

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FELIPE EDUARDO KÜLZER**

**ESTUDO DE TIRANTES PRODUZIDOS COM CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
MOLDADO NA VERTICAL E HORIZONTAL**

**Alegrete  
2020**

**FELIPE EDUARDO KÜLZER**

**ESTUDO DE TIRANTES PRODUZIDOS COM CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
MOLDADO NA VERTICAL E HORIZONTAL**

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

Orientador: Ederli Marangon

Coorientador: Pedro Henrique Omena Jucá

**Alegrete  
2020**

**FELIPE EDUARDO KÜLZER**

**ESTUDO DE TIRANTES PRODUZIDOS COM CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
MOLDADO NA VERTICAL E HORIZONTAL**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de dezembro 2020.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Eng. M.e. Pedro H. Omena Jucá  
Co-orientador  
UNIPAMPA

---

Eng. M.e. Wagner Dambros Fernandes  
IFFar

---

Prof. Dr. Telmo Egnar Camilo Deifeld  
UNIPAMPA

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço, de coração, a todos familiares e amigos, sem exceção, que sempre estiveram presentes, independente das ocasiões, me apoiando, auxiliando, ensinando e nos aprimorando juntos.

Aos colegas do grupo MAEC, que estiveram presente de diversas maneiras ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Em especial ao Guilherme Cocco, Pedro Jucá e professor Ederli Marangon, que além da amizade e momentos de descontração nas inúmeras horas de realização da pesquisa, foram apoiadores e idealizadores dessa pesquisa.

As empresas Iccila, 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.

A CAPES, pela bolsa de iniciação científica que proporcionou e custeou parte da pesquisa.

A todos meu sincero muito obrigado!

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar o mecanismo de transferência de tensões em tirantes submetidos à tração, através do processo de fissuração do concreto autoadensável, moldados com lançamento do concreto no sentido normal e perpendicular à barra de aço. 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 quadrada (15x15 cm). A avaliação do processo de fissuração dos tirantes foi realizada através do uso da correlação de imagens. A tomografia computadorizada foi utilizada para avaliar a dispersão de vazios nos tirantes moldados nos diferentes sentidos. Para a moldagem dos cilindros e tirantes foi utilizado um concreto autoadensável com resistência à compressão de 65MPa. Para caracterização da fluidez, viscosidade plástica e habilidade passante dos concretos autoadensáveis no estado fresco, foram realizados ensaios reológicos utilizando o 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. 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.

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

## ABSTRACT

This research had the objective to analyze the stress transfer mechanism in specimens under tension, through the self-compacting concrete cracking process, casted on normal and perpendicular directions to the rebar. In order to attain the objectives, cylindrical specimens were casted with the aim to assess the behavior under axial compression stress and the prismatic specimens were submitted to tests in order to evaluate behavior under tensile stress. The specimens have dimensions of 15x15x75cm and were casted on the vertical and horizontal positions using 20 and 25mm rebar, passing through the center of the square section (15x15cm). The assessment of the process was done through the use of image correlation. Computerized tomography was used to evaluate the void dispersion in the specimens casted in different directions. For the casting of specimens, a self-compacting 65MPa strength concrete was utilized. For the characterization of flow, plastic viscosity and flowability in the fresh state, rheological tests were made using Abrams cone with and without the “J” ring, “V” funnel and “L” box. The results found were convenient for the characteristics of the used concrete. It was observed that the specimen's results presented differences in their fracture mechanism. The specimens casted on the horizontal direction due to failure in adherence yielded asynchronous cracking on their faces, meaning the cracking did not pass through the cross section. However, for specimens casted on the vertical the cracking appeared simultaneously, that is, they pass through the cross section.

Keywords: Mechanical behavior, composite material, anisotropy, cast direction, concrete tomography

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Situações de aderência (aço-concreto).....	11
Figura 2 – Anomalias na parte inferior das barras de aço embebidas no concreto...	12
Figura 3 – Tensão de cisalhamento do ensaio de arrancamento.....	15
Figura 4 - Pressão estática causada pelo peso próprio do concreto.....	16
Figura 5 – Representação das tensões no ensaio de arrancamento .....	16
Figura 6 – Representação de tensões da barra de aço nervurada embebida no concreto e tracionada.....	17
Figura 7 – Distribuição de tensões no estádio I.....	19
Figura 8 – Distribuição de tensões no estádio II.....	20
Figura 9- Processo de propagação de fissuração.....	21
Figura 10 – Arranjo de tensões em um tirante de concreto armado.....	21
Figura 11 – Região de microfissuração do concreto .....	22
Figura 12 – Representação do fendilhamento.....	23
Figura 13 – Esquema representativo da teoria de TASSIOS .....	24
Figura 14 – Esquema representativo da teoria de ELIGEHAUSEN et al (1983) .....	25
Figura 15 – Procedimento experimental.....	27
Figura 16 - Curva granulométrica dos agregados .....	29
Figura 17 - Características geométricas das nervuras da barra de 20 mm (a) e 25 mm (b).....	31
Figura 18 - Curva média de força x deformação das barras de aço.....	32
Figura 19 – Procedimento de execução do ensaio de espalhamento.....	34
Figura 20 – Representação do método anel “J” .....	35
Figura 21 – Representação da caixa L.....	35
Figura 22 – Funil “V”.....	36
Figura 23 – Corpo de Prova Prismático Retangular Armado .....	38
Figura 24 – Fôrmas Verticais e Horizontais .....	39
Figura 25 – Corpo de prova prismático .....	39
Figura 26 – Corpo de prova cilíndrico instrumentado.....	40
Figura 27 – Máquina de ensaios universais.....	41
Figura 28 – Strain gage fixado na barra de aço .....	42
Figura 29 – Ilustração da instrumentação do ensaio de tração.....	43
Figura 30 – Instrumentação para sustentar LVDT.....	44

Figura 31 – Ensaio de tração axial com a instrumentação.....	44
Figura 32 – Procedimento de ensaio de tração axial dos tirantes.....	45
Figura 33 - Identificação das faces para o mapa de fissuras. ....	46
Figura 34 – Equipamento de tomografia SIEMENS SOMATOM Scope.....	47
Figura 35 – Imagens da tomografia computadorizada .....	47
Figura 36 – Concreto ao final do ensaio de tronco de cone .....	49
Figura 37 – Curvas típicas de Tensão x Deformação do CAA .....	50
Figura 38 – Formato de ruptura do corpo de prova submetido à compressão uniaxial .....	51
Figura 39 - Exemplo dos pontos analisados da curva Força x Deformação dos tirantes. ....	52
Figura 40 – Curva típica de força x deslocamento dos tirantes com barra de 20mm	54
Figura 41 - Curva força x deformação e imagens do DIC do grupo moldado na vertical com barras de 20mm .....	55
Figura 42 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na vertical com barras de 20mm .....	56
Figura 43 - Presença de vazios na interface de ligação inferior da barra de 20mm moldados no sentido vertical.....	56
Figura 44 – Curva força x deformação com DIC do grupo moldado na horizontal com barras de 20mm .....	57
Figura 45 - Presença de vazios na interface de ligação inferior da barra de 20mm moldados no sentido horizontal.....	58
Figura 46 - Curva tensão de aderência x escorregamento para topo e fundos de fôrma. ....	59
Figura 47 - Fissura de cisalhamento formada pela menor aderência na interface inferior. ....	59
Figura 48 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na horizontal com barras de 20mm .....	60
Figura 49 - Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de traxão axial.....	62
Figura 50- Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de traxão axial.....	62
Figura 51 – Mapa de fissuras dos tirantes moldados na vertical com barras de 20mm .....	63
Figura 52 - Mapa de fissuras dos tirantes moldados na horizontal com barras de 20mm .....	63

Figura 53 - Curva típica de Força x Deslocamento dos tirantes com barra de 25mm .....	65
Figura 54 - Curva Força x Deformação com DIC do grupo moldado na vertical com barras de 25mm .....	66
Figura 55 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na vertical com barras de 25mm .....	67
Figura 56 - Curva Força x Deformação com DIC do grupo moldado na horizontal com barras de 25mm .....	68
Figura 57 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na horizontal com barras de 25mm .....	69
Figura 58 – Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de tração axial ....	69
Figura 59 - Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de tração axial.....	69
Figura 60 - Mapa de fissuras dos tirantes moldados na vertical com barras de 25mm .....	71
Figura 61 - Mapa de fissuras dos tirantes moldados na horizontal com barras de 25mm .....	71
Figura 62 – Seção transversal do corpo de prova moldado na vertical.....	72
Figura 63 - Seção transversal do corpo de prova moldado na horizontal .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlação de parâmetros e sua influência na aderência .....	13
Tabela 2- Composição da mistura.....	27
Tabela 3 - Característica do agregado graúdo.....	28
Tabela 4 - Características da sílica da casca de arroz.....	30
Tabela 5- Força, deformação, tensão e módulo de elasticidade de tração das barras de aço de 20 e 25mm.....	32
Tabela 6 – Teor de aditivos e espalhamento do tronco de cone .....	48
Tabela 7 – Dados do ensaio de compressão axial do concreto autoadensável .....	50
Tabela 8 – Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 20mm moldados na vertical.....	53
Tabela 9 - Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 20mm moldados na horizontal .....	53
Tabela 10 - Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 25mm moldados na vertical.....	64
Tabela 11 - Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 20mm moldados na horizontal .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACI Committee – American Concrete Institute;

CAA – Concreto Autoadensável;

CA – Concreto Armado;

CC – Concreto Convencional;

CPV ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;

d – Lado da seção do tirante;

Fct – resistência à tração simples do concreto;

FPS – Frames por segundo;

IEV – Índice de Estabilidade Visual;

LVDT - Transformador Diferencial Variável Linear (transdutor para medição de deslocamento linear);

n – Coeficiente de conformação superficial;

Pt – Pressão transversal;

Rb2 – força de arrancamento;

SF - Slump-Flow;

t500 – tempo para o espalhamento de 500mm no ensaio de espalhamento de tronco de cone;

VMA – “Viscosity Modifier Agent” (Agente Modificador de Viscosidade);

VS - Viscosidade Plástica Aparente;

Tb – Tensão de cisalhamento;

t<sub>bu</sub> – Tensão de aderência última

$\sigma_{ct}$  – resistência à tração do concreto;

$\sigma_m$  – tensão média de aderência;

$\rho$  – Taxa de armadura.

$\varnothing$  - diâmetro da barra;

$\Delta l$  – distância média entre fissuras (considerando as 4 faces);

$\mu m$  – Micron.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1	Objetivo geral.....	8
1.2	Objetivos específicos.....	8
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>9</b>
2.1	Concreto autoadensável.....	9
2.2	Fatores de Influência na aderência.....	10
2.3	Aderência aço/matriz cimentícia.....	13
2.3.1	Aderência química .....	14
2.3.2	Aderência por atrito .....	15
2.3.3	Aderência mecânica.....	17
2.4	Ruptura da aderência.....	18
2.4.1	Ruptura por análise global.....	18
2.4.2	Ruptura por análise local .....	22
2.4.2.1	Teoria apresentada por Fusco .....	22
2.4.2.2	Teoria apresentada por TASSIOS.....	23
2.4.2.3	Teoria apresentado por ELIGEHAUSEN et al .....	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1	Caracterização dos materiais.....	28
3.1.1	Caracterização dos agregados .....	28
3.1.2	Massa específica dos materiais finos .....	29
3.1.3	Superplastificante .....	30
3.1.4	Agente modificador de viscosidade.....	30
3.1.5	Barras de aço.....	31
3.2	Ensaio reológicos.....	33
3.2.1	Fluidez, viscosidade plástica aparente e índice de estabilidade visual .....	33
3.2.2	Método do anel “J” .....	34
3.2.3	Método da caixa “L” .....	35
3.2.4	Método do funil “V” .....	36
3.3	Moldagem dos corpos de prova .....	37
3.3.1	Corpo de prova prismático retangular.....	37

3.3.2	Corpo de prova prismático retangular .....	38
3.4	Ensaio mecânico .....	40
3.4.1	Comportamento à Compressão .....	40
3.4.2	Ensaio de tração direta no tirante .....	41
3.5	Tomografia computadorizada .....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1	Propriedades reológicas.....	48
4.1.1	Fluidez, viscosidade plástica aparente e índice de estabilidade visual .....	48
4.1.2	Método do anel “J” .....	49
4.1.3	Método da caixa “L” .....	49
4.1.4	Funil “V” .....	50
4.2	Propriedades mecânicas .....	50
4.2.1	Comportamento à compressão .....	50
4.2.2	Comportamento à tração.....	51
4.2.2.1	Resultados obtidos do grupo de corpos de prova com barras de 20mm .....	52
4.2.2.2	Grupo de corpos de prova com barras de 25mm .....	64
4.3	Tomografia computadorizada .....	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	73
5.1	Recomendações para trabalhos futuros.....	75
6	REFERÊNCIAS.....	76

## 1 INTRODUÇÃO

A incessante busca por inovações vem trazendo inúmeros benefícios técnicos e econômicos à população, nas mais diversas áreas de conhecimento. Sem isso não haveria a possibilidade de avanços e não se teria atingindo o nível de desenvolvimento atual. No setor da construção civil não é diferente, constantemente são lançados novos conceitos, técnicas e materiais.

Embora toda evolução seja conveniente e a maioria dos produtos promissores sejam, de fato, eficientes, essa corrida pela inovação acaba, muitas vezes, sucumbindo produtos anteriormente consolidados, sem extrair todo seu potencial em virtude de serem pouco estudados e/ou indevidamente utilizados. Dessa forma, também é necessário aprofundar o conhecimento sobre as características do que já é utilizado e buscar melhores configurações de parâmetros de influência para que sejam aplicados de forma mais eficiente.

Diante aos impasses relacionados ao desempenho e execução do concreto convencional (CC), aliados à escassez de mão de obra qualificada para manuseio e adensamento do mesmo, foi desenvolvido por Okamura, em 1986, o concreto autoadensável (CAA). Esse é capaz de preencher a fôrma, através de seu peso próprio, sem apresentar segregação, englobando os processos de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

As principais vantagens do concreto autoadensável em relação ao convencional são: redução de mão de obra e equipamentos, possibilidade de obtenção das propriedades mecânicas desejadas independentemente da qualidade da operação de vibração, maior capacidade de concretagem em função do tempo, preenchimento de fôrmas complexas com elevada densidade de armadura, maiores distâncias e velocidade de bombeamento, entre outros.

A interface de barras de aço/CAA tem demonstrado melhor transferência de tensões ou no mínimo de mesma ordem que a relação barra de aço/CC. Quando verificada uma ligação mais coesa entre os materiais, com menor número de vazios, a melhoria dessa interface é explicada pelo fato de o CAA apresentar menor quantidade de água livre para se acumular na interface com a barra de aço, em decorrência do efeito parede e a maior homogeneidade do concreto na interface. (SKARENDAHL, 2003; e BOEL et al, 2010).

Segundo Hoelschemacher (2004), certas composições de CAA podem alcançar resistência à tração até 40% maiores que os CC's que apresentam a mesma resistência à compressão. Consoante a isso, VIDAL (2019), verificou - em análises numéricas - maior resistência à compressão nos casos em que o lançamento do concreto foi considerado paralelo à solitação, frente aos que foram analisados em sentido normal ao lançamento. Diante a isso, cabe questionar: o sentido de concretagem (vertical ou horizontal) influencia na resistência à tração, ou na transferência de tensões da barra para o concreto, em tirantes produzidos com concreto autoadensável?

Portanto, salientando a perspectiva de conhecer melhor as propriedades e aplicações dos materiais existentes, somado as vantagens do CAA - principalmente em relação à tração, melhor aderência a barra - esse estudo visa analisar o comportamento do concreto autoadensável estrutural através de tirantes, moldados na direção vertical e horizontal. Sendo assim, os tirantes serão tracionados e analisados frente a transferência de tensões, entre o aço e o concreto, bem como em relação ao processo de fissuração.

### **1.1 Objetivo geral**

Estudar o comportamento mecânico da interface de barras de aço/concreto autoadensável, através de ensaios em tirantes moldados na posição vertical e horizontal.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o processo de transferência de tensões entre o aço e o concreto através de ensaios de tração em tirantes;
- Analisar a anisotropia provocada pelo sentido de moldagem entre o aço e o concreto;
- Avaliar o processo de fissuração através da correlação de imagens;

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Concreto autoadensável

De acordo com Silva (2016), houve a constatação de elevados casos de perda de resistência do concreto armado devido aos nichos de concretagem. Essa classe de patologia congênita é decorrente, principalmente, de uma mão de obra pouco qualificada. Visando eliminar os percalços supracitados, em 1986, Okamura desenvolveu o concreto autoadensável.

O CAA é um concreto de alto desempenho, com as principais características de não requerer vibração ou compactação para seu lançamento e possuir viscosidade e fluidez de modo que não haja segregação dos materiais constituintes. Sob a ação do seu peso próprio deve fluir, preencher completamente a fôrma e atingir total compactação - mesmo em situações de alta densidade de armadura – alcançando densidade, homogeneidade e características mecânicas no mínimo iguais às do CC vibrado (CALADO, 2015).

De acordo com o exposto em RILEM (2006), as propriedades do CAA que se destacam são: habilidade de preenchimento de espaços, habilidade de passar por restrições e a capacidade de resistir à segregação. Respectivamente, referem-se à capacidade de preencher completamente as fôrmas e espaços entre armaduras, escoar por espaços restritos sem ocorrência de bloqueio causado por restrição/movimento dos agregados e manter a homogeneidade durante as etapas de mistura, transporte e lançamento sem que ocorra segregação por afundamento dos agregados ou exsudação.

Conforme Repette (2011), o CAA é produzido fundamentalmente com os mesmos materiais que os CC, entretanto, utilizam-se materiais mais finos, a exemplo do fíler calcário, cinza volante, sílica ativa e metacaulim, além de aditivos dispersantes de grande eficiência, denominados de superplastificantes de terceira geração. Em determinadas misturas, pode haver a necessidade de aumentar a viscosidade da pasta do concreto, empregando-se para tal, aditivo promotor de viscosidade.

Segundo Calado (2015), existem vários métodos de dosagem para o CAA, sendo os mais usuais no Brasil: método IBRACON, método INT/Lobo Carneiro, método ABCP e métodos baseados em estudos, como: “Método para

dosagem de concretos auto-adensáveis”, Tutikian (2004), Tutikian & Dal Molin (2007), Alencar e Helene (2008); conceitos de reologia, Melo-Repetto (2005).

Destacam-se as vantagens do CAA frente ao CC, conforme verificado por Calado (2015): o melhor envolvimento das armaduras mesmo quando há uma grande densidade delas; redução de mão de obra e equipamentos; possibilidade de obtenção das propriedades mecânicas desejadas independentemente da qualidade da operação de vibração; maior capacidade de concretagem em função do tempo; maiores distâncias e velocidade de bombeamento; perspectiva de emprego de novos sistemas construtivos além da diminuição de nichos de concretagem e melhoria nos aspectos de durabilidade, acabamento de concreto aparente e viabilização de elementos estruturais de geometria complexa.

Entretanto, de acordo com Carneiro (2018) o uso do CAA traz algumas desvantagens relacionadas a pormenores de execução, lançamento e manutenção que destoam das requeridas pelo CC. Somado a isso, o valor dos volumes de CAA são muito elevados quando comparados ao CC, devido a notória presença de adições químicas e minerais.

Segundo Repette (2011), o concreto autoadensável está ganhando mercado de forma exponencial, com perspectiva de ser o concreto convencional do futuro, não só pelo exposto acima, mas também, por apresentar as mesmas características do CC no estado endurecido. Além disso, é considerado o catalisador de maior potencial para promover a modificação tecnológica do setor da construção civil rumo a uma maior industrialização.

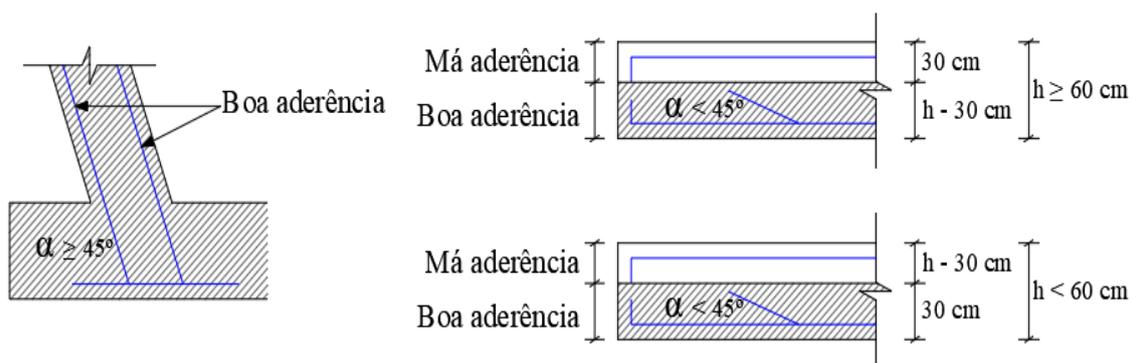
## **2.2 Fatores de Influência na aderência**

No livro de Araújo (2014), observa-se que fatores como a rugosidade, diâmetro da barra, resistência do concreto, posição da barra durante a concretagem, entre outros, são parâmetros que implicam diretamente na interface aço-concreto, sendo determinantes para a aderência entre esses.

A NBR 6118 (ABNT, 2014), ressalta que o envolvimento de barras de aço pelo concreto é diretamente influenciado pela sua inclinação no momento de lançamento e adensamento do concreto, resultando em situações de aderências distintas, conforme variações de disposição. Dessa forma, barras com inclinação superior a 45° em relação à horizontal são classificadas com tendo boa aderência.

Ainda de acordo com a norma anterior, outras condições que influenciam na aderência são: altura da camada de concreto sobre a barra, cujo peso beneficia o adensamento, nível da barra em relação ao fundo da fôrma (pois a exsudação causa porosidade no concreto, fenômeno mais intenso nas camadas mais altas). A NBR 6118 (ABNT, 2014) também considera em boa situação de aderência barras dispostas com angulação entre a horizontal e  $45^\circ$  em relação a ela, desde que para elementos estruturais com altura menor que 60cm, localizados no máximo 30cm acima da face inferior ou da junta de concretagem mais rente e para elementos estruturais com altura maior ou igual a 60cm, localizados no mínimo 30cm abaixo da face superior ou da junta de concretagem mais próxima. Essas situações podem ser visualizadas na Figura 1, onde B significa boa aderência e M, má aderência.

