

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JUNIOR MARCONATTO FLORES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE  
CONCRETO ARMADO**

**Alegrete  
2018**

**JUNIOR MARCONATTO FLORES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE  
CONCRETO ARMADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

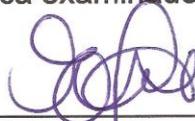
**Alegrete  
2018  
JUNIOR MARCONATTO FLORES**

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO

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.

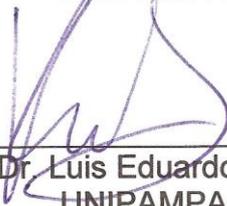
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27/06/18.

Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
UNIPAMPA

## RESUMO

Devido a lacuna criada pela falta de dados e de um processo específico para obtenção dos valores reais de resistência à tração, cria-se a necessidade de apresentar/desenvolver uma forma eficiente e confiável para obtenção destes dados, os quais são relevantes para a melhor utilização/otimização da resistência à tração do concreto nas obras de construção civil. O presente estudo avaliou a resistência à tração direta do concreto armado e não armado através de ensaios de tração direta em corpos de prova no formato “*dogbone*”, que possui pontas alargadas, uma seção transversal retangular e comprimento de 6 x 4 x 60 centímetros, respectivamente. Barras de aço com diâmetros de 6,3, 8 e 10 milímetros foram inseridas nos corpos de prova. O traço para o concreto utilizado foi 1:2,17:2,94:0,64. Para determinação da consistência do concreto utilizou-se o ensaio de abatimento (*slump test*) conforme NBR NM 67. Testes de compressão e tração direta foram realizados com idade de 28 dias. Os resultados obtidos foram representados por diagramas tensão *versus* deformação e tensão *versus* deslocamento, que foram comparados com resultados de pesquisas em bibliografias similares. Concluiu-se que a inserção do reforço proporcionou um aumento significativo na resistência do concreto, entretanto a fissuração ocorre em tensões similares a resistência a tração direta do concreto puro, independe do diâmetro de barra utilizado.

## ABSTRACT

Due the gap created by the lack of data and a specified process for the obtention of real values of tensile strength, is created the need of present/develop an efficient and trustful way for obtention of this data, which are relevant for the best utilization/optimization of the tensile strength in civil construction field. This study evaluated the direct tensile strength of reinforced and not-reinforced concrete through tests of direct traction in proof bodies with “dogbone” shape which have elongated tips, a transversal section and length of 6 x 4 x 60 centimeters respectively. Steel bars with diameters of 6,3, 8 and 10 millimeters were insert in the proof bodies. The mix of concrete used was 1:2,17:2,94:0,64. For the consistence determination of concrete was used the slump test according NBR NM 67. Compression tests and traction tests were performed with age of 28 days. The obtained results were presented by tension *versus* strain and tension *versus* displacement graphs that were compared with results found in similar bibliographies. It was concluded that the insertion of reinforcement provided a significative increase in concrete strength, nevertheless the first cracking happens in similar tensions to the direct tension strength of not-reinforced concrete, irrespective to the bar diameter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstrativo das reações secundárias em diferentes tipos de ensaio...	10
Figura 2 – Modelo do corpo de prova utilizado para o ensaio realizado por SCHUMAN E TUCKER (1943).....	12
Figura 3 – Dimensões dos corpos de prova utilizados por Nianxiang e Wenyan.....	13
Figura 4 – Disposição dos extensômetros e dos eixos de rolamento.....	14
Figura 5 – Croqui do ensaio elaborado por Nianxiang e Wenyan. ....	14
Figura 6 - Quantidades das misturas utilizadas.....	15
Figura 7 - Esquema de tração pura desenvolvido por Zheng, Kwan e Lee.....	16
Figura 8 - Localização de ruptura dos diferentes corpos de prova.....	17
Figura 9 – Detalhes do método de VELASCO (2008).....	19
Figura 10 - Montagem do ensaio.....	20
Figura 11 – Resultados de MARANGON (2011) para resistência à tração direta. ....	20
Figura 12 – Resultados de MARANGON (2011) para resistência à compressão. ....	21
Figura 13 – Método de MORENO et al. (2012) .....	22
Figura 14 - Composições das misturas. ....	22
Figura 15 - Reforços utilizados e resistência a compressão. ....	23
Figura 16 – Dimensões do corpo de prova. ....	24
Figura 17 - Procedimento para ensaio. ....	24
Figura 18 - Valores de resistência à compressão do concreto.....	25
Figura 19 – Tabela de resultados, corpos de prova com barras de aço.....	25
Figura 20 – Tabela de resultados, corpos de prova com adição de fibras de aço.....	26
Figura 21 – Fôrma que foi utilizada para moldagem dos corpos de prova. ....	27
Figura 22 – Ensaio de abatimento, primeira concretagem. ....	28
Figura 23 – Fôrmas untadas com óleo e com reforço já posicionado. ....	29
Figura 24 – Corpos de prova moldados e adensados, prontos para cura.....	29
Figura 25 – Máquina SATEC™ .....	30
Figura 26 – Corpo de prova cilíndrico instrumentado, posicionado na máquina de ensaio.....	31
Figura 27 - Máquina SATEC com o extensômetro posicionado no corpo de prova. .	32
Figura 28 – Colocação das chapas de aço na amostra. ....	33
Figura 29 - Configuração do ensaio. ....	33
Figura 30 – Locais de ruptura dos corpos de prova. ....	37
Figura 31 - Tensões no corpo de prova. ....	39
Figura 32 – Múltiplas fissurações na amostra. ....	41
Figura 33 – Fissuras e rachaduras nas amostras. ....	44
Figura 34 – Múltiplas fissuras ocorrem em todo o corpo de prova.....	47

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	6
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. OBJETIVO GERAL .....	9
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.3. JUSTIFICATIVA.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
2.1. VISÃO GERAL .....	10
2.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA.....	11
2.2.1. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS .....	11
2.2.2. MÉTODO DE SCHUMAN E TUCKER (1943).....	11
2.2.3. MÉTODO DE NIANXIANG, WENYAN (1989).....	13
2.2.4. MÉTODO DE ZHENG, KWAN E LEE (2001).....	16
2.2.5. MÉTODO DE VELASCO (2008).....	18
2.2.6. MÉTODO DE MORENO ET AL. (2012) .....	21
2.2.7. MÉTODO DE LARISSA FONTOURA .....	23
3. METODOLOGIA.....	27
3.1. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	27
3.2. ENSAIOS MECÂNICOS .....	30
3.2.1. ENSAIO MECÂNICO DE COMPRESSÃO .....	30
3.2.2. ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO .....	31
4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	34
4.1. ENSAIOS DE COMPRESSÃO .....	34
4.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA.....	35
4.2.1. CORPOS DE PROVA SEM REFORÇO .....	35
4.2.2. CORPOS DE PROVA REFORÇADOS COM BARRAS DE 6,3 MILÍMETROS DE DIÂMETRO.....	38
4.2.3. CORPOS DE PROVA REFORÇADOS COM BARRAS DE 8 MILÍMETROS DE DIÂMETRO.....	42
4.2.4. CORPOS DE PROVA REFORÇADOS COM BARRAS DE 10 MILÍMETROS DE DIÂMETRO.....	45
4.2.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	48
5. CONCLUSÕES.....	51
6. TRABALHOS FUTUROS .....	52
REFERÊNCIAS.....	53

## 1. INTRODUÇÃO

Algumas características do concreto, como elevada resistência à compressão, capacidade de ser moldado em diferentes formatos e facilidade na obtenção de sua matéria prima, fazem deste material o mais utilizado na construção civil em todo o mundo.

Apesar da vasta utilização do concreto como material estrutural na construção civil a caracterização da resistência do concreto, seja ele armado com barras, com fibras ou sem reforço algum, em geral se refere a sua resistência à compressão. Devido a sua boa resistência à compressão ele se torna ótimo para a maioria das obras estruturais, e o conjunto concreto e barras de aço cria um elemento estrutural que suporta tensões de tração maiores que apenas o concreto. Entender as características do concreto, como valor de resistência à compressão e à tração, é muito importante para o desenvolvimento de projetos, pois permite ao calculista a otimização deste material no projeto. Desta maneira vários tipos de ensaios foram criados e são utilizados para medir os parâmetros de resistência do concreto.

O ensaio de compressão é relativamente simples e é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Este ensaio apresenta valores seguros que são a base de vários cálculos para projetos estruturais. Já os ensaios de tração podem ser realizados de três formas distintas. A ABNT apresenta duas normas para realização de ensaios deste tipo. São elas:

- NBR 12142 Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos – 2010.
- NBR 7222 Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – 2011.

