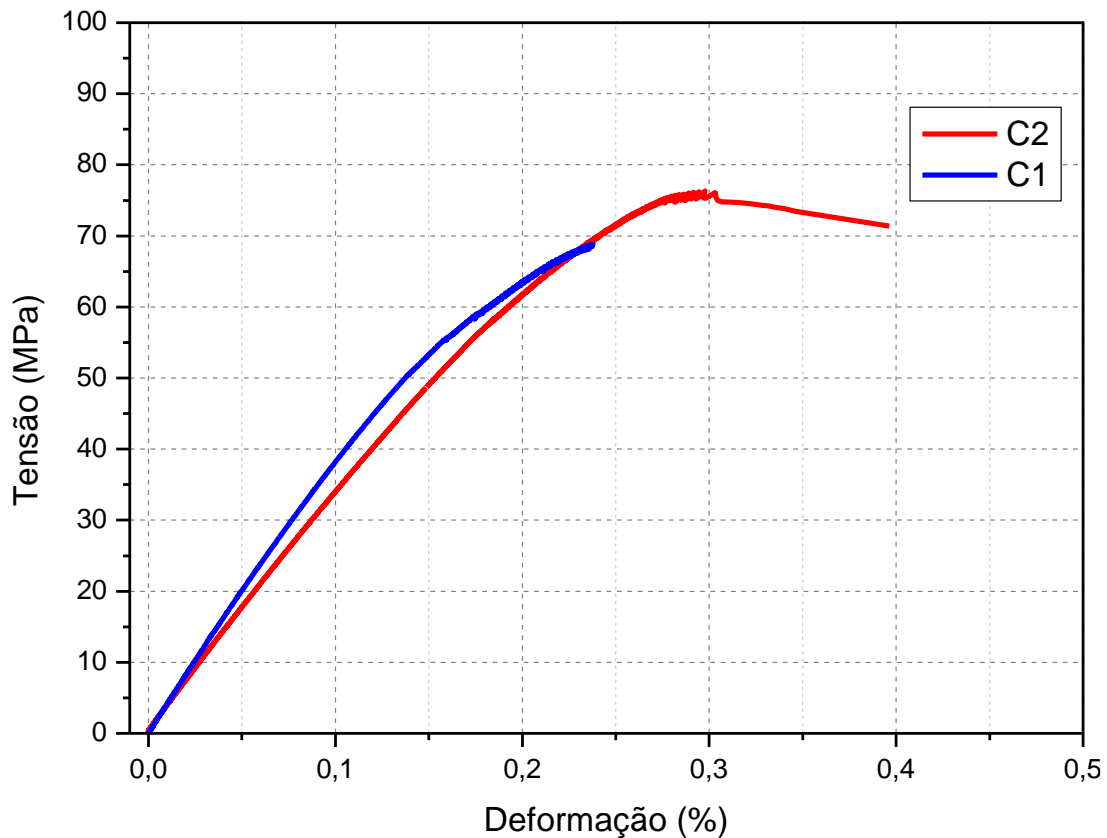
Misturas	TENSÃO DE COMPRESSÃO		DEFORMAÇÃO		MÓDULO DE ELASTICIDADE	
	Valor médio (MPa)	CV (%)	Valor médio (mm/m)	CV (%)	Valor médio (GPa)	CV (%)
C1	66,33	3,31%	2,21	11,69%	37,98	5,84
C2	77,89	1,44	2,62	9,66%	29,71	7,50

Fonte: Elaboração Própria.

A matriz C2 apresentou tensão máxima de 77,89 MPa, com valor de 14,84% superior a matriz C1, que obteve tensão de 66,33 MPa. Com relação a deformação de pico a mistura contendo fibras (C2) apresentou valor de deformação de pico superior a mistura sem fibras (C1), sendo a diferença de 15,38% (0,262% para C2 e 0,221% para C1).

Observa-se na Figura 51 as curvas típicas dos concretos, onde é possível perceber a diferença dos módulos de elasticidade. A mistura C1 apresentou módulo de elasticidade de 37,98 GPa (matriz C1 – azul) enquanto que, a mistura C2 o módulo foi de 29,71 GPa (matriz C2 – vermelho). Possivelmente essa diferença pode estar associada a quantidade de vazios, provocado pela perturbação da estrutura granular ao se adicionar fibras de aço, que são rígidas, além do teor de superplastificante ser maior nessa mistura, que também ajuda a formar bolhas de ar, que ficam aprisionadas na mistura. No entanto, não foram realizados ensaios para determinar os índices físicos de teor de vazios.

Figura 51. Curva típicas de Tensão x Deformação das misturas C1 e C2.

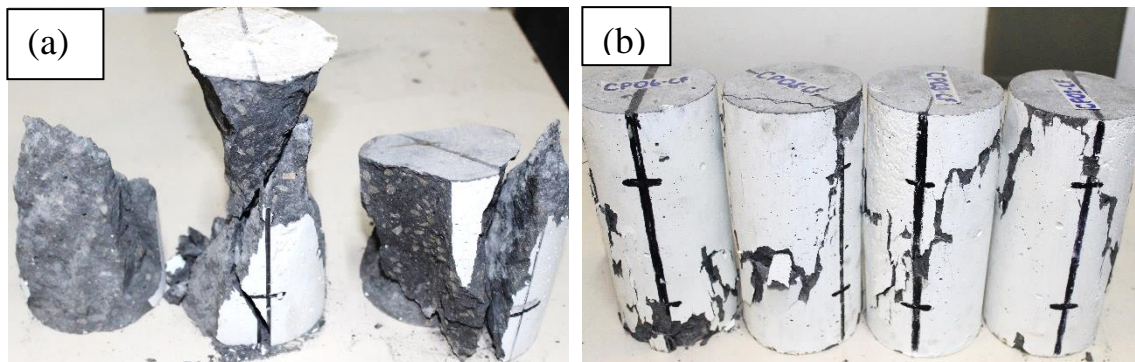


Fonte: Elaboração Própria.

A adição de fibra proporcionou a mistura C2 maior tenacidade e ductilidade, apresentando um comportamento com maior capacidade de absorção de energia de deformação (ver Figura 52 (b)), diferentemente do ocorrido na mistura C1, que tem comportamento à ruptura de forma brusca e explosiva (Figura 52 (a)), comportamento típico de materiais frágeis.

Como pode ser visto na Figura 52 (b), os corpos-de-prova da mistura C2 mostram boa integridade, após seu rompimento, proporcionado pela maior capacidade de absorção de energia resultado do efeito de confinamento interno gerado pela fibra na matriz. Ao contrário pode ser visualizado para a mistura C1 (Figura 52 (a)), em que os corpos de prova foram totalmente desintegrados.

Figura 52. Modo de fratura dos corpos-de-prova da matriz C1 (a) e C2(b), submetidos ao ensaio de compressão axial.



Fonte: Elaboração Própria.

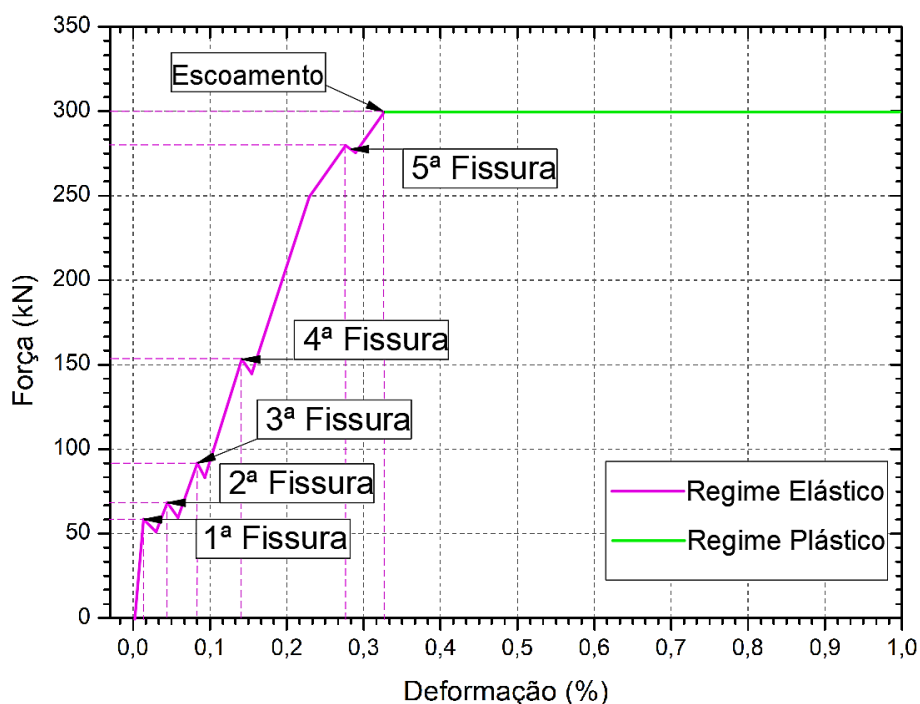
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS: TRAÇÃO – BARRA 20 mm

Os ensaios de tração direta nos tirantes foram realizados em quatro tirantes por grupo. Para a análise foi adotada uma curva típica de cada grupo. As curvas de todos os ensaios encontram-se no ANEXO A. A curva de força (kN) x deformação do concreto (%) utilizada nas figuras como comparação, foi a curva média, obtida de três ensaios de tração direta nas barras de aço conforme item 3.2.2.

Como a NBR 6118:2014 determina a deformação máxima permitida para o aço em 1% de deformação, nesta pesquisa será realizada a avaliação até essa deformação. Todavia, os ensaios de tração não foram realizados até essa deformação, e as curvas até a ruptura total dos corpos-de-prova estão no ANEXO A.

Foram definidos pontos de estudo para análise, dentro do regime elástico, onde ocorrem a abertura das fissuras, ou variação de inclinação da curva de força x deformação que possa indicar algum processo de fratura, como está exemplificado na Figura 53.

Figura 53. Exemplo dos pontos analisados da curva força x deformação dos tirantes.



Fonte: Elaboração Própria.

Nas Tabela 12 a Tabela 15 são apresentados os dados médios do ensaio de tração do tirante dos grupos da barra de 20 mm.

Tabela 12. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.H.20.

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV(%)
1ª FISSURA	60,045	8,72%	0,00390	16,06%	4956,190	13,04%
2ª FISSURA	63,892	7,92%	0,04522	15,36%	434,005	37,88%
3ª FISSURA	73,152	-	0,106	-	259,025	-
ESCOAMENTO	147,531	1,43%	0,2057	31,98%	191,669	0,03%

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 13. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.V.20

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV(%)
1ª FISSURA	55,691	9,15%	0,006	18,34%	3265,006	45,41%
2ª FISSURA	72,749	16,46%	0,045	16,80%	465,099	4,10%
3ª FISSURA	92,836	22,63%	0,108	24,69%	221,559	43,95%

4ª FISSURA	156,966	3,88%	0,221	2,00%	206,249	1,74%
ESCOAMENTO	177,104	2,78%	0,278	11,72%	130,861	26,23%

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 14. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.H.20.

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV(%)
1ª FISSURA	106,889	8,37%	0,00864	36,25%	4760,941	29,34%
ESCOAMENTO	201,887	5,61%	0,0770	20,40%	273,703	14,69%

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 15. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.V.20.

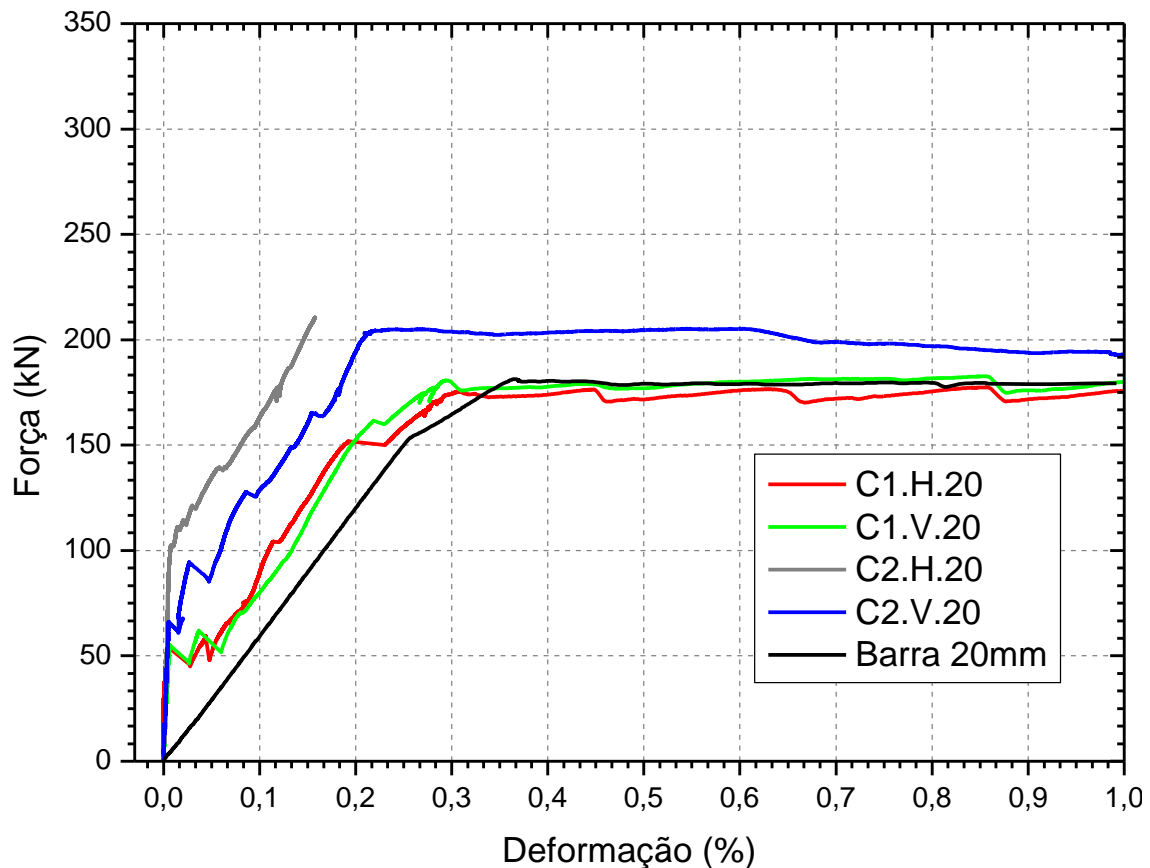
PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV(%)
1ª FISSURA	61,121	16,60%	0,006	21,12%	3185,741	16,49%
2ª FISSURA	85,038	11,59%	0,022	20,66%	747,006	10,63%
3ª FISSURA	113,186	16,96%	0,065	42,08%	381,776	29,03%
4ª FISSURA	132,060	22,59%	0,113	31,97%	246,054	9,42%
5ª FISSURA	180,436	5,96%	0,254	0,43%	185,528	6,75%
ESCOAMENTO	202,772	1,30%	0,277	23,65%	170,157	56,79%

Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 54, é mostrado as curvas típicas das matrizes C1 e C2 com barra de 20 mm, com moldagem na horizontal e vertical.

Através das curvas típicas foi possível verificar a diferença de comportamento mecânico dos grupos, primeiramente para as matrizes C1, que apresentaram módulos de elasticidade e força máxima até o início do escoamento da barra de aço semelhantes, com um pequeno aumento da energia de deformação (área sob a curva força x deformação) quando comparadas ao resultado somente da barra de aço de 20 mm.

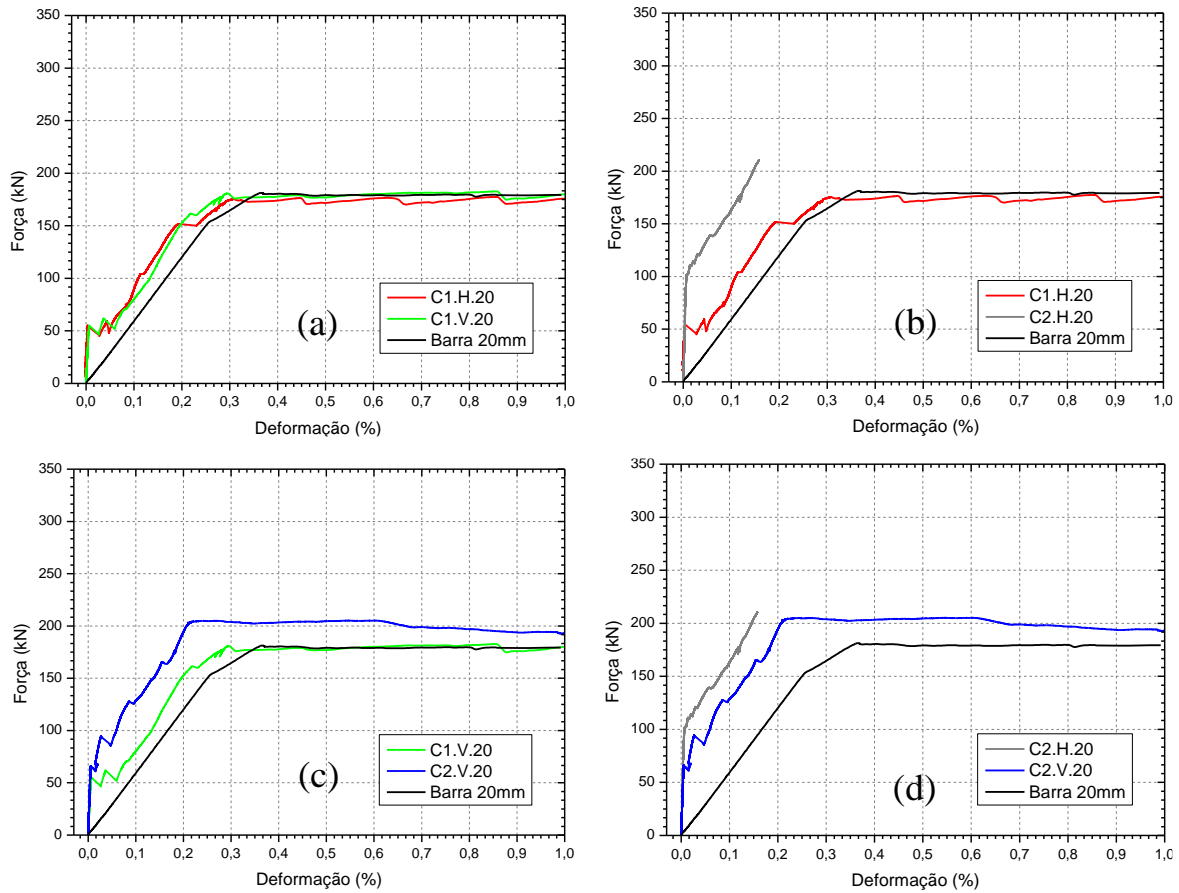
Figura 54. Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 20 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 55 são mostradas as comparações dos ensaios de C1.H.20 e C1.V.20 em (a), C1.H.20 e C2.H.20 em (b), C1.V.20 e C2.V.20 em (c) e C2.H.20 e C2.V.20 em (d). Na Figura 55 (a) é possível verificar as duas curvas da mistura C1, em que as forças de primeira fissura das amostras são bastante próximas (ver Tabela 12 e Tabela 13) com um patamar de fissuração após a formação de primeira fissura, que ocorre entre a deformação de 0,0039% e 0,05%. Nesse patamar a matriz atinge a tensão máxima de tração. Em seguida é possível observar que o comportamento do tirante (força x deformação) é paralelo a curva da barra de aço (na cor preta), ou seja, a partir do patamar de fissuração a rigidez é igual ao da barra. Em seguida é possível observar o patamar de escoamento da barra, iniciada com deformação de aproximadamente 0,3 %, e uma força de aproximadamente 175 kN.

Figura 55. Comparação das Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 20 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Para a moldagem horizontal, Figura 55 (b), é possível observar uma diferença considerável em relação ao processo de início de fissuração, quando são adicionadas fibras a mistura. Por exemplo, a carga de 1ª fissura para a mistura com fibras foi 78 % maior que comparada a mistura sem fibras. Ainda, se analisar para a mesma deformação, é possível observar que o grupo C2.H.20 apresenta uma maior área abaixo da curva, indicando uma maior capacidade de absorção de energia proporcionado pela inclusão das fibras à mistura. Por outro lado, é possível observar que a rigidez dos dois grupos é praticamente igual até a primeira fissura, sendo que para C1.H.20 é de 4956 GPa e para C2.H.20 é de 4761 GPa, diferença de apenas 4%, ou seja, está dentro do erro de ensaio.

Na moldagem vertical (Figura 54 (c)), o módulo de elasticidade do grupo C1.V.20 e C2.V.20 é de 3265 e 3185GPa, respectivamente, com variação de 2,5% entre os grupos. até a primeira fissura. A primeira fissura ocorre com força de 55,6 kN para o grupo

C1.V.20 e 61,1 kN para o C2.V.20. Essa diferença proporcionada foi pela ação das fibras, como ocorre nos grupos horizontais. Após o aparecimento da primeira fissura o comportamento dos dois grupos se distancia, pela maior capacidade do compósito (C2) absorver energia por deformação, tanto no regime elástico quanto no plástico, como pode ser observado pela maior área sob a curva, sendo o único grupo da barra de 20 mm, que apresenta maior capacidade de carga para alcançar o escoamento.

No ponto de escoamento, o grupo C2.V.20 apresenta aumento no valor da força de 14,49%, com força de 202,7 kN, contra 177,1 kN do grupo C1.V.20.

Para a mistura C2, pode-se observar na Figura 55 (d), que o aparecimento da primeira fissura no grupo moldado na horizontal, tem um aumento na carga de 74,86% em comparação ao grupo moldado na vertical, como também tem maior módulo de elasticidade até a primeira fissura, com uma diferença de 48,45%. Porém o grupo C2.V.20, apresenta redução gradual deste módulo com o processo de fissuração, que ocorre mais tardiamente na quarta fissura até chegar ao valor próximo de 246 GPa, enquanto para o grupo horizontal, a redução do módulo ocorre logo após a primeira fissura (aproximadamente 273,7 GPa), com baixas deformações e sem mantêm até o escoamento.

No grupo C2.V.20, o processo de fissuração ocorre de forma progressiva, com mudança do módulo de elasticidade do compósito modificando a cada abertura de fissura, reduzindo a capacidade do espécime em resistir a solicitação. Seu comportamento também é divergente em relação aos demais grupos, pois ele apresenta acréscimo na capacidade de carga no regime plástico do compósito, indicando um desempenho no regime plástico superior aos demais, pois neste caso, a orientação das fibras são na sua maior diagonais e transversais ao processo de fissuração, devido a sua disposição no processo de lançamento.

4.3.1 Campo de deformação

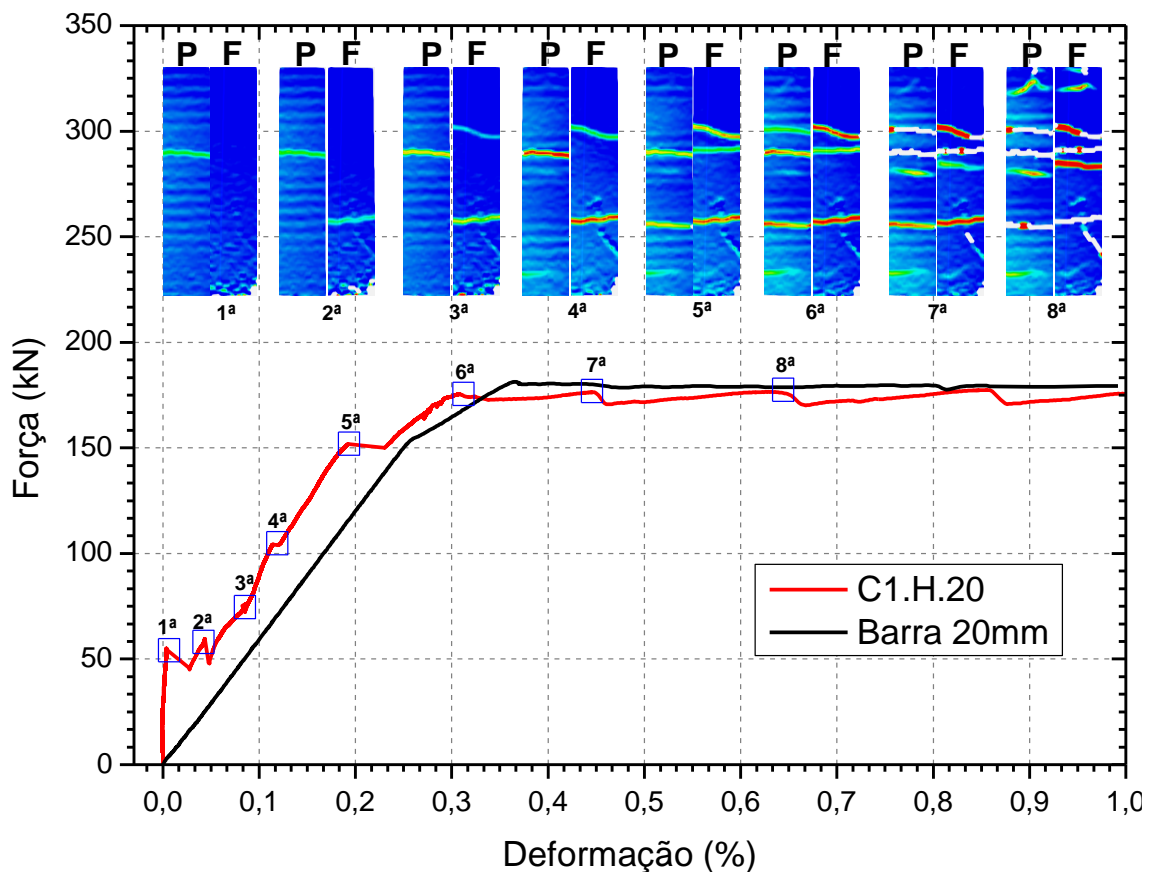
A aplicação do DIC (correlação digital de imagem) possibilitou a análise do processo de fissuração, bem como monitorar o comportamento ou desenvolvimento da fissuração que ocorre nos tirantes, conforme apresentado no item 3.2.2.

Assim, foram elaborados a partir das curvas típicas de força x deformação dos grupos, os campos de deformação da face frontal e posterior dos tirantes, sendo designado

“F” para frontal, que representa nos tirante moldados na horizontal a parte superior, por onde foi lançado o concreto, e “P” para a face posterior, que para os tirantes moldados na horizontal representa o fundo da fôrma. Para as amostras moldadas na vertical foi escolhida uma das faces como a frontal e a outra considerada posterior, desde que não coincidisse as nervuras longitudinais com as garras da máquina, ou seja, as nervuras longitudinais ficavam paralelas as garras da máquina de ensaios.

Foram definidos pontos de estudo para análise do DIC, que neste caso, do grupo C1.H.20 são oito (ver Figura 56), onde ocorrem as aberturas de fissuras, ou variação que pode indicar algum processo de fratura.

Figura 56. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.H.20.



Fonte: Elaboração Própria.