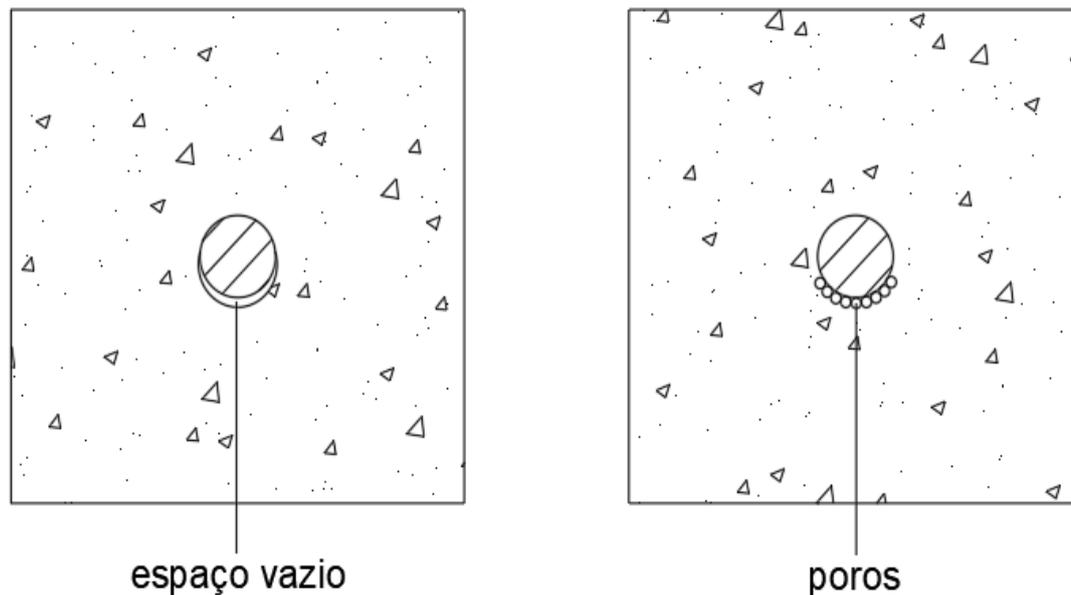
Figura 1 – Situações de aderência (aço-concreto)



Fonte: adaptado de Araújo, 2014.

Conforme averiguou Mohammed (2002), em seus estudos relacionados a oxidação de barras de aço embebidas no concreto em diferentes sentidos de concretagem, barras dispostas no sentido perpendicular ao sentido de despejo do concreto apresentam maior número de vazios na interface aço/concreto na parte inferior das barras, como pode ser observado na Figura 2. Salienta também que ocasionalmente regiões das barras paralelas ao sentido de concretagem apresentam vazios, justificados pelo mau adensamento do concreto convencional.

Figura 2 – Anomalias na parte inferior das barras de aço embebidas no concreto



Fonte: adaptado de LEONHARDT; MONNING, 1977

A interface em barras de aço embebidas verticalmente no CC sofrem pequenas alterações na parte inferior das nervuras, formando-se uma microestrutura mais áspera/grosseira. Ainda segundo os mesmos autores, as barras embebidas horizontalmente apresentaram uma zona interfacial completamente distoante da situação anterior, sendo drasticamente afetados pela exsudação. Tais interfaces foram estudadas durante o período de 365 dias, constatando-se que na maioria dos casos não houveram alterações após 28 dias, entretanto, em situações isoladas ocorreram reações até 365 dias, dependendo da disponibilidade de água e espaços na região interfacial (HORNE et al, 2007).

Nesse contexto, embora em configurações de concretagem distintas das quais pretendem ser averiguadas neste trabalho, Dybel (2019), constatou alterações nas interfaces aço/concreto embebidos em diferentes condições. O CAA vertido no sentido paralelo as barras, de modo ascendente do fundo da fôrma para o topo, frente aos vertidos perpendicularmente as barras lançados do topo da fôrma, apresentou melhor interface entre os materiais, fundamentado no conceito de redução da presença de ar, que por vezes fica confinado quando o sentido de despejo de concreto é o inverso.

Simplicio (2008), enfatiza a relação do diâmetro da barra, definindo como inversamente proporcional a aderência, ou seja, quanto maior for o diâmetro da barra, maior será a interferência causada. Isso é justificado pela maior retenção de água na interface do aço-concreto, resultando em uma região de envoltória porosa, diminuindo assim a capacidade de resistência ao cisalhamento e compressão da zona de interface da matriz.

De acordo com Barbosa (2001), a relação entre os fatores que influenciam a resistência de aderência está presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Correlação de parâmetros e sua influência na aderência

<b>Parâmetro</b>	<b>Comportamento do parâmetro</b>	<b>Comportamento da aderência</b>
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, 2001.

### **2.3 Aderência aço/matriz cimentícia**

Segundo Reyes (2009), a aderência pode ser definida como sendo o mecanismo de transferência de tensões que existe na interface aço/concreto. Já de acordo com Sartori (2017), a aderência pode ser classificada como fenômeno responsável pelo funcionamento do concreto armado como material estrutural, pois sem ela a armadura deslizaria dentro da matriz de concreto e o elemento apresentaria comportamento similar ao de uma estrutura de concreto simples.

Dybel (2019) salienta que o fenômeno de ligação entre as barras de aço e a matriz é teoria fundamental do concreto armado como material de construção com caráter estrutural, uma vez que o conceito baseia-se na transferência mútua de esforços entre os dois elementos, e que a avaliação de alterações no

processo de deformação bilateral é fator inerente ao controle de trincas e deslocamentos.

De acordo com Almeida Filho (2006), embora a aderência entre esses materiais seja de grande valia, é um dos assuntos mais complexos a ser plenamente compreendidos. Tais dificuldades são atreladas à falta de conhecimentos teóricos e procedimentos experimentais.

Consoante a Fusco (1995), a aderência pode ser explicada através da soma de três mecanismos resistentes: adesão, atrito e engrenamento mecânico. Entretanto, Sartori (2017), ressalva que na prática a separação da aderência nas três parcelas é somente esquemática, pois não é possível determinar cada uma separadamente. Ainda segundo o último, a posição da barra também tem extrema importância, sendo que na parte superior das peças de concreto a exsudação é maior e a adesão acaba sendo prejudicada.

### **2.3.1 Aderência química**

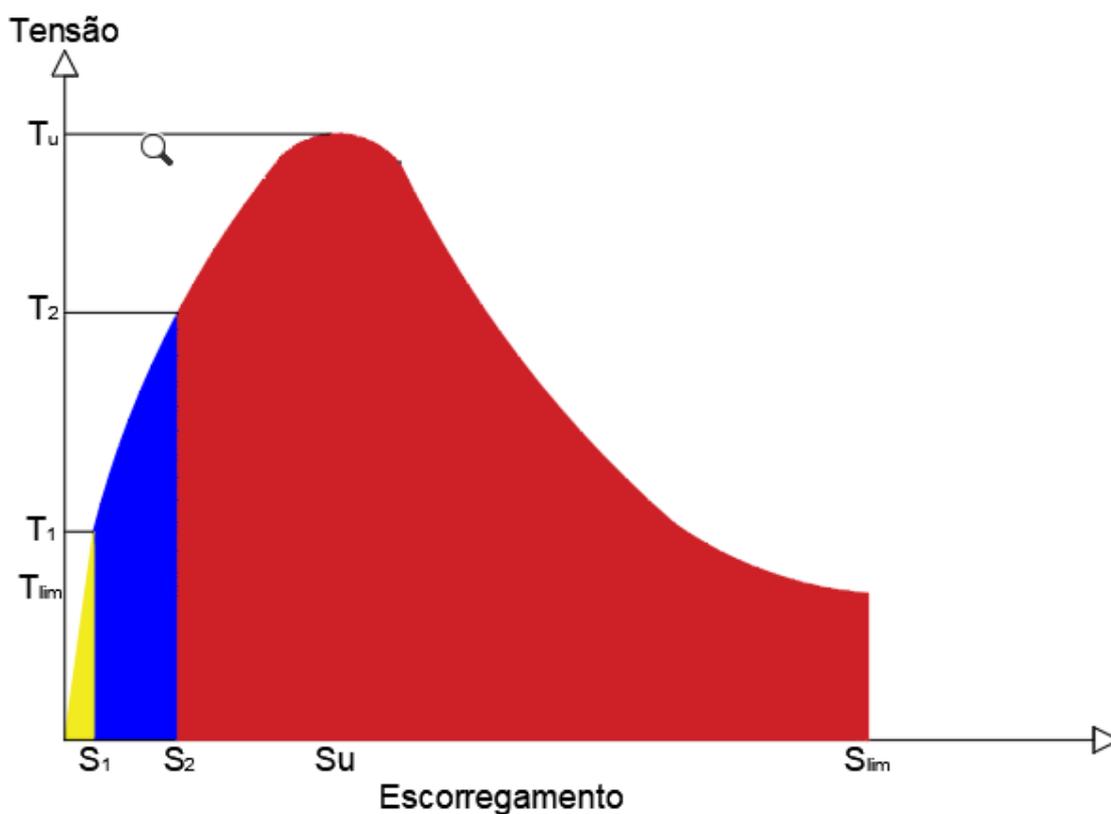
A aderência química também é conhecida como aderência por adesão. É produto das ligações físico-químicas que se desenvolvem na região de contato entre o aço e concreto durante o período de hidratação do cimento. Além disso, também é relacionada com a rugosidade e a limpeza da superfície das armaduras. (FUSCO, 1995).

A parcela de aderência por adesão é relativamente baixa quando comparada a aderência mecânica e por atrito, sendo desfeita no início do deslizamento entre os materiais em questão (ELIGEHAUSEN et al., 1983; DANIN, 2010; SARTORI, 2017).

Na análise da curva tensão de cisalhamento por escorregamento, em ensaios de arrancamento (PullOut), é possível verificar a parcela de aderência química pela região linear (representada pela cor amarela), como pode ser verificado na Figura 3, no trecho compreendido entre a origem e o ponto T<sub>1</sub>.

Ainda na Figura 3, pode se observar a parcela referente à aderência por atrito e aderência mecânica, nas cores azul e vermelho, respectivamente.

Figura 3 – Tensão de cisalhamento do ensaio de arrancamento



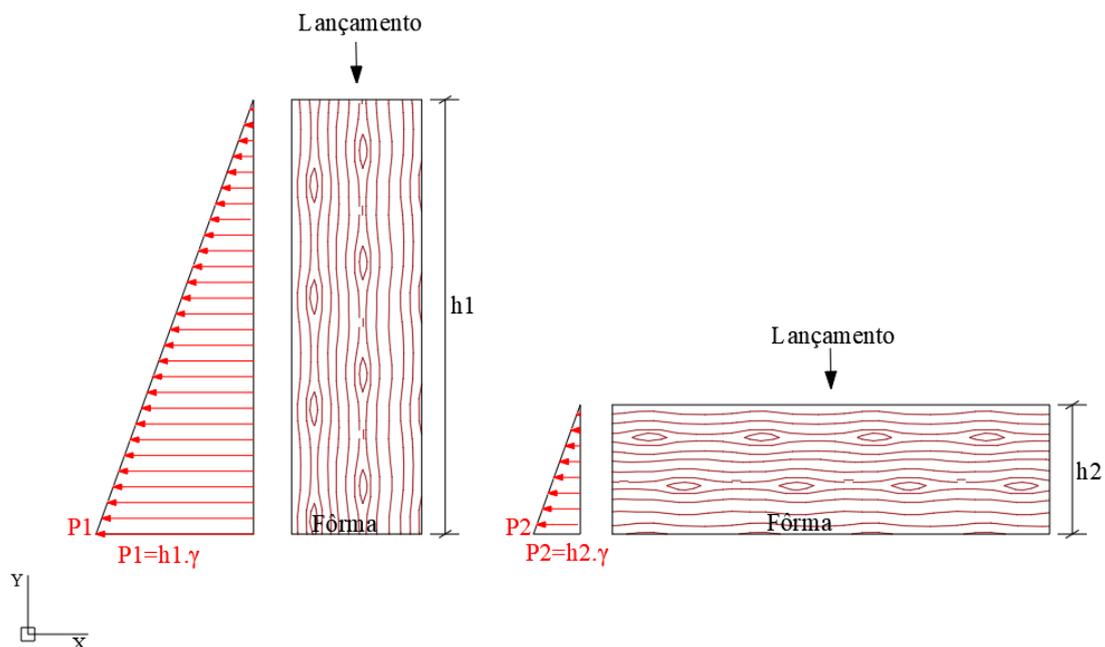
Fonte: adaptado de Silva, 2006.

### 2.3.2 Aderência por atrito

Conforme Fusco (1995), a aderência por atrito é estabelecida conforme o coeficiente de atrito dinâmico entre os materiais, que também está relacionado com a rugosidade superficial dos materiais. Essa parcela de aderência é resultante de 3 fenômenos: pressão transversal, retração do concreto e por danos ocasionados pelo rompimento da aderência química.

De acordo com o exposto por Castro (2002), o atrito é promovido pela pressão transversal, originada pelo peso próprio do concreto, como pode ser visualizado na Figura 4 – adaptado para as condições do trabalho -, aumentando o grau de confinamento com o acréscimo de altura de moldagem. Além disso, uma parcela da pressão transversal é originada pela retração do concreto.

Figura 4 - Pressão estática causada pelo peso próprio do concreto.

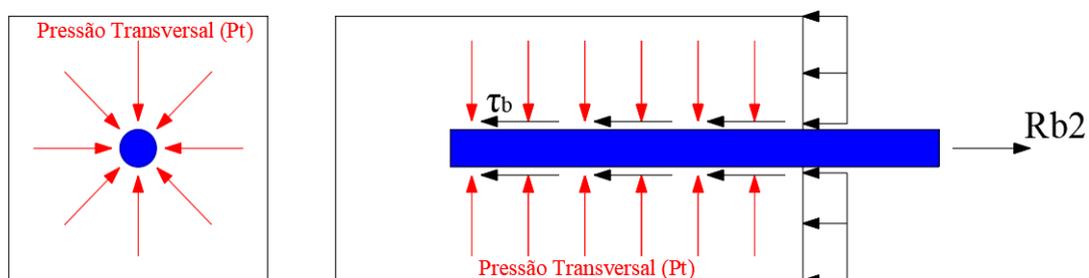


Fonte: elaboração própria.

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

Os ensaios de arrancamento permitem a verificação da aderência por atrito. Dessa forma, o esquema de tensões dhoro processo de arrancamento ao longo do elemento de reforço pode ser visualizado na Figura 5 , onde  $P_t$  é a pressão transversal,  $R_{b2}$  a força de arrancamento e  $T_b$  a tensão de cisalhamento.

Figura 5 – Representação das tensões no ensaio de arrancamento



Fonte: Fusco, 1995.

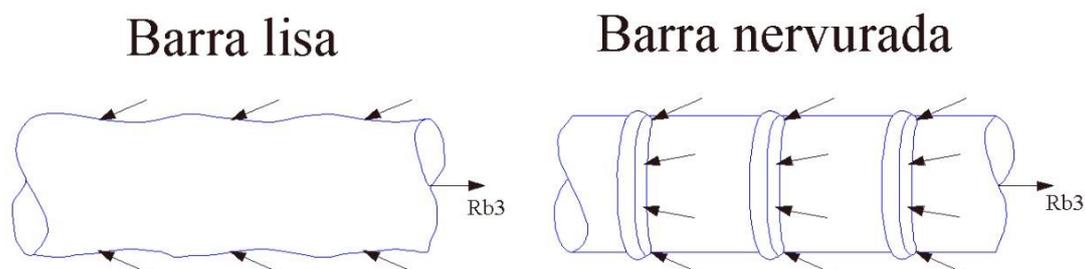
A aderência por atrito é limitada pelo ACI COMMITTEE 408 (1991), em valores de 0,41 e 10 MPa é diretamente proporcional a pressão transversal que

a matriz realiza no elemento de reforço, estando relacionado 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.

### 2.3.3 Aderência mecânica

A aderência do tipo mecânica também é conhecida como aderência por engrenamento mecânico. Segundo Sartori (2017), essa parcela de resistência é a mais efetiva e confiável. Fusco (1995), menciona que essa aderência é conquistada através das saliências na superfície das barras, que encontra aderência dentro da matriz e pode ser atrelada à capacidade da matriz resistir tensões de compressão. Dessa forma, as nervuras acabam gerando tensões de compressão e promovem o travamento no concreto como pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Representação de tensões da barra de aço nervurada embebida no concreto e tracionada



Fonte: adaptado de Fusco, 1995.

Ainda segundo Fusco (1995), em estágios iniciais de carregamento a configuração de aderência entre o aço e a matriz geram uma região de microfissuração na matriz circunvizinha à barra.

Quanto maior a aderência, maior o número de fissuras, as quais ocasionam altas concentrações de tensões de aderência no limite das regiões de descontinuidade. As regiões de descontinuidade são delimitadas por fissuras principais e estão atreladas a capacidade da matriz de absorver energia de deformação (LEONHARDT & MÖNNIG, 1977; CASTRO, 2002).

## **2.4 Ruptura da aderência**

De acordo com Castro (2002), em estruturas de concreto armado a aderência permite a transmissão de tensões entre o aço e a matriz. Essa ligação entre os elementos é responsável pelo controle de abertura de fissuras. Quanto mais uniforme e coesa a interface entre os materiais, mais eficaz se torna a transferência de tensões. Proporcional a efetividade dessa relação são as possibilidades de se obter maior número de fissuras com menor abertura individual, que apresentam melhores condições de proteção da armadura quando comparadas à um número menor de fissuras com aberturas de maior escala.

Ainda segundo Castro (2002), é válido destacar o comportamento local em uma seção de uma barra ancorada e o comportamento global de toda uma região de ancoragem. Sendo o comportamento local caracterizado pela aderência na interface e o equivalente deslizamento local, que descreve o comportamento seccional entre a barra de aço e o concreto circunvizinho. A ruptura da aderência local é caracterizada pelo processo da tensão de aderência atingir o pico e diminuir com o aumento do deslizamento. O comportamento global é uma sintetização do comportamento local ao longo de uma barra, enquanto a máxima força resistida por uma região é denominada de capacidade de ancoragem.

Os CAA's em geral apresentaram valores menores de energia de fratura que os CC's, conforme comprovado pelos resultados do método do efeito de tamanho. Esse comportamento mais frágil está relacionado à melhoria das propriedades da interface, devido à utilização de uma composição granulométrica com mais finos no caso do CAA do que no caso do CC (RIBEIRO, 2017).

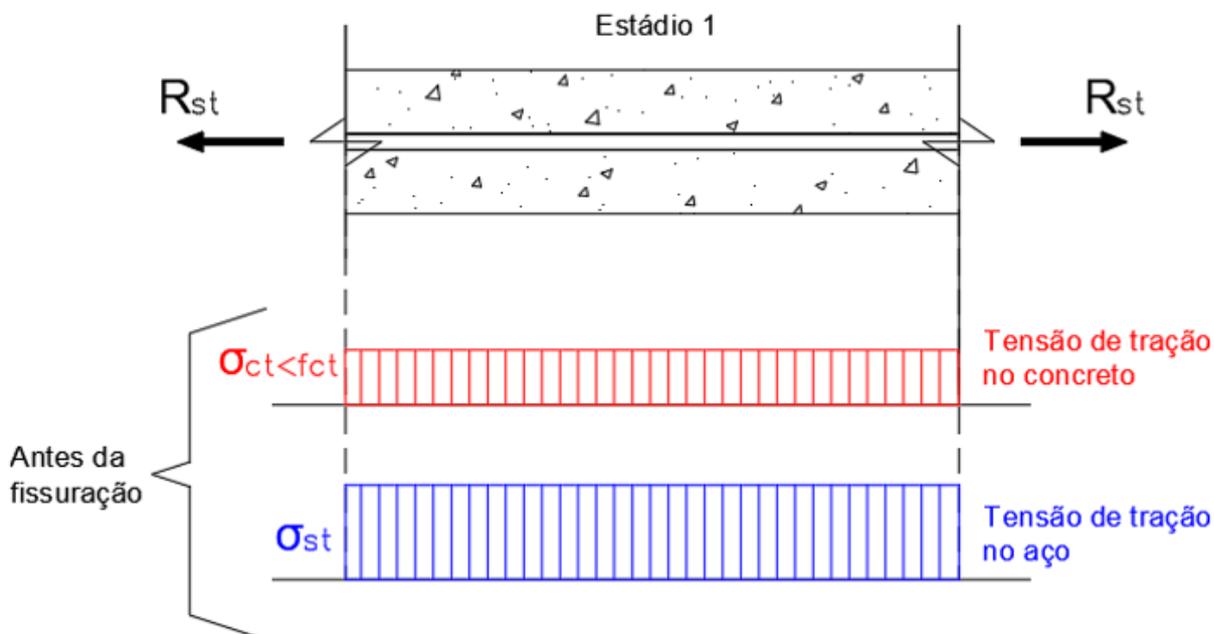
### **2.4.1 Ruptura por análise global**

O modelo de fissuração proposto é de autoria de Fusco (1995). Salienta-se, que, para a análise global desconsidera-se a microfissuração próxima da fissura principal, que ocasiona deslizamentos localizados.

Apesar do concreto apresentar capacidade mecânica de tração inferior à de compressão, tem aptidão a absorver uma parcela de esforços de tração antes

de fissurar, situação denotada de estágio I, até que atinja a resistência à tração do concreto ( $\sigma_{ct}$ ) e se formem as fissuras, situação representada pela Figura 7.

Figura 7 – Distribuição de tensões no estágio I

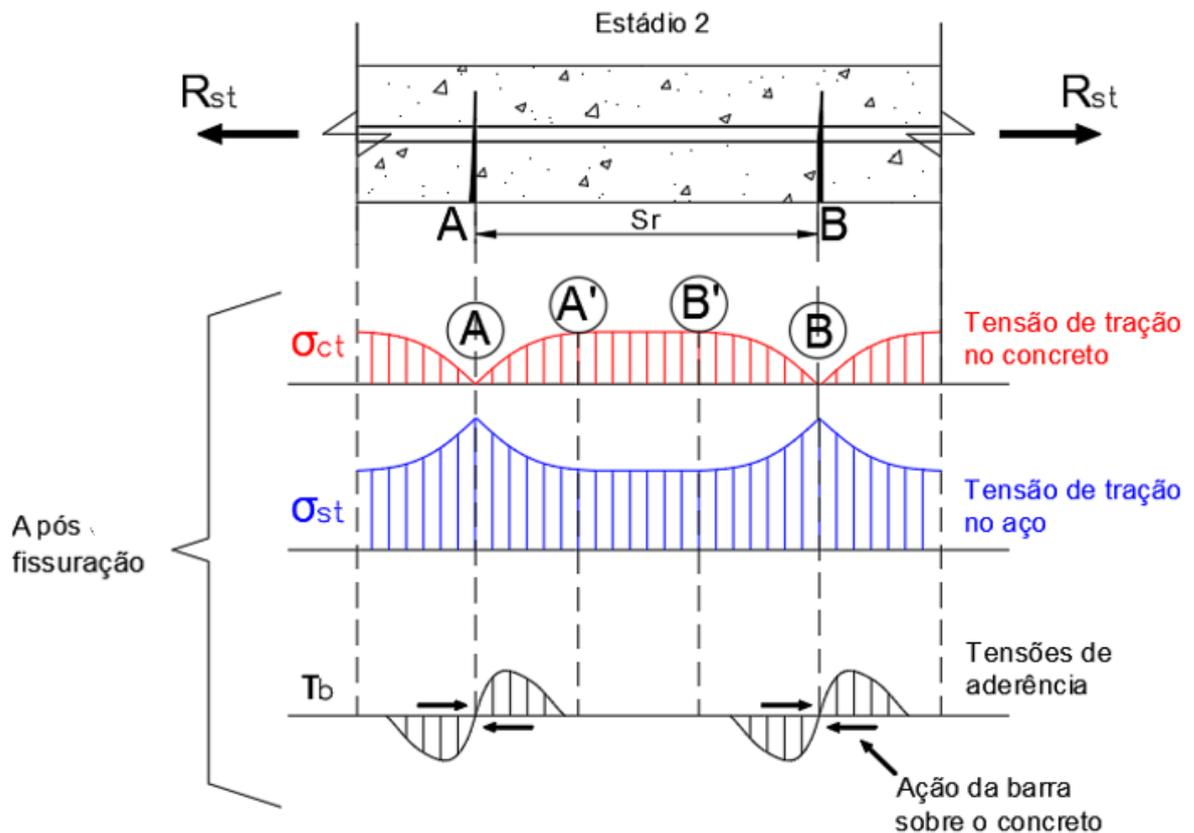


Fonte: adaptado de Fusco, 1995.