Devido à complexidade deste tipo de teste a ABNT não apresenta nenhuma norma para a realização dos ensaios de tração direta em concretos. Desta maneira muitas formas de se realizar este procedimento são apresentadas por diversos autores. O ensaio de tração direta é o que apresenta valores mais próximos da tração real do concreto, porque, quando executado corretamente, apresenta uma distribuição uniforme das tensões em sua seção transversal.

O valor da resistência à tração que é utilizado na maior parte dos cálculos é uma porcentagem do valor da resistência a compressão. Entretanto saber o valor exato da

resistência à tração do concreto com ou sem armadura é muito importante para um domínio maior do material, principalmente na aparência e na durabilidade do concreto. O conhecimento correto do valor de resistência à tração ajudaria a diminuir os problemas de fissuração e também possíveis falhas em estruturas de concreto armado (OLUOKUN, 1991).

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a resistência à tração direta do concreto armado através de corpos de prova.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o comportamento à compressão dos concretos, obtendo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.
- Executar ensaios de tração direta em corpos de prova de concreto armado com diferentes diâmetros de barras, e obter o diagrama de tensão *versus* deformação.
- Analisar os resultados obtidos e compará-los com os encontrados em bibliografias semelhantes.

### **1.3. JUSTIFICATIVA**

Devido à lacuna criada pela falta de dados e de um processo específico para obtenção dos valores de tração direta, cria-se a necessidade de apresentar/desenvolver uma forma eficiente e confiável para obtenção destes dados que são de grande importância para a melhor utilização/otimização da resistência à tração do concreto nas obras de construção civil.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

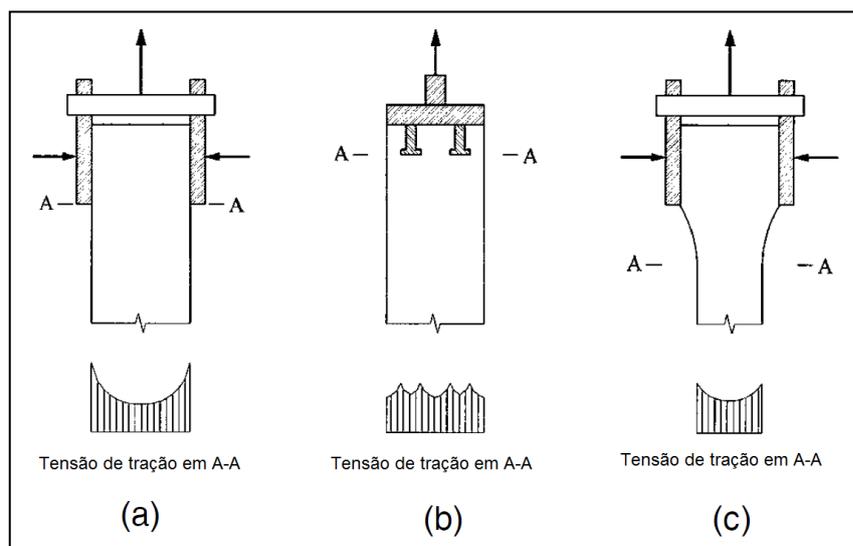
### 2.1. VISÃO GERAL

Podem-se classificar os ensaios referentes à tração no concreto em dois grupos: ensaios de tração direta, e ensaios de tração indireta. Os ensaios de tração indireta são regulamentados no Brasil e amplamente utilizados, mas os resultados destes ensaios não apresentam números compatíveis com a real resistência à tração do concreto, chegando a casa dos milhares a diferença entre a tração obtida nestes ensaios e a real (NEVILLE, 1997).

De acordo com MEHTA (2008), os ensaios de tração direta apresentam um valor mais próximo do real. Este tipo de ensaio não é utilizado com frequência devido a sua dificuldade de realização e por não possuir um equipamento específico para este tipo de ensaio. Ao utilizar uma máquina qualquer os dispositivos de acoplamento do corpo de prova na máquina introduzem esforços secundários no objeto. Estes esforços não podem ser descartados e assim o CP não estará sujeito somente à tração.

Na figura 1 é possível observar a influência das forças secundárias em três variações do ensaio de tração direta. A partir da análise da figura 1, conclui-se que o alargamento das extremidades do corpo de prova pode reduzir estes esforços secundários.

Figura 1 - Demonstrativo das reações secundárias em diferentes tipos de ensaio.



Fonte: Adaptado de Zheng et. al (2001, p. 63)

Comparando os ensaios de tração normatizados com o de tração direta foram encontrados alguns valores obtidos pela relação entre os módulos de ruptura. Diz-se que o ensaio de tração por compressão diametral apresenta um valor de 10 a 15% maior que o mesmo concreto submetido ao um ensaio de tração direta. Já no ensaio de flexão este valor sobe para 50 a 100%. Isto acontece devido a diferença entre os ensaios e porque apenas no ensaio de tração direta o corpo de prova está submetido apenas ao esforço de tração (MEHTA, 2008).

## **2.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA**

### **2.2.1. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS**

Alguns pesquisadores apresentaram modelos para realizar o ensaio de tração direta. Estes ensaios apresentam variações entre si, sempre buscando a distribuição da tensão igualmente em todo o corpo de prova e a restrição das tensões secundárias. A seguir serão apresentados brevemente os procedimentos de ensaios de tração direta encontrados na literatura pertinente.

### **2.2.2. MÉTODO DE SCHUMAN E TUCKER (1943).**

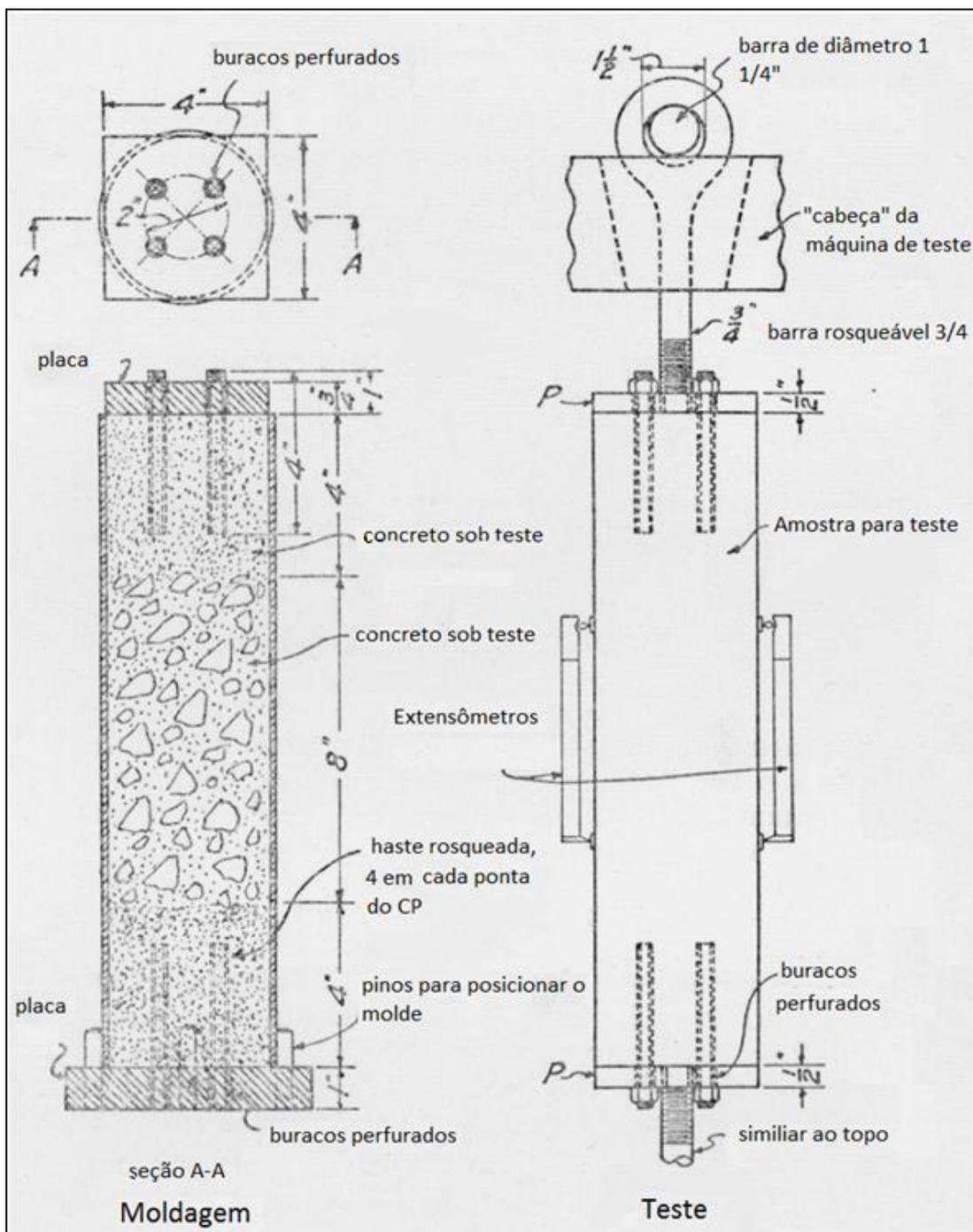
Os autores SHUMAN E TUCKER (1943) procuraram desenvolver um método novo que suprisse alguns defeitos apresentados em outros métodos que foram analisados. O principal problema que se tentou corrigir foi o fato de, no caso de corpos de prova com as extremidades alargadas, a ruptura ocorrer com frequência na junção entre a extremidade alargada e o centro corpo de prova.