No grupo C1.H.20 a abertura da primeira fissura ocorre na face posterior, ocasionada pela falha na interface de contato entre a barra e a matriz (ver ponto 1ª - Figura 56), pois devido a menor área de contato, há conseqüentemente a menor aderência química e de atrito entre os materiais na interface, resultando em uma tensão de aderência

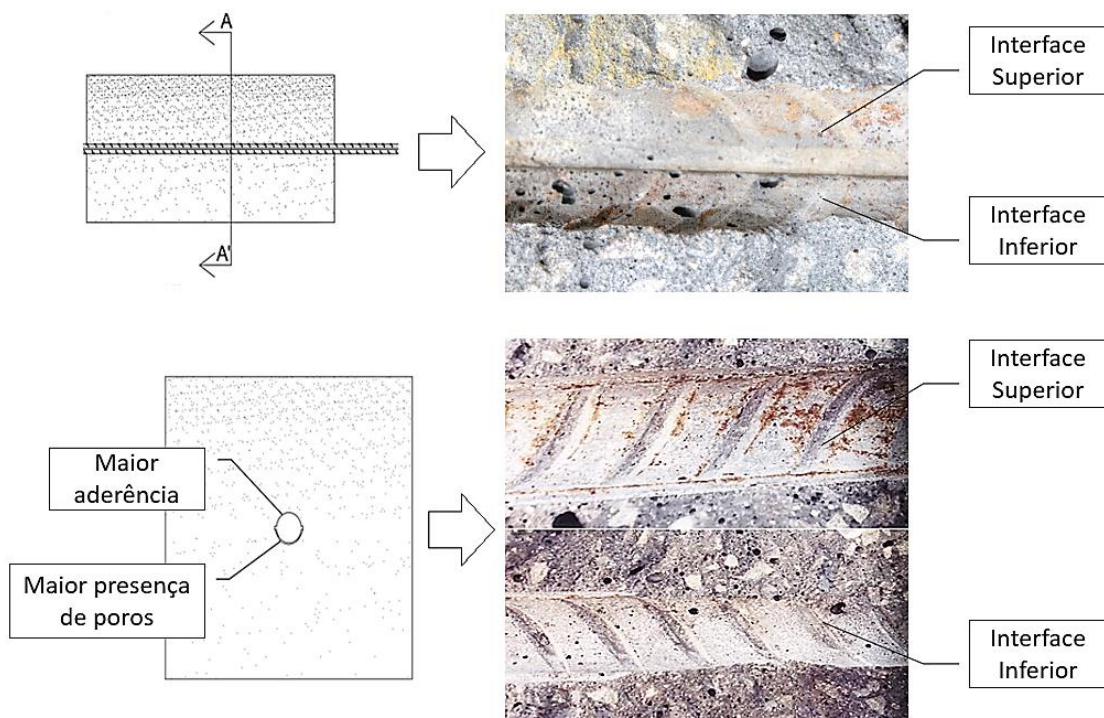
menor, como já citado por Dybel e Kucharska (2020), que exemplifica o comportamento da tensão de aderência x deslocamento, em relação a cada uma das faces da barra de aço embebida no concreto.

Porém neste grupo, o processo de fissuração ocorre de maneira desigual, com aberturas iniciadas de maneira assíncrona, que só vão se igualar próximo ao fim do regime elástico.

Dessa forma, há a formação da segunda fissura na face frontal (ver ponto 2ª - Figura 56), com seguinte abertura da terceira fissura na face frontal, em simetria com a primeira fissura da face posterior (3º ponto). No 4º Ponto, com deformações maiores que 0,2%, as faces tendem a abrir fissuras simétricas, pois a abertura de fissuras nesta deformação está ligada ao a aderência mecânica.

Após realizar o rompimento dos tirantes deste grupo e o desmembramento da matriz, foi efetuado a análise das interfaces de ligação entra a barra-matriz, mostrado na Figura 57, validando o efeito de topo da barra na matriz utilizada.

Figura 57. Presença de vazios na interface de ligação inferior da barra na matriz C1.



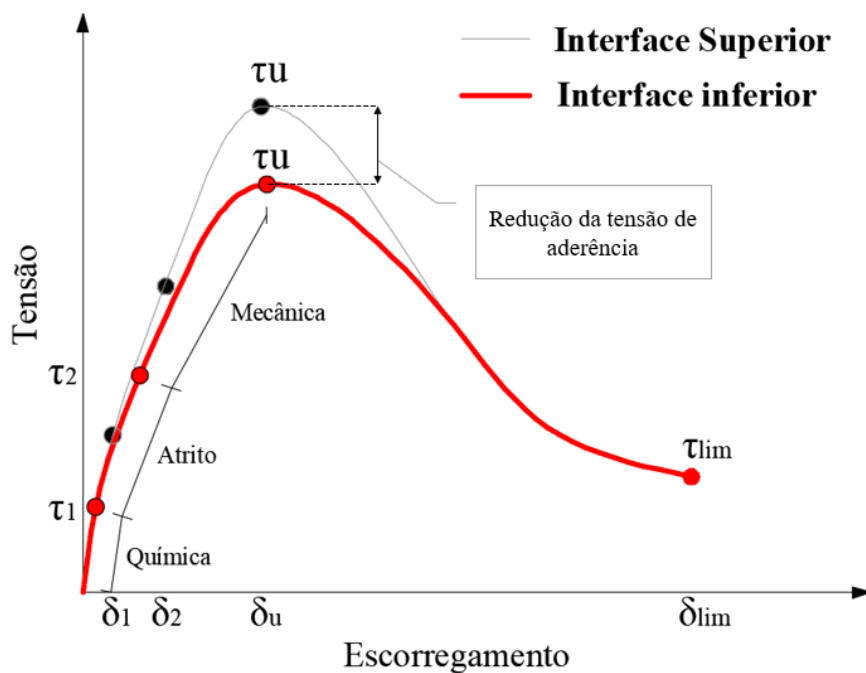
Fonte: Elaboração Própria.

No processo de desmembramento da mistura, além da confirmação da maior presença de poros na região inferior da barra, foi analisado o comportamento local de

formação de fissuras na interface aço-matriz, associado a diminuição da área de contato. Dessa forma, foi constatado a redução na capacidade de aderência química (τ_1), e de atrito (τ_2) da interface inferior, quando comparado a interface superior (ver Figura 58), que por consequência reduz a resistência adesional de pico (τ_u), justificando assim, a formação da primeira fissura na face posterior do tirante.

Dessa maneira pelos resultados obtidos, pode ser observado na Figura 58 a ilustração da redução nas tensões de aderência da interface inferior em relação a superior, baseado na Figura 58 de Silva (2006).

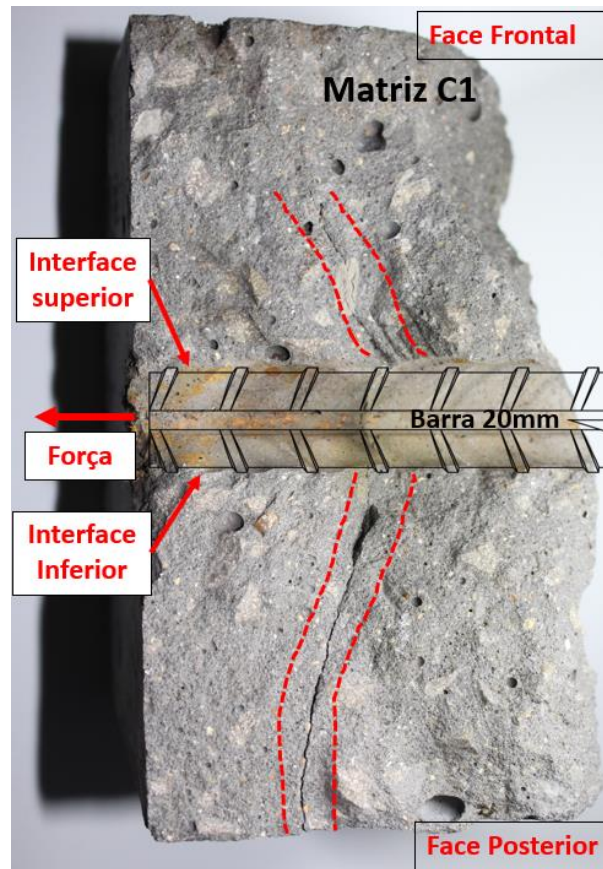
Figura 58. Curva tensão de aderência x escorregamento para topo e fundos de fôrma.



Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 59, valida os argumentos supracitados, pela formação da fissura inicial na interface inferior da barra até a face posterior, e a formação da fissura na interface superior, que não chega a atingir a face frontal.

Figura 59. Fissura de cisalhamento formada pela menor aderência na interface inferior.

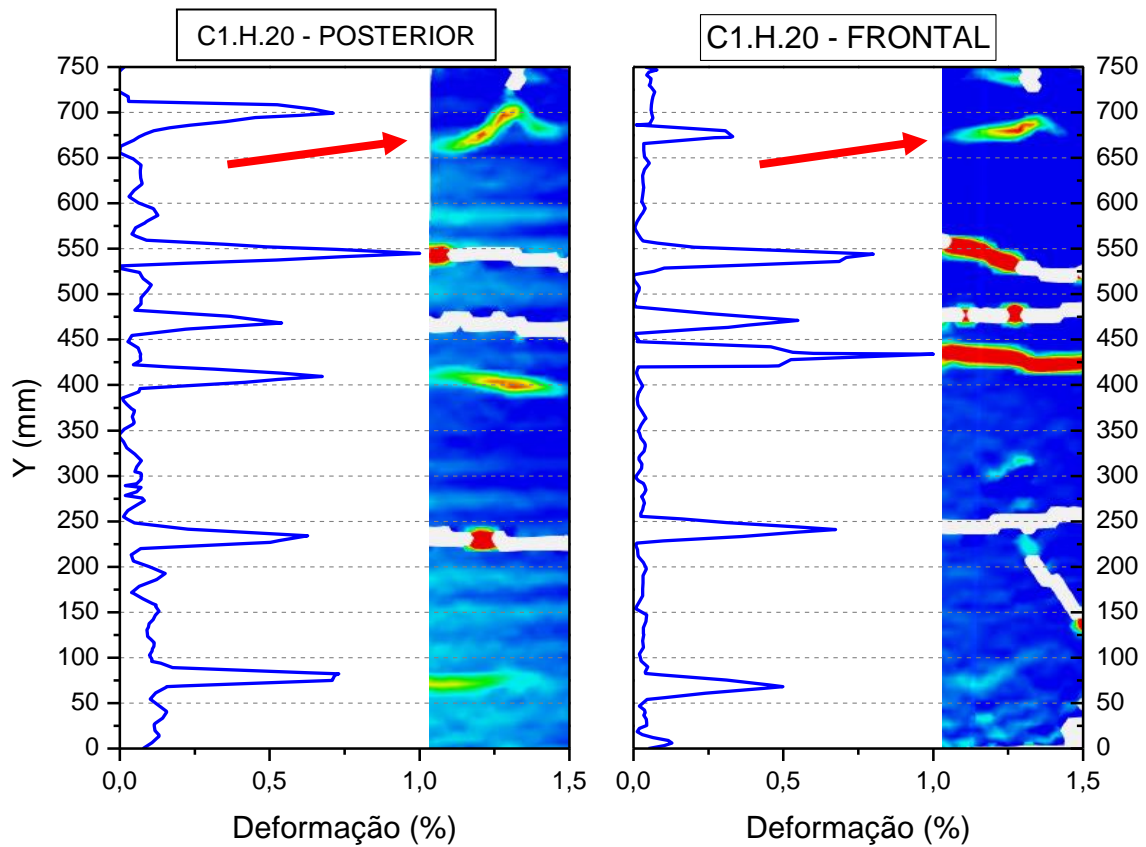


Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 60, são mostrados os campos de deformações do C1.H.20 com deformação de 1%, na face posterior e frontal do tirante. Nela é constatado, a semelhança nos campos de deformação, iniciando o processo fendilhamento na parte superior, de acordo a seta indicativa.

Essa semelhança ocorre, pois neste grupo, a sincronia na abertura de fissuras e posterior estabilidade acontece a partir do escoamento, com deformação de 0,2057%, enquanto o processo assíncrono de fissuração ocorre antes dessa deformação.

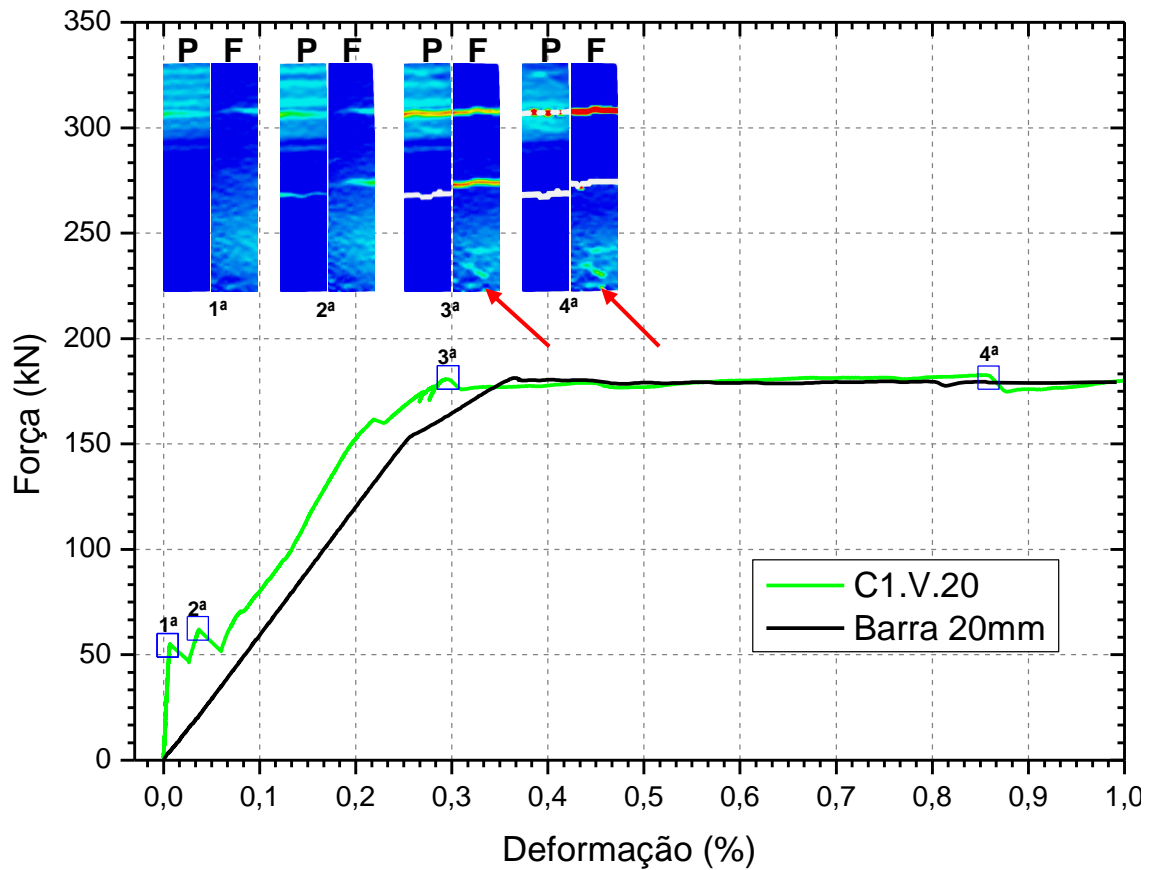
Figura 60. Seção transversal do campo de deformação do C1.H.20.



Fonte: Elaboração Própria.

No grupo C1.V.20, o processo de formação de fissura ocorre de maneira simétrica (ver Figura 61), onde o início das fissuras ocorre em ambas as faces do tirante (frontal e posterior) para o mesmo carregamento e deformação. Isso, indica uma maior uniformidade na transferência de tensão entre o aço e o concreto.

Figura 61. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.V.20.

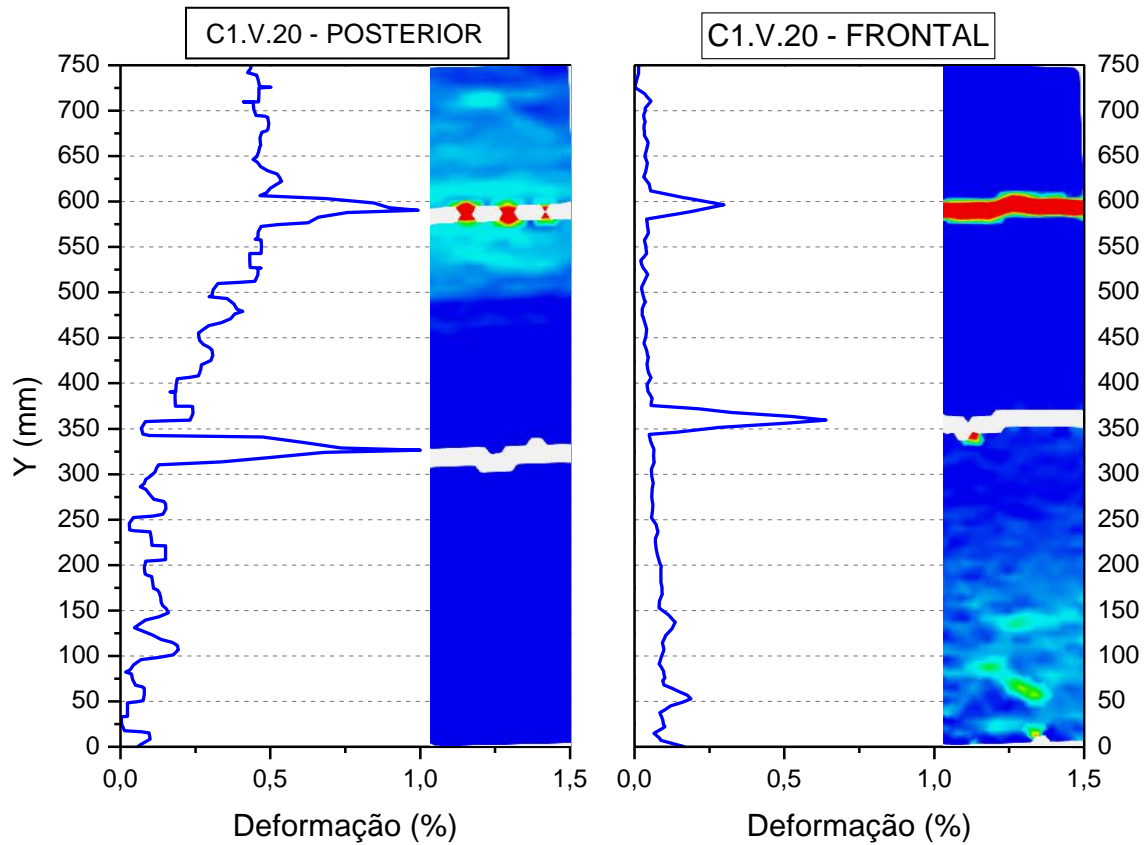


Fonte: Elaboração Própria.

Para esse grupo todas as fissuras são formadas dentro do patamar de fissuração, até o 2º ponto da Figura 62, com abertura da segunda fissura. Ainda, é possível observar, que o fendilhamento inicia próximo ao limite de escoamento da barra, na parte inferior do tirante, conforme pode ser visto na imagem do 3º e 4º ponto na Figura 61 (indicado pelas setas vermelhas).

Quando analisado a curva da Figura 62, a ação de aderência causa maiores deformações na região de descontinuidade, no ponto de 600 mm, possibilitando menor deformação relativa entre os materiais.

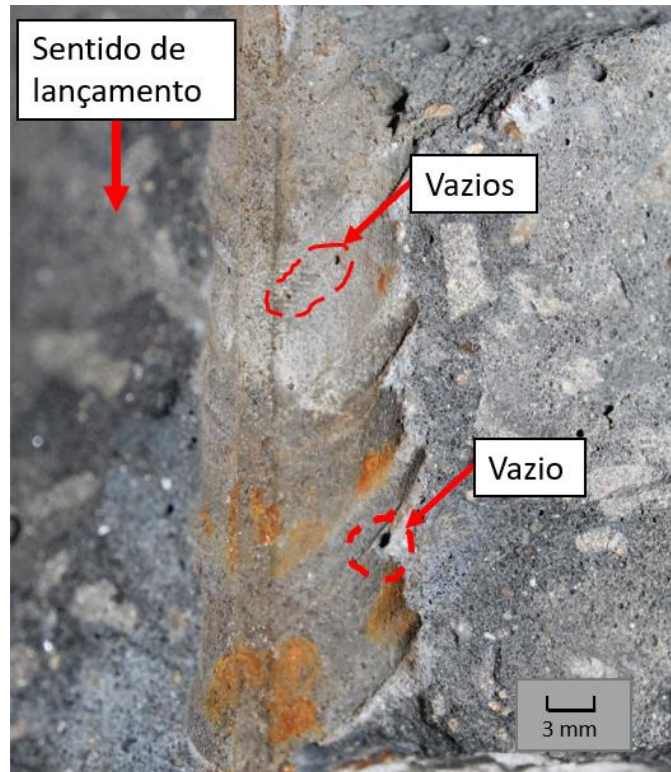
Figura 62. Seção transversal do campo de deformação do C1.V.20.



Fonte: Elaboração Própria.

Após os ensaios, foram desmembrados os tirantes C1.V.20 para verificar a presença dos vazios sob as nervuras. Na Figura 63 é mostrado os vazios em um tirante desse grupo. É possível observar que o tamanho dos vazios é inferior, quando comparado os vazios sob a barra no grupo horizontal (ver Figura 56).

Figura 63. Presença de vazios sob a nervura da barra de 20 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

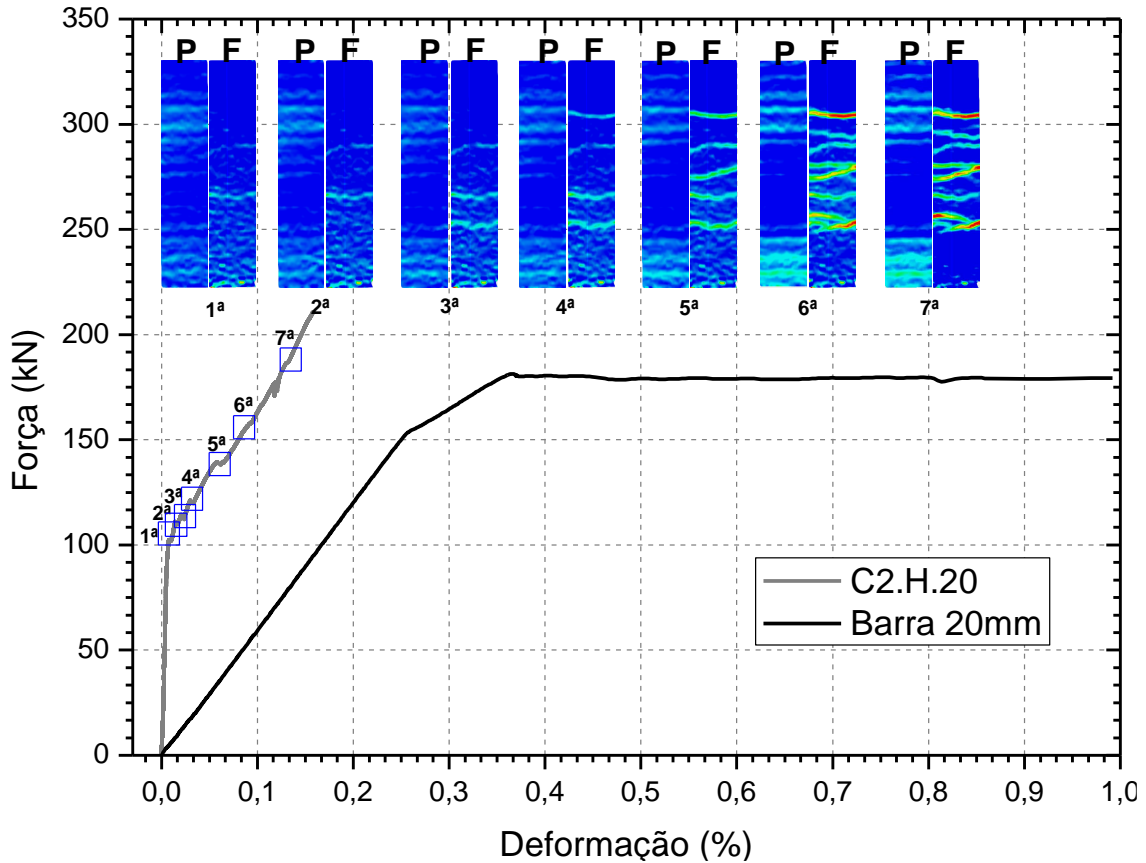
Os tirantes de matriz C1 apresentaram boa repetibilidade do comportamento, como pode ser observado nas curvas no ANEXO A, possibilitando afirmar que quando o tirante é moldado na horizontal, devido a falhas na aderência, aparecem fissuras acima ou abaixo da barra, que só se juntam no final do regime elástico. . Quando moldado na vertical, isso não acontece e as fissuras que se formam são passantes em toda a seção transversal da amostra. Há uma grande mudança no mecanismo de formação e desenvolvimento das fissuras devido à direção da concretagem para estes grupos.

As fissuras e as concentrações de deformação, do grupo C2.H.20, só foram possíveis ser visualizada pela análise do DIC, com redução de escala de trabalho para 0,1% de deformação máxima. Isso ocorre devido alta rigidez da peça de concreto, que apresenta baixas deformações finais de 0,077%, impossibilitando a análise pela escala definida inicialmente de até 1%.

Portanto, no campo de deformação do grupo C2.H.20, não ocorre nenhuma fissura até o 5º ponto da Figura 64. A partir desse ponto, é formado fissuras na face frontal, sem abertura simétrica na face posterior.

Na face posterior há a concentração de deformações próximas as extremidades do tirante, corroborando com o comportamento de aderência para concretos de alta resistência citado por Azizinamini *et al.* (1993).