Em uma seção totalmente fissurada todas as tensões são transferidas para a armadura. Entretanto, é importante ressaltar que a eventual diminuição ou mesmo a falta de aderência em determinados locais pode ser compensada pela colaboração de pontos adjacentes. Entre fissuras, parte das tensões de tração são absorvidas pelo próprio concreto através da mobilização das tensões de aderência. Dessa forma, o concreto presente, entre as fissuras, contribui para a rigidez da peça e esse arranjo é denominado enrijecimento à tração.

Considerando a existência de somente duas fissuras, denominada A e B, afastadas entre si por uma distância  $S_r$ . As tensões de aderência são distribuídas somente nos trechos de  $\overline{AA'}$  e  $\overline{BB'}$ , sendo que no trecho  $\overline{A'B'}$  há tensões de tração constantes. Com essa configuração, pode-se elevar a tensão de tração no concreto no trecho  $\overline{A'B'}$  que acaba configurando a formação de uma terceira fissura, denominada C, entre as fissuras A e B. A situação descrita pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 – Distribuição de tensões no estágio II

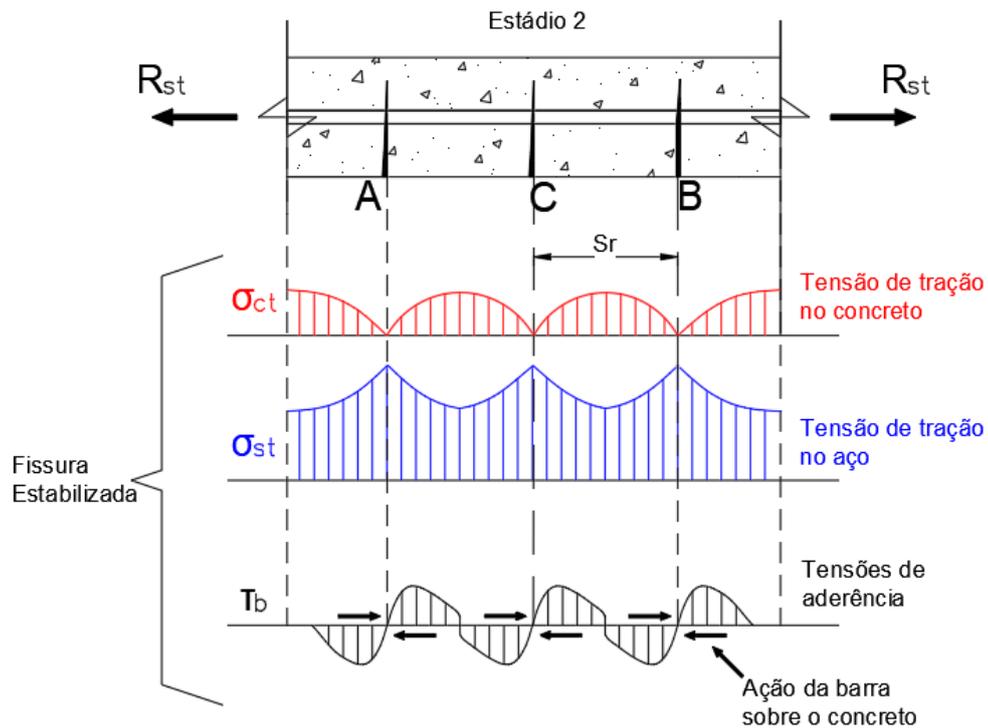


Fonte: adaptado de Fusco, 1995.

Diante da formação da fissura C (Figura 9), a tensão no concreto dependerá da capacidade de transferência de tensões entre o aço e o concreto que é promovida pela aderência entre os mesmos. Se as tensões de aderência no trecho  $\overline{AA'}$  e  $\overline{BB'}$  não atingirem o limite de ruptura do concreto, não há formação de nova fissura, alcançando-se estabilidade em relação a formação de fissuras. A situação supra descrita pode ser observada na Figura 9.

O acréscimo de tensões provocará a expansão na abertura das fissuras principais existentes e consecutivamente o processo de espalhamento das fissuras secundárias, não consideradas na configuração acima, que necessitam de uma análise local para a configuração mecânica da ligação entre o aço-concreto.

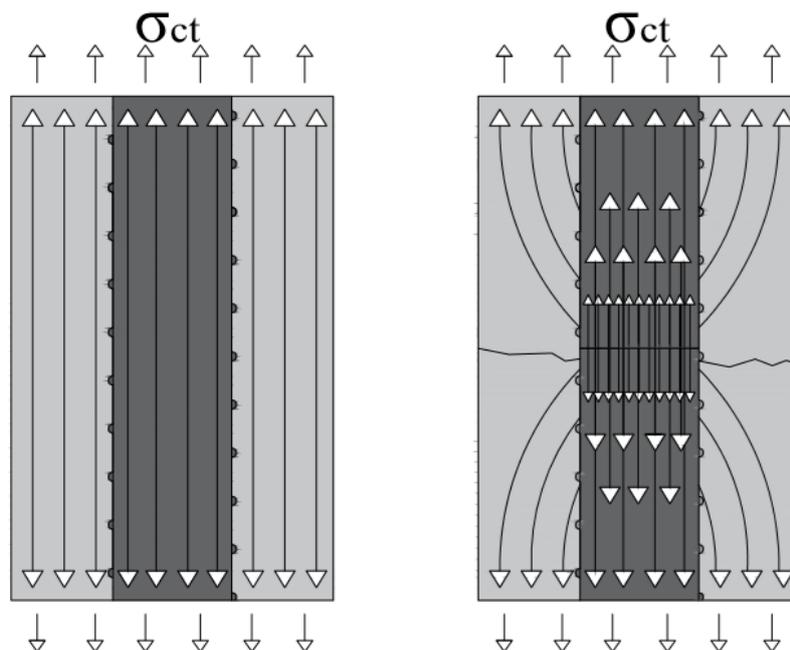
Figura 9- Processo de propagação de fissuração



Fonte: adaptado de Fusco, 1995.

A Figura 10 ilustra o arranjo das tensões em um tirante de concreto armado antes e após a abertura de fissura.

Figura 10 – Arranjo de tensões em um tirante de concreto armado



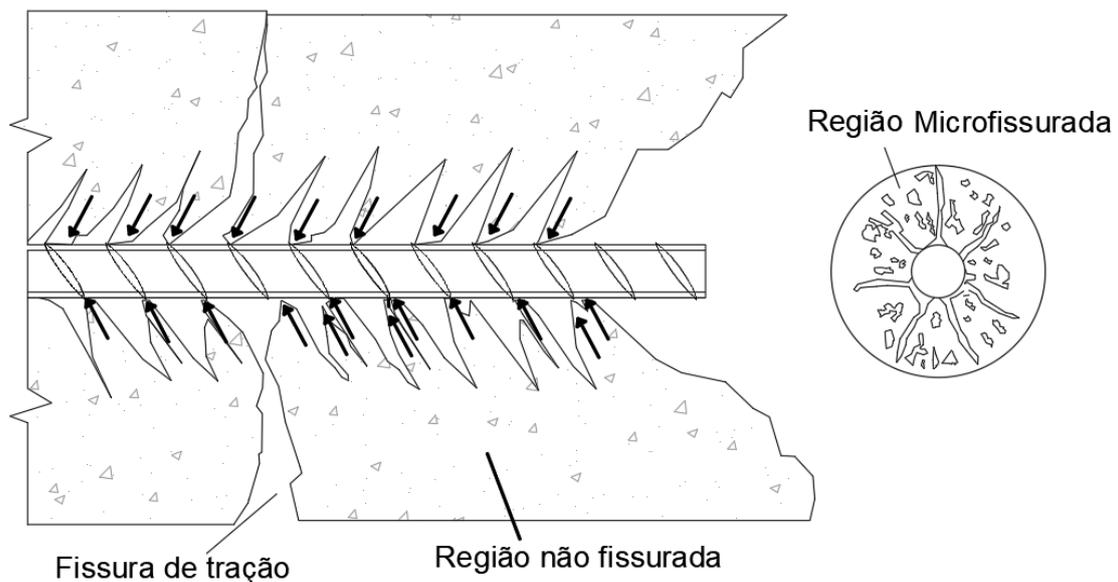
Fonte: adaptado de Fischer, 2002.

## 2.4.2 Ruptura por análise local

### 2.4.2.1 Teoria apresentada por Fusco

Ainda segundo Fusco (1995), através de uma análise mais minuciosa dos fenômenos de aderência, mostra que há uma intensa microfissuração do concreto que envolve a barra de aço, conforme ilustra Figura 11.

Figura 11 – Região de microfissuração do concreto

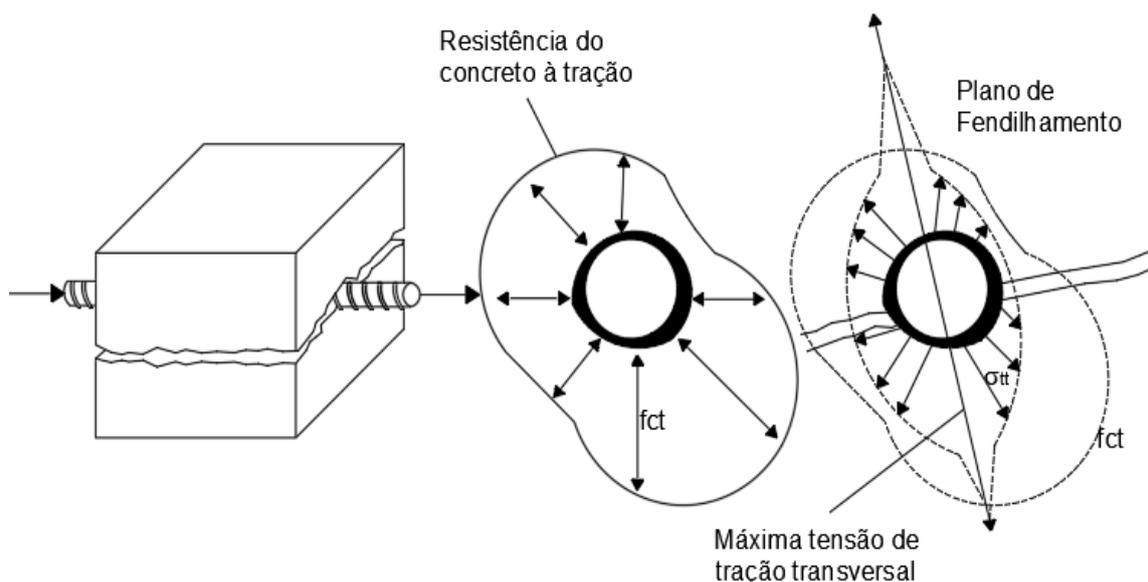


Fonte: adaptado de Fusco, 1995.

Entende-se, intuitivamente, que a solidarização aço-concreto seja decorrente da mobilização de tensões tangenciais na interface, contudo, a ligação dos materiais mobiliza tensões diagonais de compressão, que são acompanhados de tensões transversais de tração e estabelecem o equilíbrio. Essas tensões que geram as microfissuras supracitadas.

Sendo assim, a aderência entre os materiais não é dado por simples processo de deslizamento progressivo da barra de aço dentro do concreto e os esforços de tração transversais mobilizados pelo fenômeno de aderência tendem a causar o fendilhamento do material, paralelamente ao eixo da barra, conforme representado na Figura 12. O fendilhamento é causado pelas tensões circunferenciais que levam à abertura de fissura longitudinal à barra.

Figura 12 – Representação do fendilhamento



Fonte: adaptado de Fusco, 1995.

Para evitar o fenômeno de fendilhamento deve ser garantido um confinamento adequado. Também podem ser utilizadas armaduras transversais e/ou fibras que absorvem os esforços de tração, à medida que se dá a microfissuração.

#### 2.4.2.2 Teoria apresentada por TASSIOS

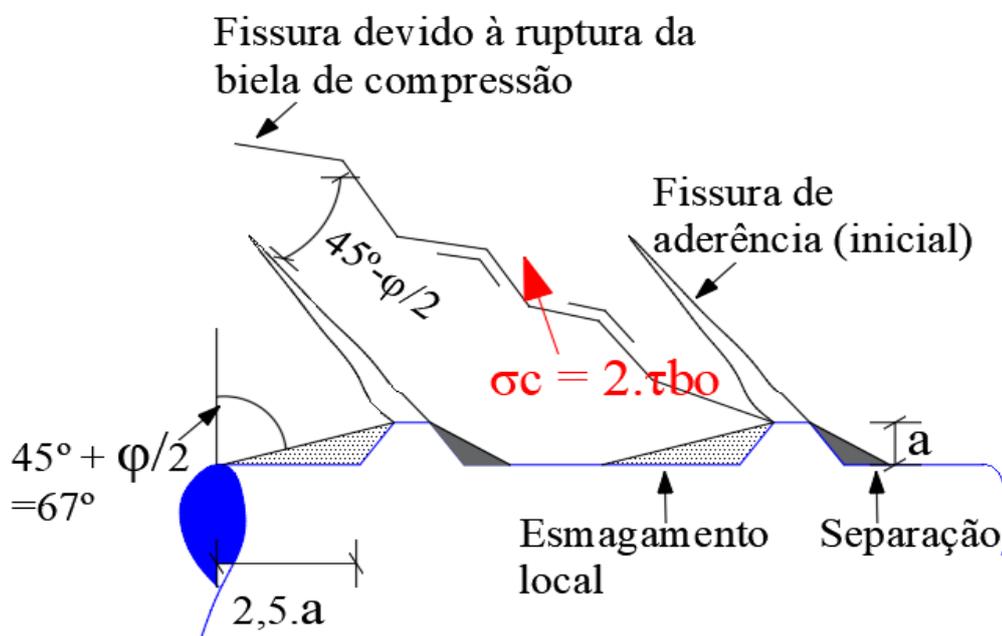
O Autor apresenta um possível estágio final de ruptura para barras nervuradas, nas quais se considera que o principal mecanismo remanescente seja o engrenamento mecânico, promovido pelo esmagamento do concreto entre as nervuras.

De acordo com o mesmo, para solicitações pequenas ocorrem deslizamentos extremamente pequenos, na ordem de microns. Nessa fase, o mecanismo de resistência é atrelado à aderência química, que resiste até 1,5 MPa de tensões, sendo que até 0,6 Mpa praticamente não há deslizamentos. Com o aumento de carregamento a tensão de aderência também é elevada, até atingir o nível que caracteriza a ruptura da adesão. Após isso, há a mobilização do engrenamento mecânico.

Passa a ser assumido que a tensão de aderência última ( $\tau_{bu}$ ) seja controlada pela ruptura das bielas de compressão que se apoiam nas nervuras. Essas bielas, entre fissuras consecutivas, são tensionadas com

aproximadamente 2 vezes  $\tau_{bu}$ . No entanto, ressalta-se que as fissuras longitudinais causadas pelo fendilhamento isolam as bielas de concreto que, nesta configuração, são carregadas por compressão quase não confinada, devido a notória destruição do concreto que circunda a barra. Sendo assim, o autor salienta que a degradação total da aderência ocorre com a ruptura dessas bielas de compressão. Pontuando que antes de ser realizado o rompimento da biela de compressão é admitido o processo de esmagamento do concreto. A Figura 13 ilustra a teoria explanada.

Figura 13 – Esquema representativo da teoria de TASSIOS



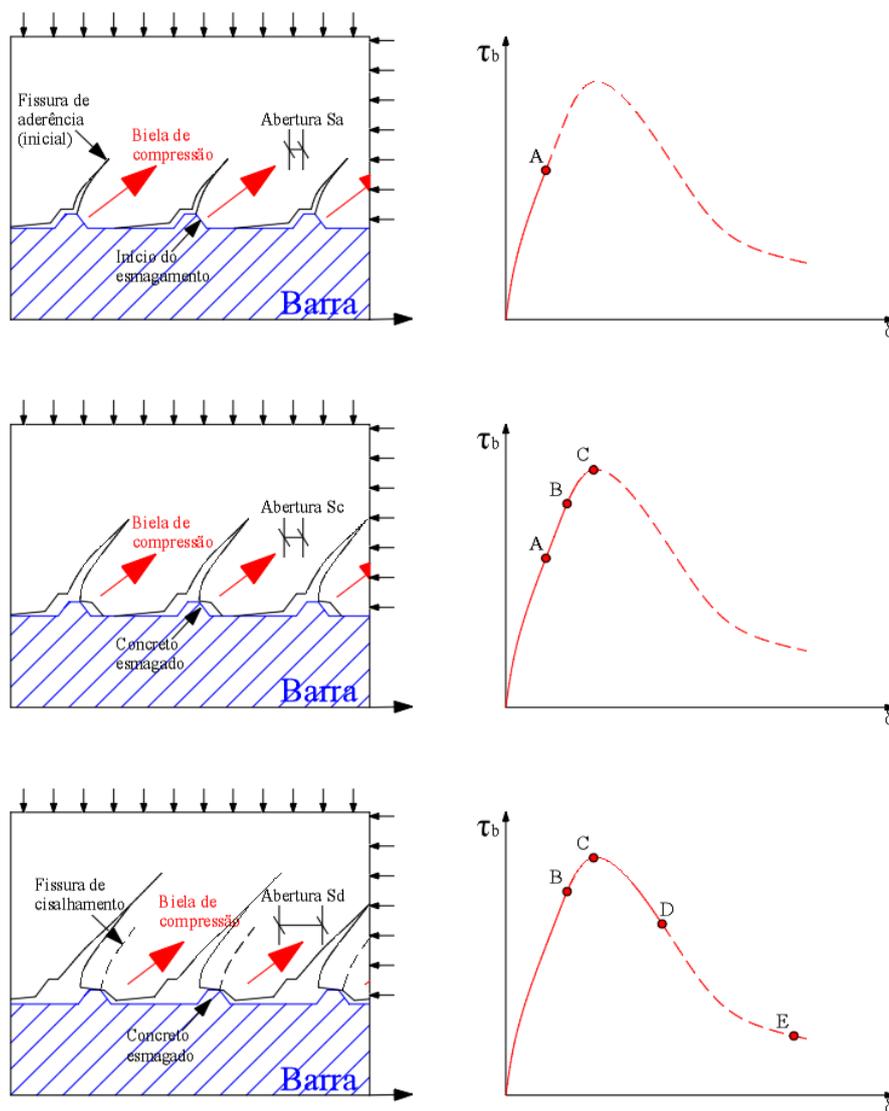
Fonte: adaptado de Tassios, 1981.

### 2.4.2.3 Teoria apresentado por ELIGEHAUSEN et al

Este modelo analisa qualitativamente o comportamento de aderência de uma configuração de concreto armado submetida a carregamento monotônico. Todas as informações que seguem são ilustradas na Figura 14.

Para as pequenas tensões de aderências (até o ponto A), as fissuras de cisalhamento iniciam sua propagação do topo das nervuras, sendo seu crescimento e tamanho controlados pela pressão de confinamento. A transferência de forças ocorrerá, principalmente, pelo engrenamento mecânico com ângulo de inclinação de aproximadamente  $30^\circ$ .

Figura 14 – Esquema representativo da teoria de ELIGEHAUSEN et al (1983)



Fonte: adaptado de Castro, 2002.

Para as pequenas tensões de aderências (até o ponto A), as fissuras de cisalhamento iniciam sua propagação do topo das nervuras, sendo seu crescimento e tamanho controlados pela pressão de confinamento. A transferência de forças ocorrerá, principalmente, pelo engrenamento mecânico com ângulo de inclinação de aproximadamente  $30^\circ$ .

Através do aumento do carregamento, ocorre esmagamento local do concreto em frente às nervuras, fator que reduz a inclinação da tangente da curva (ponto B). Quando atingida a tensão de aderência última (ponto C) as fissuras de cisalhamento estendem-se ao longo de um comprimento aproximadamente igual a quatro vezes a altura da nervura. Nesse arranjo, a transferência de forças ocorre em angulação aproximada de  $45^\circ$ .

A partir desse ponto, conforme aumenta-se o deslizamento, a tensão de aderência decresce lentamente. Quando as fissuras de cisalhamento atingem a base da nervura adjacente (ponto D), as tensões de aderência decrescem mais acentuadamente. No momento que o deslizamento se torna igual ao espaçamento entre as nervuras, apenas uma parcela do atrito passa a mobilizar a aderência (ponto E). De modo geral, a tensão de aderência última aumenta proporcionalmente com a resistência à compressão do concreto.

### **3 METODOLOGIA**

Para a execução deste trabalho foi utilizado um traço de concreto autoadensável adaptado dos estudos de (Marangon, 2011), com resistência à compressão de aproximadamente 65 MPa. As taxas de armadura utilizadas foram de  $\rho:1,40\%$  e  $\rho:2,18\%$ , para as quais foram adotadas, respectivamente, barras nervuradas de aço CA 50 com diâmetros de 20 e 25 mm. O sentido de moldagem variou entre vertical e horizontal (sentido normal e perpendicular às barras, respectivamente).

A Tabela 2 apresenta a composição do traço utilizado, que foi desenvolvido por Marangon (2011), o qual utilizou o Método do Empacotamento Compressível, implementado no programa computacional MEC\_COPPE1.0 no Laboratório de Estruturas e Materiais do PEC/COPPE/UFRJ. A dosagem foi adaptada para as condições locais e validadas através de testes preliminares no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete, RS. Foram alteradas as proporções do superplastificante e do aditivo modificador de viscosidade (VMA), afim de atingir o espalhamento ideal. A sílica ativa utilizada na dosagem de referência foi substituída por sílica da casca de arroz. Essa substituição foi necessária para adaptar-se aos materiais disponíveis na região.