Os corpos de prova propostos pelos autores possuem formato cilíndrico e diâmetro de aproximadamente 10,16 centímetros. Neste ensaio a tração foi transmitida para o concreto através de barras rosqueadas de aço, as quais foram ancoradas em uma argamassa com alto teor de cimento moldada nas pontas dos corpos de prova. Podemos visualizar as dimensões e as composições dos corpos de prova na figura 2.

Foram confeccionados corpos de prova com diferentes traços e também se utilizou concreto airado. Para os corpos de prova com traço 1:2,4:3,6 foram encontrados valores de resistência a compressão médios de 31,92 MPa aos 28 dias de cura, e a média de resistência à tração foi de 2,79 aos 28 dias. O segundo traço

utilizado foi 1:1,75:2,75 obtendo valores médios de 39,23 MPa para testes de compressão e 3,38 MPa para tração, ambos aos 28 dias. Este valor mais elevado indica, segundo SCHUMAN E TUCKER (1943), que o novo ensaio desenvolvido por eles apresenta uma distribuição mais uniforme da tensão no corpo de prova.

Figura 2 – Modelo do corpo de prova utilizado para o ensaio realizado por SCHUMAN E TUCKER (1943).

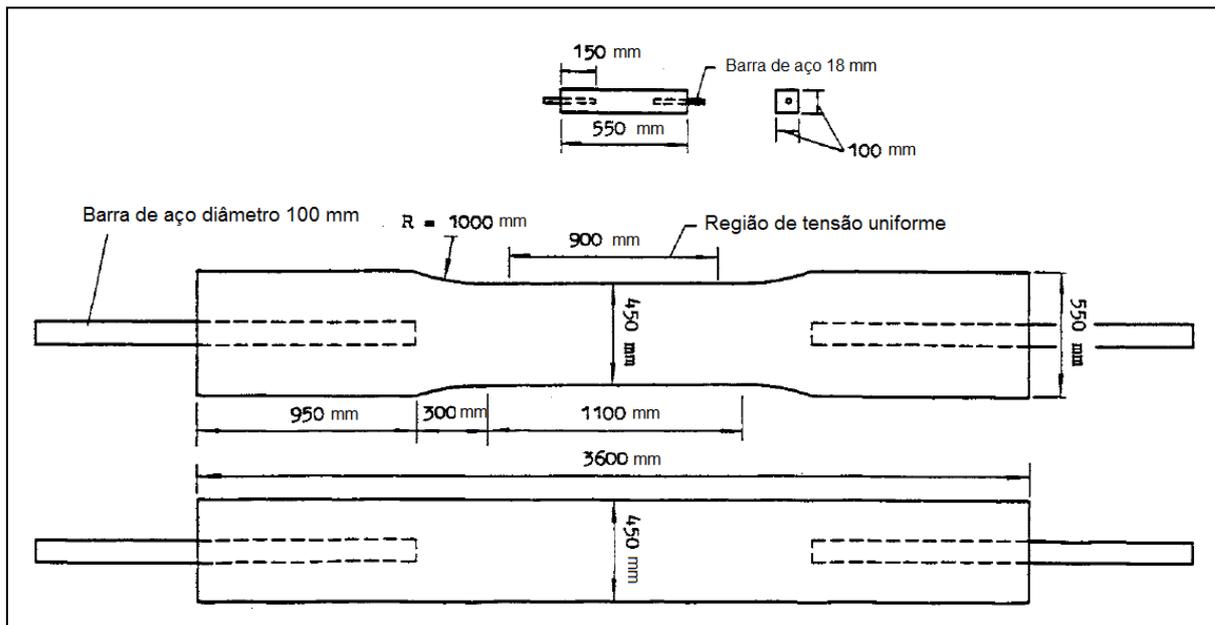


Fonte: Adaptado de Schuman e Tucker (1943, p. 109)

### 2.2.3. MÉTODO DE NIANXIANG, WENYAN (1989).

Neste trabalho foram realizados testes de tração direta, pelos pesquisadores NIANXIANG E WENYAN (1989), em corpos de prova prismáticos com dois tamanhos diferentes. O primeiro com dimensão transversal de 45 x 45 centímetros e comprimento de 360 centímetros. O segundo, menor, de seção 10 x 10 centímetros e comprimento de 55 centímetros. Ambos os corpos de prova possuíam extremidades alargadas. Os valores de resistência à tração foram necessários para a construção de uma barragem localizada no rio Leishuina província de Henan na China. Estes valores são importantes para controle da mudança de volume e de fissuras induzidas por temperatura. A tração foi transmitida aos corpos de prova através das barras de aço parcialmente embutidas no concreto, figura 3.

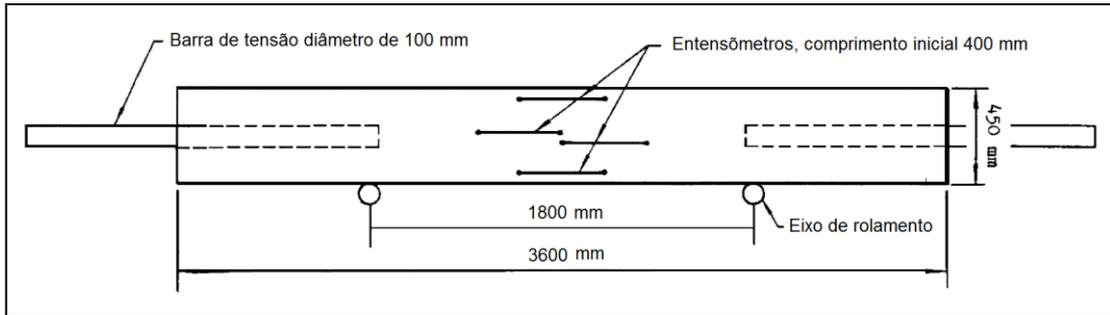
Figura 3 – Dimensões dos corpos de prova utilizados por Nianxiang e Wenyan.



Fonte: Adaptado de Nianxiang e Wenyan (1989, p. 215)

Extensômetros foram utilizados para verificar a deformação causada pela tração no espécime. Para garantir que não ocorressem excentricidades nos corpos de prova foram utilizados dois eixos de rolamento como mostrado na figura 4.

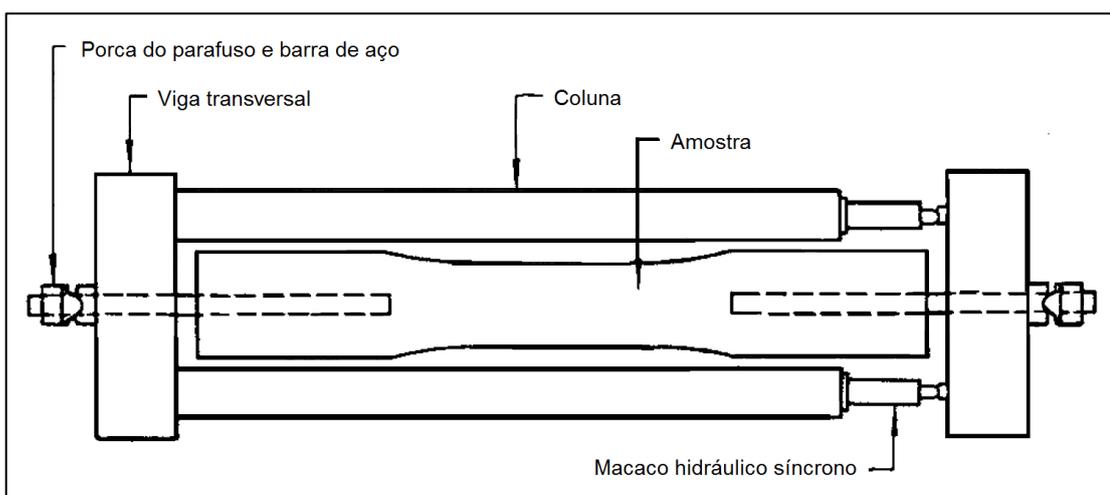
Figura 4 – Disposição dos extensômetros e dos eixos de rolamento.