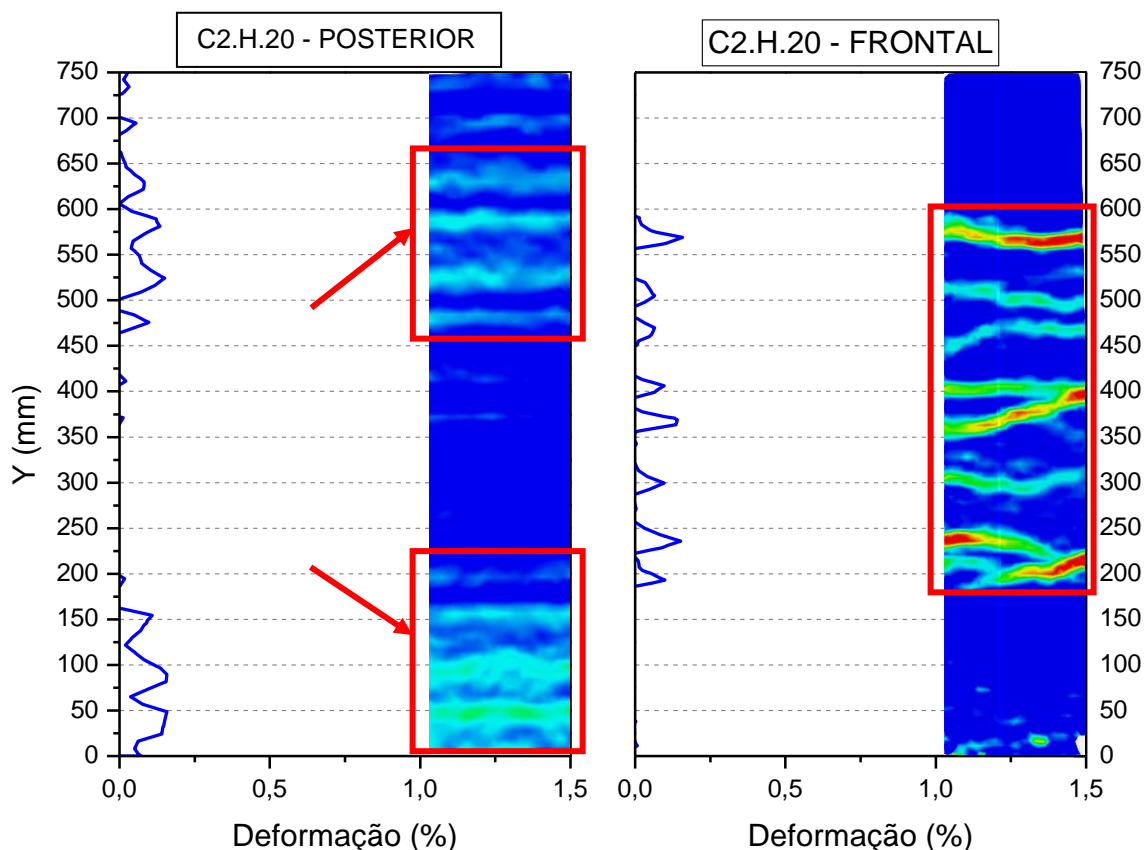
Figura 64. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.H.20.



Fonte: Elaboração Própria.

Esse comportamento fica mais claro quando se observa a vista frontal e posterior do campo de deformação para o C2.H.20, mostrado Figura 65. Nota-se três regiões de concentração de deformação, a primeira na região central da face frontal, que ocorre a multifissuração, e as demais na face posterior, sem formação de fissuras e deformação distribuída nestas áreas.

Figura 65. Seção transversal do campo de deformação do C2.H.20.

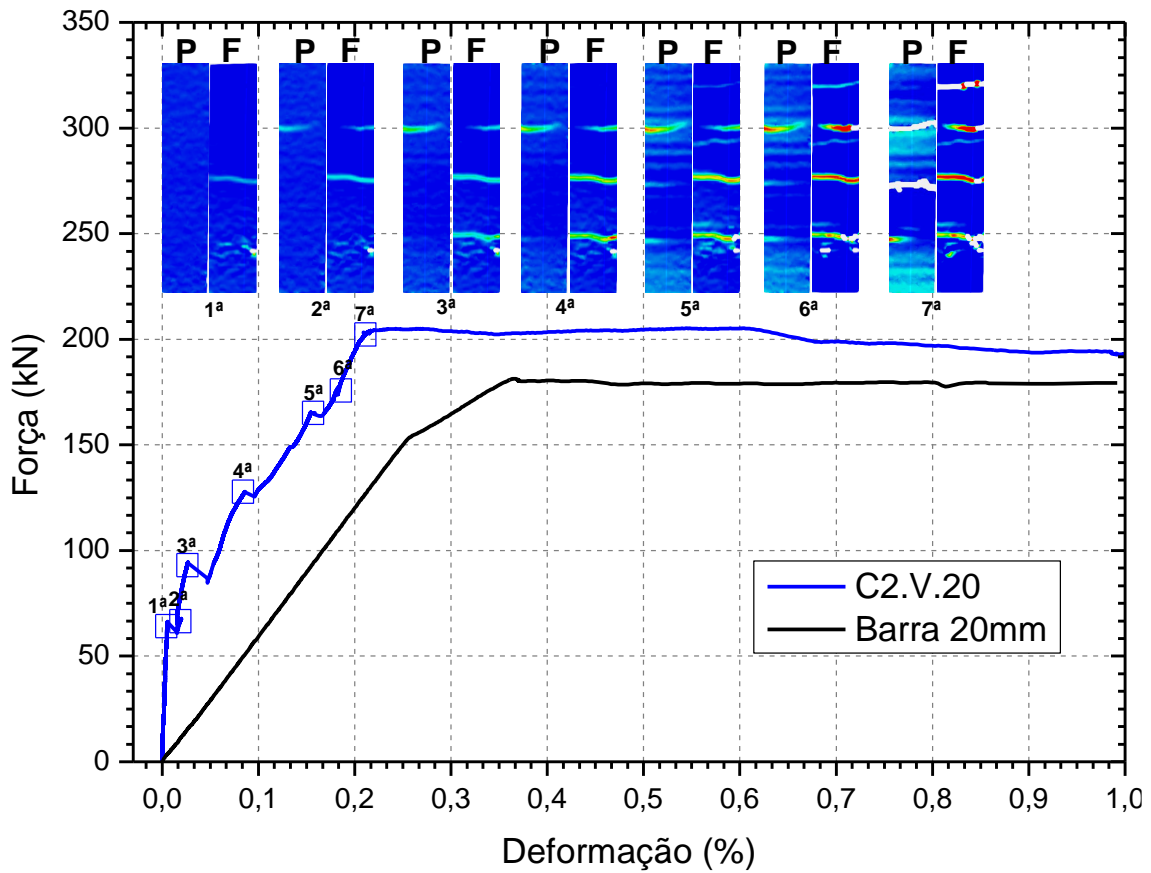


Fonte: Elaboração Própria.

Na superfície de deformação do grupo C2.V.20 (Figura 66) é possível verificar comportamento semelhante ao encontrado para C1.V.20. Neste caso se tem menos fissuras, mas elas passam por toda a seção transversal do tirante em sua maioria, apresentando padrões mais próximos entre as faces. A diferença do comportamento com o a direção do lançamento também se observa com posicionamento das fibras, já que a quantidade de fissura é muito menor que na moldagem horizontal. Por mais que as fibras façam uma redistribuição das tensões, o mecanismo criado pela direção do lançamento segue influenciando o comportamento de fissuração da concreto.

No 2º ponto da Figura 66, é formado a segunda fissura em ambas as faces, na altura de 550 mm. O aparecimento da fissura nesta altura ocorre também para os grupos C1.H.20 e C1.V.20, indicando a posição que a matriz atinge sua resistência última à tração. Porém neste grupo, ela ocorre com carga de 85,03 kN, sendo superior em 33,08% ao grupo C2.H.20 e 16,89% em relação ao grupo C1.V.20.

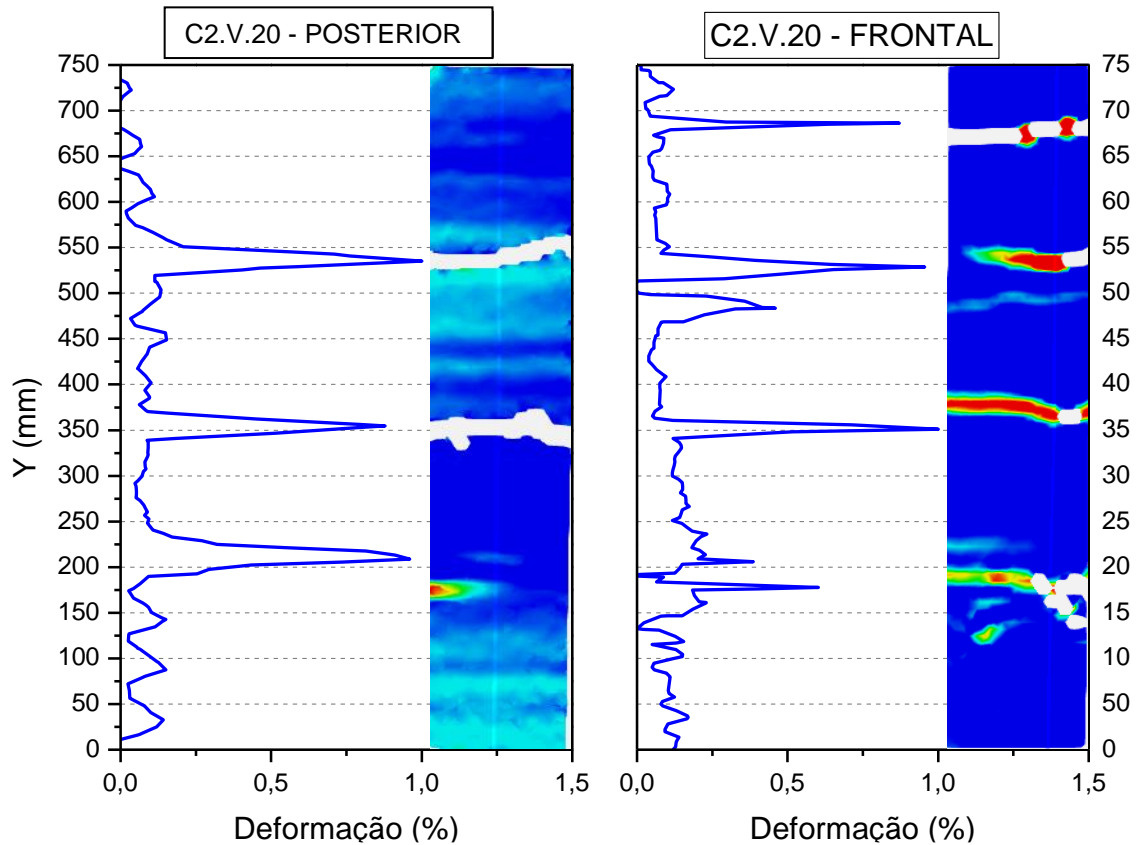
Figura 66. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.V.20.



Fonte: Elaboração Própria.

Além de apresentar maiores valores de força para a fissuração, esse grupo de tirantes (C2.V.20) apresentam seções fissuradas equidistantes, com divisão em quatro blocos principais, divididos na altura de 200, 350 e 550 mm, como pode ser observado na Figura 68.

Figura 67. Seção transversal do campo de deformação do C2.V.20.



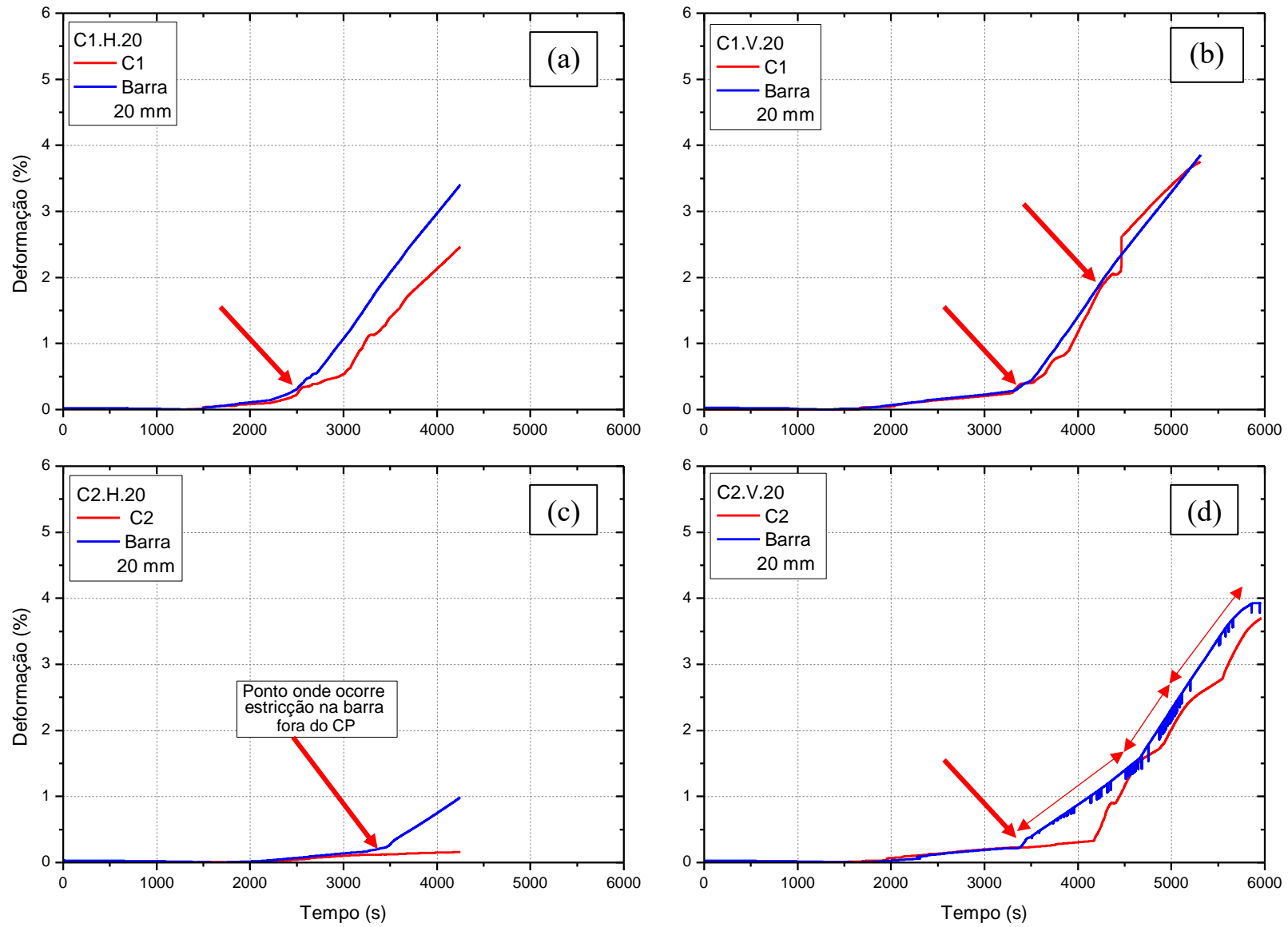
Fonte: Elaboração Própria.

4.3.2 Comportamento aço-matriz

A análise da decoesão entre a barra de aço e a matriz, foi realizada mediante a comparação da deformação individual do aço e do concreto, observando o comportamento das curvas em relação ao mesmo tempo durante a solicitação à tração.

Na Figura 68, são mostradas as curvas típicas de deformação \times tempo dos ensaios de C1.H.20 (a), C1.V.20 (b), C2.H.20 (c) e C2.V.20 (d).

Figura 68. Curvas típicas de deformação x tempo dos grupos da barra de 20 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Nas comparações das deformações da matriz de concreto e do aço, do grupo C1.H.20, verifica-se uma proximidade das curvas até a abertura da primeira fissura (ver seta na Figura 68 (a)), a partir deste ponto, a matriz apresenta menor deformação em relação a barra. Isso corre em consequência da concentração de tensão na barra, no ponto de descontinuidade da fissura. Como as fissuras são formadas em pontos diferentes em cada face, a atuação de forma solidária ao aço (enrijecimento à tração) é reduzida, sendo agravada com o aparecimento de novas fissuras, provocando um aumento da diferença de deformação entre aço-matriz do grupo C1.H.20.

No grupo C1.V.20, a primeira fissura (ver seta - Figura 68 (b)) ocorre nas duas faces e dá início na separação das curvas de deformação, até que haja o rearranjo das transferências de tensões entre os materiais, e a matriz possa através da aderência mecânica, atuar junto com o aço à sollicitação. Esse comportamento contribui para uma menor decoesão dos materiais, e com posterior reaproximação das curvas, após a abertura de cada fissura. Ainda, conforme observado na Figura 63, a interface entre o concreto e a barra de aço é mais uniforme, o que proporciona uma melhor distribuição das tensões e consequentemente das deformações.

A rigidez da matriz C2.H.20, possibilita baixíssimas deformações relativas em relação ao aço, como mostrado na Figura 68 (c). Ainda, pode ser observado, um ponto de desigualdade de deformação brusca (ver seta na Figura 68 (c)), que ocorre devido a estrição da barra fora do corpo-de-prova, acarretando em altas deformações na barra e estabilidade do comportamento da matriz. Portanto, devido a esse fato, foi assinalado o início deste processo na curva, que passa, a partir deste ponto, a não ter validade para aferir a deformação relativas entre os materiais. Contudo, dentro do regime elástico é possível observar deformações muito uniformes, indicando o efeito da fibra em confinar a barra de aço e proporcionar uma maior aderência na interface.

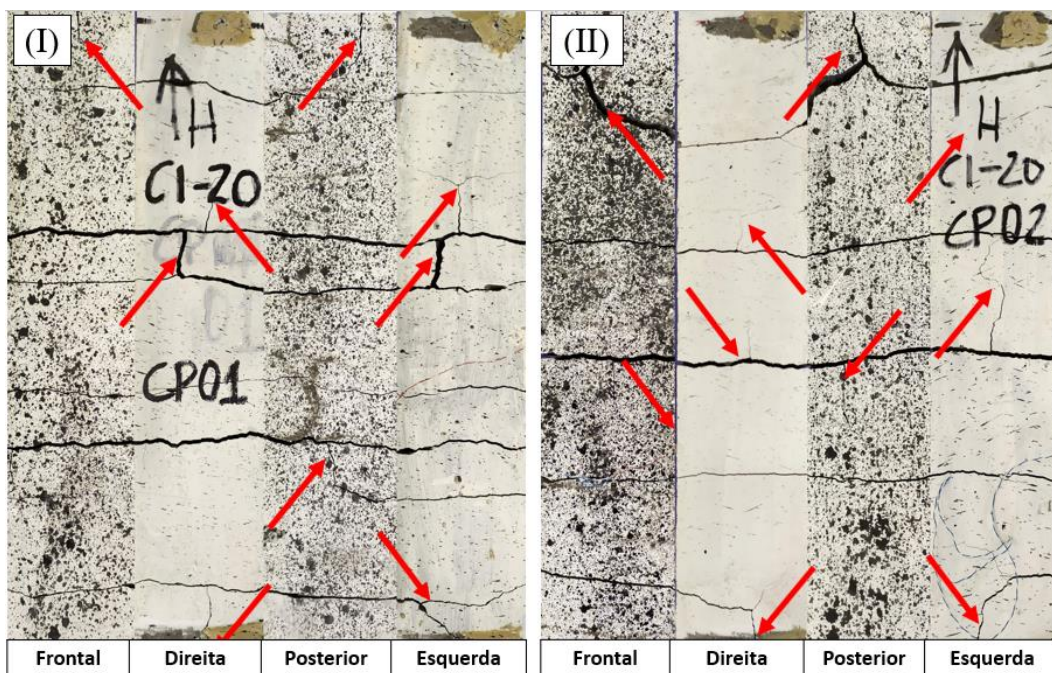
No grupo C2.V.20 (Figura 68 (d)) demonstra semelhança do processo de deformação com comportamentos homogêneos na deformação relativa entre o aço-concreto. No entanto, quando aparecem as fissuras é possível observar variações maiores, e em seguida uma reaproximação das curvas com continuidade do carregamento, como é mostrado nos intervalos da Figura 68 (d).

4.3.3 Modo de fratura

Nos dois tirantes do grupo C1.H.20 (Figura 69) é possível visualizar a manifestação de dois tipos de fratura: o primeiro por fendilhamento, que tem maior incidência próximo as extremidades; e o segundo à tração. Esse comportamento à fratura é semelhante ao que acontece com os dois tirantes do grupo C1.V.20 (Figura 70).

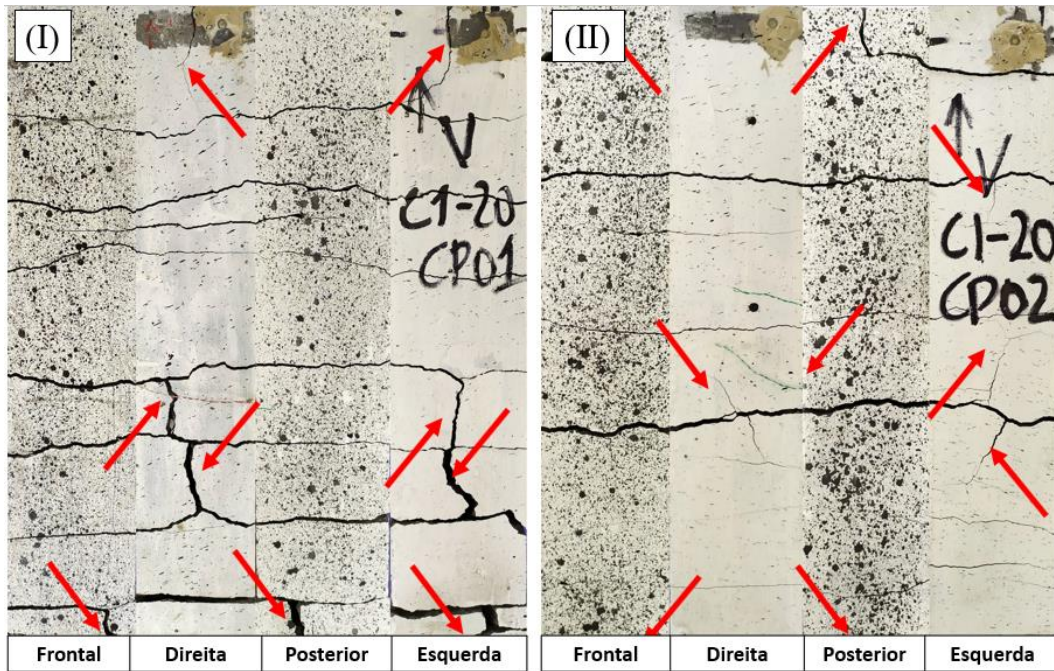
O processo de ruptura por fendilhamento está evidenciado, pelas setas em vermelho (ver Figura 69), e as fissuras horizontais são resultantes da solicitação de tração.

Figura 69. Mapas de fissuras do grupo C1.H.20.



Fonte: Elaboração Própria.

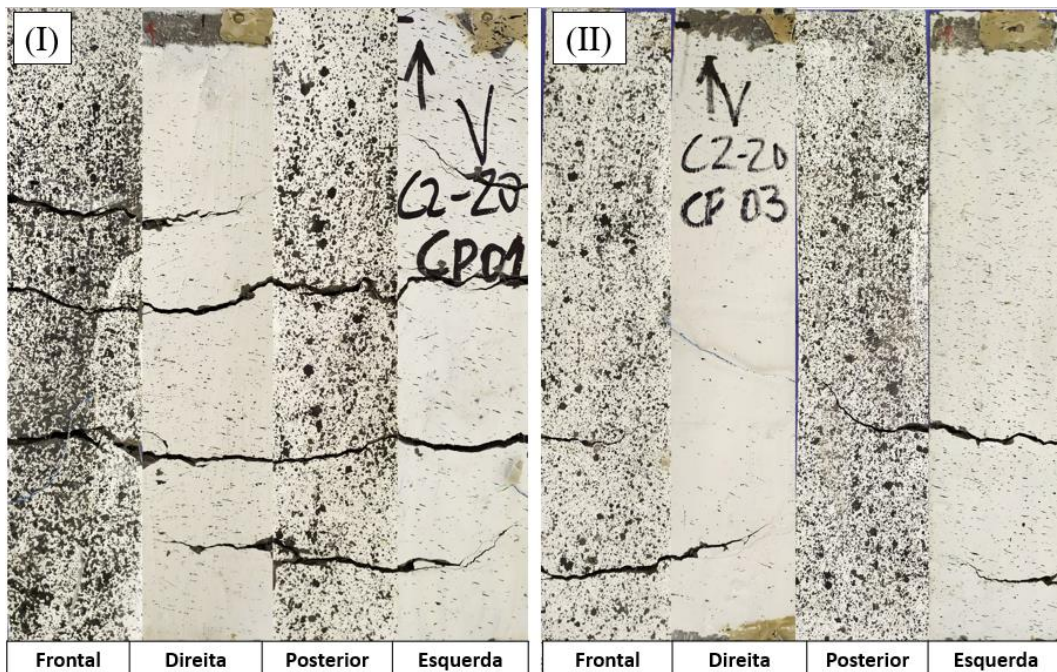
Figura 70. Mapas de fissuras do grupo C1.V.20.



Fonte: Elaboração Própria.

O modo de fratura do grupo C2.V.20, é por tração com fissuras perpendiculares a solicitação (ver Figura 71), e não apresenta processo de fendilhamento, como ocorre nos grupos da mistura C1.

Figura 71. Mapas de fissuras do grupo C2.V.20.



Fonte: Elaboração Própria.

Porém, devida a grande deformação da barra junto as extremidades do tirante, há o processo de ruptura da aderência, conforme pode ser visto na Figura 72. Esse modo de fratura é considerado do tipo dúctil, proporcionada pela ação das fibras, no confinamento da barra pela absorção de energia de deformação, como citado por Bentur; Mindess (2006), Zollo (2000), Majain et. Al. (2020) e Zhao et. al. (2018).

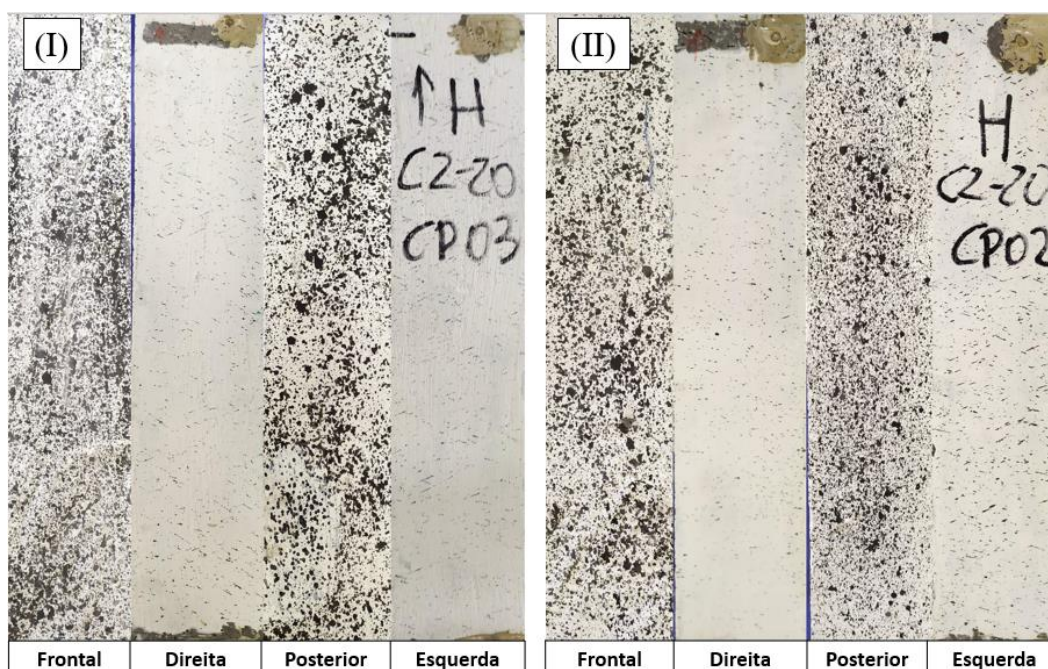
Figura 72. Panorama de fissuração por aderência na extremidade de uma amostra do grupo C2.V.20.



Fonte: Elaboração Própria.

O comportamento do grupo C2.H.20 (Figura 73), demonstra distinção do grupo moldado na vertical, visto que, não é possível verificar a olho nu o processo de abertura de fissuras no ensaio, sendo possível apenas pela análise de correlação digital de imagem.