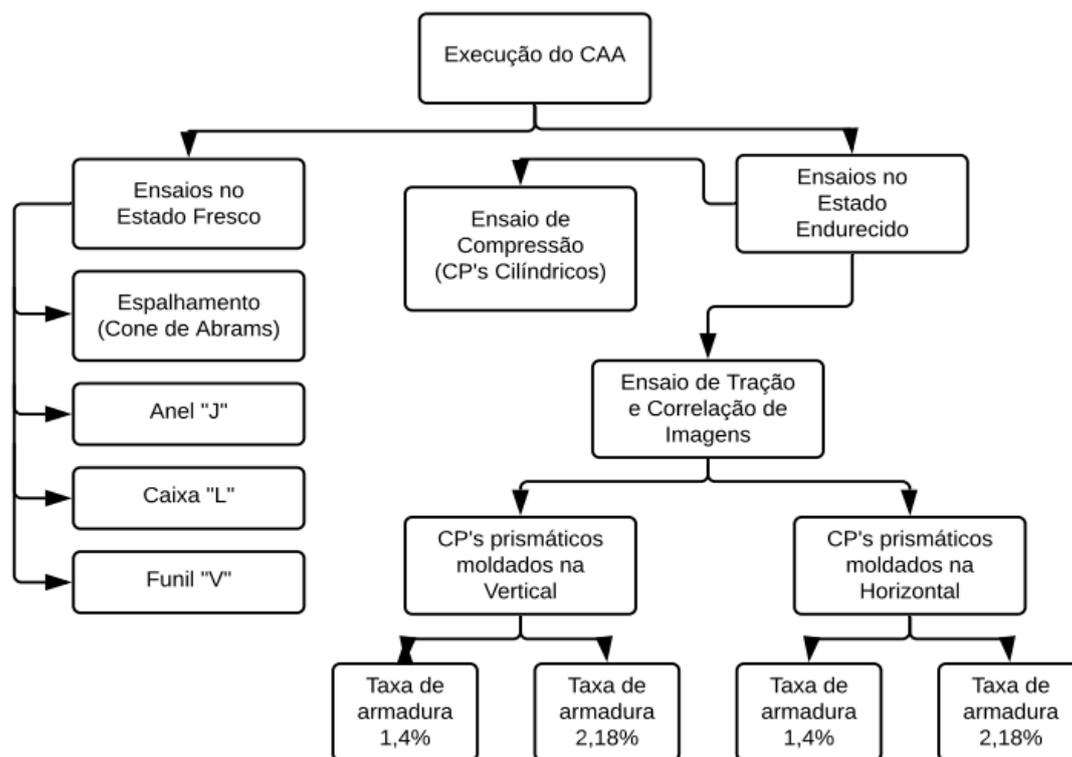
Tabela 2- Composição da mistura

Composição	CAA
Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	539,6
Agregado miúdo (Areia fina) (kg/m <sup>3</sup> )	930,06
Cimento Portland (kg/m <sup>3</sup> )	360
Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	168
Silica #325 (kg/m <sup>3</sup> )	70
Sílica da casca de arroz (kg/m <sup>3</sup> )	45
Teor de superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	8
Água (kg/m <sup>3</sup> )	160
Modificador de viscosidade (g/m <sup>3</sup> )	36
Relação Água/Cimento	0,44

Fonte: elaboração própria.

O procedimento experimental segue o organograma apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Procedimento experimental.



Fonte: elaboração própria.

### 3.1 Caracterização dos materiais

#### 3.1.1 Caracterização dos agregados

A composição granulométrica do agregado miúdo (areia) foi obtida conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com a utilização das peneiras da série normal, e algumas peneiras da série intermediária (75, 42,5 e 2000  $\mu\text{m}$ ). O diâmetro máximo foi de 1,18mm e o módulo de finura da ordem de 2. Na Figura 16 pode ser observada a curva granulométrica do agregado miúdo.

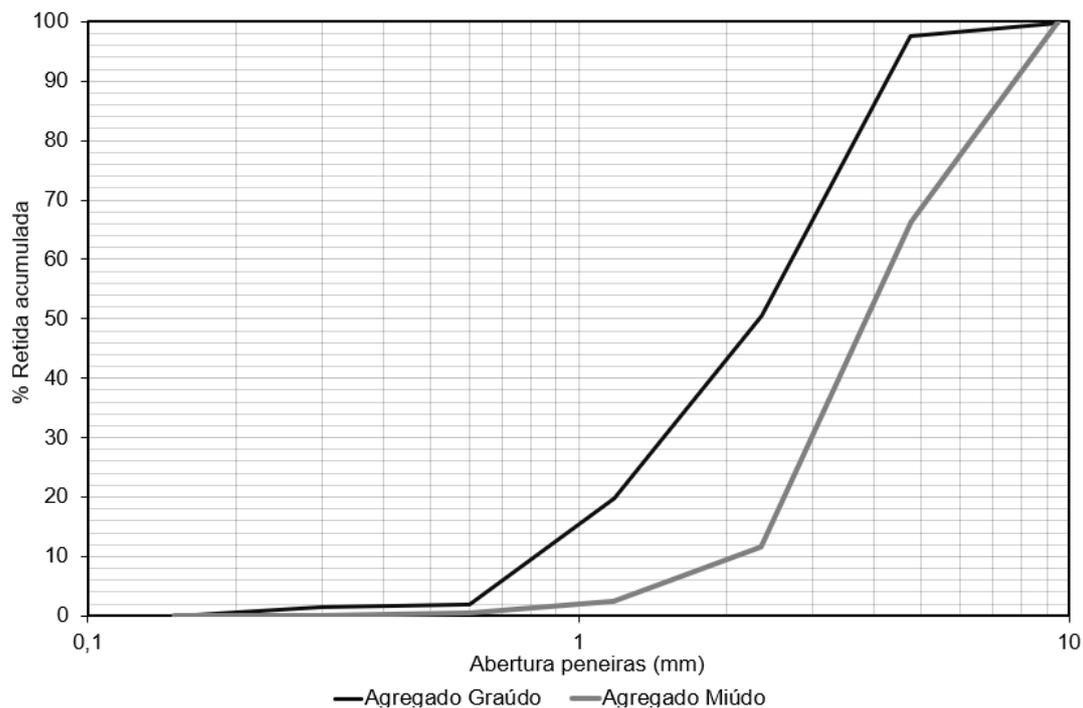
O agregado graúdo empregado foi a brita 0, obtido da empresa Supermix de Santa Maria, RS. Essa agregado foi escolhido pelo seu fator de forma (cúbico) – mais alongado que o agregado da cidade de Alegrete-RS - ser importante para alcançar as propriedades reológicas adequadas para o concreto autoadensável. Os dados do agregado graúdo estão presentes na Tabela 3 e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 16.

Tabela 3 - Característica do agregado graúdo.

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Diâmetro máximo (mm)	9,5
Módulo de finura	5,79
Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,54
Absorção de água (%)	3,94
Massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,33
Teor de material pulverulento	0,04

Fonte: Dalcin (2016).

Figura 16 - Curva granulométrica dos agregados



Fonte: elaboração própria.

### 3.1.2 Massa específica dos materiais finos

O cimento utilizado foi o CP-V ARI RS, da marca Votorantin, para o qual foi realizado o ensaio de massa específica de acordo com a norma NM 23, através do método do frasco de Le Chatelier e obteve-se uma massa específica de 2,98 g/cm<sup>3</sup>.

A cinza volante é proveniente da termoelétrica Presidente Médici e tem massa específica determinada pelo frasco de Le Chatelier NBR NM 23 (ABNT,2001), resultando em 1,98 g/cm<sup>3</sup>.

A sílica da casca de arroz utilizada é da marca Pilecco Nobre, obtida através da queima da casca de arroz com temperatura controlada, resultando em um material pozolânico que já é bastante difundido no setor da construção civil. Sua caracterização foi executada por Silva (2019), através da difração por raios X, obtendo-se os dados apresentados na Tabela 4. Sendo sua massa específica de 2,03 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4 - Características da sílica da casca de arroz

<b>Componente</b>	<b>Composição</b>
Óxido de Silício – SiO <sub>2</sub>	89,06%
Óxido de Manganês - MnO	0,53%
Pentóxido de Fósforo – P <sub>2</sub> O	0,84%
Trióxido de Enxofre – SO <sub>3</sub>	0,21%
Óxido de Potácio - K <sub>2</sub> O	2,99%
Óxido de Cálcio – CaO	1,18%
Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub>	4,30%
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15%
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74%

Fonte: Silva, 2019.

O fíler denominado sílica #325 é proveniente da moagem de quartzo, da Mineradora Jundu, tendo a função de diminuir a quantidade de cimento utilizadas, em virtude de possuir a mesma granulometria. Realizou-se o ensaio de massa específica pelo método do frasco de Le Chatelier, normatizado pela NBR NM 23 (ABNT 2001), obtendo como resultado a massa específica de 2,68 g/cm<sup>3</sup>.

A massa específica do agregado miúdo foi determinada de acordo com o ensaio normatizado pela NBR 9776 e obteve-se o valor de 2,64g/cm<sup>3</sup>.

### **3.1.3 Superplastificante**

O superplastificante é de base química de Poliacrilato, fornecido pela empresa RITT da cidade de Alegrete, RS, e possui o teor de sólidos de 22,71%.

### **3.1.4 Agente modificador de viscosidade**

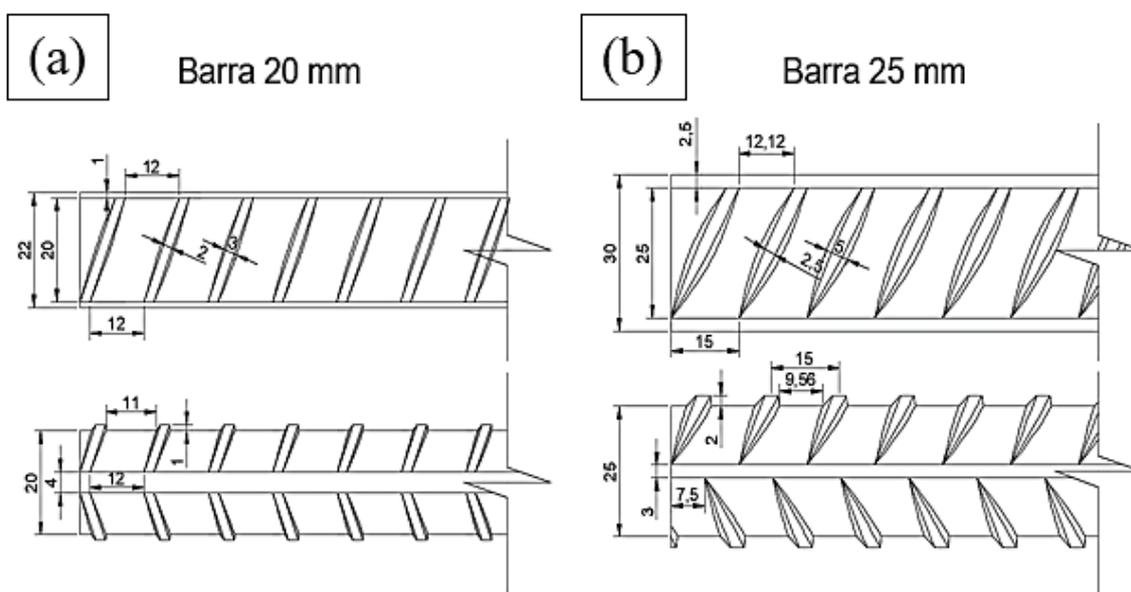
Foi utilizado como agente modificador de viscosidade (VMA) o Rheomac UW 410, fabricado pela BASF. Com base química de polímeros de celulose com alta massa molecular, apresenta coloração branca e em pó. Sua aplicação foi realizada após a homogeneização dos constituintes da mistura, de forma que fornecesse a devida coesão à mistura e também com o intuito de evitar a segregação e exsudação.

### 3.1.5 Barras de aço

As barras de aço utilizadas (20 e 25mm) foram obtidas através de doação da empresa Iccila, localizada em Santana do Livramento, RS. As barras de aço são da marca Gerdau, com nervuradas do tipo CA-50. Para caracterização mecânica das barras de aço, foram realizados ensaios de tração direta. No referido ensaio utilizou-se o clip-gage da marca Instron até o início do escoamento da barra e também dois LVDT's de 100mm para controle de deformação linear, obtendo a deformação pós escoamento pela média dos mesmos.

Foram verificadas as dimensões das nervuras das barras de aço, pois apresentam diferentes configurações geométricas. A barra de 20mm tem distribuição simétrica de replicação, e as de 25mm apresenta nervuras intercaladas, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Características geométricas das nervuras da barra de 20 mm (a) e 25 mm (b).



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

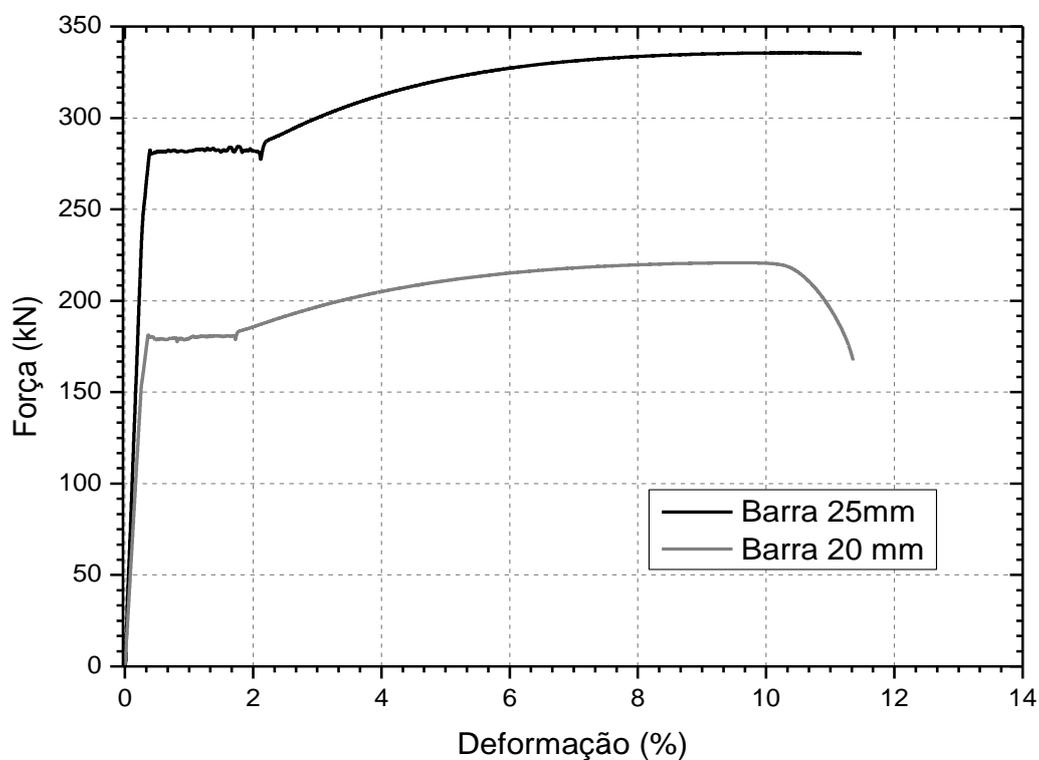
Na Tabela 5 são apresentados os dados médios do ensaio de tração das barras de 20 mm e 25 mm, e a curva média força x deformação, das barras em questão, pode ser observada na Figura 18.

Tabela 5 - Força, deformação, tensão e módulo de elasticidade de tração das barras de aço de 20 e 25mm

Barra	Força Escoamento (kN)	Deformação Escoamento (%)	Tensão de escoamento (MPa)	Força Máxima (kN)	Deformação Máxima (%)	Tensão Máxima (MPa)
20mm	182,4	0,376	580,59	222,87	10,38	709,43
CV (%)	0,79	3,61	0,79	1,32	11,46	1,32
25mm	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 18 - Curva média de força x deformação das barras de aço



Fonte: elaboração própria.

Para a moldagem, as barras foram posicionadas com as nervuras voltados para duas faces de captura de imagem – moldagem vertical – e paralelas ao topo de fôrma e fundo de fôrma, na moldagem horizontal.

## **3.2 Ensaio reológicos**

### **3.2.1 Fluides, viscosidade plástica aparente e índice de estabilidade visual**

A determinação do espalhamento do concreto é normatizada pela NBR 15823-2 (ABNT,2017), que através do ensaio denominado de espalhamento de tronco de cone determina a fluides, a viscosidade plástica aparente e estabilidade visual da mistura.

A fluides é estabelecida pela média do diâmetro de espalhamento de duas medições perpendiculares entre si, realizadas após a retirada do cone de Abrams -totalmente preenchido de CAA - e do total escoamento do CAA em fluxo livre por ação da gravidade sob a placa metálica de base. Neste ensaio também pode ser averiguado a viscosidade plástica aparente e o índice de estabilidade visual.

A viscosidade plástica aparente do CAA, também denominada de espalhamento de tronco de cone t500 é resumida em tomar o tempo de abatimento da mistura no ensaio de SF. Concretos com baixa viscosidade, classificados como VS1 apresentam espalhamento inicial elevado e tendem a atingir o diâmetro de 500mm em menos de 2 segundos e cessando seu fluxo em pouco tempo. Os de elevada viscosidade apresentam fluxo com intervalo de tempo superior a 2 segundos e de forma mais uniforme, sendo classificados como VS2.

O índice de estabilidade visual (IEV) é classificado por inspeção visual, constatando a possível exsudação e segregação da composição, certificando assim a classe de homogeneidade pela fluides dos agregados ao longo do espalhamento.

Neste trabalho foi esperado que a mistura alcançasse espalhamento próximo ao obtido por Marangon, (2011), com cerca de 600mm, correspondente a classe SF1. A Figura 19 ilustra os equipamentos e o procedimento de ensaio.

Figura 19 – Procedimento de execução do ensaio de espalhamento



Fonte: elaboração própria.

### 3.2.2 Método do anel “J”

O ensaio realizado com o anel “J” determina a habilidade passante do CAA, é atualmente normatizada pela NBR 15823-3 (ABNT,2017), entretanto, para a realização deste trabalho utilizou-se o previsto na NBR 15823-3 (ABNT,2010), devido a limitações do laboratório no tocante a disponibilidade de instrumentos.

O método referido consiste na realização do SF na presença do anel “J”, que age como interceptador de fluxo – simulando a presença de armaduras frente ao escoamento do CAA, e posterior tomada de duas medidas perpendiculares entre si do espalhamento. A Figura 20 ilustra os equipamentos e o procedimento de ensaio.

Figura 20 – Representação do método anel “J”

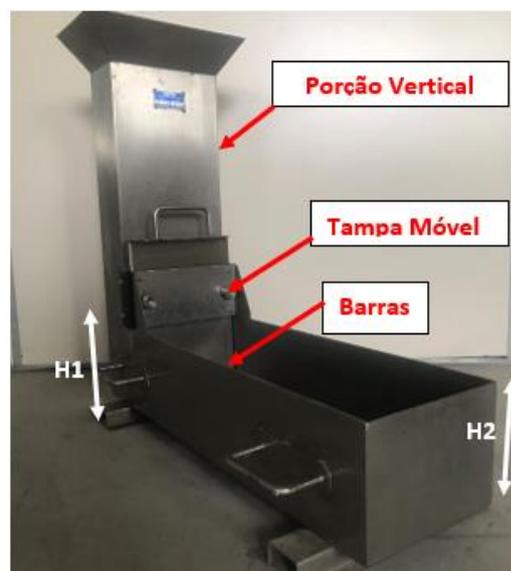


Fonte: Elaboração Própria.

### 3.2.3 Método da caixa “L”

Visando a simulação da habilidade de passagem do CAA em seu estado fresco por armaduras, nesse ensaio a mistura é despejada no recipiente vertical do sistema e posteriormente é retirada a tampa móvel situada na parte inferior, permitindo, assim, o escoamento do material frente às barreiras verticais. A Figura 21 ilustra o sistema.

Figura 21 – Representação da caixa L



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Como resultado é obtida a razão entre a altura na porção horizontal (H2) da fôrma e da vertical (H1), assim como o tempo resultante do escoamento. A razão entre esses é proporcional a facilidade de escoamento, quanto maior H2/H1, maior a capacidade de fluxo. Essa classificação também foi feita utilizando a NBR 15823 (ABNT,2010), devido devido a limitações do laboratório no tocante a disponibilidade de instrumentos.

### 3.2.4 Método do funil “V”

De acordo com o prescrito na NBR 15823-5: (ABNT,2017), determina-se a viscosidade do CAA, através do método do funil “V” ilustrado pela Figura 22, na qual a seta indica a comporta.

Figura 22 – Funil “V”



Fonte: elaboração Própria.

Para execução do ensaio despeja-se uma amostra homogênea e representativa da mistura de volume igual a 12 litros na parte superior do funil e após um tempo máximo de 12 segundos a comporta deve ser aberta e averiguado o tempo decorrente para o total escoamento do concreto pela abertura inferior. Caso ocorra obstrução do escoamento, o ensaio deve ser realizado novamente. Caso ocorra repetição da obstrução do concreto, o mesmo

não apresenta viscosidade e habilidade passante necessários para ser considerado autoadensável.

O tempo necessário para o escoamento da mistura determina a viscosidade do material, de modo que quanto maior o tempo necessário para o escoamento, menor será a viscosidade do material.

### **3.3 Moldagem dos corpos de prova**

Afim de alcançar os objetivos, estimou-se a execução dos seguintes corpos de provas.

- 4 CP's prismáticos retangulares com barra de aço nervurada com  $\phi$  20mm, moldados no sentido vertical;
- 4 CP's prismáticos retangulares com barra de aço nervurada com  $\phi$  25mm, moldados no sentido vertical;
- 4 CP's prismáticos retangulares com barra de aço nervurada com  $\phi$  20mm, moldados no sentido horizontal;
- 4 CP's prismáticos retangulares com barra de aço nervurada com  $\phi$  25mm, moldados no sentido horizontal;
- 4 Cp's cilíndricos para cada grupo de concretagem.

A concretagem foi executada em grupos de 8 CP's prismáticos. Foram então moldados 16 CP's. prismáticos de 15x15x75cm e 8 CP's cilíndricos 10x20cm.

#### **3.3.1 Corpo de prova prismático retangular**

Para a averiguação do comportamento à compressão do CAA foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com 100mm de diâmetro e 200mm de altura, sendo moldados somente no sentido vertical. Dois dias após a concretagem os CP's foram desmoldados e a retificação da face superior dos CP's realizadas aos 21 dias.

Durante o período de cura os CP's foram mantidos em uma câmara úmida com umidade relativa do ar em 90% (+ ou - 5%) e temperatura de 20°C (+ ou - 5° C) até o momento de realização da compressão.

### 3.3.2 Corpo de prova prismático retangular

O corpo de prova prismático retangular armado é ilustrado na Figura e tem as dimensões em concreto de 150x150x750mm, enquanto a barra nervurada de aço – localizada na região central do CP no sentido da maior medida – tem comprimento de 1150mm e diâmetros de 20 e 25mm com taxas de armadura de  $\rho:1,40\%$  e  $\rho:2,18\%$ , respectivamente.