Fonte: Adaptado de Nianxiang e Wenyan (1989, p. 216)

O ensaio foi realizado em uma máquina de testes de tração horizontal com capacidade nominal de 1000 KN. Na figura 5 é possível observar a montagem do dispositivo. Para considerar o teste válido foi observado o local da ruptura, se a ruptura ocorresse nos 110 centímetros intermediários do corpo de prova, o teste era considerado válido. Tanto os valores dos corpos de prova considerados válidos quanto dos inválidos foram considerados devido à pouca variação entre estes dados. Ao todo 58% dos corpos de prova testados foram considerados válidos, um número abaixo do esperado pelos pesquisadores, mas atingiu um número superior a 50% de rupturas em local satisfatório, que foi o mínimo requisitado para considerar o ensaio válido.

Figura 5 – Croqui do ensaio elaborado por Nianxiang e Wenyan.



Fonte: Adaptado de Nianxiang e Wenyan (1989, p. 216)

Os autores confeccionaram vários corpos de prova com diferentes traços. As respectivas quantidades de cada material estão na figura 6. O número da mistura identifica algumas características dela, sendo os dois primeiros números a porcentagem da relação água-cimento, o terceiro número a numeração do agregado e o quarto e último número se refere ao aditivo utilizado sendo 3 para cinzas volantes e 0 para misturas sem adição.

Figura 6 - Quantidades das misturas utilizadas

Número da mistura	Quantidades da mistura, kg/m <sup>3</sup>				
	Cimento	Areia	Cascalho	Água	Cinzas Volantes
4843	169	485	1698	90	19
4543	173	426	1734	92	31
4333	203	533	1582	97	23
4540	242	465	1668	109	
5540	200	504	1662	110	
7040	161	552	1640	113	
5530	227	602	1499	125	
5520	282	702	1269	155	
5510	327	759	1109	180	

1 kg/m<sup>3</sup> = 0.0624 lb/ft<sup>3</sup>.

Fonte: Adaptado de Nianxiang e Wenyan (1989, p. 215)

As resistências médias de cada mistura estão na tabela 1.

Tabela 1 – Valores encontrados por Nianxiang e Wenyan (1989).

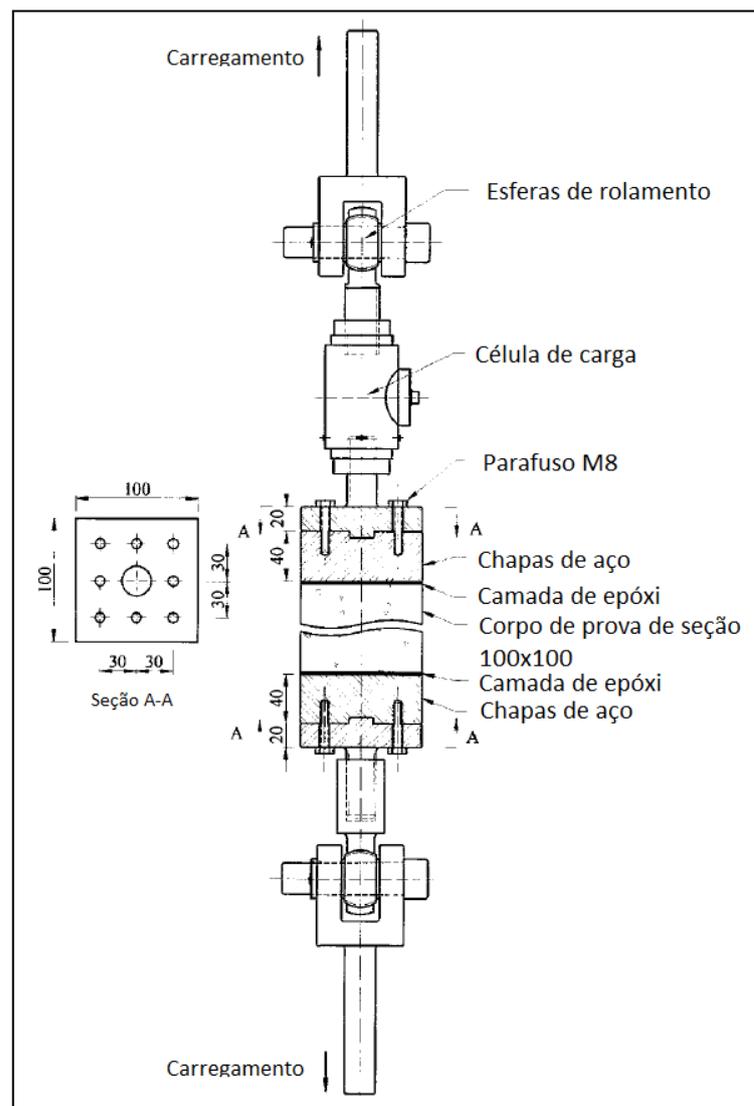
Número do Grupo	Resistência a tração (MPa)		Resistência a Compressão (Mpa)
	Maiores	Menores	
4543	1,70	2,42	26
4540	1,91	2,61	32,45
5540	1,74	2,99	30,85
7040	1,10	2,03	25,75
5510	2,65	3,75	35,90
5520	1,93	2,89	30,75
5530	1,84	3,21	32,20
4333	1,60	2,58	31,90
4843	1,44	2,35	27,95

Fonte: Adaptado de Nianxiang e Wenyan (1989, p. 216)

#### 2.2.4. MÉTODO DE ZHENG, KWAN E LEE (2001).

Para realizar este ensaio ZHENG, KWAN E LEE (2001) utilizaram corpos de prova prismáticos com dimensões 100 x 100 milímetros, e comprimento variável entre 150 e 500 milímetros. A tração foi transmitida para o corpo de prova através de duas placas de aço. A placa superior é tracionada por uma haste cilíndrica de aço de 25 milímetros de diâmetro, a qual é acoplada na máquina que implica tração. A placa superior é conectada na placa inferior por meio de 8 parafusos dispostos simetricamente para que a tensão seja distribuída uniformemente. Uma cola epóxi foi utilizada para conexão da placa inferior com o corpo de prova. Na figura 7 podemos visualizar a disposição do ensaio desenvolvido pelos autores.

Figura 7 - Esquema de tração pura desenvolvido por Zheng, Kwan e Lee.



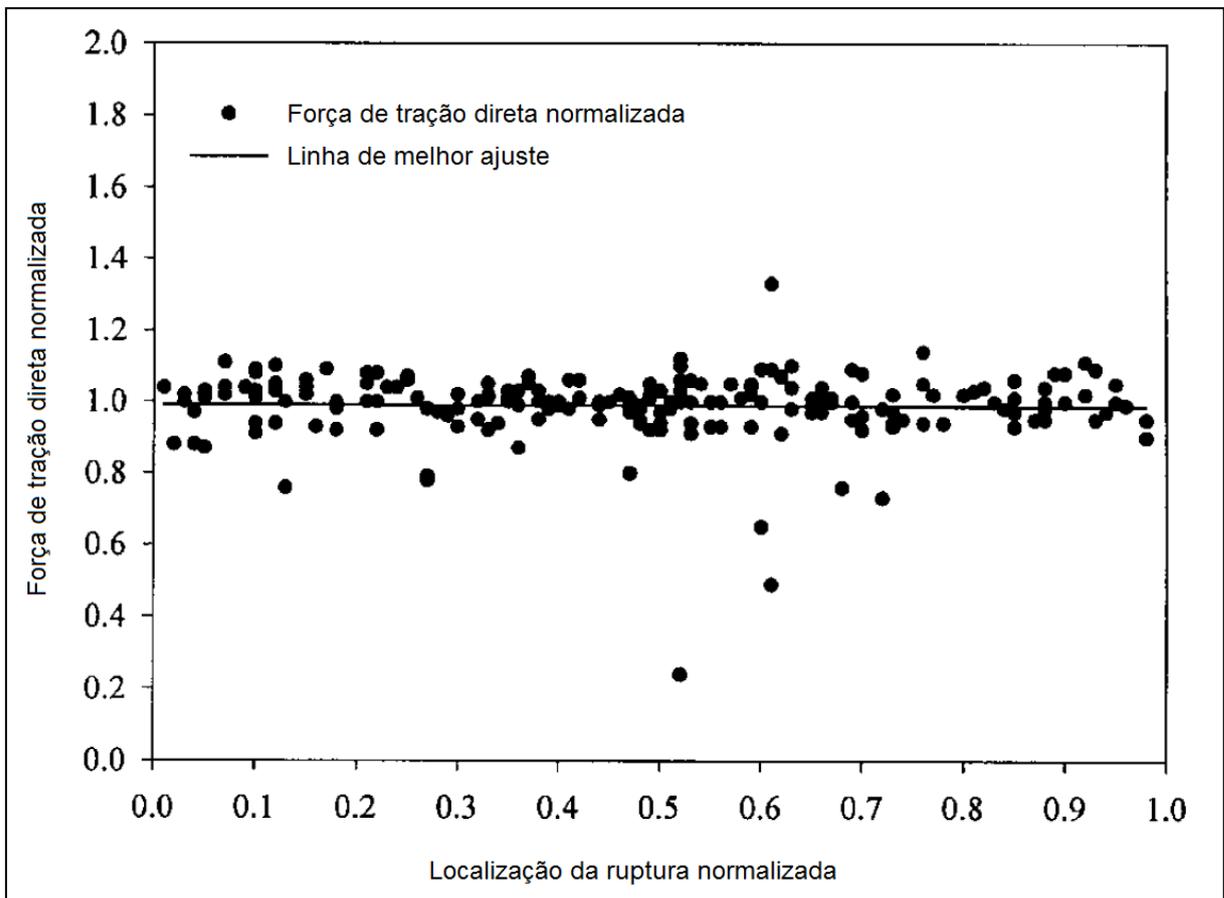
Fonte: Adaptado Zheng, Kwan e Lee (2001, p. 65)