Figura 73. Mapas de fissuras do grupo C2.H.20.

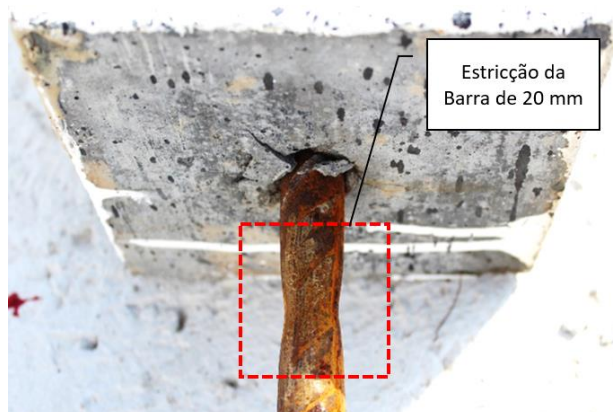


Fonte: Elaboração Própria.

Devido a essa rigidez da peça do grupo com concreto com fibras e moldado na horizontal, ocorre o processo de escoamento da barra, diferente dos demais grupos, na parte externa ao concreto (ver Figura 74). Portanto o tipo de fratura do grupo C2.H.20, é ocasionado pelo rompimento da barra, em que não ocorre deslizamento, devido à grande aderência entre os materiais, como citado por Al-Jahdali (1997) e Belo (2017).

Neste grupo foi necessário finalizar o ensaio quando iniciava a estricção da barra fora da matriz.

Figura 74. Estricção da barra de 20 mm no grupo C2.H.20.



Fonte: Elaboração Própria.

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS: TRAÇÃO – BARRA DE 25 mm

Os grupos da barra de 25 mm, obedeceram às mesmas configurações de ensaio dos grupos com barra de 20 mm. Da Tabela 16 a Tabela 19 são apresentados os dados médios dos ensaios de tração dos tirantes dos grupos das barras de 25 mm, com pontos analisados de acordo com a Figura 53. A barra de aço, quando atinge a resistência de 500 MPa, apresenta mudança no módulo de elasticidade, que foi denominado de “E – Mudança” (ver indicação na Figura 53)

Tabela 16. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.H.25.

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV (%)
1ª FISSURA	58,315	27,48%	0,009	9,25%	1639,940	30,20%
2ª FISSURA	92,149	33,07%	0,049	57,93%	291,057	25,83%
3ª FISSURA	174,536	33,20%	0,155	41,76%	216,351	3,95%
4ª FISSURA	189,556	-	0,163	-	211,732	-
E - MUDANÇA	242,753	0,09%	0,215	3,40%	208,460	12,06%
ESCOAMENTO	283,432	0,64%	0,363	26,56%	74,627	41,28%

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 17. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C1.V.25.

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV (%)
1ª FISSURA	52,082	20,92%	0,005	44,61%	2349,547	27,92%
2ª FISSURA	67,338	6,09%	0,034	61,13%	550,730	31,19%
3ª FISSURA	101,024	7,42%	0,087	54,41%	255,673	32,49%
4ª FISSURA	146,160	16,31%	0,136	50,43%	222,189	38,56%
5ª FISSURA	104,893	-	0,087	-	156,328	-
E - MUDANÇA	245,732	2,74%	0,245	18,10%	188,686	8,70%
ESCOAMENTO	281,605	1,61%	0,326	17,25%	89,592	12,47%

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 18. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.H.25.

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (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%	236,820	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%	49,060	21,51%

Fonte: Elaboração Própria.

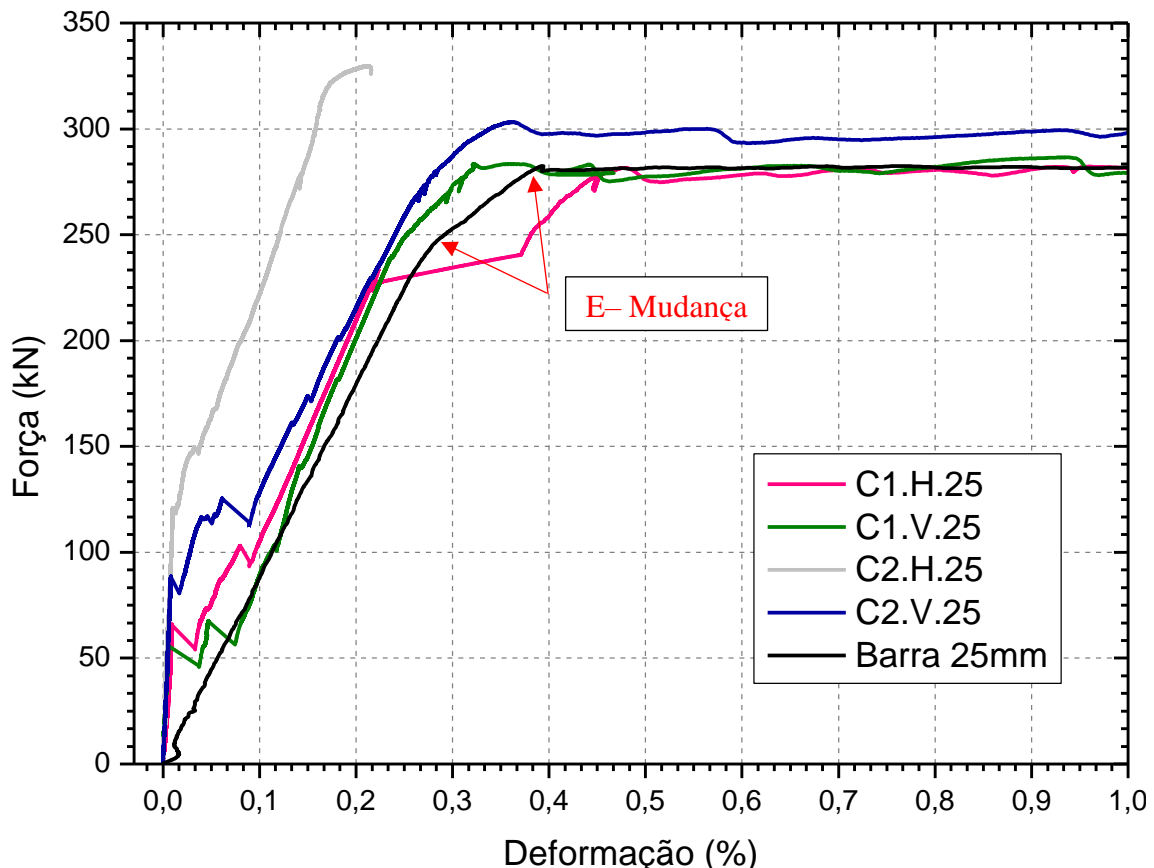
Tabela 19. Dados médios dos ensaios de tração axial do grupo C2.V.25.

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV (%)
1ª FISSURA	61,455	11,14%	0,007	14,40%	1959,190	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	-	212,830	-
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: Elaboração Própria.

Na Figura 75 é mostrado as curvas típicas das matrizes C1 e C2 com barras de 25 mm, moldadas na horizontal e na vertical.

Figura 75. Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 25 mm.



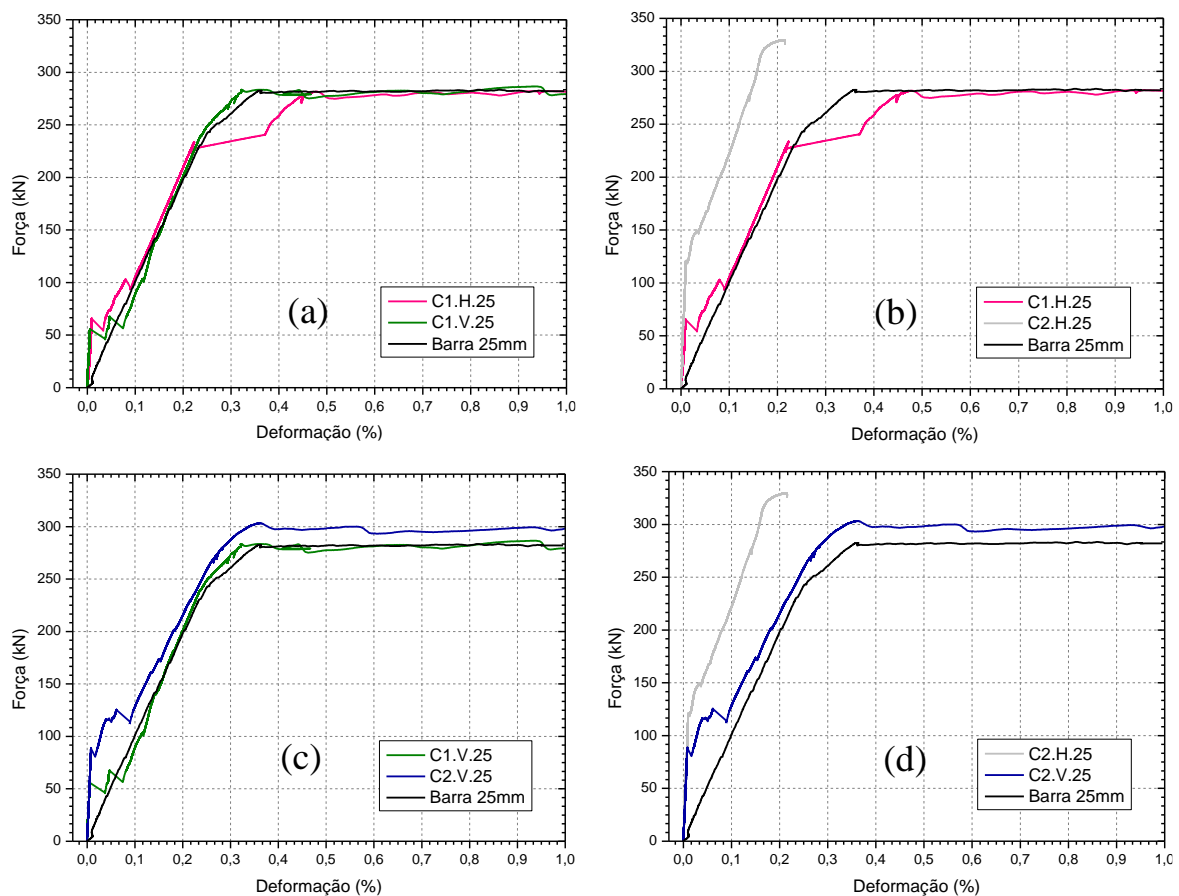
Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 76 são mostradas as comparações dos ensaios de C1.H.25 e C1.V.25 (a), C1.H.25 e C2.H.25 (b), C1.V.25 e C2.V.25 (c) e C2.H.25 e C2.V.2 (d).

As curvas para a mistura C1 (Figura 76 (a)) para moldagem horizontal e vertical, apresentam as forças semelhantes para abertura da primeira fissura, com valor de 58,31 kN para o grupo C1.H.25, e de 52,08 kN para o C1.V.25, onde dá-se início ao patamar de fissuração. No entanto, eles (os grupos) apresentam diferenças de deformação para a primeira fissura de 51,7%, e consequente diferença de módulo de elasticidade, de 1639 GPa para moldagem horizontal, e de 2349 GPa para a moldada na vertical. Em seguida, observa-se que o início dos patamares de escoamento, ocorrem entre a deformação de 0,3% a 0,4%, com força igual a 280 kN.

Após o patamar de fissuração, os grupos da mistura C1, apresentam curva paralela a curva da barra de aço, sem contribuição para enrijecimento à tração proporcionada pela matriz.

Figura 76. Curvas típicas de força x deformação dos grupos da barra de 25 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Para as moldagens horizontais, há o aumento da absorção de energia de deformação da mistura C2 em relação a C1, pela maior área sob a curva para a mesma

deformação (Figura 76 (b)), aumento esse, que também ocorre para a carga de fissuração de 107,77 kN para o C2.H.25, e 58,33 kN para C1.H.25, diferença essa de 84,76%.

A fibra também proporciona para moldagens verticais (C2.V.25, Figura 76 (c)), o aumento da absorção de energia de deformação, quando comparado ao grupo C1.V.25. Ganho que ocorre no patamar de fissuração, no regime elástico, que apresenta para a primeira fissura uma força de 61,45 kN para o concreto C2, e de 52,08 kN para o concreto C1, e ao final desse patamar com força de 136,62 kN, e 67,33 kN, respectivamente, proporcionando ganhos substanciais na absorção de energia nessa fase.

Na Figura 76 (d), na comparação dos grupos da mistura C2, apresentam ganhos de energia de deformação em relação a curva da barra até o escoamento, porém esse ganho é superior para o grupo moldado na horizontal, em concordância com os resultados obtidos por Torrijos, Barragán e Zerbino (2010). O ganho de resistência do grupo moldado na horizontal foi beneficiado pelo alinhamento preferencial das fibras na direção da aplicação da força de tração.

As principais diferenças entre os grupos da matriz C2, é o aumento da força de escoamento para o grupo moldado na horizontal, que apresenta valores 26,46% maior em relação a moldagem na vertical. No entanto, a moldagem vertical, apresenta ganhos significativos de energia de deformação no regime plástico.

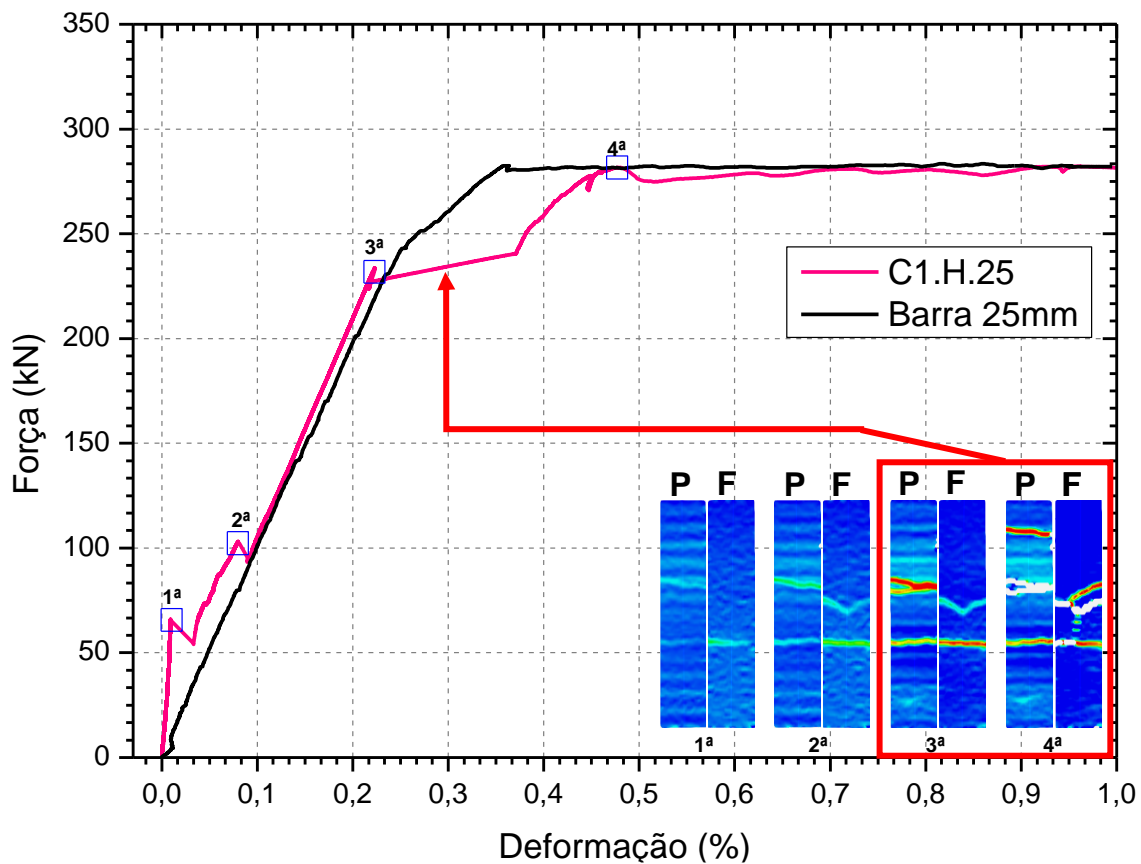
4.4.1 Campo de deformação

A análise dos grupos da barra de 25 mm através da correlação de imagem até a deformação de 1%, validou o comportamento mecânico à fratura

No campo de deformação do grupo C1.H.25, mostrado na Figura 77, existe a formação de duas fissuras da face posterior e uma fissura simétrica na face frontal (1º ponto), com posterior aparecimento da segunda fissura frontal simétrica (2º Ponto).

Essa segunda fissura, após aparecer nas duas faces (ou seja, passante pela seção transversal), causa a concentração da sollicitação de tração na barra de aço na região central do tirante, onde ocorre grandes deformações localizadas. Em razão disso, no intervalo entre o 3º e 4º ponto ocorre o fendilhamento na região central do tirante, como é mostrado na Figura 77 no 4º ponto do campo de deformação da face frontal.

Figura 77. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.H.25

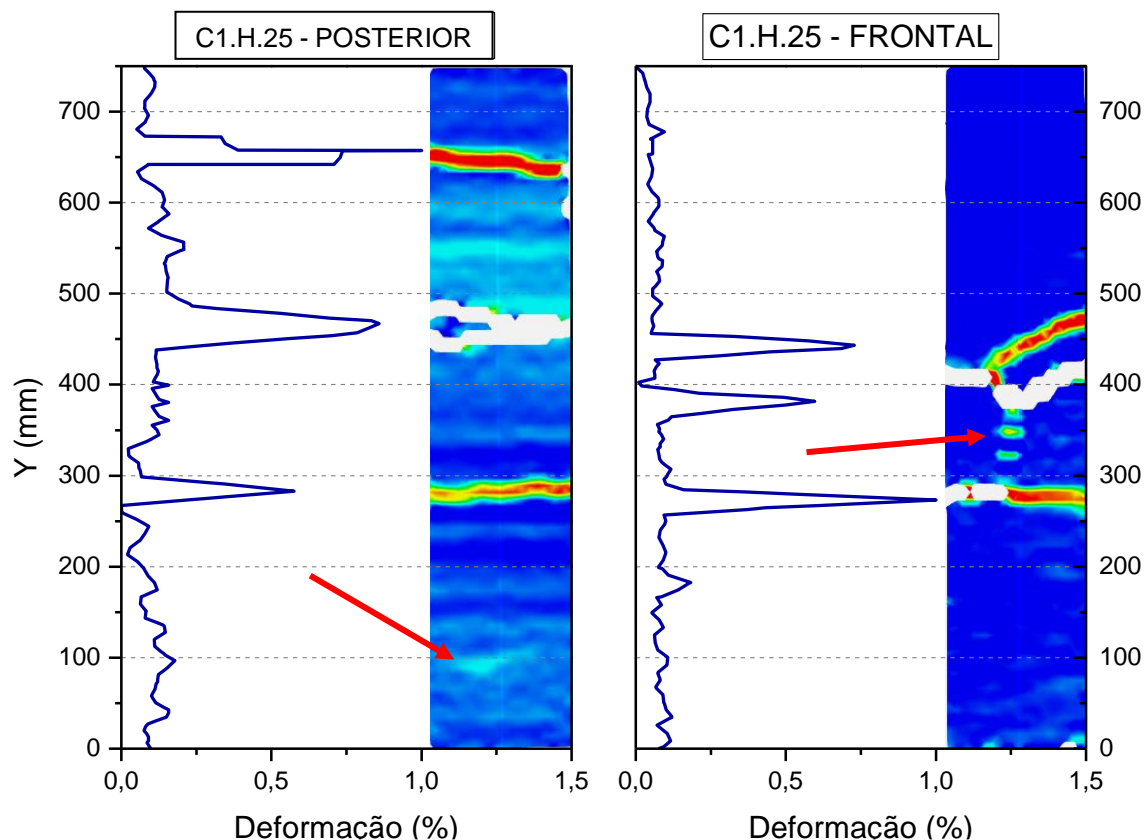


Fonte: Elaboração Própria.

Esse processo de fendilhamento acontece no intervalo de deformação de 0,2 a 0,5%, devido à redução na área de confinamento em 7%, na comparação a área o grupo da barra de 20 mm. Devido a isso, formasse o fendilhamento central como pode ser observado na Figura 78, entre a altura 280 e 450 mm, da face frontal. Além desse fendilhamento, é possível verificar na face posterior a formação também na extremidade inferior do tirante (ver indicação na Figura 78), provocado pelas altas deformações de extremidade da barra de aço.

O aparecimento das fissuras na face posterior confirma o mecanismo de fratura dos tirantes moldados na horizontal sem fibra, como acontece também no grupo da barra de 20 mm (C1.H.20).

Figura 78. Seção transversal do campo de deformação do C1.H.25.

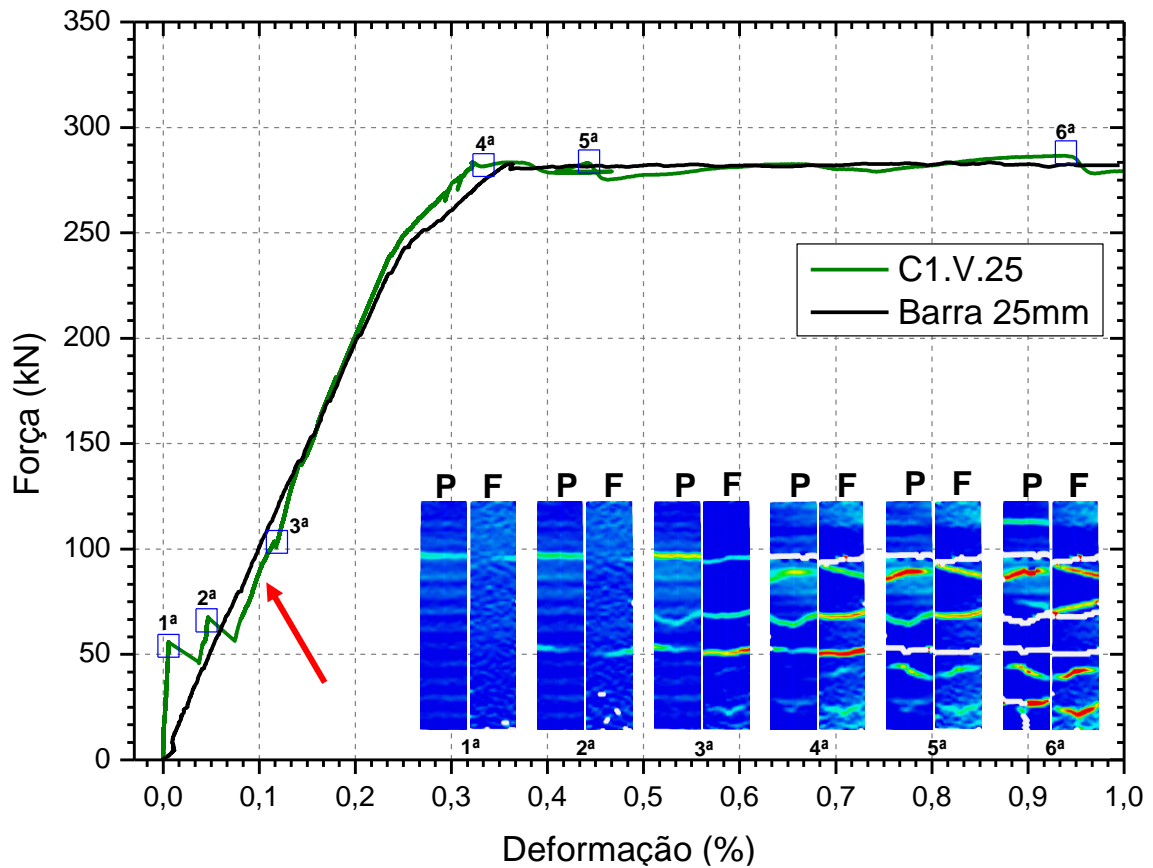


Fonte: Elaboração Própria.

No grupo C1.V.25 a simetria e simultaneidade das fissuras são confirmadas como propriedade dos tirantes moldados na vertical, como pode ser visualizado na Figura 79, e como também havia sido identificado no grupo C1.V.20 (ver Figura 62).

No regime elástico desse grupo, há um acréscimo de energia de deformação até o aparecimento da segunda fissura, pois na formação da fissura subsequente, é possível verificar a ocorrência de fendilhamento na face posterior, e no 3º ponto da curva na face frontal (ver indicação na Figura 79).

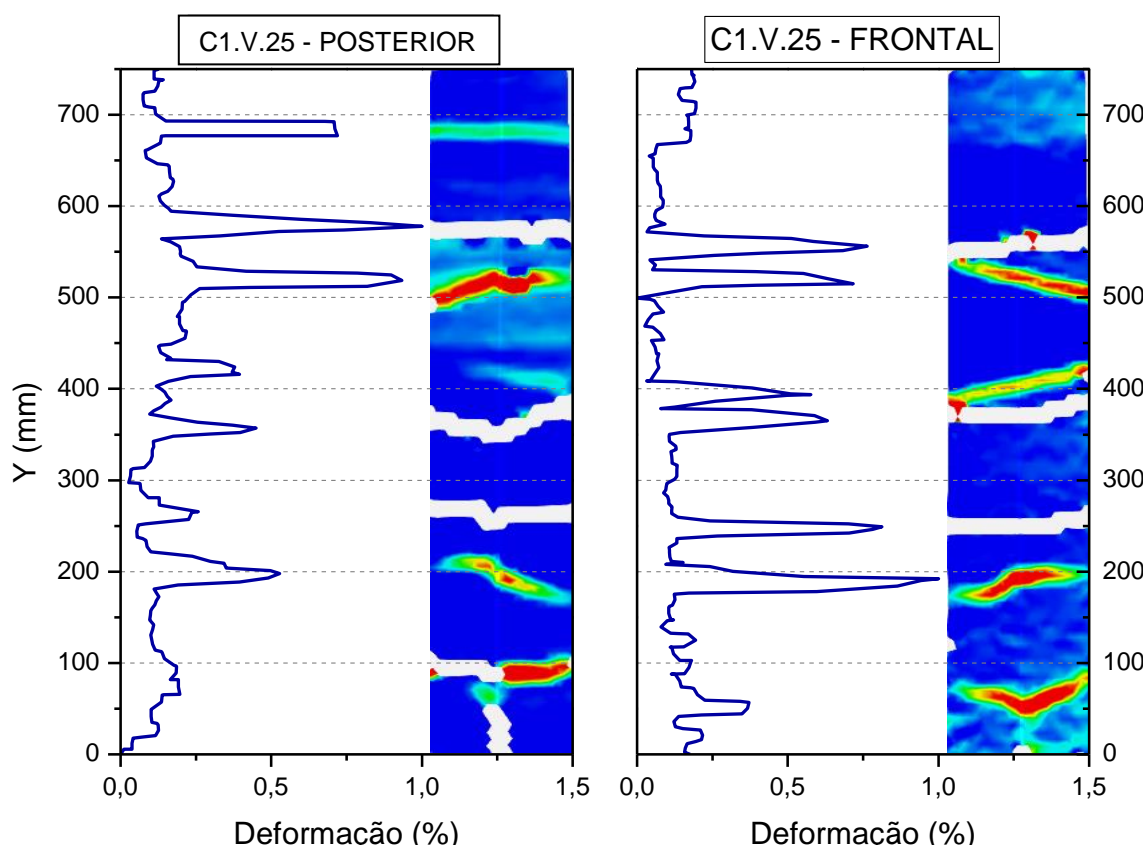
Figura 79. Curva força x deformação com DIC do grupo C1.V.25.