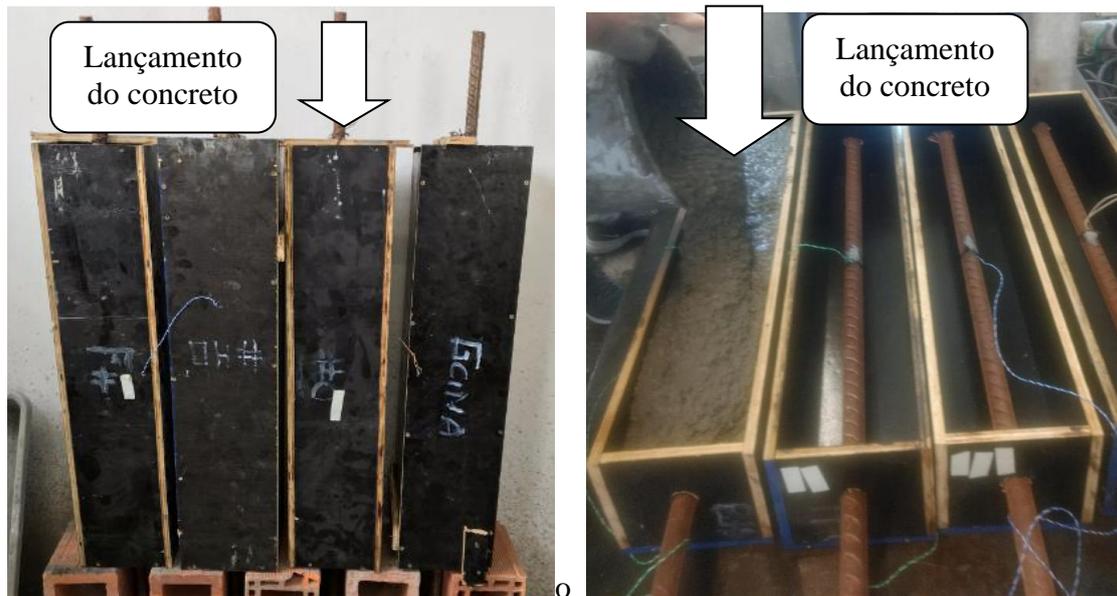
Figura 23 – Corpo de Prova Prismático Retangular Armado



Fonte: elaboração Própria.

Conforme anteriormente mencionado, esses CP's são moldados em diferentes sentidos de despejo do CAA, em moldes de compensado naval elaborados exclusivamente para a realização deste experimento. Tal variação de procedimento é ilustrada na Figura 24, onde as setas indicam o sentido de despejo do concreto.

Figura 24 – Fôrmas Verticais e Horizontais



Fonte: elaboração própria

A Figura 25 ilustra o CP moldado com barra de 25mm de diâmetro, na qual também pode se observar as faces laterais com coloração branca e as faces referentes ao local de colagem do strain gage e sua face oposta estão coloridas com fundo branco e pigmentados com tinta preta. Tais colorações são utilizadas, respectivamente, para identificar a olho nu o aparecimento de fissuras nas laterais e para a captura e correlação de imagens através do software GOM CORRELATOR nas faces frontal e traseira.

Figura 25 – Corpo de prova prismático



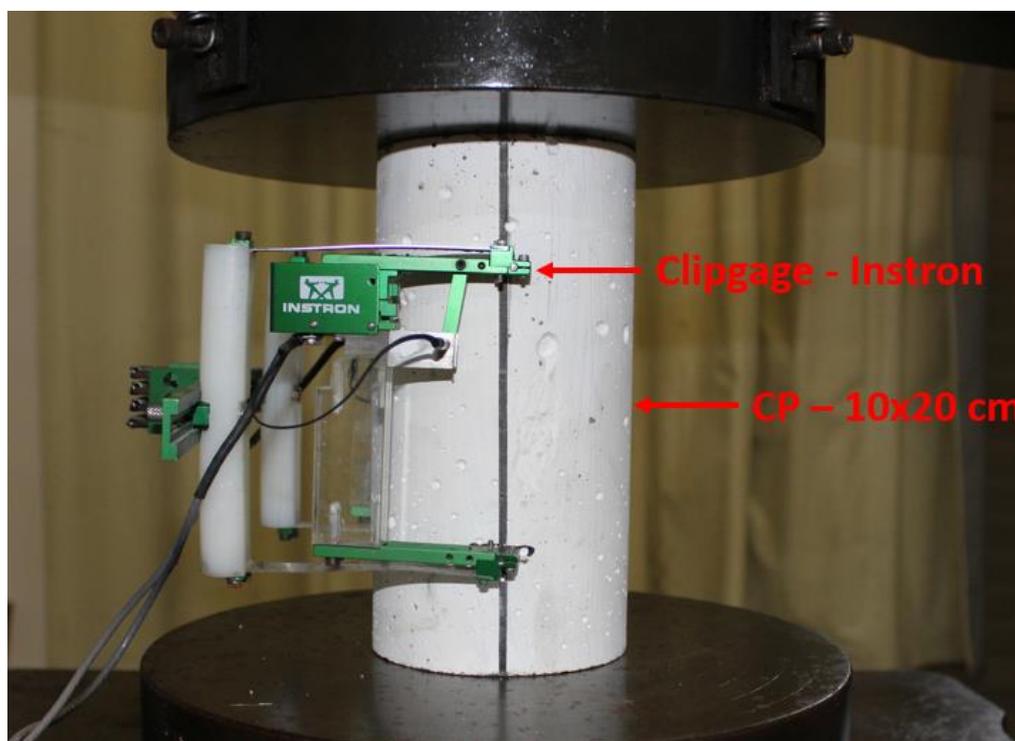
Fonte: elaboração Própria.

### 3.4 Ensaios mecânicos

#### 3.4.1 Comportamento à Compressão

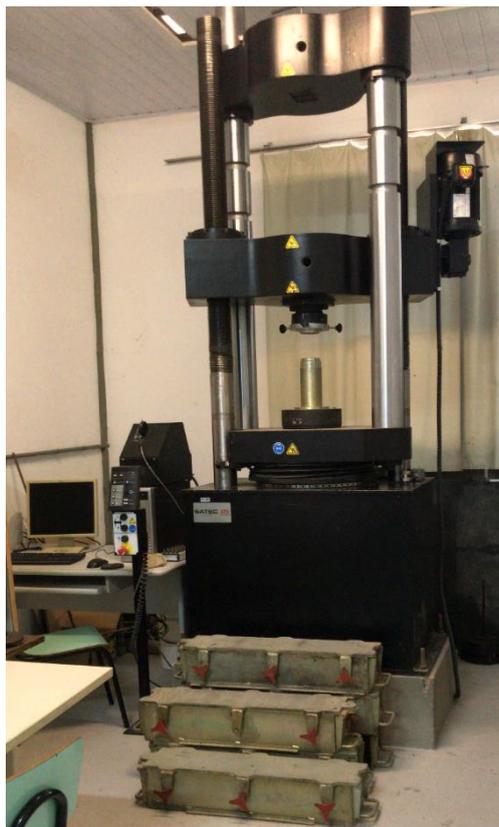
A resistência à compressão bem como a deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram determinados através de ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos com velocidade de deslocamento do travessão de 0,05mm/min, instrumentado com extensômetros do tipo clip gage, da marca Instron, sistema ilustrado na Figura 26. A máquina de ensaios universais utilizada é da fabricante Instron e possui capacidade de carga de 1500 kN, sendo representada na Figura 27.

Figura 26 – Corpo de prova cilíndrico instrumentado



Fonte: JUCA, P., 2020.

Figura 27 – Máquina de ensaios universais



Fonte: elaboração própria.

### 3.4.2 Ensaio de tração direta no tirante

Para a averiguação do comportamento mecânico foram realizados ensaios de tração no tirante. A velocidade de deslocamento 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.

Diante de ensaios testes, foi averiguado que para determinação dos parâmetros é necessário instrumentar o corpo de prova, conforme seguem as especificações:

- Strain gage uniaxial de 120 ohms com grade 5 mm colado no centro da barra de aço, cuja fixação pode ser observada na Figura 28;
- LVDT de 100mm, para determinação da deformação da barra de aço, conectados no condicionador de sinais Spider;
- LVDT Instron, aplicados na porção de concreto para determinação da sua deformação;

- Câmera Canon, configurada para captura 720p e 30fps, para captura da face frontal do corpo de prova;

- Câmera Sony, configurada para captura 2160p e 30fps, para captura da face inversa a aplicação do strain gage, para o grupo moldado na vertical, e para captura da face de fundos da fôrma, na moldagem horizontal.

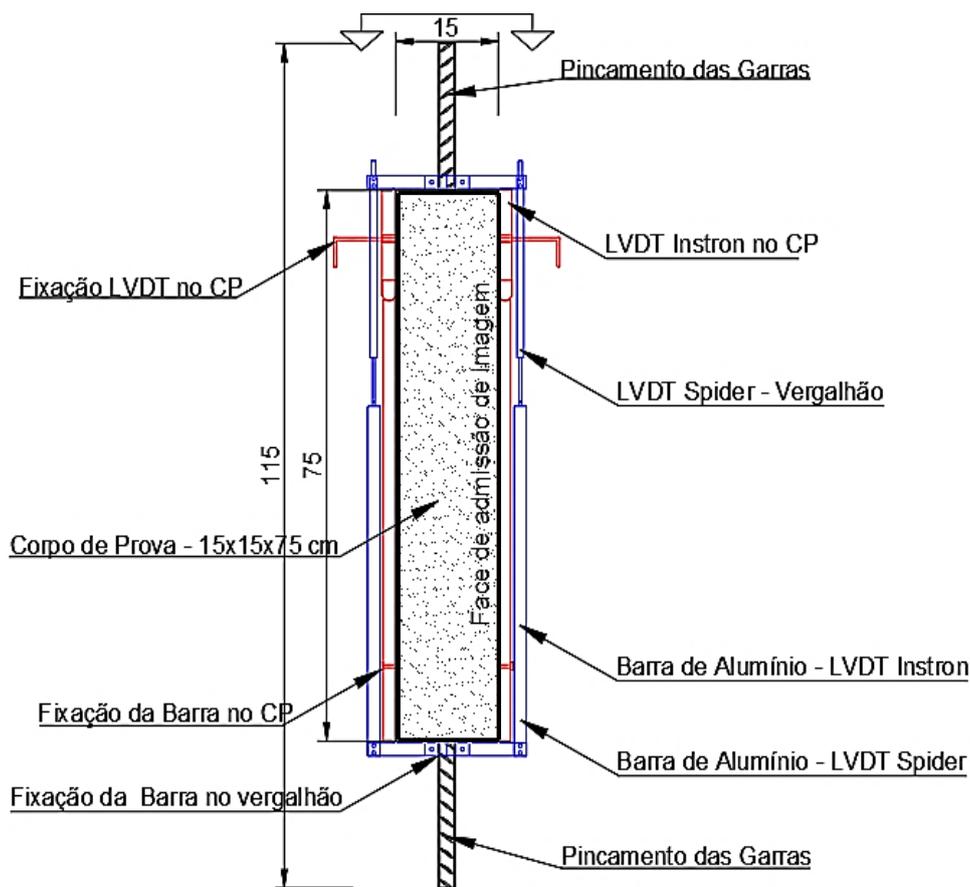
Figura 28 – Strain gage fixado na barra de aço



Fonte: elaboração própria.

A utilização de câmeras de captura de vídeos de fabricantes e configurações distintas é necessária frente às diferentes distâncias e espaço para a realizações das filmagens. A face traseira do corpo de provas (lado aposto ao strain gage) apresenta limitação de espaço devido a localização da prensa no sala. A Figura 29 demonstra parcialmente a instrumentação utilizada, de modo representativo com as devidas indicações.

Figura 29 – Ilustração da instrumentação do ensaio de tração



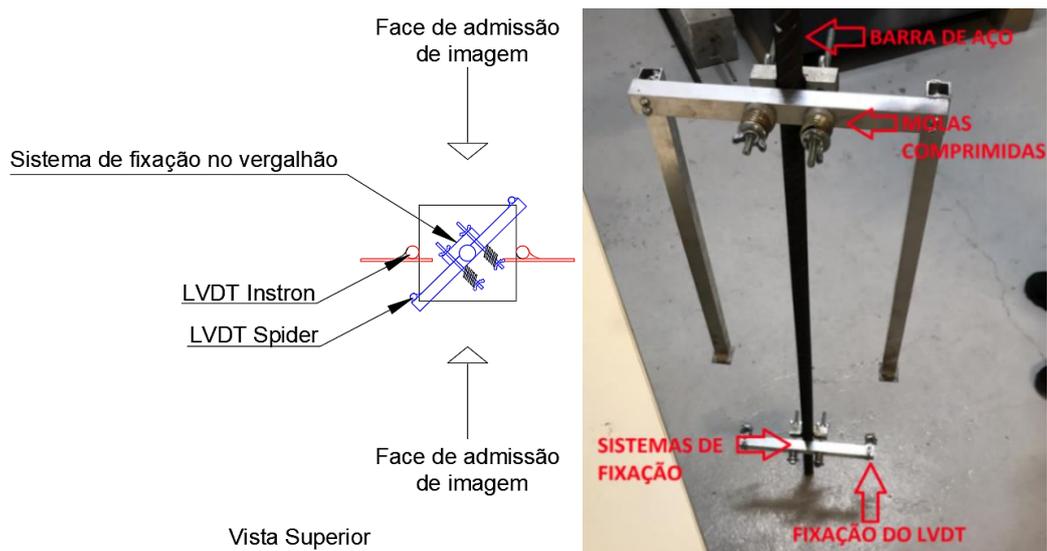
Fonte: adaptada de JUCÁ, P. (2020)

A alternativa adotada para fixar a sustentação do LVDT Spider no vergalhão pode ser visualizada com as devidas indicações na Figura 30, bem como o aparato real. Através de um sistema de compressão por molas, para manter o suporte fixo à barra - frente à redução da seção transversal ocasionado pela tração da barra.

O suporte destinado a prender a barra de alumínio e os LVDT's Instron, foi elaborado com a utilização de cola epóxi nas faces laterais do CP. Isso frente as constatações dos ensaios testes que evidenciaram que quando eram realizados furos para a fixação com parafusos, acarretava na criação de superfícies de falhas, levando a inconsistências no comportamento da amostra.

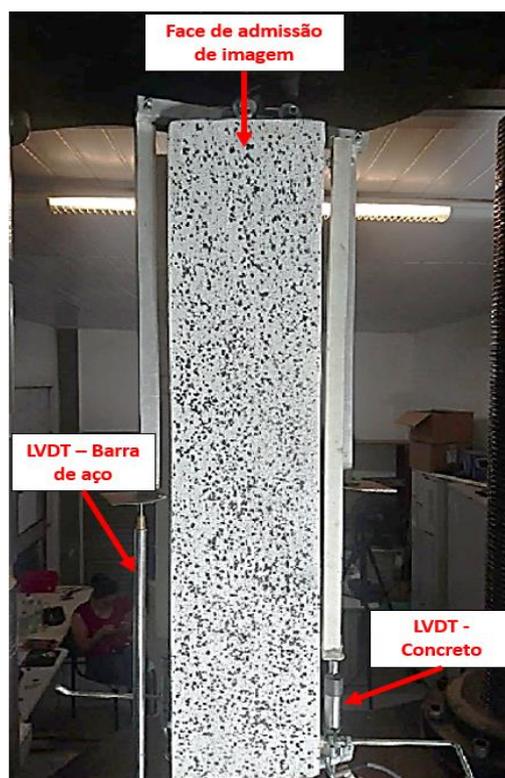
A Figura 31 e Figura 32 ilustram as configurações utilizadas para realização do ensaio.

Figura 30 – Instrumentação para sustentar LVDT



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Figura 31 – Ensaio de tração axial com a instrumentação



Fonte: JUCA, P., 2020.

Figura 32 – Procedimento de ensaio de tração axial dos tirantes



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

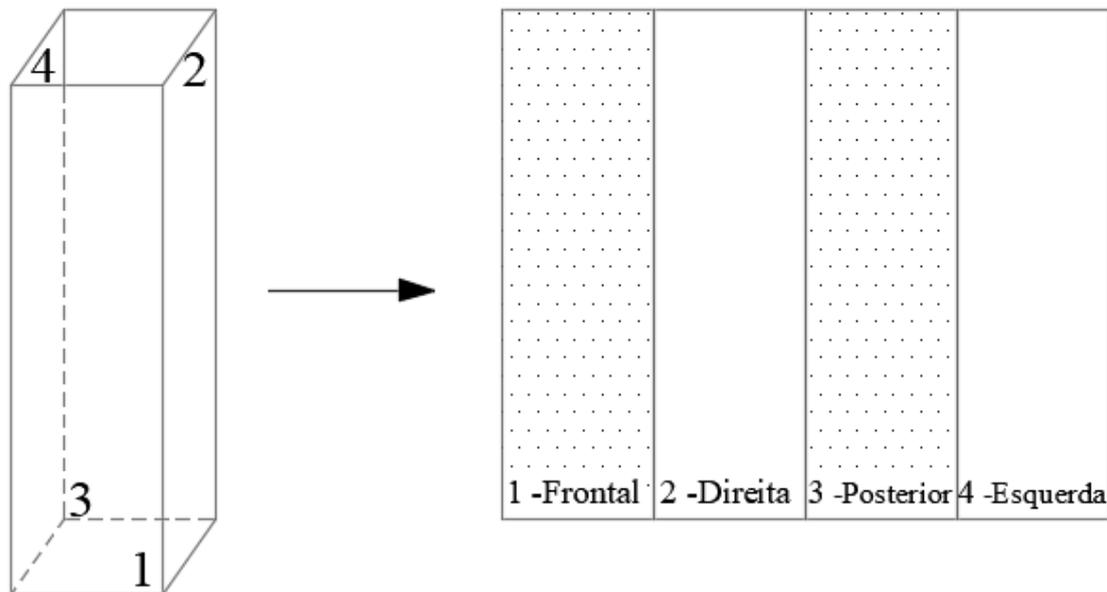
A NBR 6118:2014, no item 17.3.3 – Estado limite de fissuração, define a área de envolvimento, construída por um retângulo cujos os lados não devem ter a distância maior que  $7,5\Phi$  do eixo da barra, como a área de envolvimento para o grupo de elementos das armaduras passivas, denominado Acr.

Portanto a região de envolvimento do concreto para as barras nesta pesquisa, são de  $900\text{ cm}^2$  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  $225\text{ cm}^2$ , 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 na Figura 33.

Figura 33 - Identificação das faces para o mapa de fissuras.



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

### 3.5 Tomografia computadorizada

A tomografia computadorizada foi realizada em dois corpos de prova para verificar a porosidade referente ao sentido de lançamento do concreto. Foi realizada na Santa Casa de Misericórdia de São Gabriel – RS, em um tomógrafo Siemens SOMATOM Scope (Figura 34), operado pela interface syngo CT VC-30 easyIQ.

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  $0,768 \text{ g/cm}^3$ , já as amostras tem peso específico de  $7,96 \text{ g/cm}^3$  para o aço e cerca de  $2,7 \text{ g/cm}$  para o concreto. Sendo assim, foi necessário realizar uma adaptação de filtro 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 corpo de prova.

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 syngo fastView.

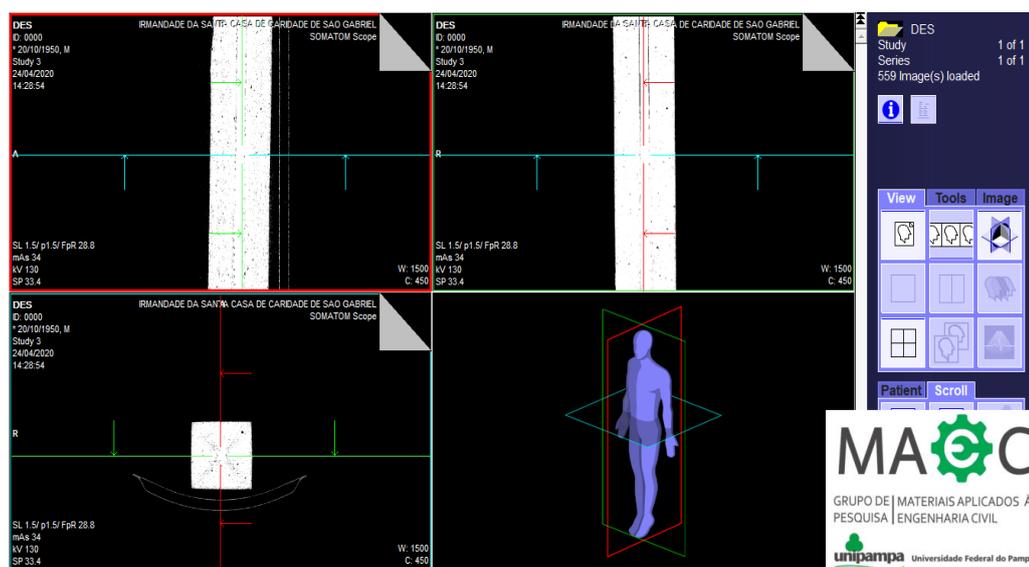
Figura 34 – Equipamento de tomografia SIEMENS SOMATOM Scope



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

A tomografia computadorizada, está dividida em três planos visualização x-y-z, que são representados nos três cortes existentes na estrutura física humana (Figura 35 apenas como elemento de referência para a sondagem).

Figura 35 – Imagens da tomografia computadorizada



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

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 na S.T. no centro do corpo-de-prova, e mesmo sistema de varredura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades reológicas

#### 4.1.1 Fluidéz, viscosidade plástica aparente e índice de estabilidade visual

A mistura foi dosada com superplastificante (SP) e aditivo modificador de viscosidade (VMA) de modo que obtivesse o espalhamento próximo aos 600mm. Dessa forma, seguem representados na Tabela 6 o teor dos materiais utilizados e o espalhamento obtido.

Tabela 6 – Teor de aditivos e espalhamento do tronco de cone

Teor de SP (%)	Teor de VMA (%)	Espalhamento do Tronco de Cone (mm)
0,67	0,376	615

Fonte: elaboração própria.