Antes da colagem das placas inferiores o corpo de prova foi lixado até o aparecimento dos agregados graúdos para que não houvesse uma camada de argamassa colada à placa que se desprendesse antes da ruptura do corpo de prova. O epóxi foi utilizado em uma camada de 0,5 a 1 milímetro.

Aproximadamente 200 corpos de prova foram testados utilizando 17 lotes de concreto. Destes 200 corpos de prova nenhum apresentou ruptura próxima à interface placa *versus* corpo de prova, indicando que a montagem foi adequada e a cola epóxi apresentou resistência suficiente.

Como os corpos de prova não possuíam o mesmo comprimento foi feita uma relação entre a distância da base do corpo de prova ao local de ruptura, e o comprimento total do corpo de prova. Na figura 8 podemos ver que esta relação apresenta um valor aleatório indicando que o local da ruptura não foi o mesmo, assim, os autores concluíram que não houve acumulo de tensões, ou seja, a tensão foi transmitida igualmente em todo o corpo de prova.

Figura 8 - Localização de ruptura dos diferentes corpos de prova.



Fonte: Adaptado de Zheng, Kwan e Lee (2001, p. 65)

Várias misturas foram utilizadas para realizar os testes. Os valores das resistências médias de cada mistura aos 28 dias estão na tabela 2.

Tabela 2 – Valores de resistências obtidos por Zheng et al. (2001)

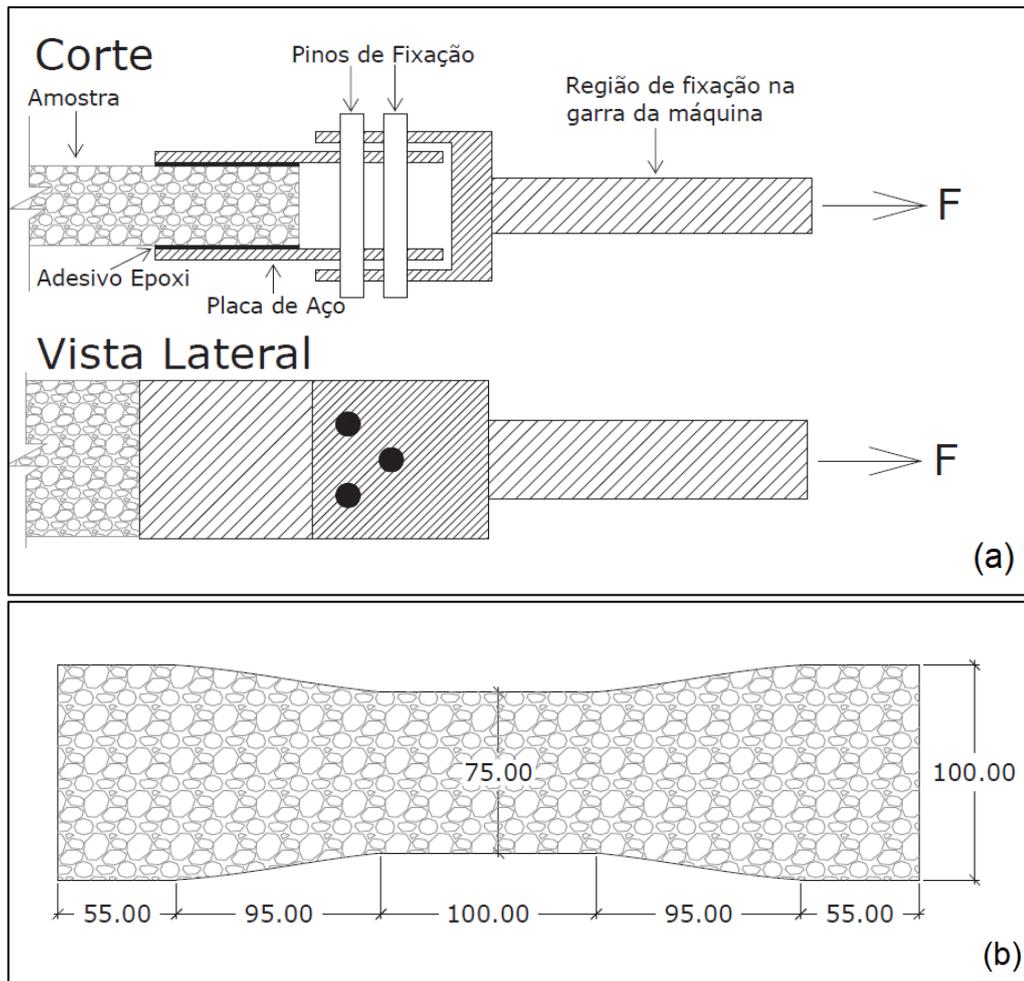
Mistura	Resistência a tração (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)
Mistura 1-1	2,81	28,9
Mistura 1-2	2,73	35,9
Mistura 1-3	2,97	49,66
Mistura 1-4	3,03	60,16
Mistura 2-1	2,91	34
Mistura 2-2	2,97	40
Mistura 2-3	3,14	58
Mistura 3-1	2,44	29,2
Mistura 3-2	2,80	49
Mistura 3-3	3,12	69,6

Fonte: Adaptado de Zheng, Kwan e Lee (2001, p. 69)

### 2.2.5. MÉTODO DE VELASCO (2008).

Para realizar o ensaio de tração direta MARANGON (2011) utilizou um modelo idealizado por LIMA (2004), e modificado por VELASCO (2008). Neste sistema foi realizado um acoplamento rígido na máquina utilizada no ensaio e duas placas de aço foram coladas com resina epóxi em cada extremidade do corpo de prova. As placas foram então ligadas à máquina por meio de 3 pinos introduzidos, ligando as placas provenientes do aparelho às placas coladas na amostra. Na figura 9 (a) pode ser visualizada a montagem do ensaio. Os corpos de prova possuem seção de 100 x 100 milímetros e 400 milímetros de comprimento como pode ser verificado na figura 9 (b).

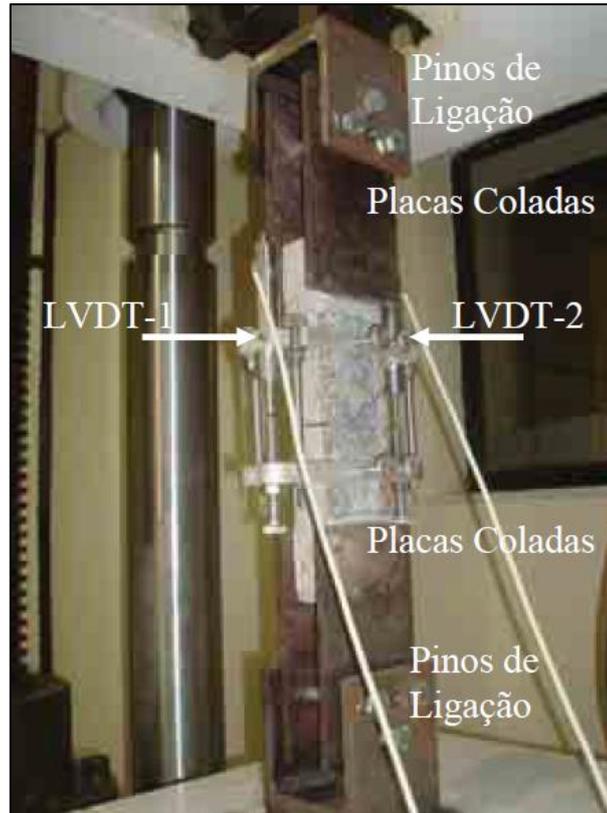
Figura 9 – Detalhes do método de VELASCO (2008).



Fonte: Marangon (2011, p. 67 e 68). (a) Sistema de acoplamento da amostra na máquina. (b) Dimensões do corpo de prova.