Fonte: Elaboração Própria.

O grupo C1.V.25 apresenta uma múltipla fissuração até o limite de deformação de 1%, com comportamento similar em ambas as faces, como pode ser visto na Figura 80. No entanto, apresenta fendilhamento na extremidade inferior, como mostrado na Figura 80.

Figura 80. Seção transversal do campo de deformação do C1.V.25.

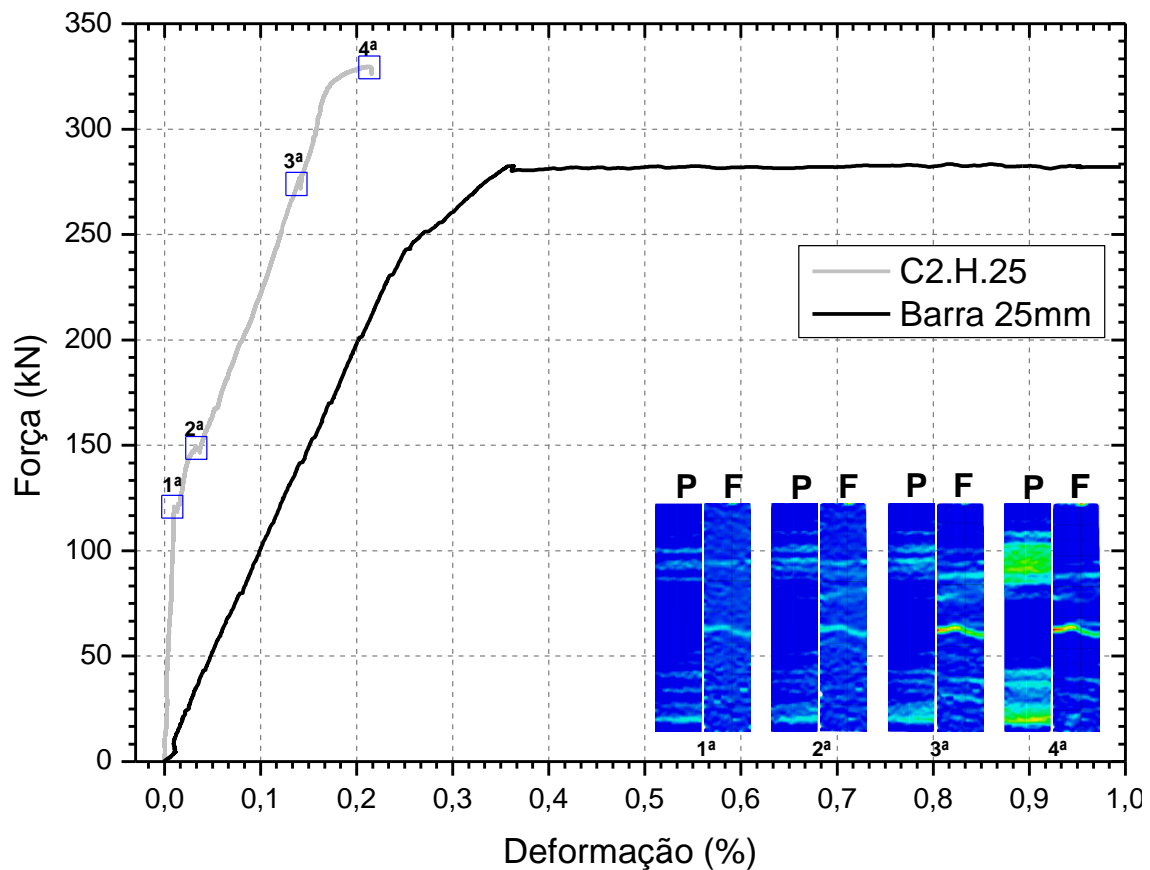


Fonte: Elaboração Própria.

No grupo C2.H.25, há a estricção da barra fora da matriz, e parece não ter deformação relativa entre o aço e o compósito. No entanto, esse grupo apresenta altas cargas em toda fase elástica, com maior tenacidade para a mesma deformação quando comparado com os demais grupos.

O comportamento mecânico relacionado com a correlação de imagem do grupo C2.H.25, é mostrado na Figura 81. Comportamento esse, que é similar ao presente no grupo C2.H.20, com maiores deformações próximas as extremidades na face posterior, e aparentemente sem aparecimento de fissuras a olho nu (ver Figura 88 no item 4.4.3). Com análise do DIC, é possível observar o aparecimento de apenas uma fissura na face frontal, que tem sua progressiva abertura, até ser aliviada pela estricção da barra.

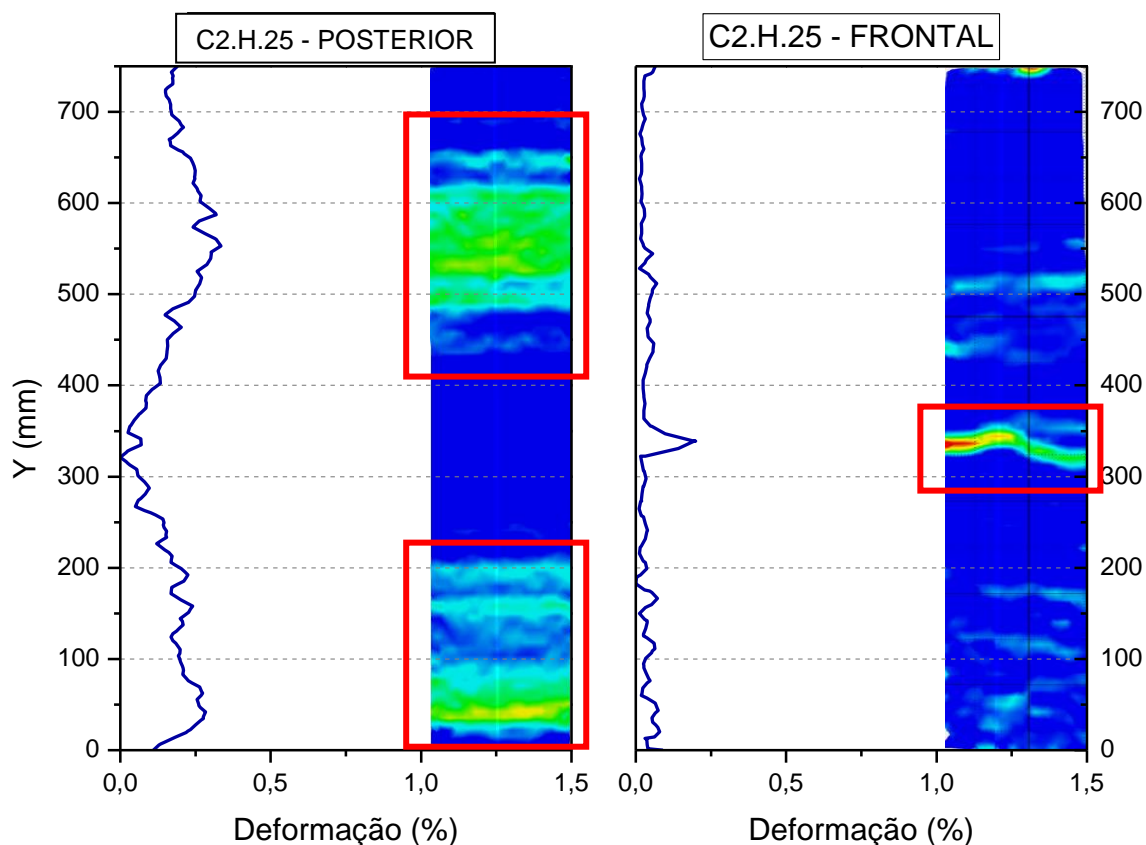
Figura 81. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.H.25



Fonte: Elaboração Própria.

Como citado por Gao et. al. (2020), a concentração de deformações em algumas regiões, ocorre pela distribuição e orientação das fibras no elemento estrutural. Essa distribuição pode provocar uma concentração de tensões não homogênea. Isso, aumenta rigidez da ligação aço-concreto na extremidade do tirante. Dessa forma, na Figura 82, é mostrado nas extremidades da face posterior na altura de 50 e 550 mm (ver indicação das áreas de concentração na Figura 82), as regiões de concentração de deformação, como também é observado na face frontal na altura de 350 mm.

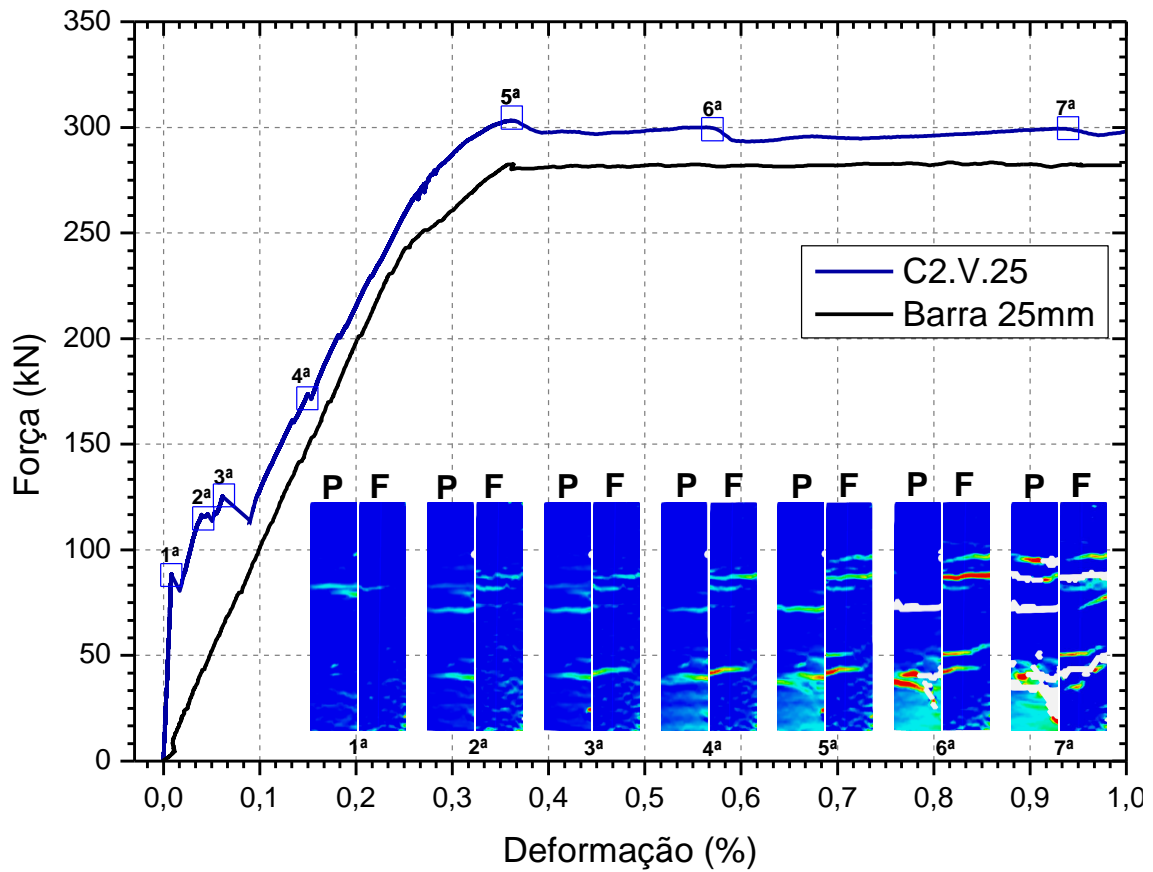
Figura 82. Seção transversal do campo de deformação do C2.H.25.



Fonte: Elaboração Própria.

A superfície de deformação do grupo C2.V.25 é semelhante ao grupo C2.V.20, com início do processo de fissuração nas duas faces de maneira simétrica. No entanto, pela menor área de confinamento na barra de 25 mm (taxa de armadura maior que a barra de 20 mm), a matriz reduz o enrijecimento à tração, e por consequência, tem menor ganho de energia quando comparada a curva apenas da barra de aço. Por esse motivo, observa-se uma maior aproximação, no regime elástico, entre a curva do grupo C2.V.25 com a curva da barra de aço de 25 mm. No regime plástico, o aumento da capacidade de absorção de energia por deformação, o que confirma a propriedade predominante nestes dois grupos, C2.V.25 (Figura 83) e C2.V.20 (ver Figura 61), o que possibilita melhores comportamentos mecânicos no regime plástico do tirante.

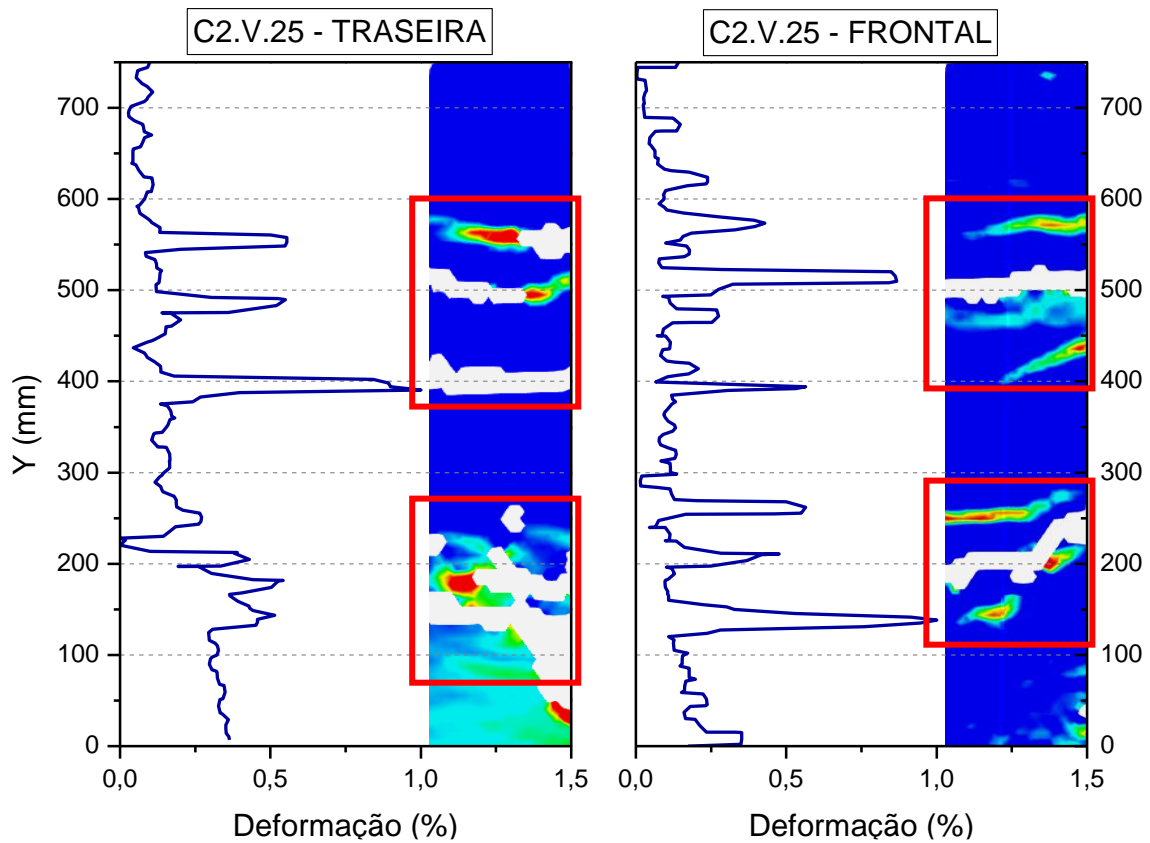
Figura 83. Curva força x deformação com DIC do grupo C2.V.25



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 84, observa-se a simetria nas distribuições de fissura, em duas áreas nos intervalos de 100 a 250 mm e 390 a 550 mm, manifestando uma concentração de tensões.

Figura 84. Seção transversal do campo de deformação do C2.V.25.

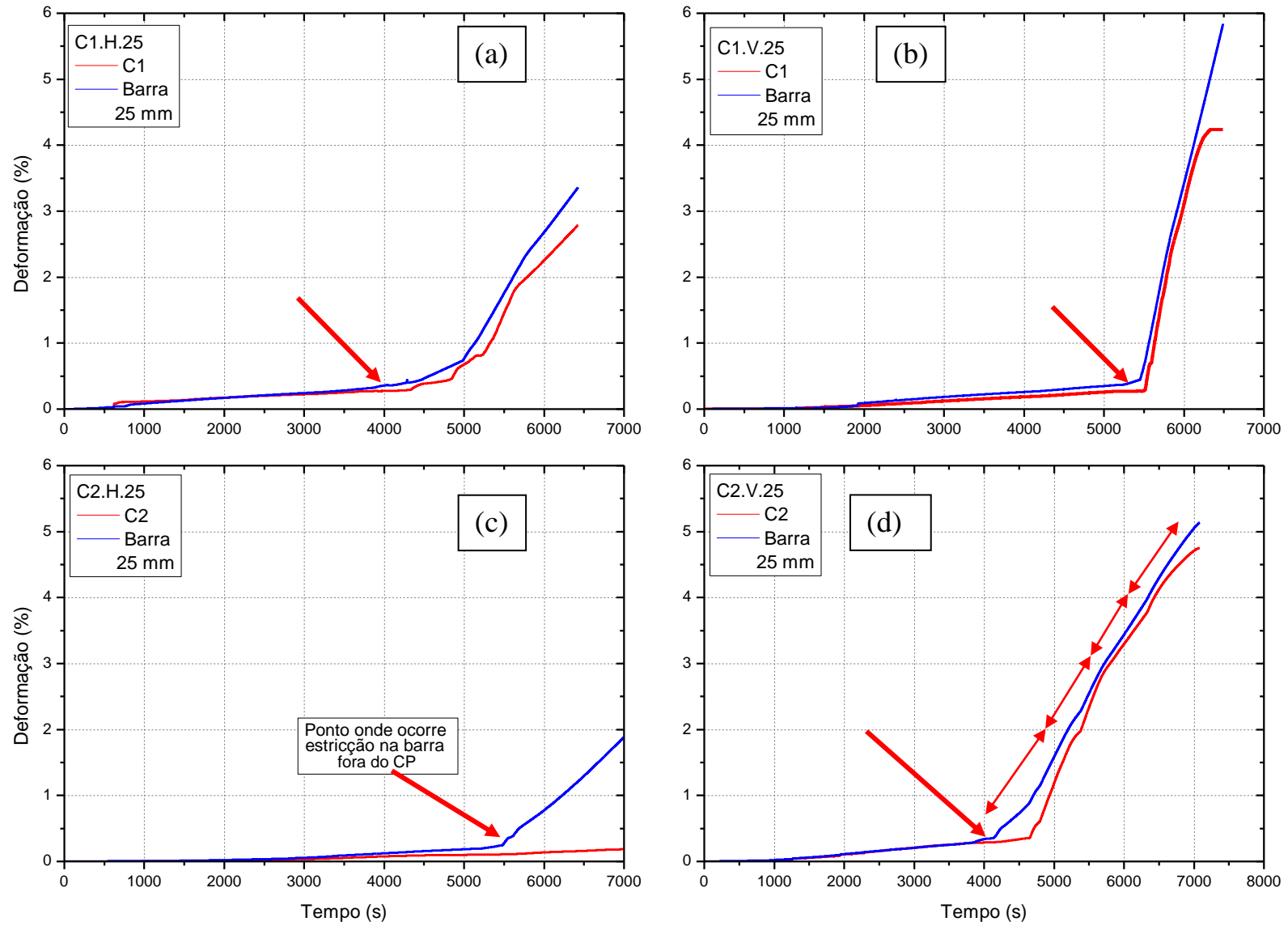


Fonte: Elaboração Própria.

4.4.2 Comportamento aço-matriz

As análises da decoesão entra a barra de 25 mm e os concretos usados, C1 e C2, moldados na vertical e horizontal, são mostradas na Figura 85, através das curvas típicas de deformação x tempo dos ensaios de C1.H.25 (a), C1.V.25 (b), C2.H.25 (c) e C2.V.25 (d).

Figura 85. Curvas típicas de deformação x tempo dos grupos da barra de 25 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

A curva de deformação para o grupo C1.H.25, apresenta início de decoesão a partir da primeira fissura, como indicado pela seta na Figura 85 (a). Dessa maneira, a deformação relativa entre os materiais aumentou, conforme foi surgindo novas fissuras.

No grupo C1.V.25 (Figura 85 (b)), é possível observar que a partir da primeira fissura (ver seta vermelha), as deformações permanece com uma diferença constante de deformação até o final do ensaio. Isso ocorre pela maior homogeneidade da interface de contato da matriz e o aço, que proporciona melhor transferência de tensões, e assim, deformações mais próximas, que talvez não caracterize decoesão.

Na Figura 85 (c), é possível observar a rigidez provocada pela mistura C2 moldada na horizontal (Figura 85 (c)), que intensifica o efeito de confinamento na barra e garante maior proximidade entre as curvas de deformações. Isso acontece até o processo de estrição da barra (Figura 89 no item 4.4.3), provocando o aumento brusco na deformação do aço. A partir desse ponto de estrição, as deformações relativas não são mais consideradas válidas, pois ocorrem fora do trecho de interesse.

É possível observar na Figura 85 (d), após a primeira fissura, decoesão entre a matriz e o aço (ver seta vermelha). A partir desse ponto, aparentemente se dá o início de pontos de aproximação das deformações, provocada pela redistribuição de tensões por meio da aderência, até a abertura de uma nova fissura. Esse processo acontece algumas vezes (como é indicado pelos segmentos das setas na Figura 85 (d)) por dois fatores: o primeiro pela ação das fibras, na região de descontinuidade pela transferência de tensão para matriz; e o segundo pelo maior confinamento, também provocado pelas fibras na redução de propagação de fissuras circunvizinhas a barra. Esse efeito foi observado por Mazaheripour; Barros; Sena-Cruz (2015).

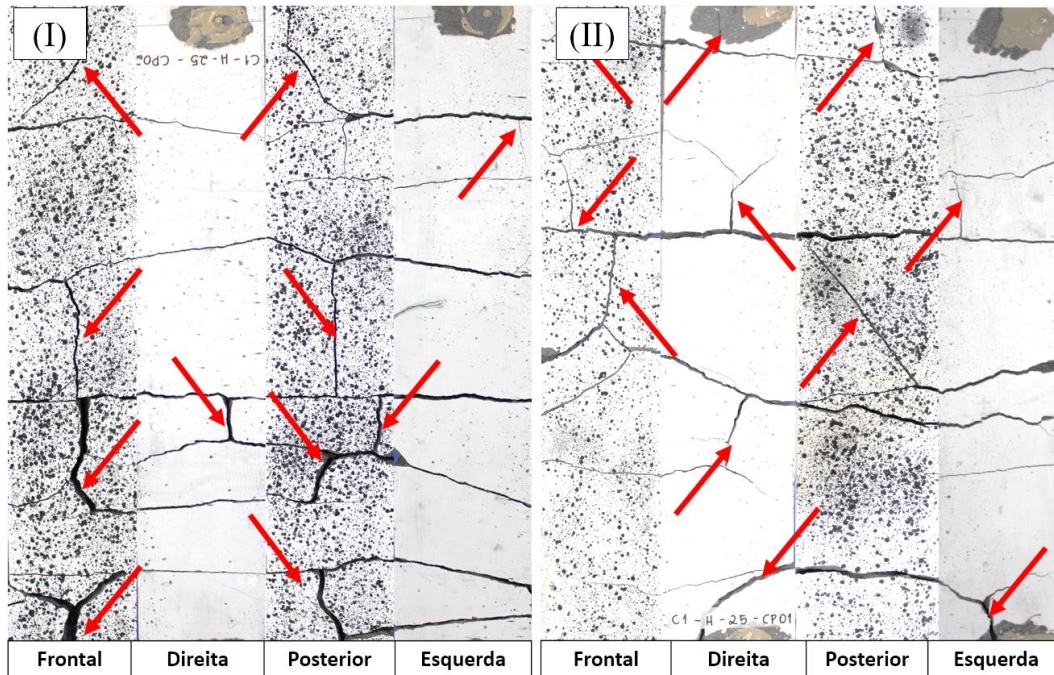
4.4.3 Modo de Fratura

Neste item são apresentados os mapas de fissuração, obtidas pela ordenação da captura das faces frontal, posterior e laterais dos tirantes.

O grupo C1.H.25 apresenta no processo de solitação, fissuras horizontais, com posterior ruptura por fendilhamento (ver Figura 86). Neste grupo, o fendilhamento está presente em todo o comprimento do tirante, inclusive na região central.

Isso mostra que com o aumento da taxa de armadura na seção, houve a potencialização do processo de fendilhamento, o que provocou durante o ensaio o deslocamento das extremidades do tirante, em todas as faces.

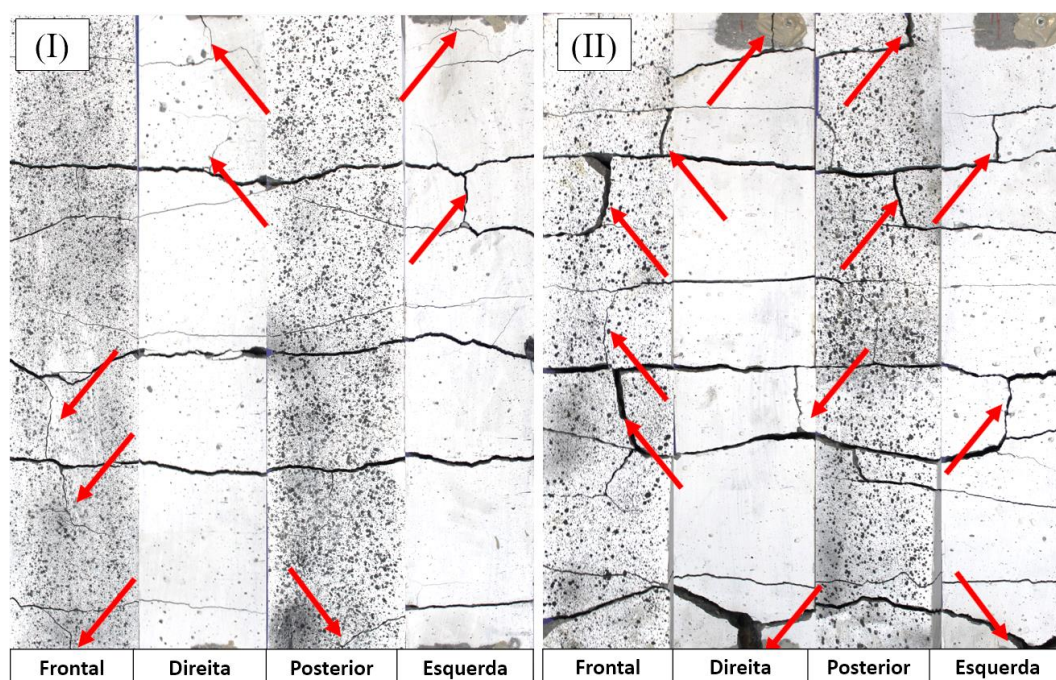
Figura 86. Mapas de fissuras do grupo C1.H.25.