Como a mistura apresentou fluidez no tronco de cone entre 550 e 650mm, ela é classificada como SF1. O tempo para atingir 500mm de espalhamento foi maior que 2 segundos, dessa forma sendo classificada quanto à viscosidade plástica na classe VS2, que apresenta melhor resistência à segregação, entretanto, tende a apresentar maior teor de ar incorporado. O Índice de Estabilidade Visual (IEV) do concreto foi classificado como estável – IEV0 – sem evidência de segregação ou exsudação, conforme pode ser observado na Figura 36. Classificações de acordo com o previsto na NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

Figura 36 – Concreto ao final do ensaio de tronco de cone



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

#### 4.1.2 Método do anel “J”

O valor obtido após o espalhamento do CAA foi de 570 mm, que representa boa capacidade de fluidez da mistura pelas barras bloqueadoras, com redução no espalhamento, de 7,31%, quando comparado com os valores obtidos sem o anel “J”. Dessa forma, é classificado como PJ2, de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

#### 4.1.3 Método da caixa “L”

Neste ensaio foi determinada a habilidade passante do concreto, sendo recomendado que a razão entre a altura do concreto na parte horizontal (H2) e a altura restante na parte vertical da caixa (H1) seja maior ou igual a 0,80. O valor obtido através dessa razão, no ensaio sem barras de restrição foi 1,0. Quando o ensaio foi realizado com 3 barras de obstrução a razão alcançada foi de 0,92, mostrando que a mistura tem boa capacidade de fluxo (habilidade passante) e é classificada como PL2, de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

#### 4.1.4 Funil “V”

O CAA levou 22 segundos para escoar pelo funil “V”, sendo, portanto, a mistura classificada como VF2 (entre 9 e 25 segundos), de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

### 4.2 Propriedades mecânicas

#### 4.2.1 Comportamento à compressão

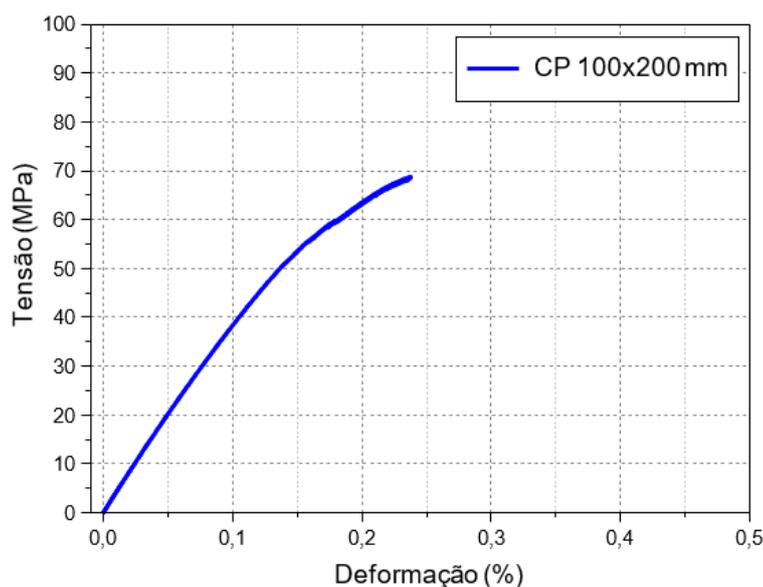
Foram submetidos, ao ensaio de compressão uniaxial, quatro corpos de prova de cada grupo de concretagem. Seguem, na Tabela 7 os resultados médios e coeficiente de variação de resistência à compressão, deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Na Figura 37 é possível observar curva típica de Tensão x Deformação.

Tabela 7 – Dados do ensaio de compressão axial do concreto autoadensável

	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO(MPA)	DEFORMAÇÃO (%)	MÓDULO DE ELASTICIDADE(GPA)	POISSON (V)
<b>MÉDIA</b>	66,33	2,21	37,98	0,18
<b>CV (%)</b>	3,31	11,69	5,84	16,6

Fonte: elaboração própria.

Figura 37 – Curvas típicas de Tensão x Deformação do CAA



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Na Figura 38 pode se observar a forma de fratura dos corpos de provas, que apresentou rompimento e dissipação de energia de forma brusca e explosiva – comportamento típico de materiais frágeis.

Figura 38 – Formato de ruptura do corpo de prova submetido à compressão uniaxial



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

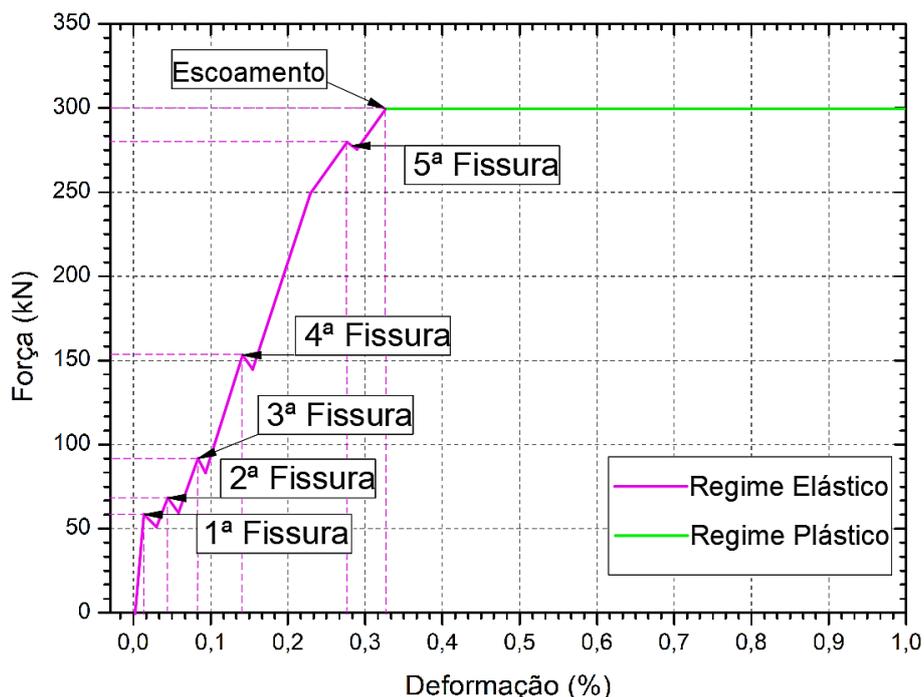
#### 4.2.2 Comportamento à tração

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, que corresponde a curva média, obtida de três ensaios de tração direta nas barras de aço conforme item 3.1.5.

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.

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 39.

Figura 39 - Exemplo dos pontos analisados da curva Força x Deformação dos tirantes.



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

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.

Dessa forma, foram elaborados a partir das curvas típicas de força x deformação dos grupos, os campos de deformação da face frontal e posterior dos tirantes. Para os CP's moldados na vertical foi escolhida uma das faces como a frontal "F" e a outra considerada posterior "P", 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. Para os tirante moldados na horizontal a parte superior é o topo da fôrma, por onde foi lançado o concreto, e o fundo da forma é a face posterior.

#### 4.2.2.1 Resultados obtidos do grupo de corpos de prova com barras de 20mm

A análise da decoesão entre a barra de aço e a matriz, foi realizada através da deformação individual da barra de aço e da matriz, observando a distância relativa entre as funções, distância que, exprime de forma adimensional a diferença de comportamento dos materiais durante a solicitação à tração.

Nesse t3pico s3o abordados 4 corpos de prova com barras de 20mm de diâmetro, moldados no sentido normal à barra e outros 4 no sentido perpendicular à barra.

Como nessa pesquisa o sentido de moldagem é um parâmetro de influência de estudo, foi verificado através das curvas deformação x tempo, o comportamento que cada grupo possui ao ser solicitado à tração uniaxial da barra.

Na Tabela 8 e Tabela 9 s3o apresentados os dados médios do ensaio de tração dos tirantes do grupo com a barra de 20mm.

Tabela 8 – Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 20mm moldados na vertical

PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV(%)
<b>1ª FISSURA</b>	55,691	9,15%	0,006	18,34%	3265,006	45,41%
<b>2ª FISSURA</b>	72,749	16,46%	0,045	16,80%	465,099	4,10%
<b>3ª FISSURA</b>	92,836	22,63%	0,108	24,69%	221,559	43,95%
<b>4ª FISSURA</b>	156,966	3,88%	0,221	2,00%	206,249	1,74%
<b>ESCOAMENTO</b>	177,104	2,78%	0,278	11,72%	130,861	26,23%

Fonte: elaboração própria.

Tabela 9 - Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 20mm moldados na horizontal

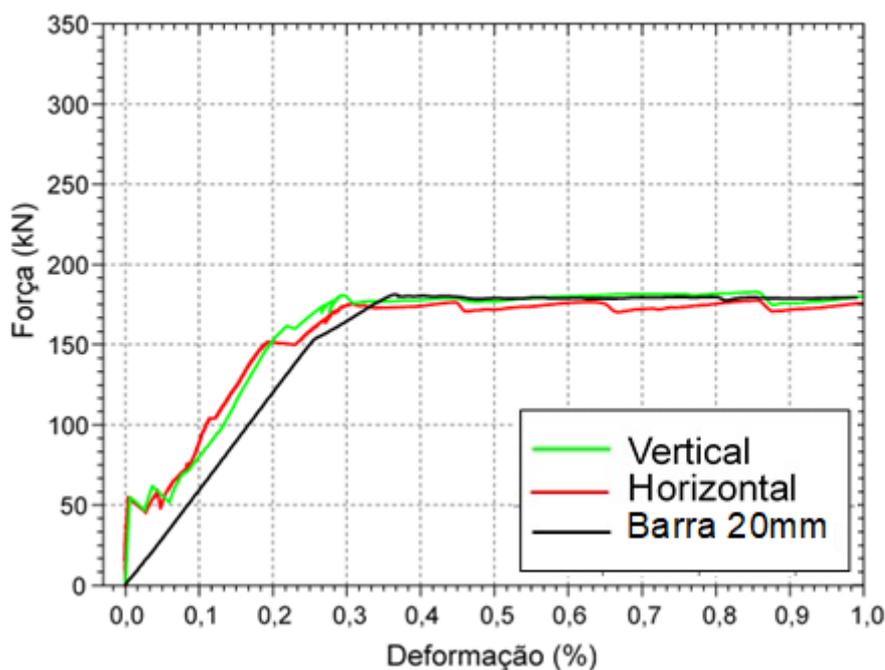
PROCESSO	Força (kN)	CV (%)	Deformação do Concreto (%)	CV (%)	E (GPa)	CV(%)
<b>1ª FISSURA</b>	60,045	8,72%	0,00390	16,06%	4956,190	13,04%
<b>2ª FISSURA</b>	63,892	7,92%	0,04522	15,36%	434,005	37,88%
<b>3ª FISSURA</b>	73,152	-	0,106	-	259,025	-
<b>ESCOAMENTO</b>	147,531	1,43%	0,2057	31,98%	191,669	0,03%

Fonte: elaboração própria.

Na Figura 40 s3o mostradas as curvas típicas referentes aos diferentes sentidos de concretagem dos tirantes, nela é possível observar a diferença de comportamento mecânico referente ao sentido de moldagem. Observa-se que apresentam semelhantes módulo de elasticidade e força máxima até o início do escoamento da barra de aço, com um pequeno aumento da energia de deformação - área sob a curva força x deformação - quando comparadas somente com a barra de aço de 20mm de diâmetro.

Ainda na Figura 40 é possível observar que as forças de primeira fissura das amostras moldadas nos diferentes sentidos são bastante próximas, 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. Na sequência é notório que o comportamento do tirante (força x deformação) é paralelo a curva da barra de aço, ou seja, a partir do patamar de fissuração a rigidez do conjunto 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 40 – Curva típica de força x deslocamento dos tirantes com barra de 20mm



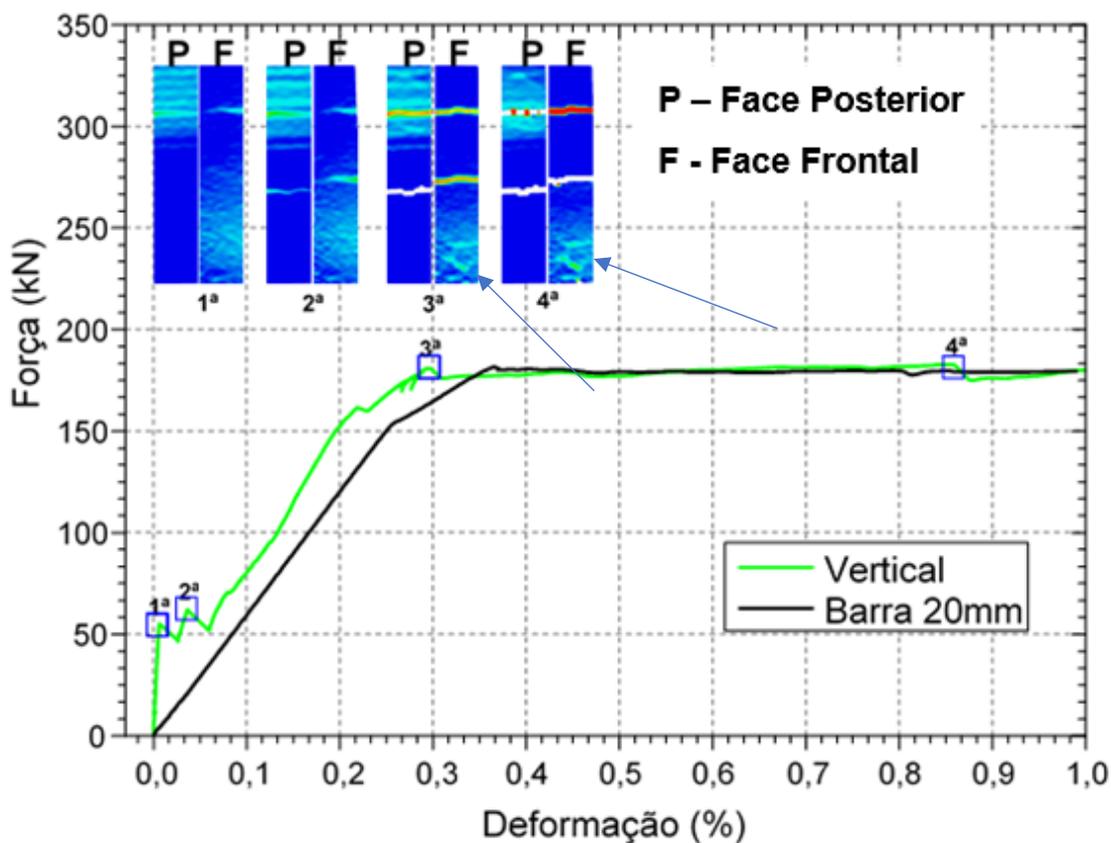
Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Nos tirantes moldados com lançamento de concreto no sentido normal às barras – moldagem vertical – o processo de formação de fissuras ocorre de maneira simétrica (ver Figura 41), 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.

Para esse grupo todas as fissuras são formadas dentro do patamar de fissuração, até o 2º ponto da Figura 41, com abertura da segunda fissura. É

possível observar que o fendilhamento inicia próximo ao limite de escoamento da barra, na parte inferior do tirante, conforme pode ser visto na Figura 41 onde as imagens do 3º e 4º ponto evidenciam maiores deformações e início da abertura vertical de fissura, conforme indicado pelas setas.

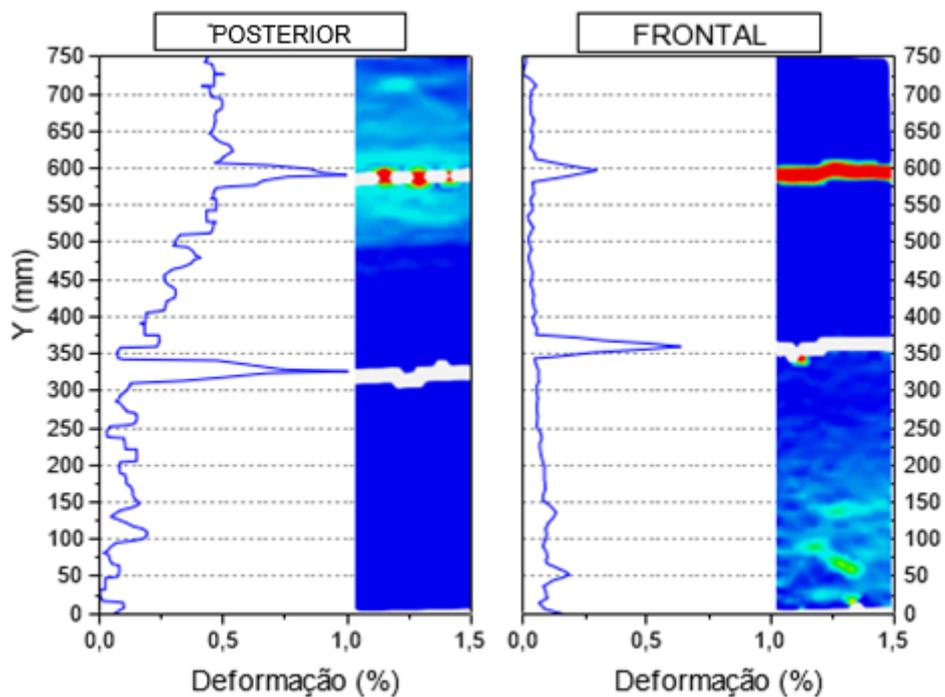
Figura 41 - Curva força x deformação e imagens do DIC do grupo moldado na vertical com barras de 20mm



Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Quando analisada a Figura 42, a ação de aderência causa maiores deformações na região de descontinuidade, no ponto de 600 mm, possibilitando menor deformação relativa entre os materiais.

Figura 42 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na vertical com barras de 20mm



Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Após os ensaios, foram desmembrados os tirantes para verificar a presença dos vazios sob as nervuras. Na Figura 43 são mostrados os vazios em um tirante desse grupo.

Figura 43 - Presença de vazios na interface de ligação inferior da barra de 20mm moldados no sentido vertical



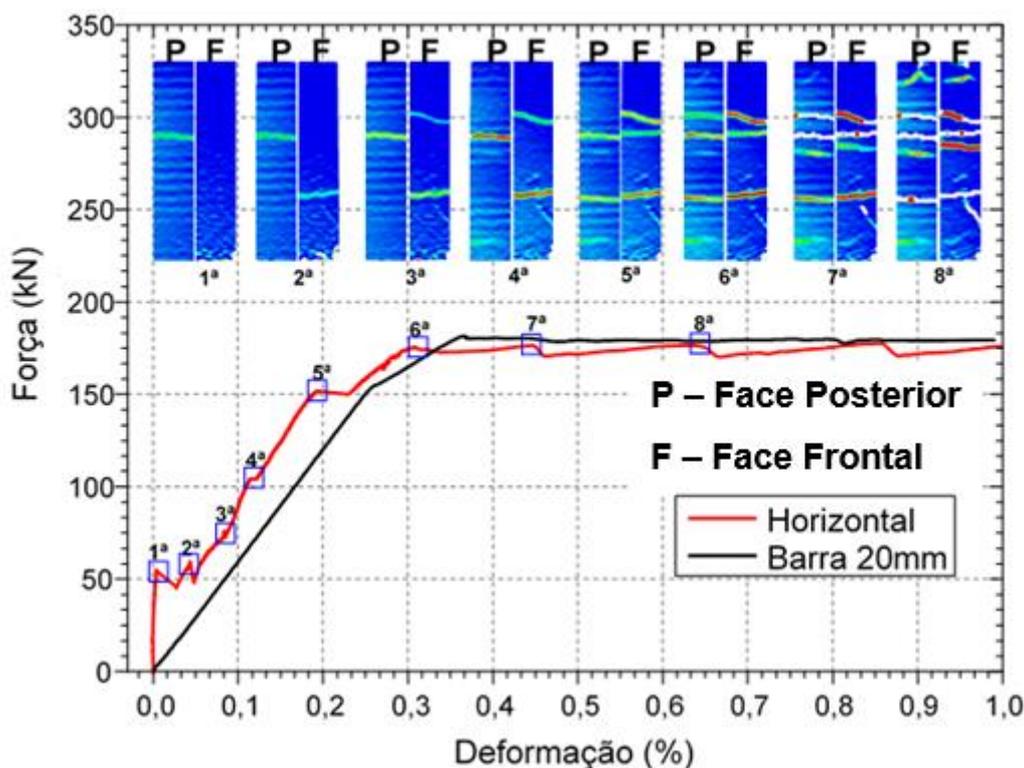
Fonte: elaboração própria.

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 44), 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.

O processo de fissuração ocorre de maneira desigual entre as faces observadas, com aberturas iniciadas de maneira assíncrona, que só se igualam próximo ao final do regime elástico.

Sendo assim, há a formação da segunda fissura na face frontal (ver ponto 2ª – Figura 44), com sucessiva abertura da terceira fissura na face frontal, em simetria com a primeira 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 a aderência mecânica.

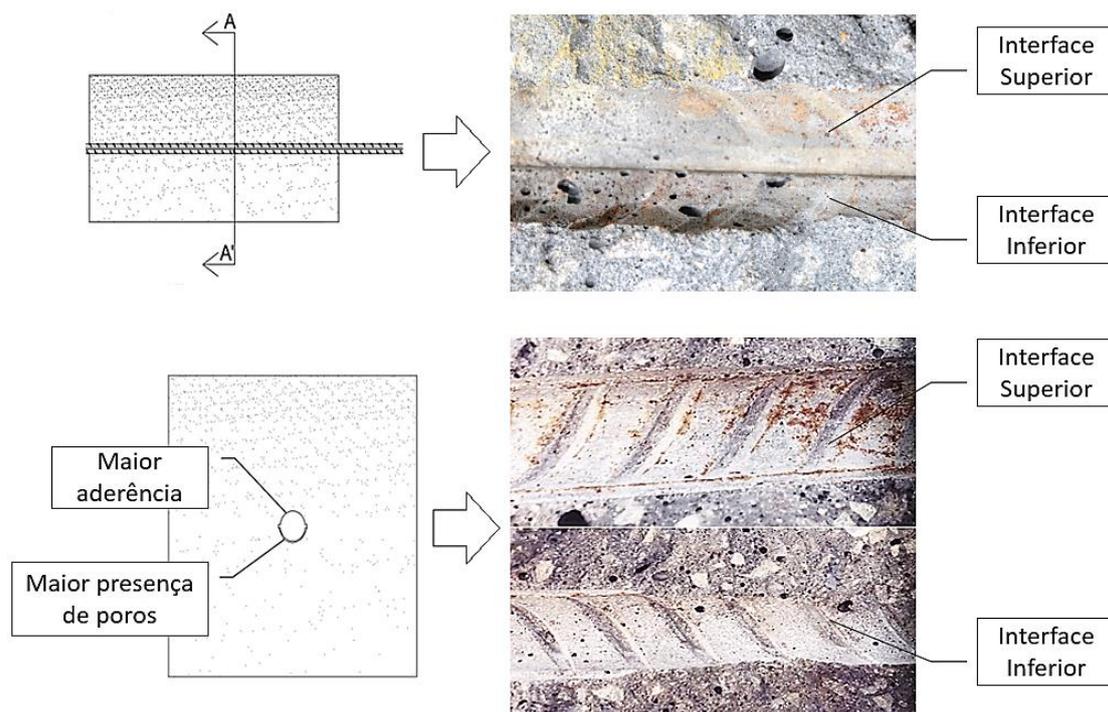
Figura 44 – Curva força x deformação com DIC do grupo moldado na horizontal com barras de 20mm



Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Após acontecer o rompimento dos tirantes deste grupo e o desmembramento da matriz, foi efetuado a análise das interfaces de ligação entra a barra-matriz, mostrado Figura 45, validando o efeito de topo da barra na matriz utilizada.