Foi utilizado na confecção dos corpos de prova um concreto auto adensável com dois tipos de agregado graúdo. Para o agregado com diâmetro máximo de 9,5 milímetros foi dado a nomenclatura de C1, e as amostras contendo agregado de diâmetro máximo de 19,5 milímetros foram denominadas C2. Foram produzidos 9 tipos de amostras sendo 4 corpos de prova C1 e 5 corpos de prova C2. Fibras de aço foram utilizadas como reforço em diferentes porcentagens. As porcentagens de fibra de aço estão especificadas na nomenclatura de cada amostra assim como o diâmetro da fibra utilizada, respectivamente. Uma amostra sem reforço também foi moldada. A configuração do ensaio é mostrada na figura 10, onde podemos observar as chapas de aço coladas na amostra e o acoplamento destas chapas na máquina que executa o ensaio.

Figura 10 - Montagem do ensaio.



Fonte: Marangon (2011, p. 69)

Os resultados obtidos por MARANGON (2011) estão dispostos na Figura 11 e Figura 12.

Figura 11 – Resultados de MARANGON (2011) para resistência à tração direta.

Misturas	Resistência à Tração (MPa)		Deformação de pico ( $\mu\epsilon$ )		Módulo de Elasticidade (GPa)		Res. à Tração Relativa
	$f_t$	CV (%)	$\epsilon_{Pf}$	CV (%)	E	CV (%)	$f_{tcf}/f_{tc0}$
C1	4,20	1,84	161	4,87	32,13	2,46	1,00
C1.1%65	4,48	0,41	163	11,31	32,36	9,48	1,06
C1.1,25%65	5,28	2,81	203	12,53	33,73	2,56	1,25
C1.1,5%65	5,01	8,17	134	12,24	31,62	1,74	1,19
C2	4,63	8,41	139	8,41	33,10	6,32	1,00
C2.1%65	4,96	7,60	158	1,79	35,58	5,53	1,07
C2.1%80	4,65	8,93	192	4,39	35,77	5,50	1,01
C2.1,25%65	4,84	4,21	177	2,00	33,90	5,42	1,04
C2.1,25%80	5,02	6,31	183	9,15	34,43	6,48	1,08

Fonte: Marangon (2011, p. 134)

Figura 12 – Resultados de MARANGON (2011) para resistência à compressão.

Misturas	Tensão de primeira fissura (MPa)		Deformação Axial de Primeira fissura ( $\mu\epsilon$ )		Resistência à Compressão (MPa)		Deformação Axial de Pico ( $\mu\epsilon$ )		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	$f_{c1}$	CV (%)	$\epsilon_1$	CV (%)	$f_c$	CV (%)	$\epsilon_a$	CV (%)	E	CV (%)
C1	35,33	0,90	1059	1,18	69,91	1,00	2930	4,38	33,93	1,04
C1.1%65	36,32	0,71	936	0,20	72,03	0,88	2940	1,22	37,82	0,54
C1.1,25%65	36,06	0,42	981	2,84	72,21	1,24	2980	6,72	37,47	2,49
C1.1,5%65	35,93	0,43	982	2,03	72,54	0,20	2950	4,21	37,35	3,78
C2	35,66	0,60	969	2,63	70,20	2,76	2740	0,43	35,65	0,90
C2.1%65	37,91	0,38	1057	2,74	70,93	2,06	2810	1,30	36,53	3,30
C2.1%80	38,53	0,39	1113	1,88	70,32	0,25	2810	2,69	35,26	2,31
C2.1,25%65	37,63	1,00	1131	1,94	70,34	1,21	3080	0,86	34,55	1,48
C2.1,25%80	38,10	0,69	1104	2,16	76,06	3,48	3180	3,85	35,13	4,42

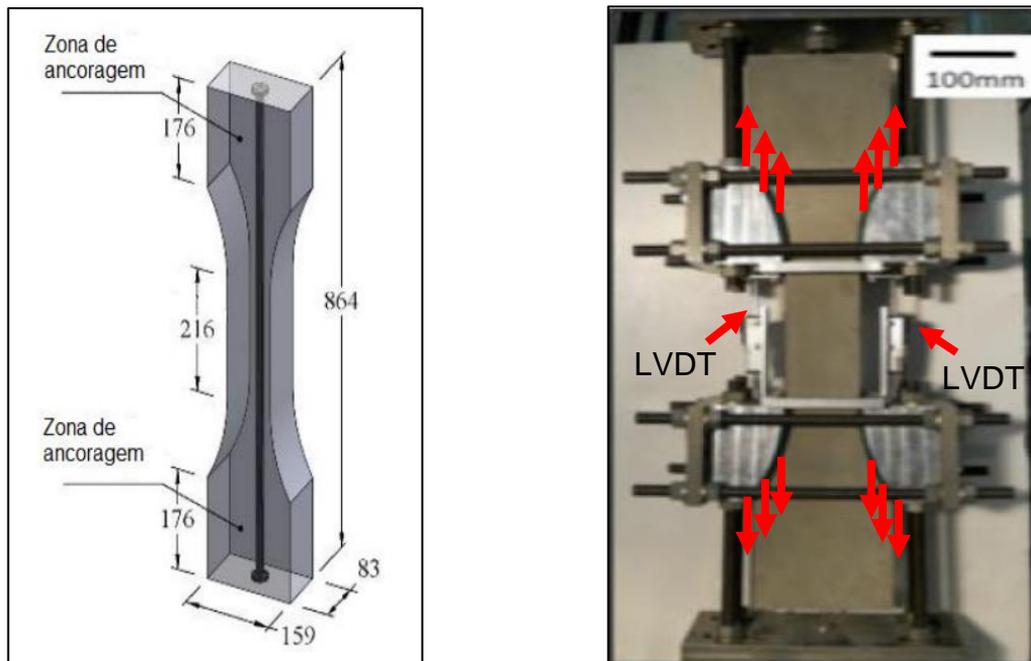
Fonte: Marangon (2011, p. 120)

## 2.2.6. MÉTODO DE MORENO ET AL. (2012)

Neste método desenvolvido por MORENO et al. (2012) foram considerados dois formatos para os corpos de prova, um formato em *dogbone* (do inglês osso de cachorro), e outro prismático. Na figura 13 (a) estão discriminadas as dimensões do formato *dogbone*. Os corpos de prova foram tracionados na parte curva do espécime para que ocorresse uma redução nas tensões secundárias, submetendo o mesmo ao máximo esforço de tração. Na figura 13 (b) pode ser visualizada a disposição do ensaio, também pela figura 13 (b) setas indicam o local onde foi aplicada a força no corpo de prova.

A deformação do CP foi medida com auxílio de dois LVDT's (do inglês, *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear), a disposição dos LVDT's pode ser vista na figura 13 (b).

Figura 13 – Método de MORENO et al. (2012)



Fonte: (a) Adaptado de Moreno et al., 2012. (Dimensões em mm). (b) Adaptado de Moreno et al., 2012. (a) Dimensões do corpo de prova em milímetros. (b) Configuração do ensaio.

Três tipos de misturas foram utilizadas na confecção dos corpos de prova sendo eles: *HyFCR* (*Hybrid Fiber Reinforced Concrete* – do inglês Concreto Híbrido Reforçado com Fibra), *SC-HyFCR* (*Self-Consolidating Hybrid Fiber Reinforced Concrete* – do inglês Concreto Híbrido Auto Adensável Reforçado com Fibra) e *ECC* (*Engineered Cementitious Composite* – Compósito Cimentício Projetado). Na figura 14 pode-se visualizar as quantidades para as misturas citadas, sendo que a *SC-HyFCR* utiliza a mesma mistura da *HyFCR* apenas sendo retirada a fibra de 60 mm. Outra variação é o *ECC-init* o qual também utiliza a mistura do *ECC* apenas com uma pequena adição na quantidade de super plastificante.

Figura 14 - Composições das misturas.

Mistura	Ligante (kg)		Agregado (kg)		Água (kg)	Aditivos Químicos (água % ligante)		Fibras de Aço (% vol.)		Fibras Poliméricas (% Vol.)	
	C	CV	Fino	Graúdo		SP	AMV	60 mm	30 mm	8 mm	12 mm
ECC	547	656	438	–	312	.50	.11	–	–	–	2
HyFRC	484	–	808	743	220	.16	–	.80	.50	.20	–

Fonte: Adaptado de Moreno et al. (2012, p 264)

Os reforços utilizados e os valores de resistência à compressão estão na figura 15.

Figura 15 - Reforços utilizados e resistência a compressão.