Fonte: Elaboração Própria.

O grupo C1.V.25, de maneira semelhante ao grupo C1.H.25, apresenta modo de fratura à tração, com fissurações passantes pela seção transversal, desde a fase inicial de carregamento. Após iniciasse o processo de fratura por fendilhamento. Porém, quando comparado a Figura 87, dos dois tirantes do grupo C1.V.25, com o mapa de fissuração do grupo C1.H.25, é evidente que há simetria das porções fissuradas para o grupo vertical, como também apresentam distâncias entre fissuras mais equidistantes.

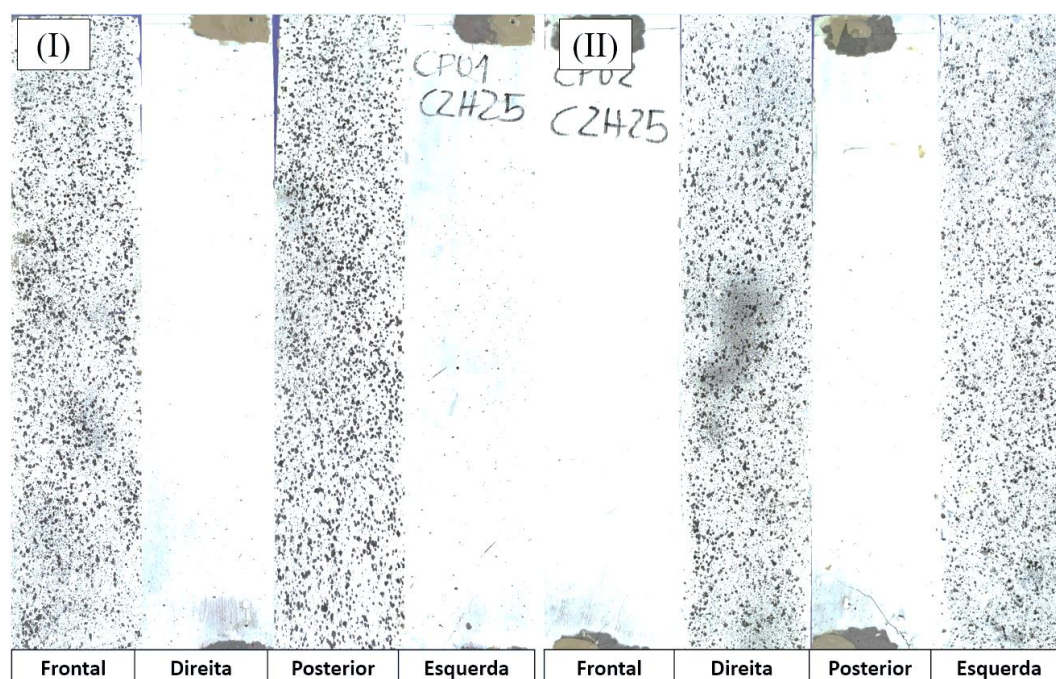
Figura 87. Mapas de fissuras do grupo C1.V.25.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 88, os mapas de fissuras dos tirantes C2.H.25, não apresentam fissuras visíveis, pois neste grupo, só é possível verificar a deformação através da correlação digital de imagem.

Figura 88. Mapas de fissuras do grupo C2.H.25.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 89, é possível visualizar a estrição da barra de 25 mm, que ocorreu fora do comprimento de análise do material compósito.

Figura 89. Estrição da barra de 25 mm no grupo C2.H.25.

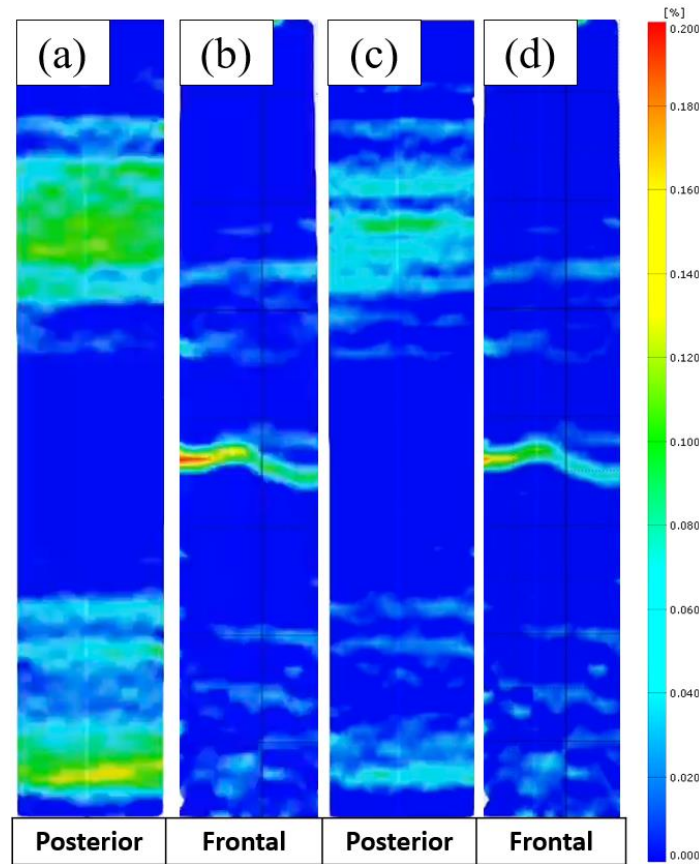


Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, foi observada uma recuperação elástica do tirante C2.H.25, após o ensaio de tração axial e posterior liberação das pinças da máquina de ensaios universais. Isso foi possível durante a verificação das imagens através do DIC, e comprovado pelas imagens mostradas na Figura 90.

Nessa Figura, mostra-se quatro superfícies de deformação, com (a) e (b) referentes a deformação máxima do ensaio de tração da face posterior e frontal, e as faces (c) e (d), que foram obtidas após o descarregamento do tirante. Aparentemente o aço não atingiu o escoamento, porém a matriz foi danificada e por mais que se observou uma recuperação elástica, ainda ficou danificação permanente.

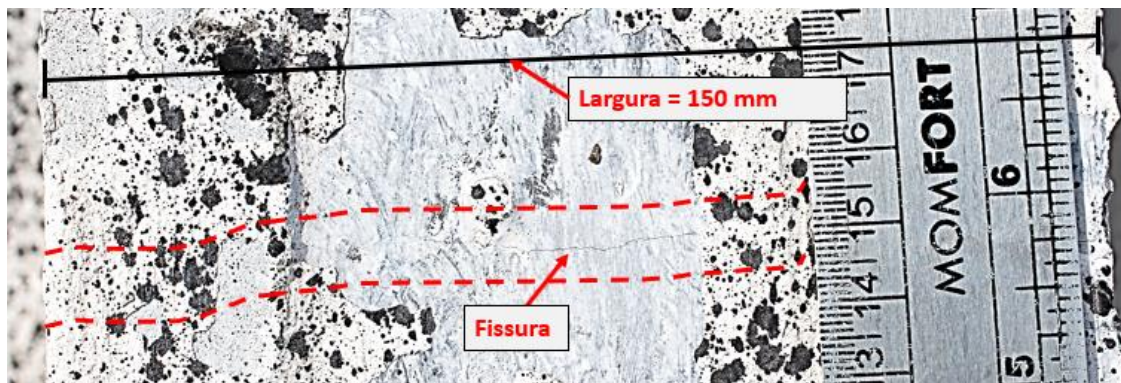
Figura 90. Comportamento elástico do tirante do grupo C2.H.25, após finalização do ensaio.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 91, é mostrado a fissura da face frontal após o descarregamento do tirante C2.H.25, referente ao campo de deformação (d) da Figura 90.

Figura 91. Fissura horizontal do tirante do grupo C2.H.25.

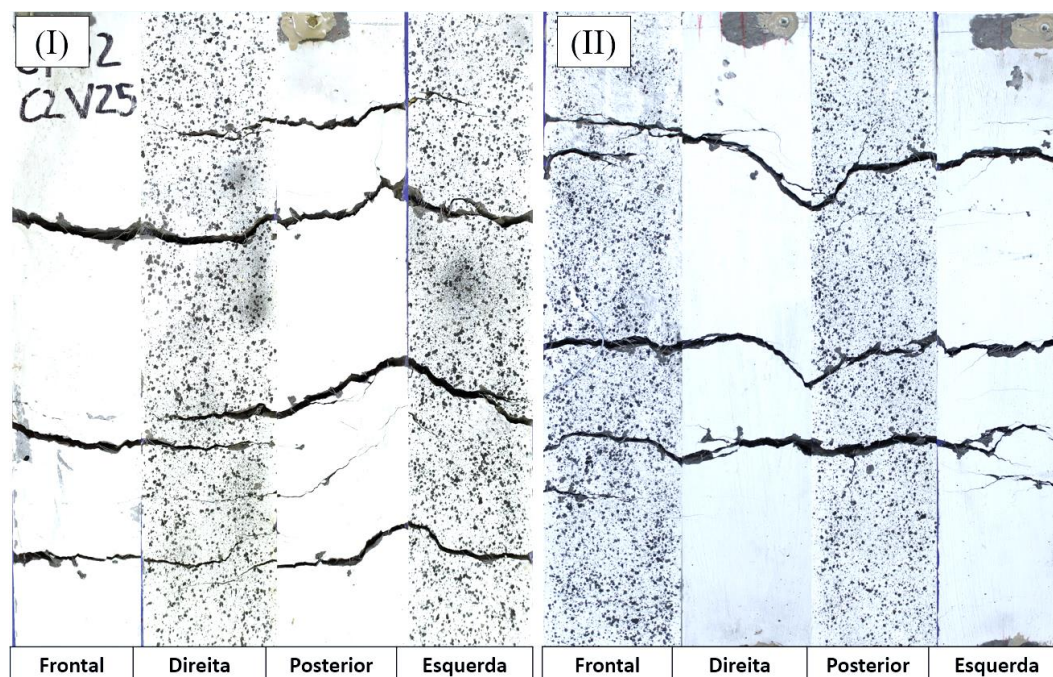


Fonte: Elaboração Própria.

No grupo C2.V.25, o processo de fratura ocorre à tração, em todo comprimento do tirante com simetria entre as faces, como é mostrado na Figura 92.

A ruptura deste grupo ocorre quando a barra de aço inicia o processo de endurecimento, com o aumento na capacidade de carga à tração, em deformações próximas a 6%.

Figura 92. Mapas de fissuras do grupo C2.V.25.



Fonte: Elaboração Própria.

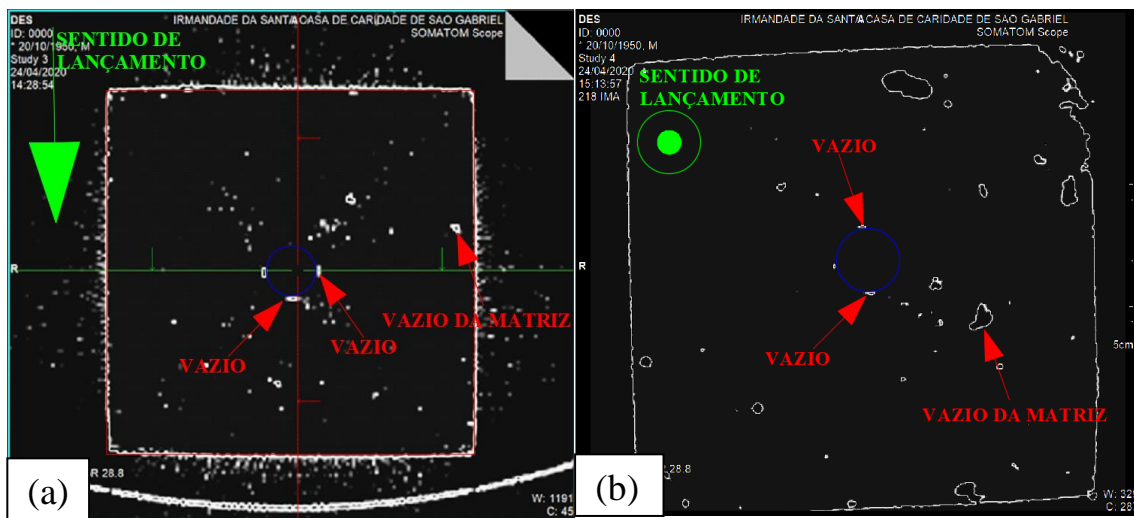
4.5. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A dispersão das fibras, bem como a presença de vazios, foi analisada em dois tirantes pertencentes ao grupo contendo barra de 20 mm através da tomografia computadorizada.

Na Figura 93 é possível observar uma imagem de uma amostra moldada na horizontal e outra na vertical. Os vazios são representados com a cor branca, como também os limites da seção transversal. Na Figura 93 (a) é possível observar um vazio na região inferior barra de aço, e também abaixo das nervuras longitudinais presentes nas laterais da barra de aço. Da mesma forma, na Figura 93 (b), moldada na vertical, é possível observar a existência de pequenos vazios abaixo da nervura transversal da barra de aço.

Como foi possível observar no desmembramento da matriz na moldagem horizontal (Figura 57) e na moldagem vertical (Figura 63). Isso mostra que a presença de vazios causados pelo sentido de moldagem, não é alterado com a adição de fibras a matriz. Por fim, isso demonstra que a região de interface entre o concreto e a barra de aço é bastante complexa, com regiões de melhor e outras de pior aderência, que possivelmente influenciam no comportamento estrutural de um elemento.

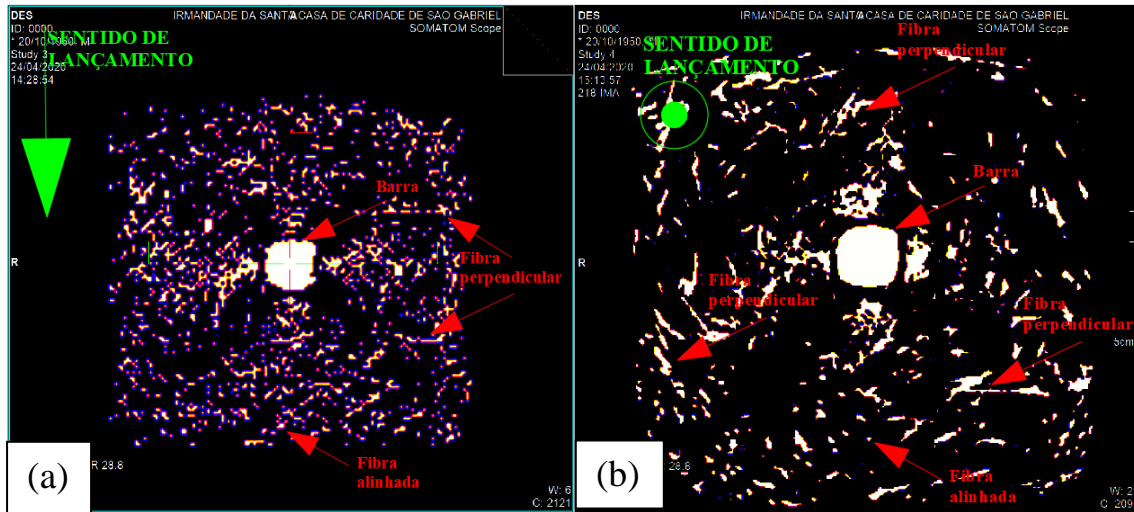
Figura 93. Vazios observados na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 94 é possível visualizar na cor branca com um contorno em azul as fibras e barra de aço na seção transversal do tirante: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical. Assim, quando a imagem da fibra é representada por um ponto, significa que a fibra está alinhada paralelamente a barra de aço. Portanto, fica claro na Figura 94 (a) que em sua maioria, as fibras estão alinhadas paralelamente ou parcialmente em relação a barra de aço, que neste caso estão alinhadas na direção do carregamento imposto. Por outro lado, na Figura 94 (b) observa-se que as fibras estão em sua maioria perpendiculares a direção da barra. Dessa forma, é possível concluir que as fibras nessa condição não atuam como pontes de transferências de tensões, uma vez que elas estão perpendiculares a ação da força de tração no tirante.

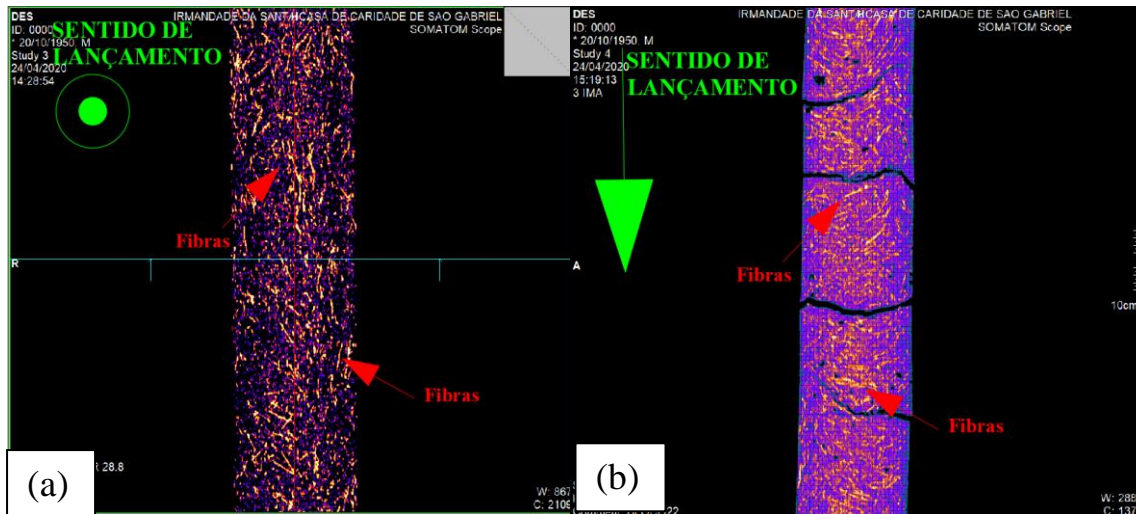
Figura 94. Distribuição das fibras na seção transversal: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical.



Fonte: Elaboração Própria.

Essa distribuição de orientação das fibras nos dois tirantes, fica mais evidente quando analisadas nas imagens no corte longitudinal, mostrados na Figura 95 (a) e (b). em que se verifica a orientação das fibras, que está em sua predominância na direção diagonal e transversal ao sentido de lançamento no tirante C2.V.20 (Figura 95 (b)). No corte longitudinal do tirante C2.H.20 (Figura 95(a)), as fibras apresentam também orientação diagonal e transversal ao sentido do lançamento, porém neste caso essa orientação é alinhada à direção da sollicitação, resultando em um melhor desempenho à tração uniaxial.

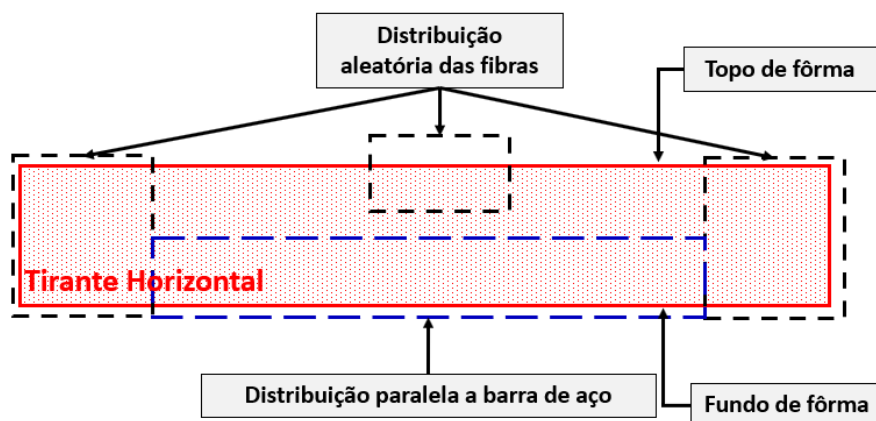
Figura 95. Distribuição das fibras na seção longitudinal dos tirantes: (a) moldado na horizontal e (b) moldado na vertical.



Fonte: Elaboração Própria.

A distribuição das fibras pela análise tomográfica, mostrou estar relacionada à direção do lançamento. Assim as fibras tendem a se orientar sempre na direção perpendicular ao lançamento. Isto ajuda a entender o modo de fratura com o sentido de moldagem, como também a semelhança no mecanismo de fratura, das barras de 20 e 25 mm. Para os grupos verticais, a melhor distribuição de fissuras é proporcionada pela distribuição das fibras seguirem preponderantemente uma orientação perpendicular em relação ao lançamento e, neste caso, à direção do carregamento. A ação das fibras no grupo horizontal também tem orientações perpendiculares ao lançamento, mas que agora ficam na direção paralela ao carregamento, que se somam ao reforço primário, e geram um comportamento mais resistente à tração, com maior rigidez de contato. No entanto essa distribuição não é uniforme, e apresenta perturbações na sua orientação e distribuição localizadas em algumas zonas do tirante, como é mostrado na Figura 96. O que justifica o comportamento diferente entre as faces posterior e frontal do grupo C2.H.20 e C2.H.25.

Figura 96. Zonas de orientação das fibras no tirante.



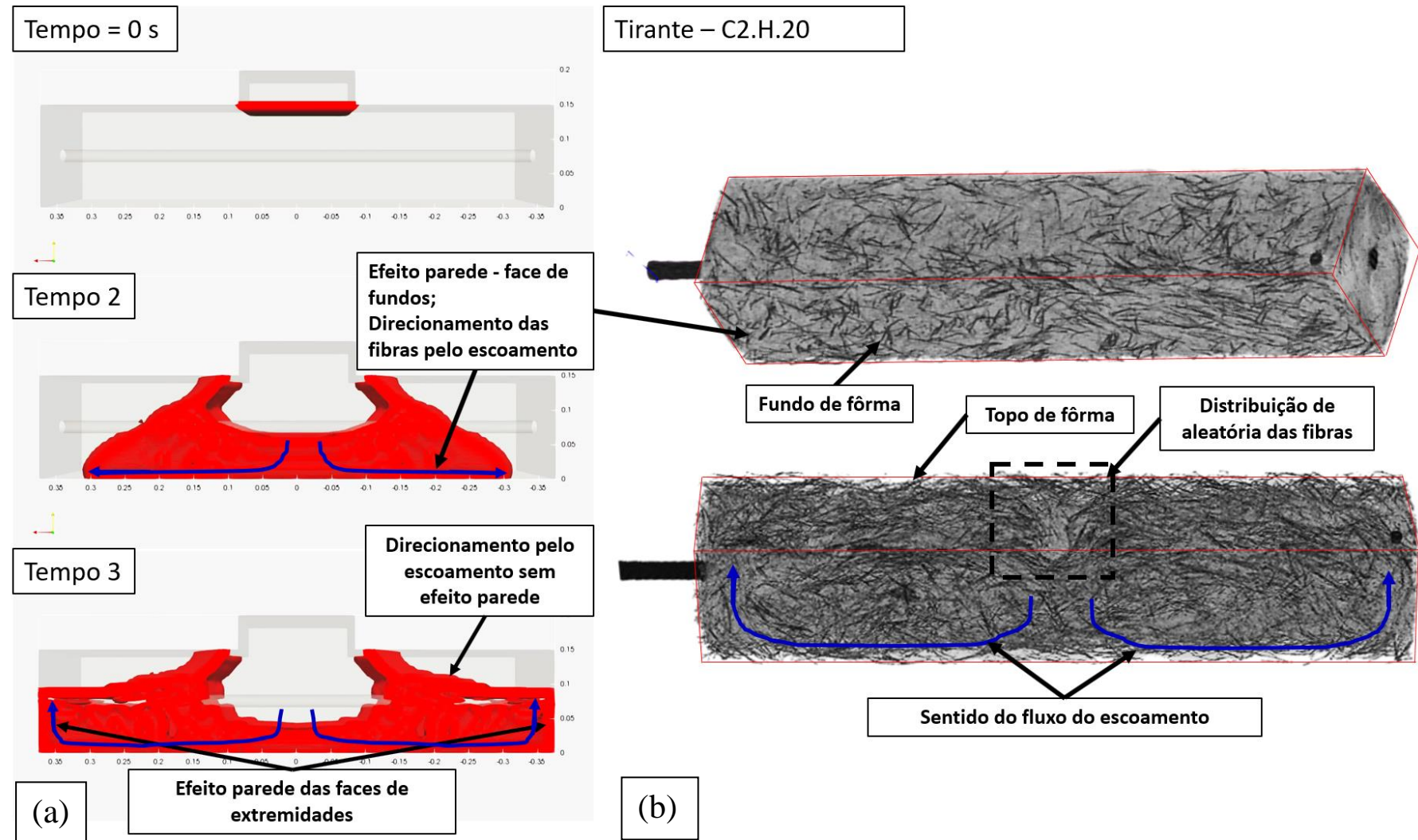
Fonte: Elaboração Própria.

Essas zonas são formadas desde o início do lançamento, onde a mistura ao entrar em contato com a fôrma direciona as fibras no sentido paralelo as faces laterais e do fundo (efeito parede). O que impossibilita o posicionamento perpendicular da fibra a essas faces (ver Tempo 2 - Figura 97(a) e Figura 97 (b)). Além disso, a tensão cisalhante de escoamento, força o direcionamento das fibras até as extremidades da fôrma.

Após o escoamento e preenchimento do fundo da fôrma, a mistura sofre influência das faces de extremidade, que provocam o direcionamento perpendicular e aleatório ao sentido da barra nos dois extremos do tirante (ver Tempo 3 - Figura 97(a)). E por último, é reduzido a quantidade de mistura adicionada, até o preenchimento total da fôrma. Essa redução, possui menor velocidade de lançamento, e menor volume de entrada, o que acaba não produzindo direcionamento da fibra na região central no topo da fôrma, como pode ser visto na Figura 97 (b).