Figura 45 - Presença de vazios na interface de ligação inferior da barra de 20mm moldados no sentido horizontal

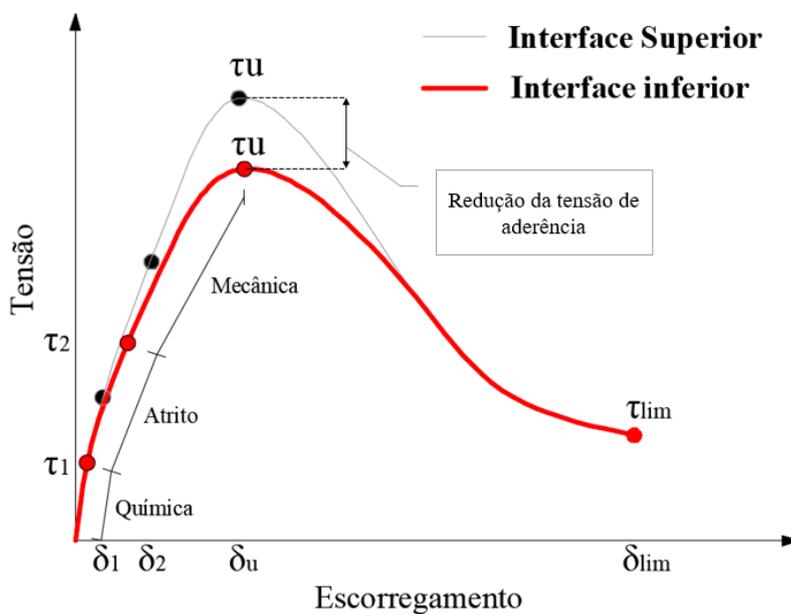


Fonte: JUCÁ, P., 2020.

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 à redução na capacidade de aderência química ( $T_1$ ), e de atrito ( $T_2$ ) da interface inferior, quando comparado a interface superior (ver Figura 46), que por consequência reduz a resistência adesional de pico ( $T_u$ ), justificando assim, a formação da primeira fissura na face posterior do tirante.

Dessa maneira pelos resultados obtidos, pode ser observado na Figura 46 a ilustração da redução nas tensões de aderência da interface inferior em relação a superior, baseado na Figura 46 de Silva (2006).

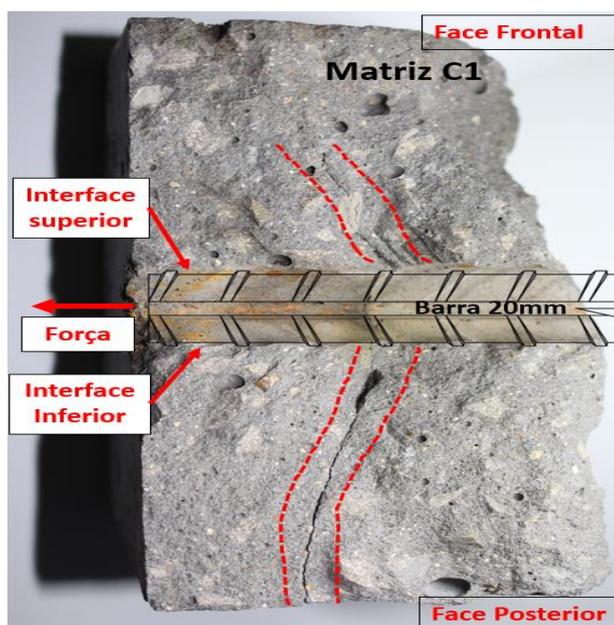
Figura 46 - Curva tensão de aderência x escorregamento para topo e fundos de fôrma.



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

A Figura 47, 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 47 - Fissura de cisalhamento formada pela menor aderência na interface inferior.



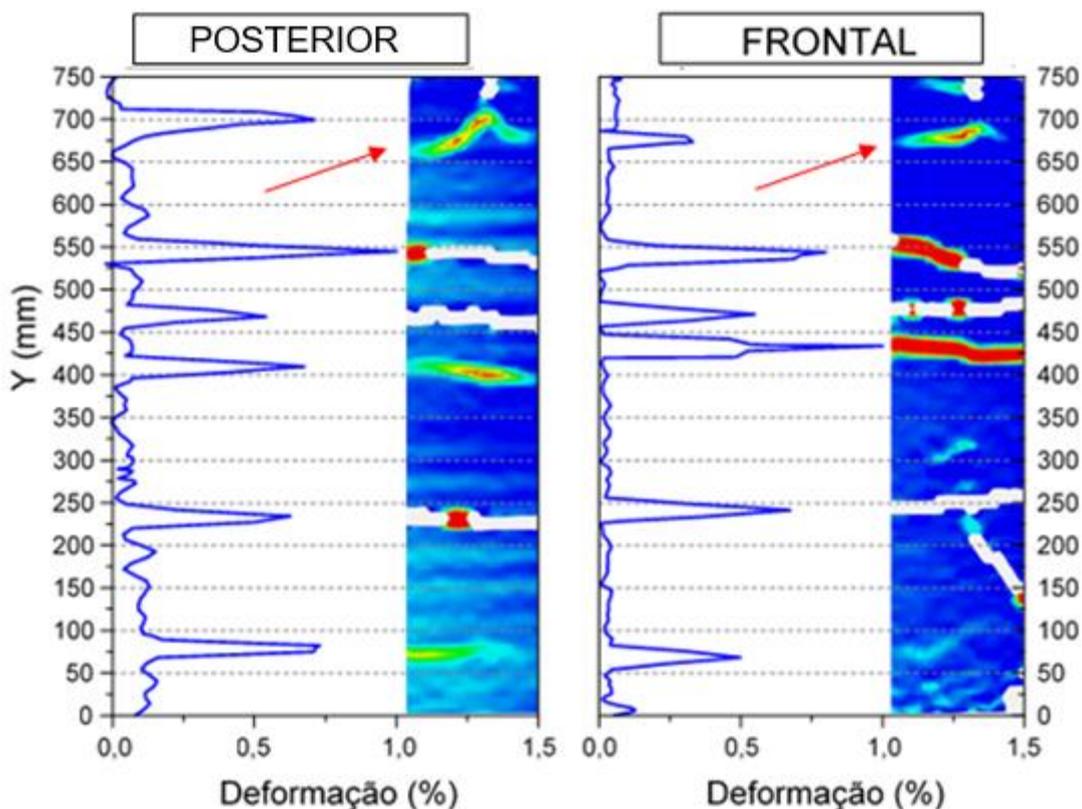
Fonte: JUCÁ, P., 2020.

É possível observar na Figura 47 que os vazios sob a barra são maiores que os vazios sob as nervuras do grupo vertical, conforme a Figura 42.

Na Figura 48, são mostrados os campos de deformações do grupo de tirantes moldados no sentido perpendicular às barras 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 da amostra, 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 48 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na horizontal com barras de 20mm



Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Os tirantes com barras de 20mm, moldados em ambos os sentidos, apresentaram boa repetibilidade do comportamento, possibilitando afirmar que quando o tirante é moldado na horizontal, devido a falhas na aderência,

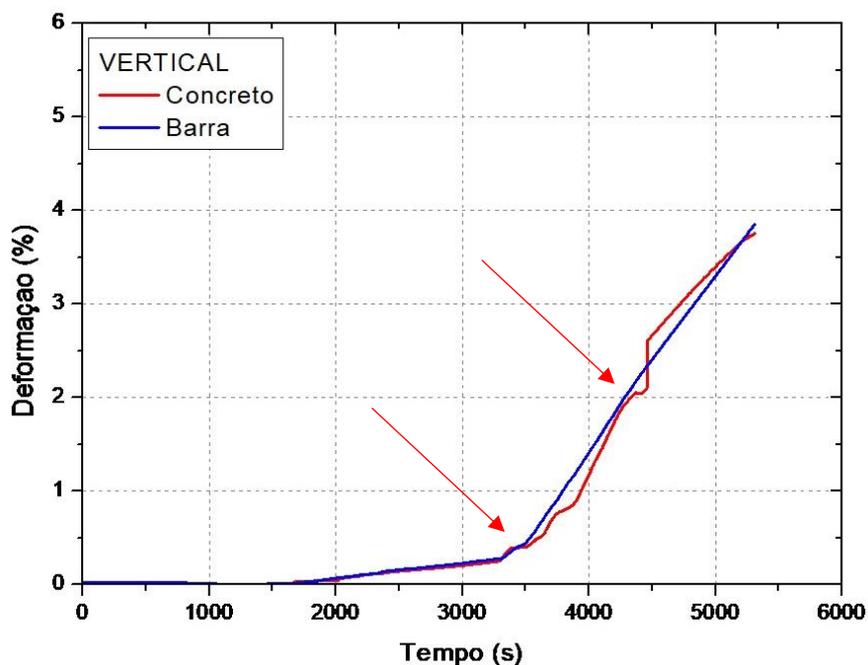
aparecem fissuras acima ou abaixo da barra, que só se juntam no final do regime elástico. Quando moldado na vertical, isso não acontece e as fissuras que se formam são passantes em toda a seção transversal da amostra. Há uma grande mudança no mecanismo de formação e desenvolvimento das fissuras devido à direção da concretagem para o grupo com barras de 20mm.

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.

No grupo de concretagem vertical a primeira fissura (ver seta na Figura 49) ocorre simultaneamente 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 solicitação. 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 43, a interface entre o concreto e a barra de aço é mais uniforme, o que proporciona uma melhor distribuição das tensões e conseqüentemente das deformações.

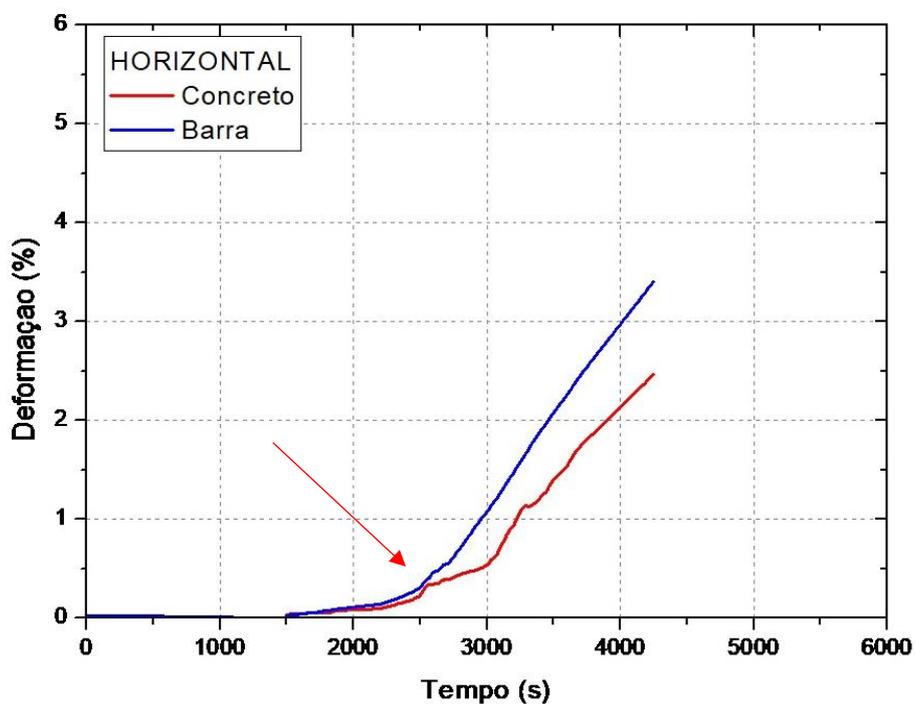
Nestas comparações o grupo de tirantes moldados na horizontal, verifica-se um comportamento semelhante entre os materiais até a abertura da primeira fissura (ver seta na Figura 50), a partir deste ponto a matriz apresenta menor deformação em relação a barra. Isso corre em conseqüência da concentração 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 moldado na horizontal.

Figura 49 - Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de tração axial



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Figura 50- Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de tração axial

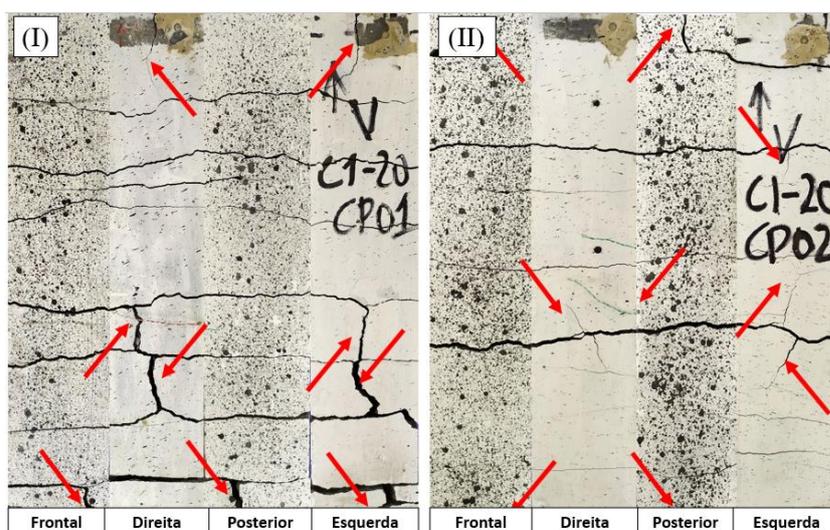


Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Na Figura 51 é possível visualizar a manifestação de dois tipos de fratura: o primeiro é por fendilhamento, que tem maior incidência próximo às extremidades; e o segundo à tração. Este comportamento à fratura é similar ao

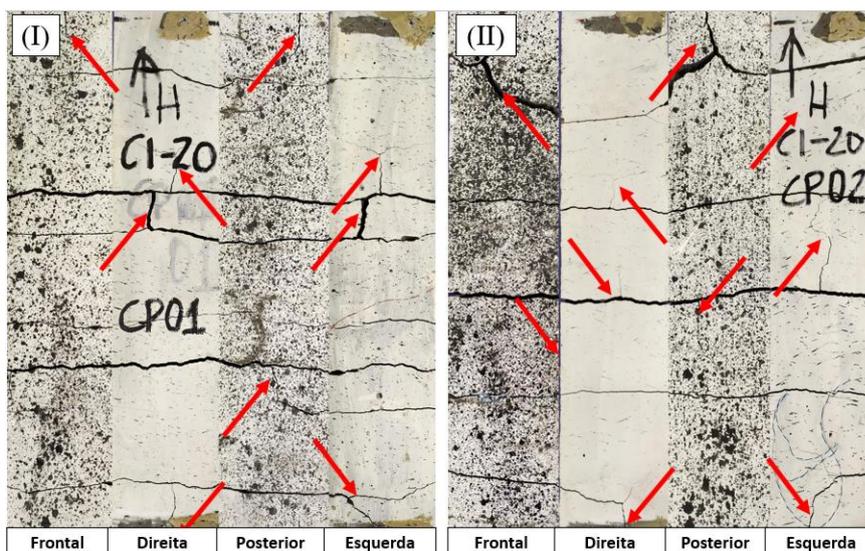
que ocorre com os tirantes moldados na horizontal, ilustrados na Figura 52. Nestas figuras é possível visualizar todo o mapeamento das fissuras que ocorreram ao longo do processo de tração nos tirantes bem como o processo de ruptura por fendilhamento, que está evidenciado pelas setas em vermelho e as fissuras horizontais (perpendiculares à barra).

Figura 51 – Mapa de fissuras dos tirantes moldados na vertical com barras de 20mm



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Figura 52 - Mapa de fissuras dos tirantes moldados na horizontal com barras de 20mm



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

#### 4.2.2.2 Grupo de corpos de prova com barras de 25mm

Os tirantes com barra de 25mm, obedeceram às mesmas condições de ensaio das amostras com barra de 20 mm. Na Tabela 10 e Tabela 11 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 39. 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 39).

Tabela 10 - Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 25mm moldados na vertical

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 11 - Dados médios dos ensaios de tração axial dos tirantes com barras de 25mm moldados na horizontal

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.

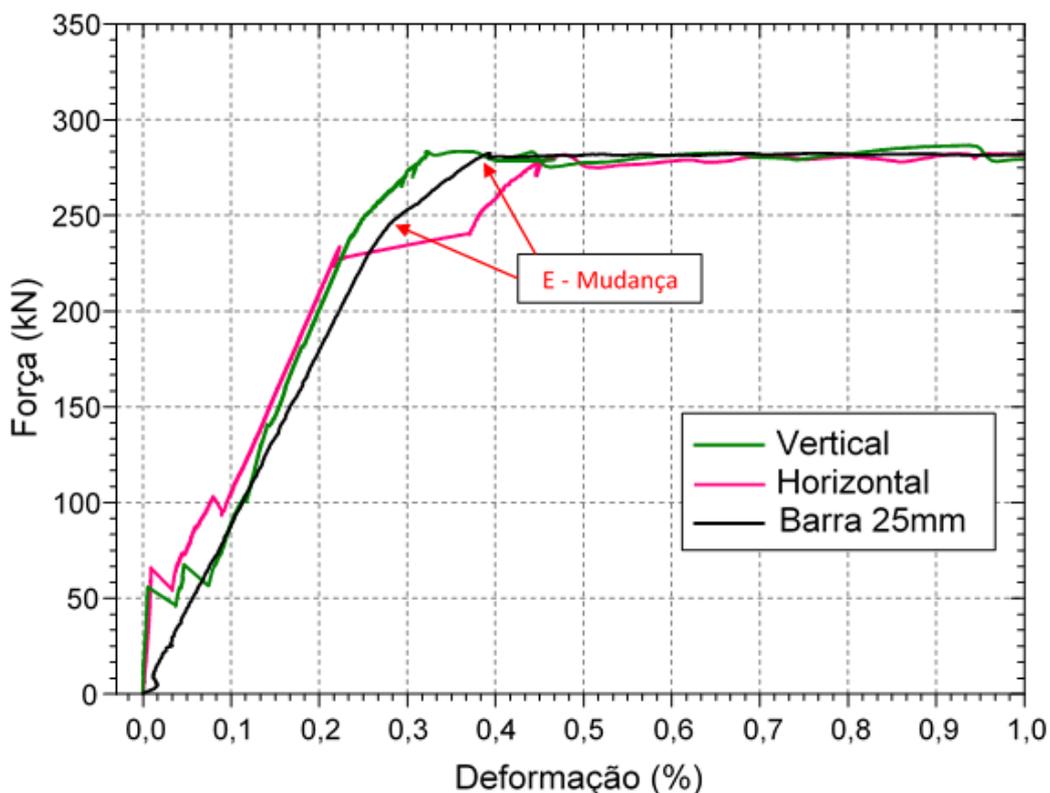
Na Figura 53 pode ser observado o comportamento típico dos tirantes moldados na vertical e horizontal comparadas com a curva típica da barra de 25mm.

Mesmo moldados em sentidos diferentes os grupos apresentam as forças semelhantes para abertura da primeira fissura, com valor de 52,08 kN e 58,31

kN, respectivamente, onde dá-se início ao patamar de fissuração. No entanto, apresentam considerável diferença de deformação para a primeira fissura e consequente diferença de módulo de elasticidade, de 2349 GPa para a moldada na vertical e de 1639 GPa para moldagem horizontal. Em seguida, observa-se que o início dos patamares de escoamento, ocorrem entre a deformação de 0,3% a 0,4%, com força próxima a 280 kN.

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

Figura 53 - Curva típica de Força x Deslocamento dos tirantes com barra de 25mm



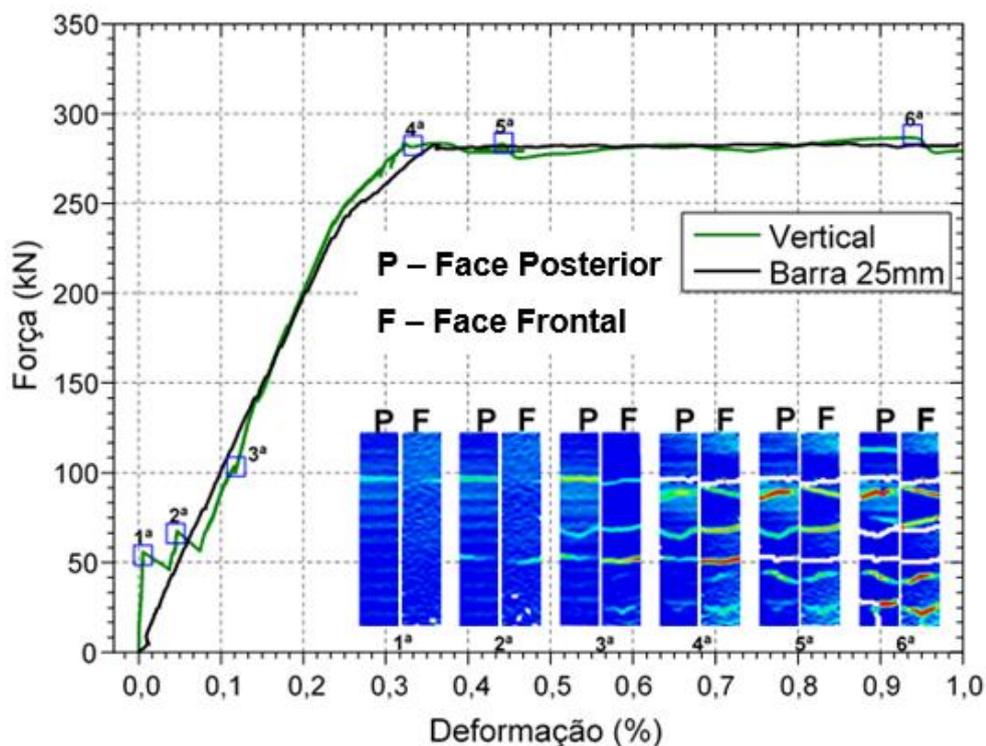
Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

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.

Nos tirantes moldados no sentido vertical, com barra de 25mm a simetria e simultaneidade de formação das fissuras são confirmadas como propriedade, como pode ser visualizado na Figura 54, e como também havia sido identificado no grupo com barras de 20mm (ver Figura 41).

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.