Nome da Amostra	Mistura	Reforço (diâmetro)	Número de Amostras	F <sub>c</sub> (MPa)
ECC3-4	ECC-init	# 4 (12.7mm)	4	53.0
ECC3-4	ECC	# 4 (12.7mm)	4	49.6
SCHy3-4	SC-HyFRC	# 4 (12.7mm)	2	31.3*
Hy3-4	HyFRC	# 4 (12.7mm)	2	40.3*
ECC3	ECC	None	4	36.9
SCHy3	SC-HyFRC	None	2	31.3*
Hy3	HyFRC	None	2	40.3*

\* Valores baseados em ensaios de mesma mistura, mas diferentes lotes.

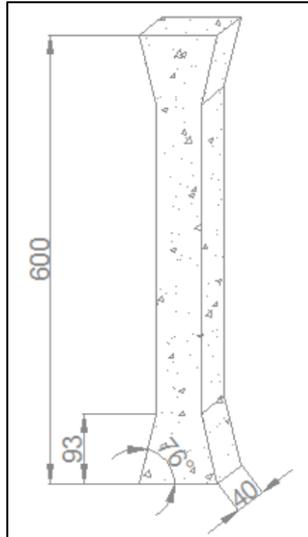
Fonte: Adaptado MORENO ET AL. (2012, p.265)

Os corpos de prova de nomenclatura *ECC* alcançaram resistência de tração direta nas amostras sem reforço de 3,9 MPa. Já a média dos nomeados *HyFRC* e *SC-HyFRC* sem forço foi de 2,6 e 2,8 MPa respectivamente.

### 2.2.7. MÉTODO DE LARISSA FONTOURA

FONTOURA (2015) confeccionou 24 corpos de prova com formato de *dogbone*, destes, 3 corpos de prova para cada tipo de reforço e 3 sem reforço algum. Os reforços utilizados foram barras de aço de 5, 8 e 10 milímetros de diâmetro, e fibras de aço misturadas ao concreto com porcentagens de 0,15, 0,30 e 0,45%. O traço do concreto confeccionado foi de 1:2,17:2,94:0,61 e porcentagem de super plastificante de 0,3%. As dimensões do corpo de prova podem ser visualizadas na figura 16.

Figura 16 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: FONTOURA (2015, p. 28)

Após 28 dias da concretagem os corpos de prova foram ensaiados. Para realizar a ligação do corpo de prova com a máquina do ensaio foram coladas placas de aço com auxílio de cola epóxi na parte superior do corpo de prova, na parte inferior o corpo de prova foi acoplado diretamente na máquina, como mostrado na figura 17.

Figura 17 - Procedimento para ensaio.



Fonte: FONTOURA (2015, p. 32)

Os resultados de resistência à compressão para os corpos de prova cilíndricos estão na figura 18. Os valores obtidos nos testes de tração direta para as amostras sem reforço e reforçadas com barras de aço estão inseridos na Figura 19, e na Figura 20 estão às resistências para os corpos de prova com adição de fibras de aço. A maioria dos corpos de prova rompeu na ligação inferior, onde o corpo de prova foi travado diretamente na máquina, indicando que esta ligação, por não permitir a articulação da amostra, pode ter gerado um acúmulo de tensões secundárias, as quais levaram o corpo de prova a romper neste local.

Figura 18 - Valores de resistência à compressão do concreto.

Matriz de concreto			
T e n s ã o	M P a	CP1_m	24,50
		CP2_m	23,1
		CP3_m	22,50
		<b>Média =</b>	<b>23,37</b>
		DP =	1,026
		CV (%)=	4,39

Fonte: FONTOURA (2015, p. 33)

Figura 19 – Tabela de resultados, corpos de prova com barras de aço.

		Matriz de concreto	Diâmetro das barras			
			5mm	8mm	10mm	
T e n s ã o	M P a	CP1	1,03	3,11	6,06	6,365
		CP2	-	2,33	-	-
		CP3	2,11	2,61	6,03	6,812
		<b>Média =</b>	<b>1,57</b>	<b>2,68</b>	<b>6,04</b>	<b>6,59</b>
		DP =	0,764	0,396	0,022	0,316
		CV (%)=	48,64	14,74	0,37	4,80

Fonte: FONTOURA (2015, p. 37)

Figura 20 – Tabela de resultados, corpos de prova com adição de fibras de aço.

		Matriz	Porcentagem de fibras		
			0,15%	0,30%	0,45%
T e n s ã o	CP1	1,03	-	1,12	1,365
	CP2	-	2,33	1,93	1,342
	CP3	2,11	2,61	2,80	-
	<b>Média =</b>	<b>1,57</b>	<b>2,47</b>	<b>1,95</b>	<b>1,35</b>
	DP =	0,764	0,202	0,84	0,0163
	CV (%)=	48,64	8,17	43,16	1,21

Fonte: FONTOURA (2015, p. 39)

Pode-se observar apenas os resultados de duas amostras sem reforço, indicando a dificuldade em ensaiar estas amostras, uma vez que estas são de extrema fragilidade. As amostras com reforço de barras de aço apresentaram um aumento na resistência à medida que o diâmetro do reforço aumentou, sendo condizente com o esperado. Os resultados das amostras com reforço de fibras não se mostraram satisfatórios visto que a resistência diminuiu à medida que aumentou a porcentagem de fibras de aço.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram executados nos formatos “dogbone” e cilíndrico. O primeiro formato foi o mesmo utilizado por FONTOURA (2015), com seção retangular de 60 x 40 milímetros no meio do corpo de prova, e comprimento de 600 milímetros. O corpo de prova possui as pontas alargadas influenciando as tensões a serem aplicadas no meio do corpo de prova onde a seção é menor e também diminuindo a tensões secundárias como mostrado na Figura 1.

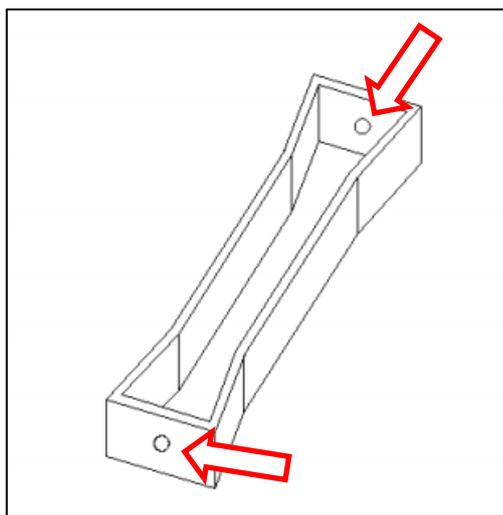
O formato cilíndrico apresenta as dimensões de 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura.

Foram produzidas 22 amostras, sendo 4 amostras prismáticas para cada tipo de reforço, 7 prismáticas sem reforço e 3 amostras cilíndricas.

Para tornar o concreto armado foram utilizadas barras de aço nervuradas com diâmetros de 6,3, 8 e 10 milímetros.

Na figura 21 é mostrada a fôrma que foi utilizada para confecção dos corpos de prova. Os orifícios indicados pelas setas na figura 21 têm por objetivo centralizar as barras de aço no momento do lançamento do concreto.

Figura 21 – Fôrma que foi utilizada para moldagem dos corpos de prova.



Fonte: FONTOURA (2012, p. 28)

Três concretagens foram realizadas seguindo o mesmo traço: 1:2,17:2,94:0,64. Para concretagem foram utilizados os seguintes materiais:

- Agregado graúdo: brita 0.
- Agregado miúdo: areia fina.
- Cimento Portland IV.
- Água

Os agregados graúdo e miúdo foram secos em estufa por 24 horas para que a porcentagem de água não fosse alterada. Antes do lançamento do concreto nas fôrmas, as mesmas foram untadas com óleo para facilitar a desforma como mostrado na figura 23. O concreto foi adensado nas fôrmas com auxílio de uma haste metálica com ponta semiesférica e leves batidas com martelo de borracha foram aplicadas nos lados da fôrma para evitar a formação de nichos de ar. A figura 24 mostra os corpos de prova adensados em suas fôrmas e prontos para cura. A cura dos corpos de prova durou 28 dias e foi realizada em uma sala com a umidade controlada para evitar a formação de fissuras durante a secagem.

O ensaio de abatimento (*slump test*) foi executado segundo a NBR NM 67 - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, e apresentou um abatimento de 17 centímetros na primeira concretagem, como pode ser visto na figura 22, 17 centímetros na segunda concretagem e 15 centímetros na terceira.

Figura 22 – Ensaio de abatimento, primeira concretagem.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Fôrmas untadas com óleo e com reforço já posicionado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Corpos de prova moldados e adensados, prontos para cura.



Fonte: Autoria própria.

## 3.2. ENSAIOS MECÂNICOS

### 3.2.1. ENSAIO MECÂNICO DE COMPRESSÃO

Testes de compressão foram realizados nos corpos de prova cilíndricos, transcorridos 28 dias de cura. Para execução do ensaio de compressão a máquina SATEC™ *Series Static Hydraulic Test Systems* da marca INSTRON foi utilizada. A máquina SATEC™, figura 25, imprimiu um deslocamento de 0,01 mm/mim na amostra.