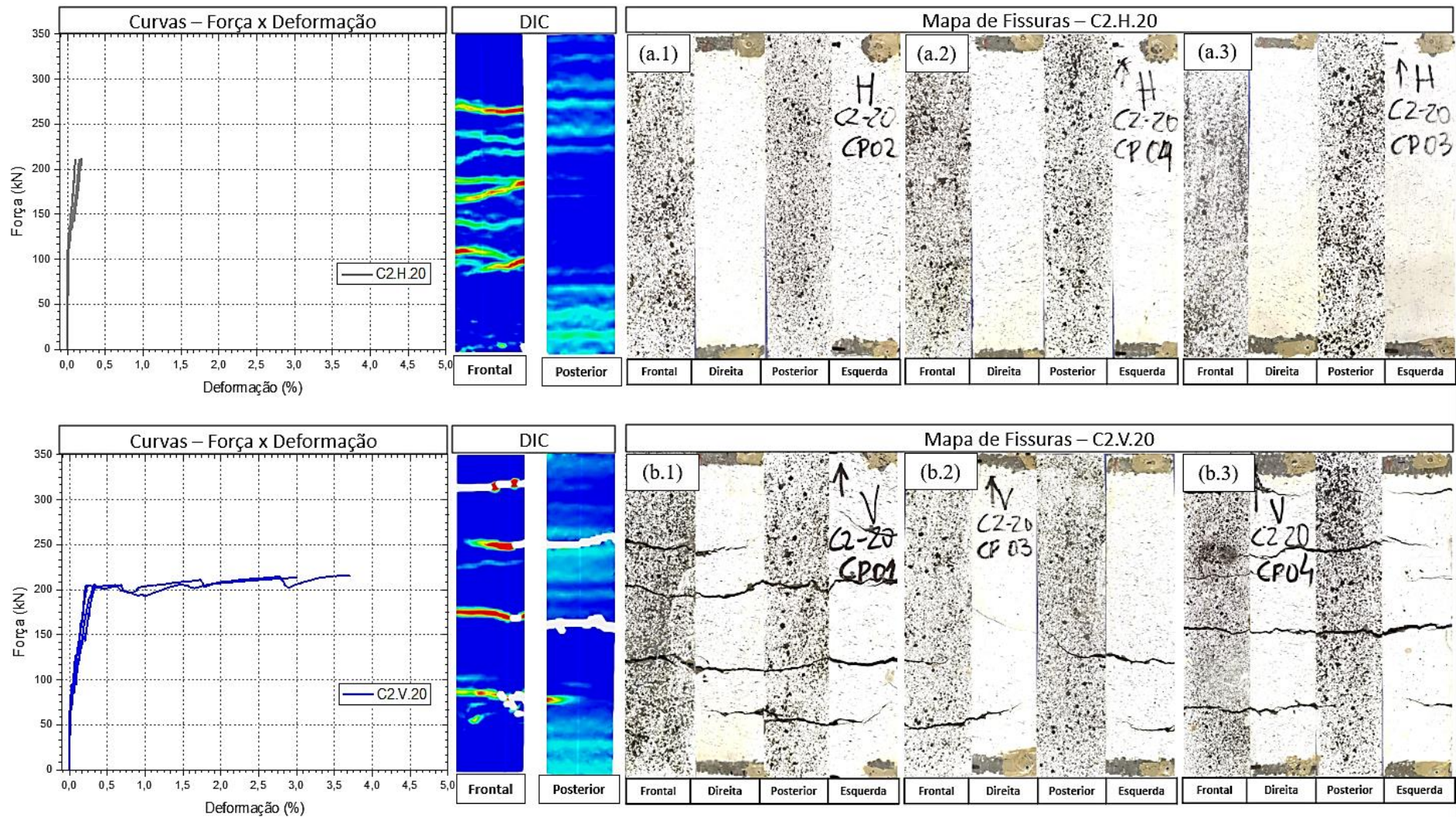
O resultado desse processo, bem como a repetibilidade do comportamento das matrizes com fibra moldados na horizontal, é mostrado pela correlação da curva força x deformação dos tirantes de barra de 20 mm, com o campo de deformação e dos mapas de fissuras, na Figura 98, onde os tirantes (a.1), (a.2) e (a.3) são do grupo C2.H.20, e os tirantes (b.1), (b.2) e (b.3) são do grupo C2.V.20. Na Figura 99, são mostrados a correlação dos tirantes com barra de 25 mm, onde (a.1), (a.2) e (a.3) são tirantes do grupo C2.H.25, e (b.1), (b.2) e (b.3) são tirantes do grupo C2.V.25. Por fim, é possível validar o comportamento mecânico e à fratura pela influência do sentido de moldagem, mesmo diferindo a taxa de armadura.

Figura 97. Orientação das fibras no lançamento na fôrma (a) e imagens da tomografia da dispersão de fibras no tirante C1.H.20 (b).



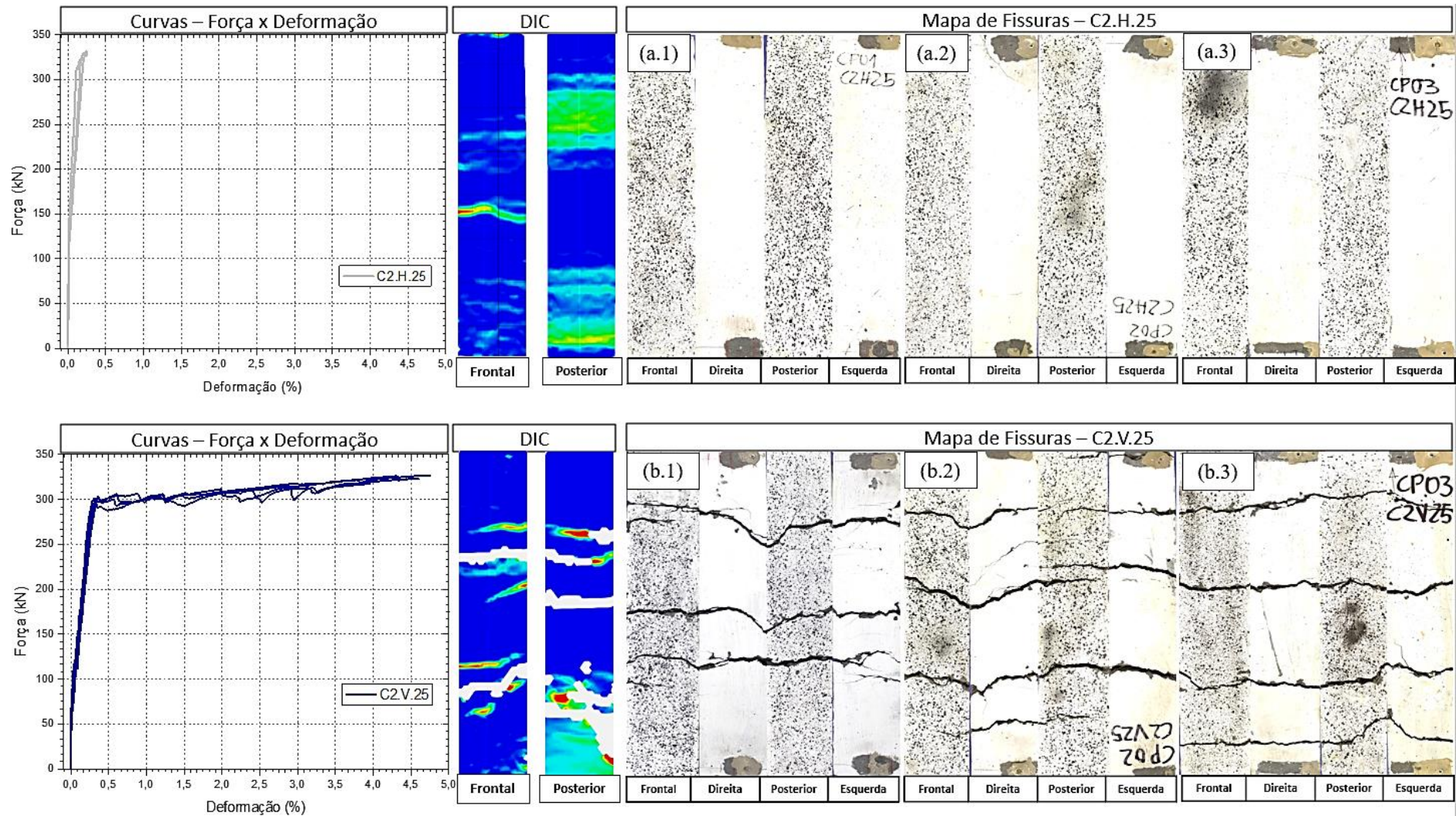
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 98. Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.20 (a) e C2.V.20 (b).



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 99. Curva força x deformação, DIC e mapa de fissura para os grupos C2.H.25 (a) e C2.V.25 (b).



Fonte: Elaboração Própria.

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos foi possível concluir alguns comportamentos característicos que são descritos a seguir.

Nos ensaios reológicos, para a matriz com e sem fibra, os resultados confirmaram as propriedades necessárias para classificá-las como concreto autoadensável. Para o espalhamento da matriz C2, houve a diminuição na trabalhabilidade, que é referente a redução da viscosidade plástica que as fibras provocam na mistura, quando comparado a matriz C1. As misturas são classificadas, de acordo com a norma NBR 15823:2010, como SF1 com espalhamento entre 550 e 650 mm, a viscosidade plástica é VS2, com menor possibilidade de segregação, e com índice de estabilidade visual de IEV0.

No comportamento a compressão, a mistura C1 apresentou resistência de 66,3 MPa, e módulo de elasticidade de 37,98 GPa. Essa mistura tem comportamento frágil durante o ensaio, com rompimento brusco e explosivo. Entretanto, a mistura C2, tem comportamento modificado pela adição das fibras, com resistência à compressão de 77,89 MPa, e módulo de elasticidade de 29,71 GPa, com comportamento dúctil de rompimento, com maior tenacidade, que fornece ao espécime boa integridade após o ensaio.

No que se refere aos resultados da anisotropia, causada na matriz pelo sentido de moldagem no concreto autoadensável, pode-se concluir através da observação do processo de fissuração analisado pelo DIC, que na moldagem vertical, a interface de ligação entre aço-concreto tem maior homogeneidade, e apresenta menos falhas devido a menor presença de vazio, promovendo, assim, uma maior área de interface para transferência de tensões de aderência, o que possibilita melhor enrijecimento à tração no tirante. Esse mecanismo resultou na formação de fissuras que atravessam a seção transversal. Para a moldagem horizontal, esse mecanismo é alterado pela presença de vazios na região inferior da barra, que diminuem a capacidade de aderência dessa região, o que resultou em menores resistência de aderência. Para o grupo sem fibras nominado de concreto C1, tanto com barra de 20 mm como de 25 mm, resultou na formação da primeira fissura na face posterior do tirante. Essa assimetria de fissuras, vai se compatibilizar apenas no final do regime elástico. A fratura por fendilhamento ocorre na moldagem na vertical próximo ao escoamento, pela falta de confinamento adequado. Essa, situação foi potencializada quando analisado o grupo de moldagem na horizontal, que além de possuir falta de confinamento adequado, apresenta diferença no

comportamento da interface superior e inferior, o que ocasiona fratura por fendilhamento para menores deformações.

O mecanismo de transferência de tensões é melhorado com a incorporação de fibras ao concreto, que além de possibilitar a transferência de tensões de tração em regiões de descontinuidade (fissuras), garantiu um melhor confinamento da barra, dificultando a formação de fissuras iniciais de cisalhamento na matriz, e posterior rompimento das bielas de compressão. Na moldagem vertical com fibras do concreto C2, houve um aumento da absorção de energia por deformação, quando comparado a matriz C1 (sem fibras), e ainda houve aumento no enrijecimento à tração do tirante com fibras no regime plástico, tanto para os tirantes dos grupos da barra de aço de 20 mm, quanto para os tirantes da barra de aço 25 mm. Isso possibilita afirmar que, na moldagem vertical a adição de fibra na mistura, proporcionou ganhos na capacidade de absorção de energia por deformação e maior resistência, de forma solidária entre o aço-compósito. Na moldagem horizontal da matriz C2, o comportamento assíncrono do campo de deformação, foi verificado na face frontal e posterior do tirante pela análise de correlação digital de imagem, onde foi observado formação de fissuras apenas na face frontal, sem a formação na face posterior. Isso foi provocado pela distribuição das fibras na matriz, que apresentam orientação paralela ao sentido da sollicitação e também pelo efeito parede que alinha as fibras no fundo da forma. Essa orientação é provocada pelo escoamento da mistura em estado fresco na fôrma, e possibilitou ao estado endurecido da matriz, alta rigidez e resistência à tração e baixas deformação do tirante. Isso foi observado para ambos os grupos de barras na moldagem horizontal com fibra. Os aumentos de forças de primeira fissura, em relação a mistura sem fibras foram de até 91,91%, para a barra de aço de 20 mm, e 106,92% para a barra de aço de 25 mm. A rigidez nos grupos C2.H.20 e C2.H.25, foi tão grande que ocorre estrição da barra fora da matriz.

Essa distribuição das fibras fica evidente com análise da tomografia, que no grupo C2.V.20 apresentam maior número de fibras diagonais e paralelas a seção transversal, bem como, maior aleatoriedade na direção longitudinal, que possibilitou aumento na capacidade da matriz de absorção de energia elástica. No entanto, esse grupo, não atingiu índices de rigidez como presente no grupo C2.H.20, que além de ter fibras em diversas orientações, tem em sua maioria fibras paralelas a barra de aço, atuando como agente de reforço primário. Os comportamentos dos dois tirantes podem ser extrapolados para os tirantes dos grupos da barra de 25 mm, pela boa repetibilidade e aproximação de

comportamento entre nos grupos de mesmo sentido de moldagem e mistura. Ainda foi possível observar através da tomografia a presença de vazios sob as regiões inferiores das barras de aço. Esses vazios foram observados abaixo da barra de aço e das nervuras longitudinais, para os tirantes moldados na horizontal. Para os tirantes moldados na vertical, observou vazios abaixo das nervuras transversais, porém em menor quantidade, comparado aos moldados na horizontal.

A redução na área de confinamento da barra, provocada no grupo de 25 mm, em relação ao grupo de 20 mm, gerou o processo de fendilhamento em regiões centrais do espécime, provocando deformações bruscas, pela ruptura da aderência nas áreas de fissuras da mistura C1. No entanto, na mistura C2, confirma-se a melhoria do confinamento, pela adição de fibras, evitando a formação de fratura por fendilhamento, pelo modo de fratura por arrancamento da barra nas extremidades do tirante de forma dúctil.

Por fim, a anisotropia pelo sentido de moldagem existe, para matrizes sem fibras (C1), pela localização dos vazios na interface da matriz e o reforço. Assim como, para matriz com fibras (C2), que além de possuir o mesmo sistema de vazios da matriz C1, também tem a anisotropia formada pela orientação das fibras, pelo sentido de lançamento. Fato comprovado pelas imagens de tomografia e pela correlação digital de imagem.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Outros estudos devem ser realizados para avaliar esse mecanismo de interface, em concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço, para que possam junto com essa pesquisa fornecer um acervo consolidado para o mecanismo de transferência de tensões entre aço-matriz. Dessa maneira, foram citados alguns itens para pesquisas futuras, como:

- Analisar a porosidade da interface de ligação de tirante moldados na horizontal e vertical, através do ensaio de porosimetria por infusão de mercúrio;
- Realizar a simulação numérica com base nos ensaios desta pesquisa;
- Realizar o ensaio de arrancamento (*pullout*) em cubos com diferentes áreas de envoltória, de concreto autoadensável de alta resistência com fibras;
- Realizar ensaios cíclicos em tirantes em diferentes sentidos de moldagem;
- Verificar a influência da geometria das nervuras das barras de aço no ensaio de arrancamento;
- Analisar o confinamento a partir de elementos prismáticos de diferentes dimensões, nos ensaios à flexão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR. 15823: Concreto auto-adensável. **Rio de Janeiro**, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-3: Concreto auto-adensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-4: Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-5: Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-9776. Agregados- Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Método de Ensaio. 1986.

ABRISHAMI, Homayoun H.; MITCHELL, Dennis. **Influence of Steel Fibers on Tension Stiffening**. ACI - Structural Journal. v. 94, p. 769-776, 1997.

ALBITAR, M.; ALI, MS Mohamed; VISINTIN, P. **Evaluation of tension-stiffening, crack spacing and crack width of geopolymer concretes.** Construction and Building Materials, v. 160, p. 408-414, 2018.

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.

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

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.

BANGASH, M. Y. H. (1989). **Concrete and concrete structures: numerical modeling and applications.** Barking: Elsevier science publishers ltd., 687 p., ISBN: 1-85166-294-4.

BANGASH, M. Y. H. **Concrete and concrete structures: Numerical modelling and applications.** 1989.

BARBOSA, M. P.; COSTA, O. J.; SILVA, L. M.; SALLES, F. M. (2004). **Concreto autoadensável: avaliação da aderência aço-concreto através dos ensaios de determinação do coeficiente de conformação superficial das barras de aço.** Volume II – Construções em concreto. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Florianópolis, Brasil, 14-18 de agosto de 2004, Anais, Editores: Ivo J. Padaratz & Túlio N. Bittencourt, ISBN: 85-98576-02-6, Florianópolis, Trabalho CBC0167, p. II.484-II.497.

BARBOSA, M. P.; SILVA, L. M.; MENOSSI, R. T.; SALLES, F. M.; RÓS, P. S. (2004). **A influência da adição de finos basálticos nas características reológicas e mecânicas dos concretos auto-adensáveis.** In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON,

Florianópolis, Brasil, 14-18 de agosto de 2004, Anais..., Editores: Ivo J. Padaratz & Túlio N. Bittencourt, ISBN: 85-98576-02-6, Florianópolis, Trabalho CBC0162, p. II.7-II.22.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Ancoragem e emenda de armaduras**. Bauru/SP, Departamento Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

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

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. Crc Press, 2006.

BISCHOFF, Peter H. **Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete**. Journal of materials in civil engineering, v. 15, n. 2, p. 174-182, 2003.

BISCHOFF, Peter H. **Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete**. Journal of materials in civil engineering, v. 15, n. 2, p. 174-182, 2003.

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.

BUTTIGNOL, TET *et al.* **Design of reinforced concrete beams with steel fibers in the ultimate limit state**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 5, p. 997-1024, 2018.

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

CASTRO, C. M. (2002). **Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 155 p.

CEB, Bulletin d'Information n.89 *apud* FUSCO (1995).

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.

CONGRO, Marcello *et al.* **Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach.** Composites Part B: Engineering, p. 106958, 2019.

CUNHA, Vitor MCF; BARROS, Joaquim AO; SENA-CRUZ, J. M. **An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 1, p. 64-76, 2011.

DA SILVA, Romulo Danilli. **Estudo da aderência aço concreto em pilares mistos preenchidos.** Dissertação de Mestrado; Escola de Engenharia de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2006.

DALCIN, Jarbas Bressa. **Avaliação do potencial do uso da sílica de casca de arroz obtida através da queima controlada como substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos autoadensáveis.** Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brazil 2016.

DANCYGIER, Avraham N.; KATZ, Amnon. **Bond over direct support of deformed rebars in normal and high strength concrete with and without fibers.** Materials and structures, v. 45, n. 1-2, p. 265-275, 2012.

DANIN, Alice Ribeiro. **Estudo da aderência entre concreto e armadura: análise da influência das fibras de aço.** Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Goiás, Goiás, Brazil 2010.

DE CASTRO, Clayton Moreira. **Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DENG, F. *et al.* **The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling**. *Composite Structures*, v. 206, p. 693-712 (2018).

DYBEL, 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.

DYBEL, 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.

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. 83-23, 1983.

EUROCODE 2 (1992). **Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings**. Brussels, CEN.

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

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.

FUSCO, P.B. **Estruturas de concreto – Fundamentos do projeto estrutural**. 1.ed. São Paulo, EDUSP/McGraw-Hill do Brasil, 1976.

FUSCO, P.B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo, Editora 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.

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.

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.

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.

KANG, Su-Tae; KIM, Jin-Keun. **Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution.** Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p. 57-65, 2012.

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

LAMEIRAS, Rodrigo; BARROS, Joaquim AO; AZENHA, Miguel. **Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC).** Cement and Concrete Composites, v. 59, p. 60-76, 2015.

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.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado.** 1.ed. Rio de Janeiro, Interciência. v.1. 1977.

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

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço.** COPPE/UFRJ, 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço.** COPPE/UFRJ, 2011. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MARANGON, E.; MARTON, L. F. M.; SOARES, E. L.; MENDES, G. G.; MARTINS, R. P.; SILVA, D. M. G.; **Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz produzida por combustão em leito fluidizado**. 55º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, Gramado, RS. 2013.

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.

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.

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.

NEMECEK, J., KABELE, P., BITTNAR, Z., ‘**Nanoindentation based assessment of micromechanical properties of fiber reinforced cementitious composite**’, in M. Di Prisco, R. Felicetti and G.A. Plizzari (eds) *Fibre Reinforced Concrete – BEFIB*, Proc. RILEM Symposium, PRO 39, RILEM, Bagnoux, France. p. 401–410, 2004.

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.

OESCH, Tyler; LANDIS, Eric; KUCHMA, Daniel. **A methodology for quantifying the impact of casting procedure on anisotropy in fiber-reinforced concrete using X-ray CT**. *Materials and Structures*, v. 51, n. 3, p. 73, 2019.

QI, Jianan *et al.* **Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles**. *Construction and Building Materials*, v. 191, p. 764-774, 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.

REHM, G. AND ELIGEHAUSEN, R. **Bond of Ribbed Bars under Repeated Loads,** Report 291, German Institute for Reinforced Concrete, Berlin, 1979.

REHM, G.; ELIGEHAUSEN, R. **Einfluss von dauerlast und ermüdungsbeanspruchung auf das rissverhalten von stahlbetonbauteilen unter ubernoiegender biege beanspruchung.** (1973)

RIBEIRO, Jose Luis Duarte. **Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas.** 1985.

RILEM DRAFT RECOMMENDATION. 50-FMC. **Committee fracture mechanics of concrete. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams.** Matériaux et Constructions, vol. 33, p. 347-351, 1985.

RILEM-CEB-FIP. **Bond test for reinforcing steel: 2. Pull out test.** Materials and Structures, vol. 3, n° 15, 1970, p. 175-178.

RILEM-FIP-CEB. **Bond test for reinforcing steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7II-128): Tentative recommendations.** RILEM Journal Materials and Structures, Vol. 6, No. 32, Março-Abril, 1973, p. 96-105.

RILEM-FIP-CEB. **Bond test for reinforcing steel: pull-out test, recommendation RC 6.** Concrete Reinforcement Technology, Paris, França, 1983.

ROSÁLES, Y. M. **Análise numérico-experimental do comportamento da aderência aço-concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2016.

ROSÁLES, Y. M.; DURAND, R.; BEZERRA, L. M. **Análise Numérico - Experimental**

Do Comportamento Da Aderência Aço - Concreto. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, n. June, p. 11, 2017.

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.

SANTOS, D. dos. **Análise de vigas de concreto armado utilizando modelos de bielas e tirantes.** 195p. 2006. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

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

SÓLYOM, Sándor; BALÁZS, György L. **Influence of FRC on bond characteristics of FRP reinforcement.** In: 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. 2016. p. 271-278.

STIEL, Tobias; KARIHALOO, B.; FEHLING, Ekkehard. Effect of casting direction on the mechanical properties of CARDIFRC. In: **Proceedings of the International Symposium on Ultra-High-Performance Concrete, Kassel, Germany.** p. 481-493, 2004

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.

TASSIOS, T.P.; YANNOPOULOS, P.J. **Analytical studies on reinforced concrete members under cyclic loading based on bond stress-slip relationships.** ACI Journal, v.78, n.3, p.206-16, Maio, 1981

TOLEDO FILHO, R. D.; MARANGON, E. ; SILVA, F. A. ; MOBASHER, B. . **Effect of steel fibers on the tensile behavior of self-consolidating reinforced concrete blocks.** In: FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications, 2014, Montreal - Canada. Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications. Canada: ACI-fib Workshop Proceedings, 2014. p. 609-617.

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.

TRTIK, P, BARTOS, P.J.M., ‘**Micromechanical properties of cementitious composites**’, Mater. Struct. 32, 1999, 388–393. 28.

VELASCO, R.; MARANGON, E.; ROSA, L. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Estudo Reológico e Mecânico de Concretos Fibrosos Auto-Adensáveis.** In: IBRACON, 2008, Salvador. IBRACON - 50° Congresso Brasileiro do Concreto, 2008. v. 50.

WEI, S., MANDEL, J.A, SAID, S. ‘**Study of the interface strength in steel fibre reinforced cement-based composites**’, J. Amer. Concr. Inst. 83, 1986, 597–605. 27.

YOO, Doo-Yeol; BANTHIA, Nemkumar. **Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review.** Cement and Concrete Composites, v. 73, p. 267-280, 2016.

ZERBINO, R., TOBES, J. M., BOSSIO, M. E., GIACCIO, G. **On the orientation of fibers in structural members fabricated with self-compacting fiber 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.

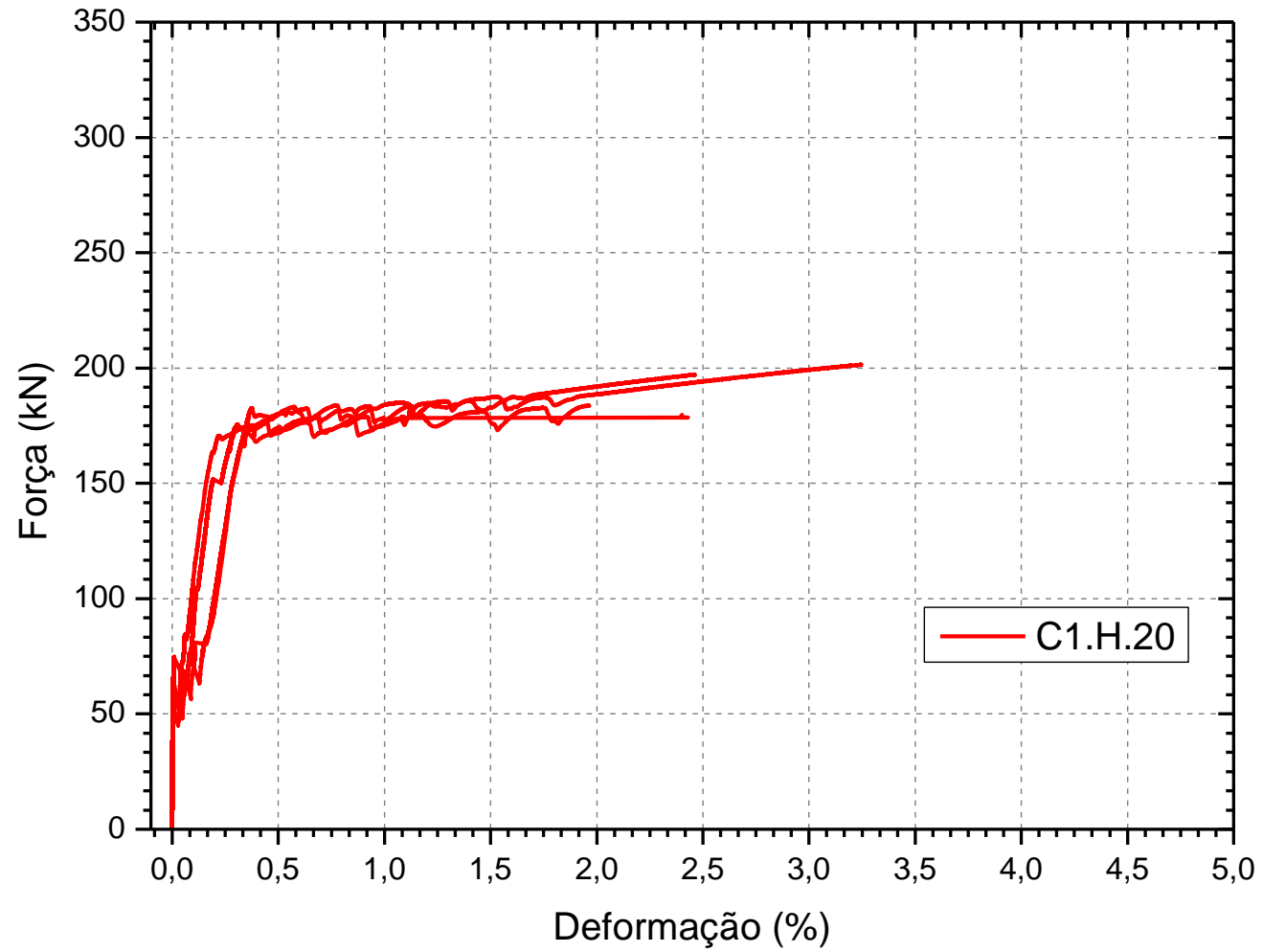
ZHAO, Mingshuang *et al.* **Bond performance of deformed rebar in steel fiber reinforced lightweight-aggregate concrete affected by multi-factors.** *Civil Engineering Journal*, n. 3, 2018.