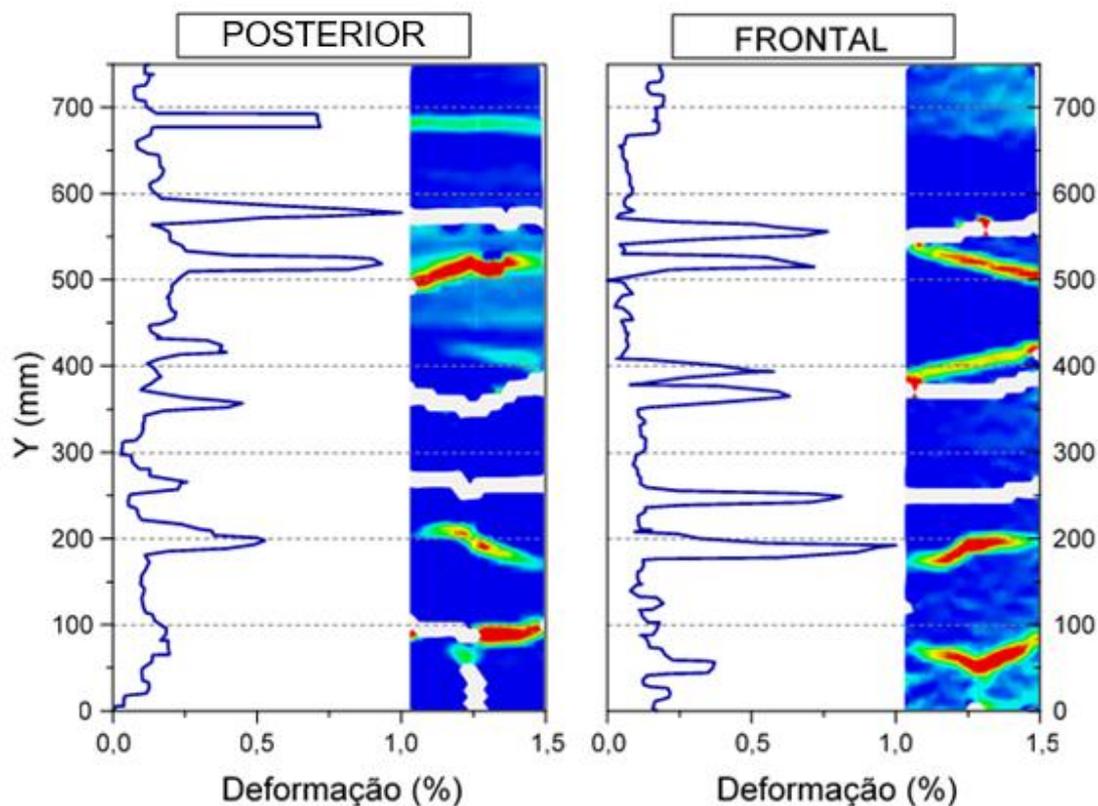
Figura 54 - Curva Força x Deformação com DIC do grupo moldado na vertical com barras de 25mm



Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Esse grupo apresenta uma múltipla fissuração até o limite de deformação de 1%, com comportamento similar da matriz em ambas as faces. No entanto, apresenta fendilhamento na extremidade inferior. Esses comportamentos podem ser observadas na Figura 55.

Figura 55 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na vertical com barras de 25mm

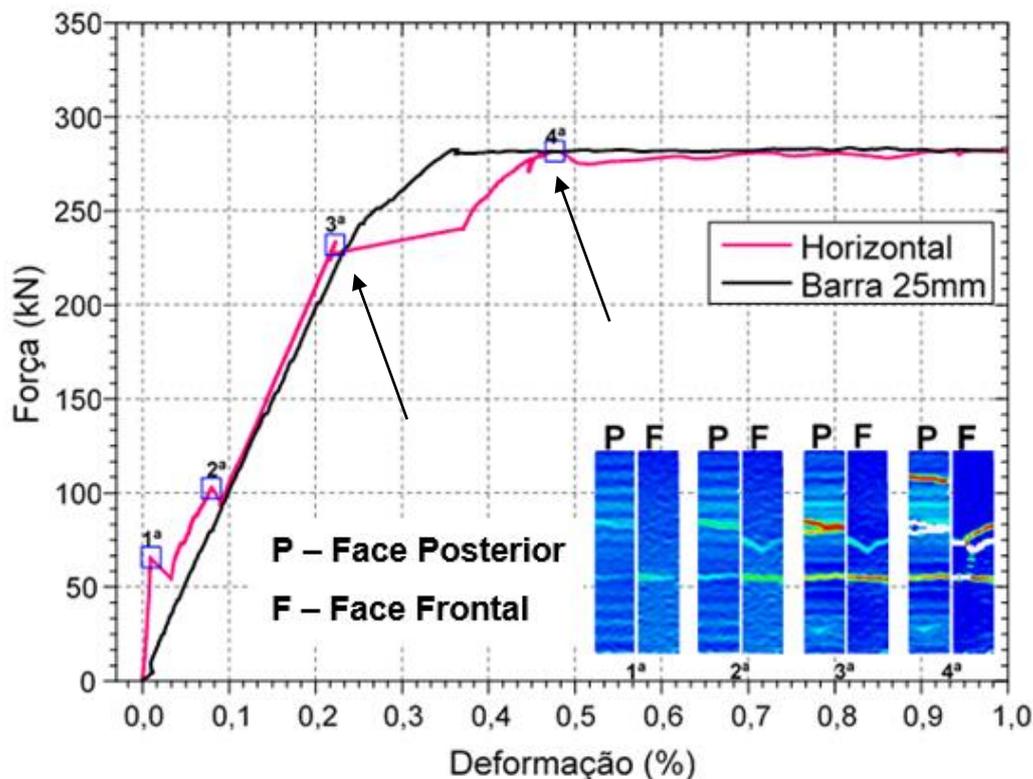


Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

No campo de deformação do grupo moldado no sentido horizontal, mostrado na Figura 56, 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 solicitação de tração na barra de aço na região central do tirante, onde ocorrem grandes deformações localizadas. Em razão disso, no intervalo entre o 3º e 4º ponto ocorre o fendilhamento na região central do tirante, conforme é indicado na Figura 56 no 4º ponto do campo de deformação da face frontal.

Figura 56 - Curva Força x Deformação com DIC do grupo moldado na horizontal com barras de 25mm



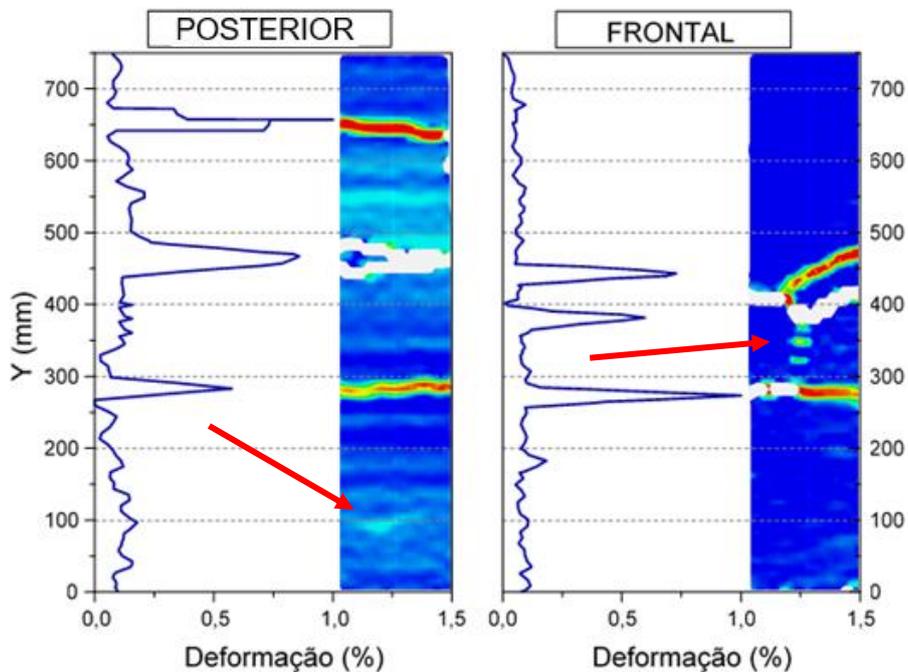
Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

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, forma-se o fendilhamento central como pode ser observado na Figura 57, conforme seta na face frontal, 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 57), 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, como acontece também no grupo da barra de 20 mm.

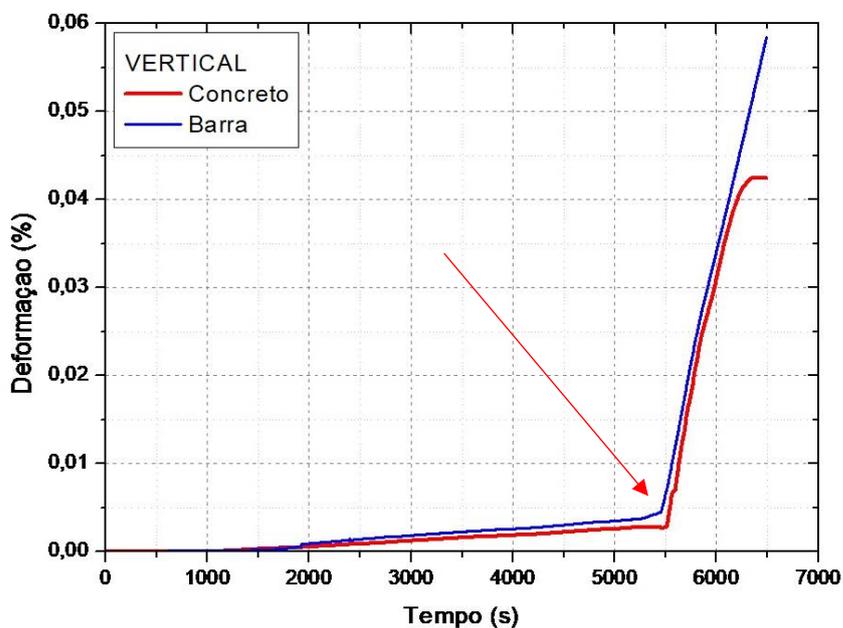
As análises da decoesão entre a barra de 25 mm moldados na vertical e horizontal, são mostradas, respectivamente na Figura 58 e na Figura 59, através das curvas típicas de deformação x tempo dos ensaios de tração axial.

Figura 57 - Seção transversal do campo de deformação do grupo moldado na horizontal com barras de 25mm



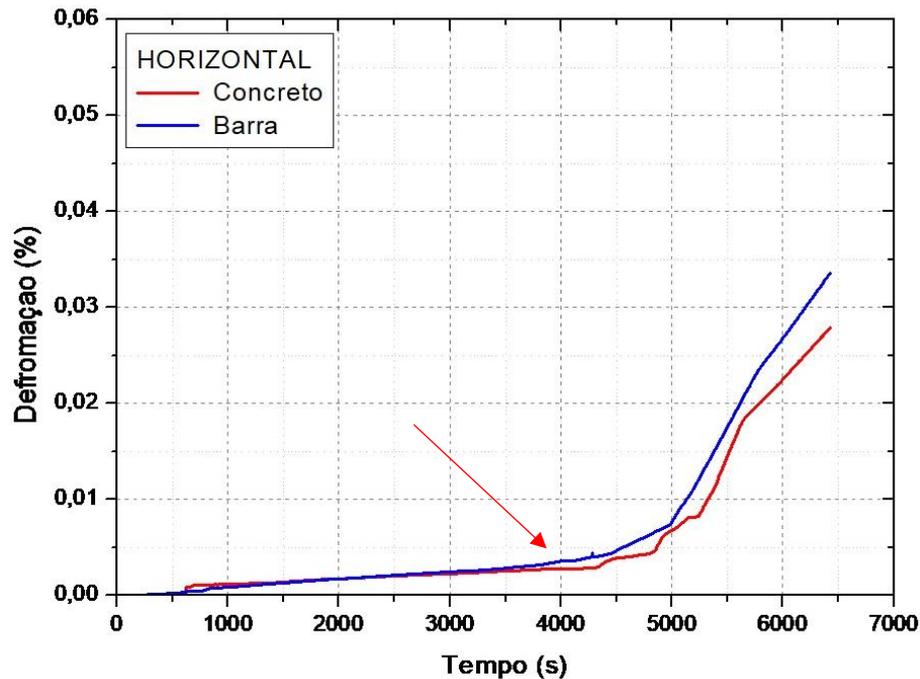
Fonte: adaptada de JUCÁ, P., 2020.

Figura 58 – Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de tração axial



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Figura 59 - Curvas típicas de Deformação x Tempo dos ensaios de tração axial



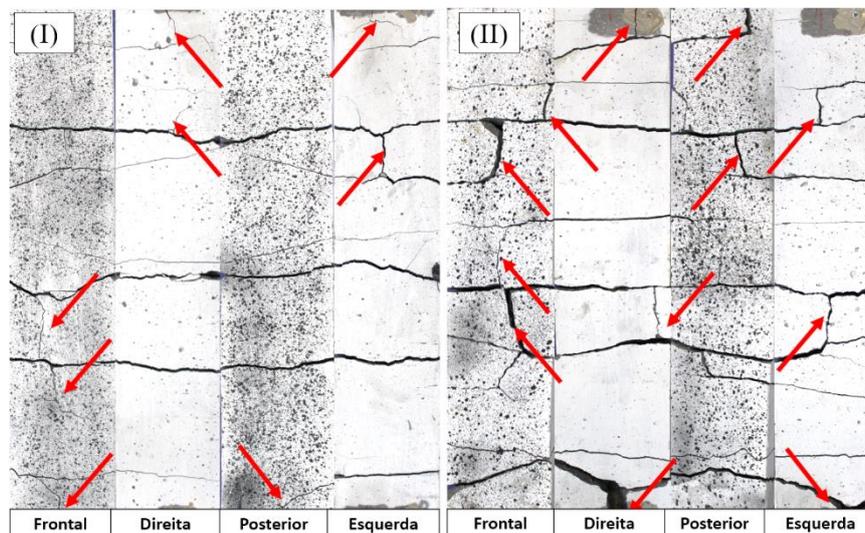
Fonte: JUCÁ, P., 2020.

No grupo moldado na vertical (Figura 58) é possível observar que a partir da primeira fissura (ver seta vermelha), embora diferentes, as deformações dos diferentes materiais é muito semelhante. 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.

A curva de deformação para o grupo moldado na horizontal apresenta início de decoesão a partir da primeira fissura, como indicado pela seta na Figura 59. Dessa maneira, a deformação relativa entre os materiais aumentou, conforme foi surgindo novas fissuras.

O grupo moldado na vertical, apresenta modo de fratura à tração, com fissurações passantes pela seção transversal, desde a fase inicial de carregamento. Após inicia-se o processo de fratura por fendilhamento. Porém, quando comparado ao grupo moldado na horizontal (Figura 61), dos dois tirantes do grupo horizontal, é evidente que há maior simetria das porções fissuradas para o grupo vertical, como também apresentam distâncias entre fissuras mais equidistantes.

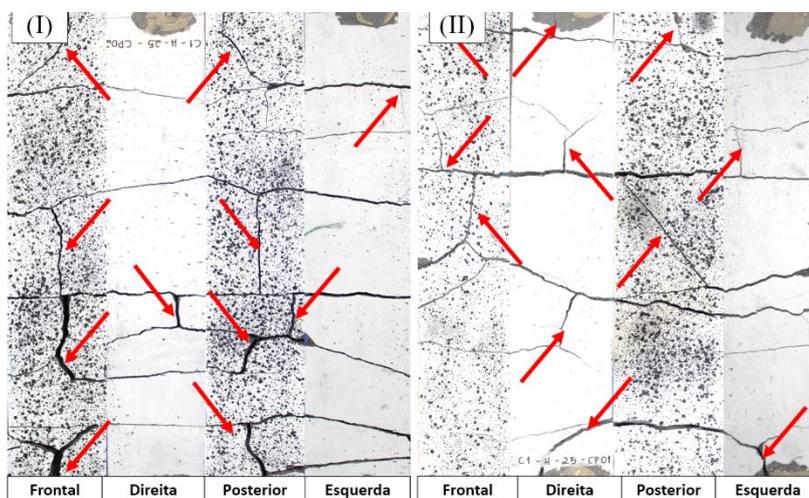
Figura 60 - Mapa de fissuras dos tirantes moldados na vertical com barras de 25mm



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

O grupo horizontal apresenta no processo de sollicitação, fissuras horizontais, com posterior ruptura por fendilhamento, assim como no grupo vertical. Neste grupo, o fendilhamento está presente em todo o comprimento do tirante, inclusive na região central, como pode ser visto na Figura 61. 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 61 - Mapa de fissuras dos tirantes moldados na horizontal com barras de 25mm



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

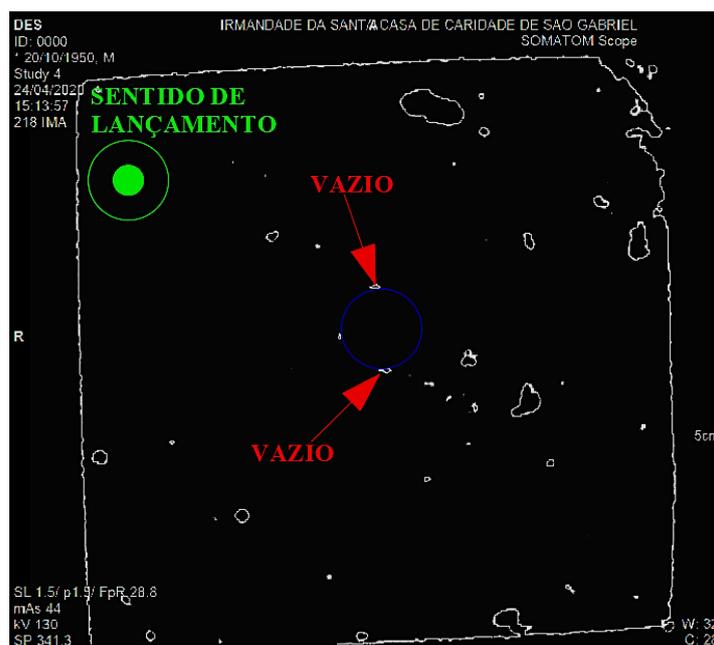
### 4.3 Tomografia computadorizada

As análises tomográficas foram realizadas em seções transversais no centro do corpo de prova, somente nos corpos de prova com barras de 20mm. Na Figura 62, os vazios são representados com a cor branca, como também os limites da seção transversal, nesta figura está presente o vazio na região inferior (fundos de fôrma), como também nos frisos laterais da barra de aço, salientando como já mencionado, a falha de interface causada pela presença de vazio na porção inferior da barra de aço, que neste estudo está denominado como face traseira.

Comparando a Figura 62 com a Figura 63, observa-se uma configuração diferente dos vazios. Observa-se que no corpo de prova moldado na vertical os vazios no entorno da barra de aço são menores e aparentam estar localizados abaixo das nervuras, enquanto nas amostras moldadas no sentido horizontal os vazios são maiores e estão localizados abaixo da barra de aço, indicando que são formados por processo de exsudação interna do concreto, bem como o efeito parede provocado pelas barras de aço.

Percebe-se ainda que os vazios mais afastados da barra são maiores no sentido de moldagem vertical, indicando maior dificuldade de liberação do ar o à maior distância até a superfície livre.

Figura 62 – Seção transversal do corpo de prova moldado na vertical



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

Figura 63 - Seção transversal do corpo de prova moldado na horizontal



Fonte: JUCÁ, P., 2020.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente aos resultados acima expostos, pode-se considerar alguns comportamentos característicos que são descritos a seguir.

Nos ensaios reológicos do concreto no estado fresco os resultados obtidos confirmaram as propriedades necessárias para classificá-las como concreto autoadensável. As misturas são classificadas, de acordo com a norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017), 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 à compressão, a mistura apresentou resistência de 66,3 MPa, e módulo de elasticidade de 37,98 GPa. Essa mistura tem comportamento frágil, com rompimento brusco e explosivo.

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 maiores e na região inferior da barra, que diminuem a capacidade de aderência dessa região, o que resultou em menores resistência de aderência. Os tirantes moldados na vertical (com barras de 20 e 25mm), apresentaram formação da primeira fissura na face posterior do tirante (fundo da fôrma). 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.

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.

Analisando os diferentes sentidos de lançamento do concreto e as diferentes bitolas dos vergalhões utilizados no trabalho, pode se observar que a força para abertura de primeira fissura é muito próximo em todos os casos - 60,04kN e 55,69 para os CP's de 20mm, respectivamente, moldados no sentido perpendicular e normal à barra e 52,08kN e 58,31kN para os CP's de 25mm, respectivamente, moldados no sentido perpendicular e normal à barra. A proximidade da força de abertura de primeira fissura para esses casos está associada à resistência à tração do concreto.

Por fim, a anisotropia pelo sentido de moldagem existe, visível pela diferença das fissuras entre os grupos de diferentes sentidos de moldagem e também pela forma e distribuição dos vazios no espécime, conforme constatado na tomografia.

### 5.1 Recomendações 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.

## 6 REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 408. Abstract of: State-of-the-art-report: bond under cyclic loads. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 88, n. 6, p. 669-73, Nov./Dec. 1991.

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

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. v. 2. Editora Dunas, 2014.

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

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

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

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

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

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

\_\_\_\_. **NBR 7477**: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. São Paulo: ABNT, 1982.

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

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

BOEL, Veerle et al. Bond behaviour and shear capacity of self-compacting concrete. In: **Design, production and placement of self-consolidating concrete**. Springer, Dordrecht, p. 343-353, 2010.

CALADO, Carlos Fernando de Araújo et al. Concreto auto-adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC). 1. ed. Pp. 262. **Editora da Universidade de Pernambuco (EDUPE)**, Recife, 2015.

CARNEIRO, Roberto Carlos. Análise das propriedades do concreto autoadensável com fibras de aço no estado plástico e endurecido com sílica ativa e com fíler calcário.

2018. 169 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

CASTRO, Clayton. M. 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, 194 p. 2002.

CASTRO, P. F. Notas sobre estudo da aderência aço-concreto, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro 2000.

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

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.

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

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. 23-83, 1983.

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

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

HOELSCHEMACHER, K. Hardened material properties of self-compacting concrete, **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 0, n. 4, p. 261-266, 2004.

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

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

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

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

MOHAMMED, Tarek Uddin et al. Chloride-induced corrosion of steel bars in concrete with presence of gap at steel-concrete interface. **Materials Journal**, v. 99, n. 2, p. 149-156, 2002.

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

REYES, Fredy Enrique G. Análise da aderência entre barras de aço e concretos (CC, CAA e CAAFA) sob influência de ações monotônicas e cíclicas. 215p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

RIBEIRO, G. O.; GUETTI, P. C.; SERNA, P. Experimental study of the mechanical behavior of self-compacting concrete based on fracture mechanics. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 3, p. 744-759, 2017.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Final report of RILEM TC 188-CSC 'Casting of self compacting concrete'. **Materials and Structures**, v. 39, p. 937-954, 2006.

SARTORI, A. L. et al. Adherence between steel bars and lightweight concrete with EPS beads. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 1, p. 122-140, 2017.

SILVA, Débora Bretas. Desenvolvimento de compósitos cerâmicos refratários silico-luminosos contendo cinza da casca de arroz e wollastonita. 130p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)** – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2019.

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

SILVA, Romulo Danilli da. Estudo da aderência aço concreto em pilares mistos preenchidos. **Master of Science Thesis**. São Jorge School of Engineering, São Paulo, 2006.

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

SKARENDAHL, Ake. The present-the future. In: **Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium. Reykjavik, Iceland**. p. 6-14, 2003.

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

VIDAL, Carla Driely Morsch. Avaliação do comportamento anisotrópico do material com método dos elementos discretos formado por barras. 69p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)** – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2019.