ŽIRGULIS, Giedrius *et al.* **Importance of quantification of steel fibre orientation for residual flexural tensile strength in FRC.** *Materials and Structures*, v. 49, n. 9, p. 3861-3877, 2016.

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.

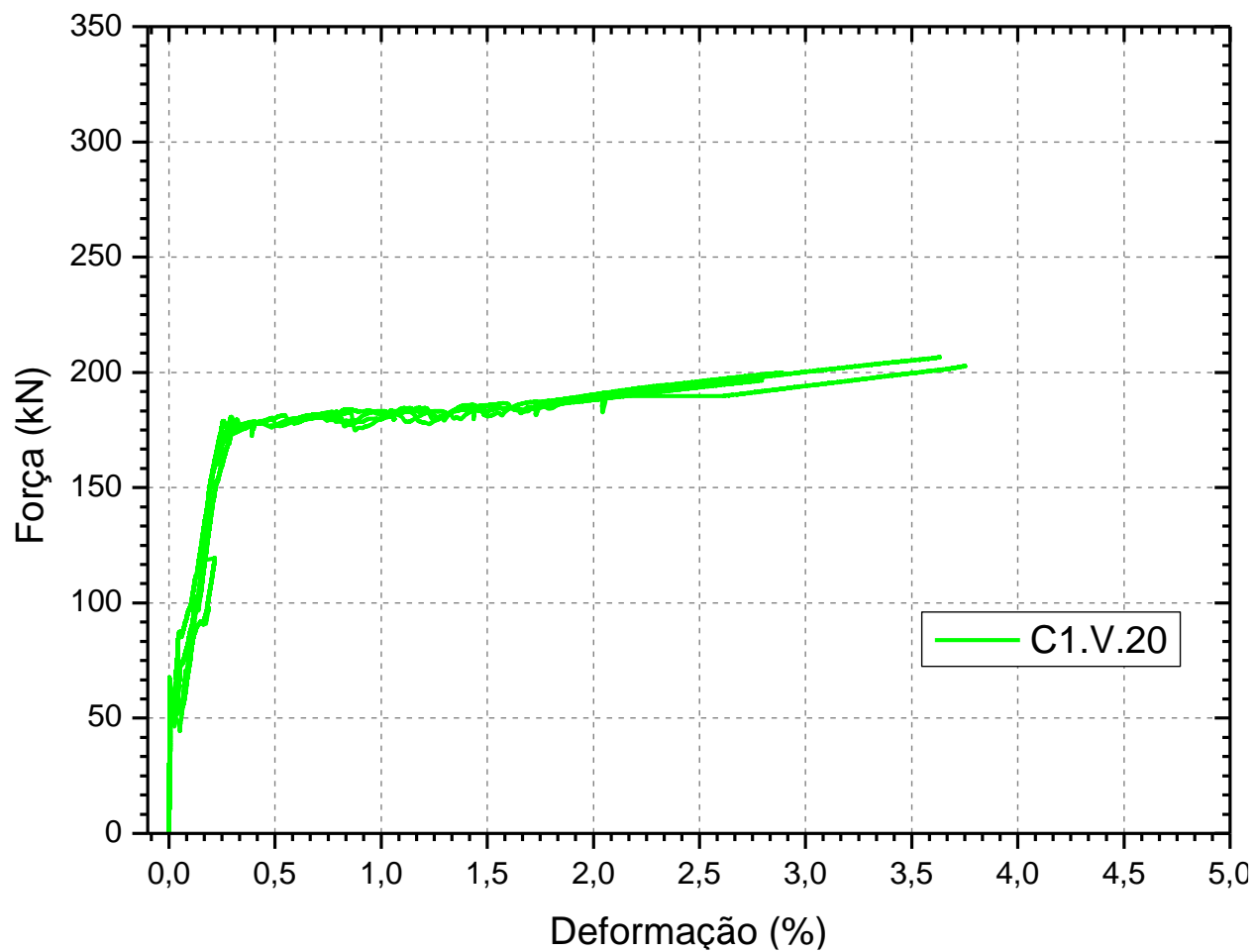
ANEXO A

Figura 100. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.H.20.



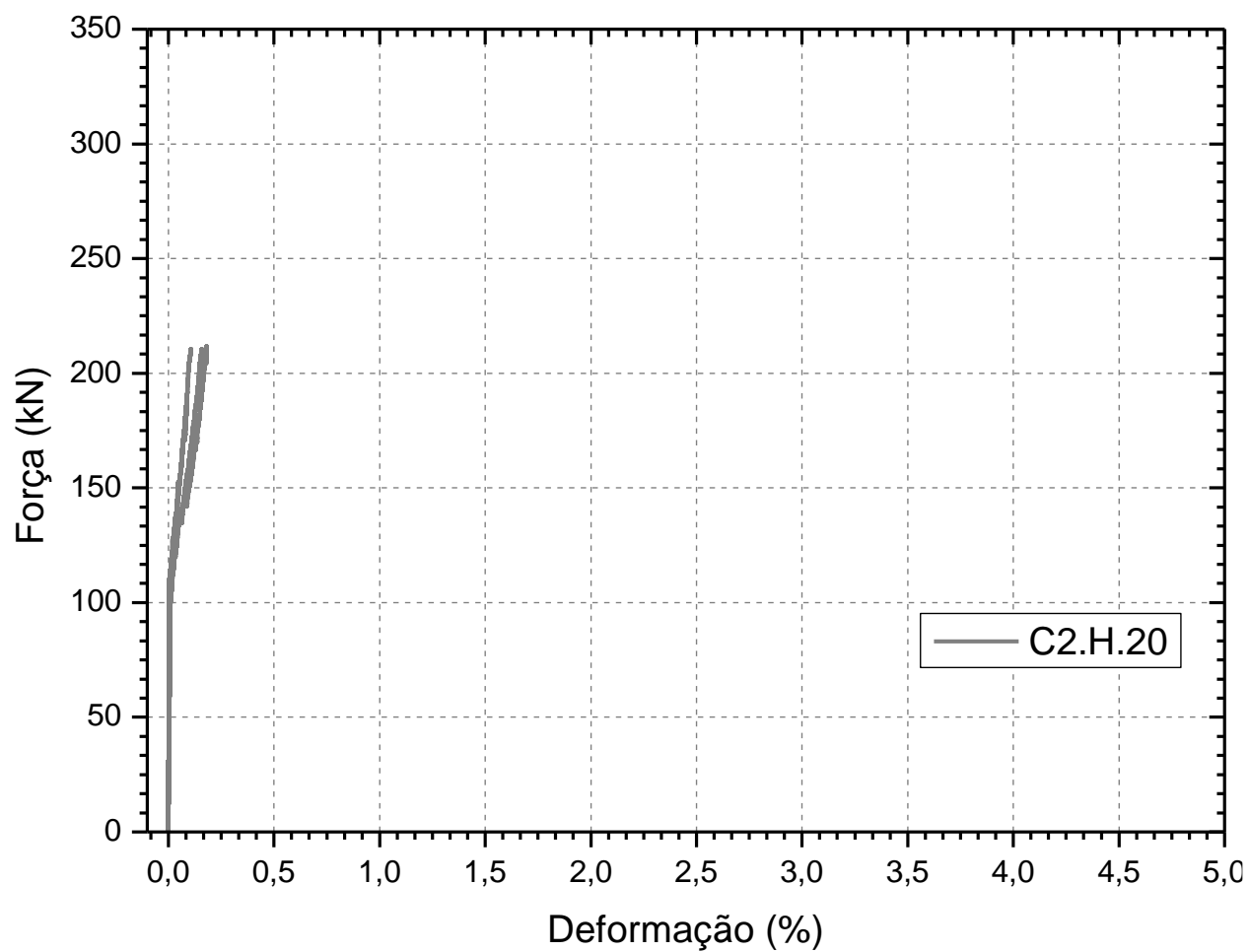
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 101. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.V.20.



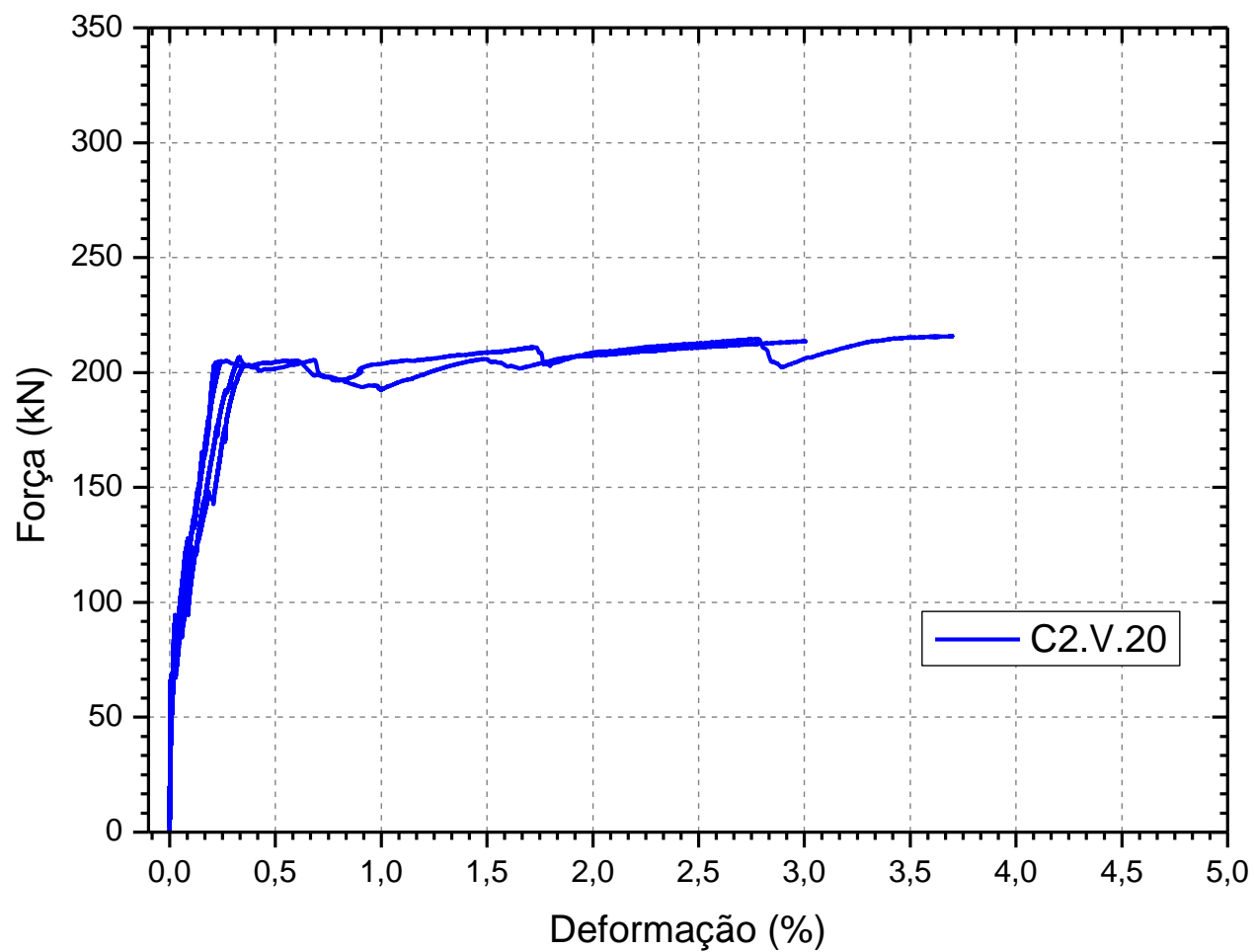
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 102. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.20.



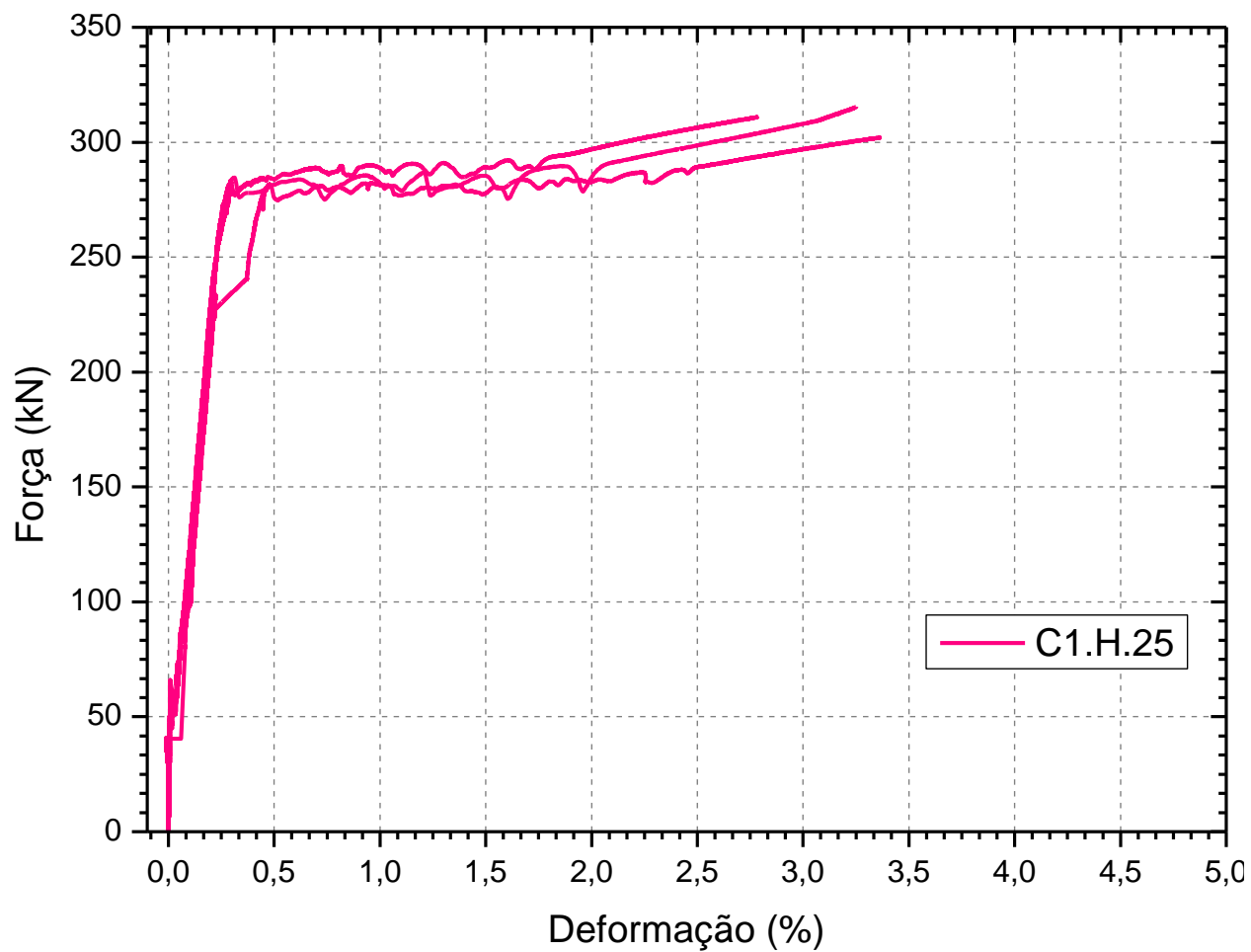
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 103. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.20.



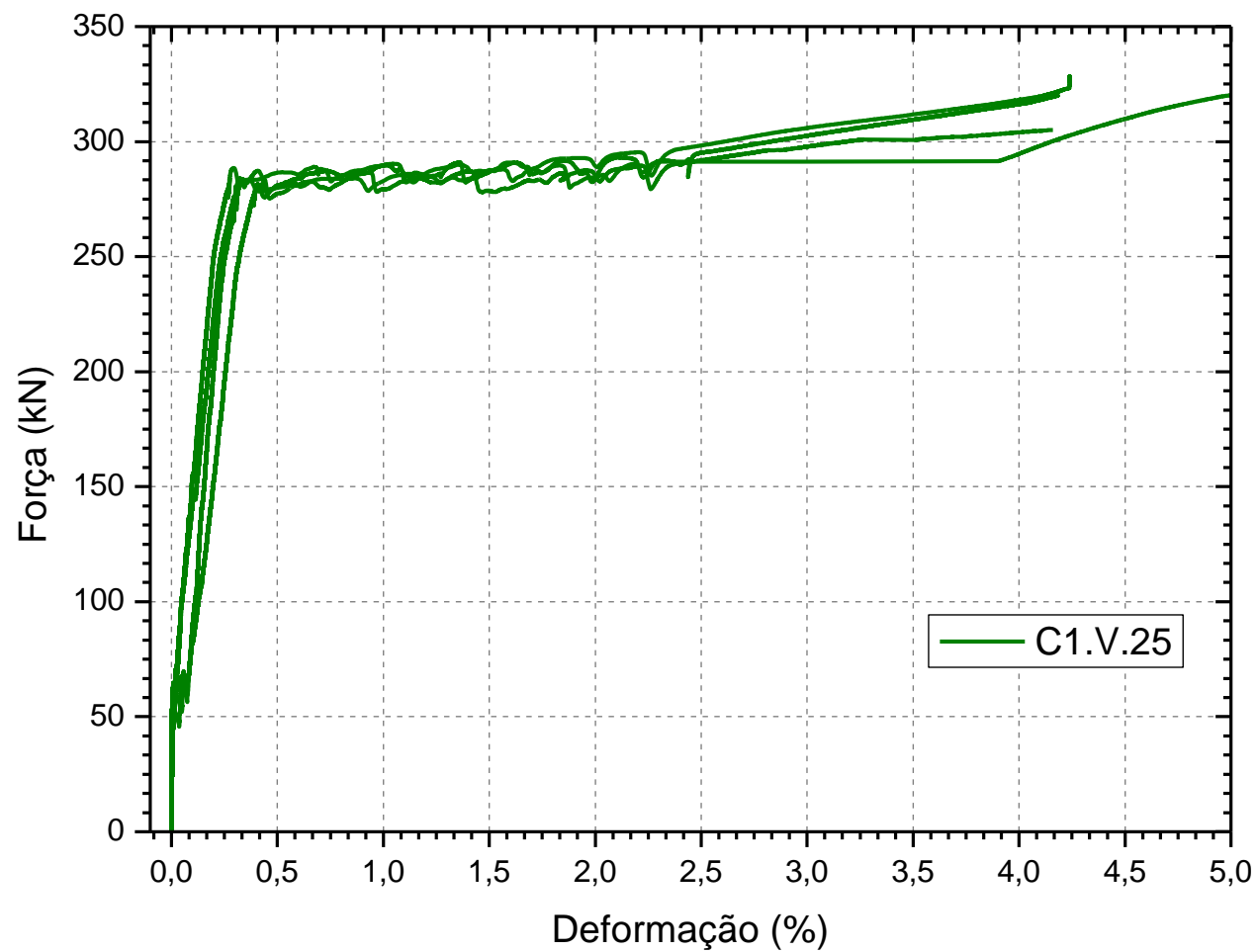
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 104. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.H.25.



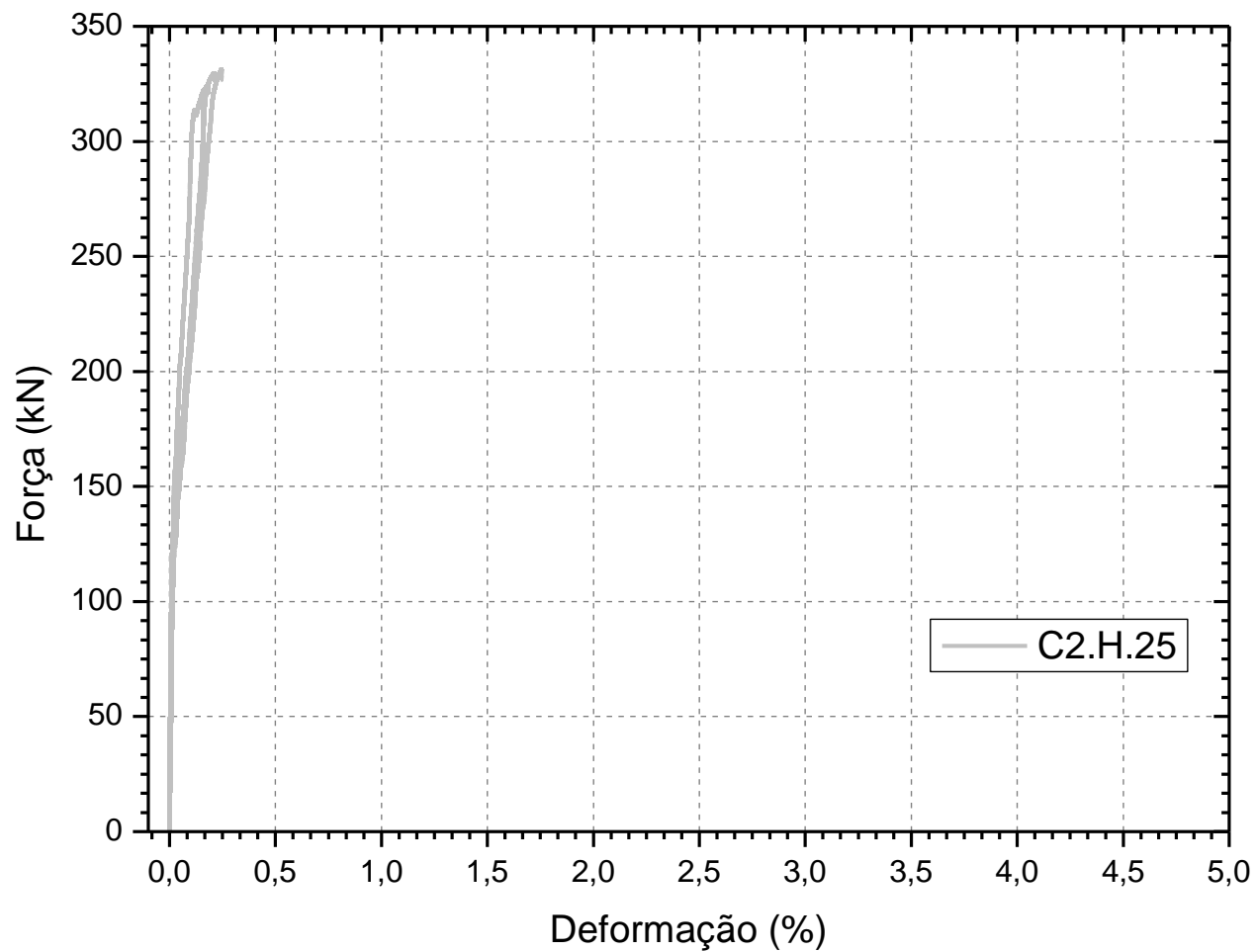
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 105. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C1.V.25.



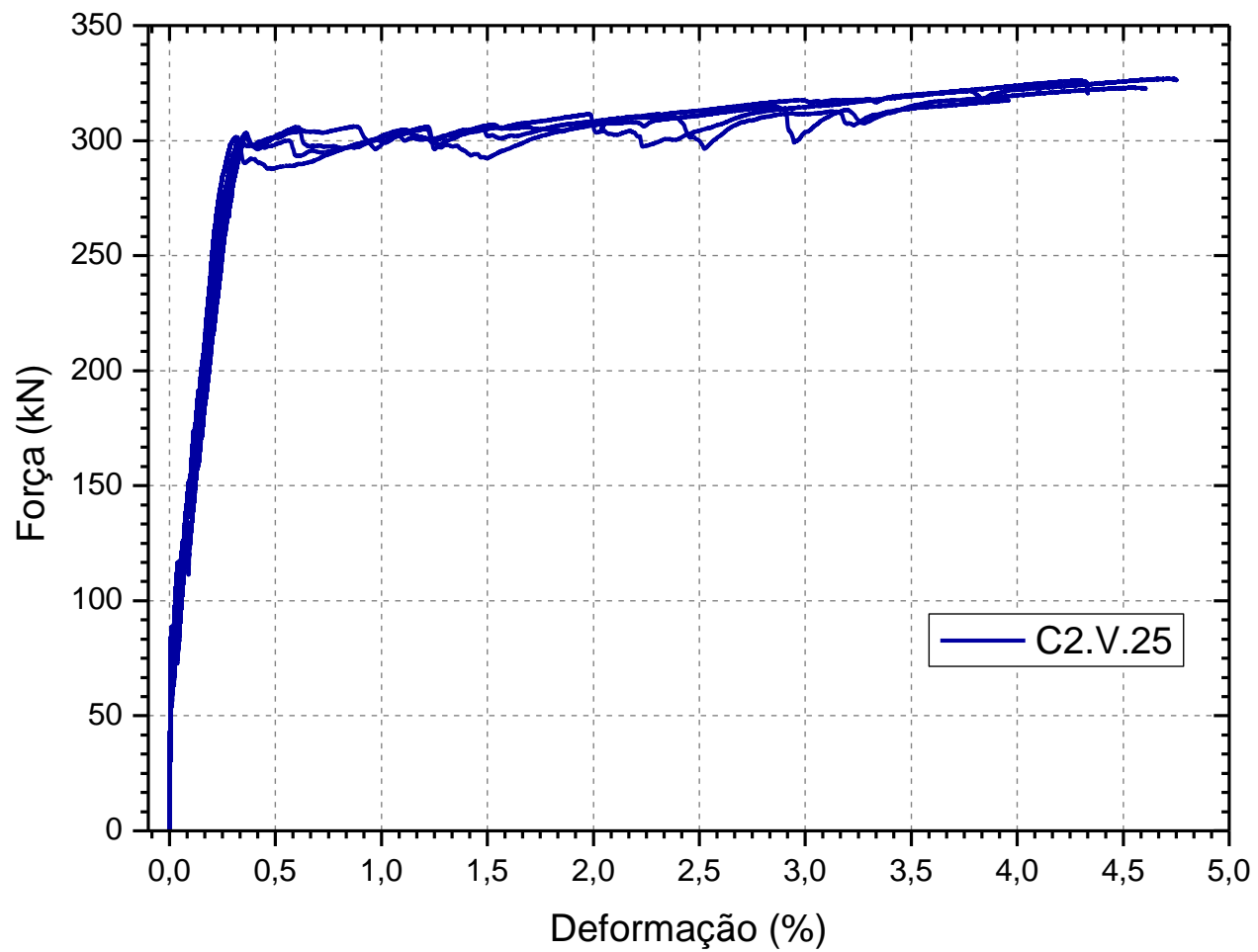
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 106. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.H.25.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 107. Curvas força x deformação no concreto dos tirantes C2.V.25.



Fonte: Elaboração Própria.