Figura 25 – Máquina SATEC™.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios de compressão foram executados de acordo com os parâmetros da ABNT NBR – 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. A figura 26 mostra o corpo de prova cilíndrico posicionado na máquina pronto para ser ensaiado.

Figura 26 – Corpo de prova cilíndrico instrumentado, posicionado na máquina de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2. ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO

A mesma máquina ora utilizada para os ensaios de compressão foi utilizada para os testes de tração com velocidade de 0,01 mm/mm. A máquina *SATEC™ Series Static Hydraulic Test Systems* da marca INSTRON pode ser vista na figura 27 já com o corpo de prova prismático pronto para ser ensaiado.

Figura 27 - Máquina SATEC com o extensômetro posicionado no corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

O ensaio foi realizado utilizando um sistema onde duas chapas metálicas foram pressionadas contra a amostra, de modo a prender o corpo de prova entre as placas, este procedimento foi realizado nas duas extremidades da amostra e pode ser visto na figura 28.

Todos os parafusos, dos corpos de prova que apresentavam reforço, foram submetidos a um torque de 200 N.m, e 70 N.m nas matrizes. O torque igual em todos os parafusos é necessário para diminuir a má distribuição da tensão na amostra e também para evitar que as chapas deslizem com a aplicação de força.

Figura 28 – Colocação das chapas de aço na amostra.

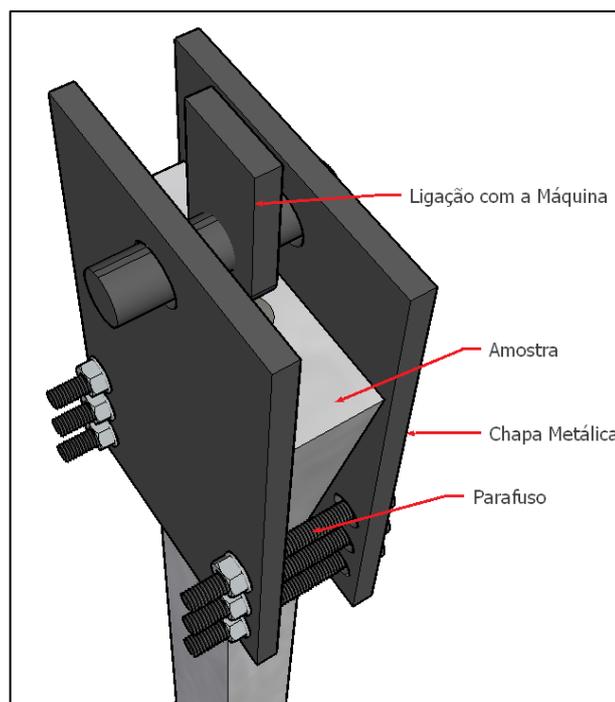


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 29 pode-se observar a instrumentação do ensaio onde as 2 chapas metálicas que são responsáveis por transmitir a tração para corpo de prova fazem a ligação entre a amostra e a máquina por meio de um pino, que é inserido no orifício centralizado da placa metálica.

A acoplagem do corpo de prova na máquina é o principal determinante deste ensaio, pois uma ligação excêntrica pode gerar momentos na amostra fazendo com que o corpo de prova seja solicitado a flexo-tração. Linhas foram traçadas no ao longo do corpo de prova centralizadas para auxiliar na centralização das chapas.

Figura 29 - Configuração do ensaio.



Fonte: Autoria própria.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Três corpos de prova cilíndricos foram ensaiados e os resultados estão dispostos na tabela 3, sendo obtidas as tensões de ruptura da amostra bem como seu módulo de elasticidade.

Tabela 3 – Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.

Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	$\sigma$ (MPa)	Deformação ( $\mu\epsilon$ )	E (GPa)
CP 1_c	25,10	31,96	2215	22,47
CP 2_c	25,51	32,48	1941	26,25
CP 3_c	22,87	29,12	1739	24,22
<b>Média</b>	<b>24,50</b>	<b>31,19</b>	<b>1965</b>	<b>24,31</b>
<b>DP</b>	<b>1,08</b>	<b>1,38</b>	<b>166,67</b>	<b>1,29</b>
<b>CV</b>		<b>4,41%</b>	<b>8,48%</b>	<b>5,31%</b>

Fonte: Autoria própria

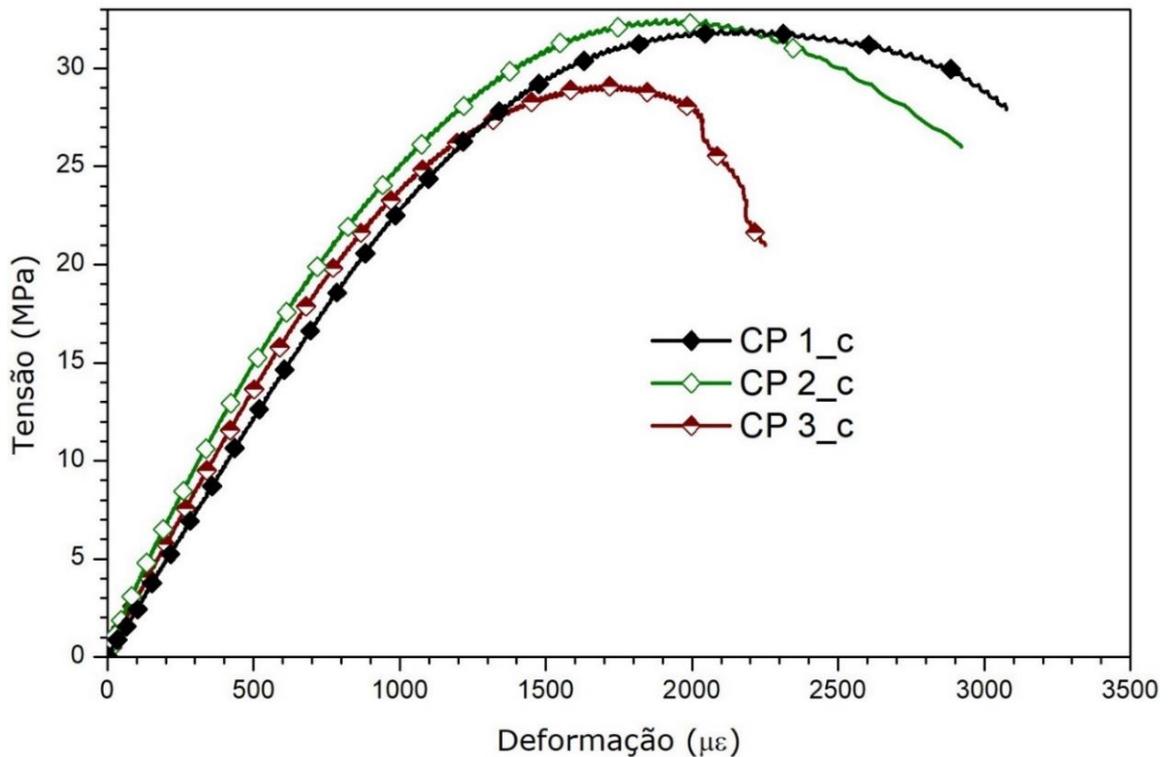
Conforme pode ser observado na tabela 3, o valor médio de resistência à compressão foi de 31,19 MPa, e o módulo de elasticidade médio foi de 24,31 GPa. O coeficiente de variação para a resistência a compressão foi baixo, indicando a boa repetibilidade dos dados. No que tange o módulo de elasticidade, o coeficiente de variação foi e 5,31%, também baixo.

Com os valores fornecidos pelo equipamento foi possível traçar o gráfico tensão *versus* deformação e a utilização do extensômetro foi crucial para obter o módulo de elasticidade de cada um dos corpos de prova.

A deformação média dos corpos de prova no momento de ruptura foi de 1965 microstrain ( $\mu\epsilon$ ) conforme informado na tabela 3, o coeficiente de variabilidade foi satisfatório com valor de 8,48%. Os resultados obtidos nos testes são satisfatórios, pois apresentam valores de resistências próximos e curvas com traçados semelhantes, principalmente os corpos de prova 1 e 2. Além disto os corpos de prova apresentaram valores similares de deformação no momento da ruptura, indicando que a mesma deformação foi necessária para romper cada um dos corpos de prova.

O gráfico 1 mostra os valores de tensão e de deformação para cada uma das amostras cilíndricas.

Gráfico 1 – Tensão *versus* deformação, para resistência à compressão dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria

## 4.2. ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA

### 4.2.1. CORPOS DE PROVA SEM REFORÇO

Cinco corpos de prova foram ensaiados e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 4.

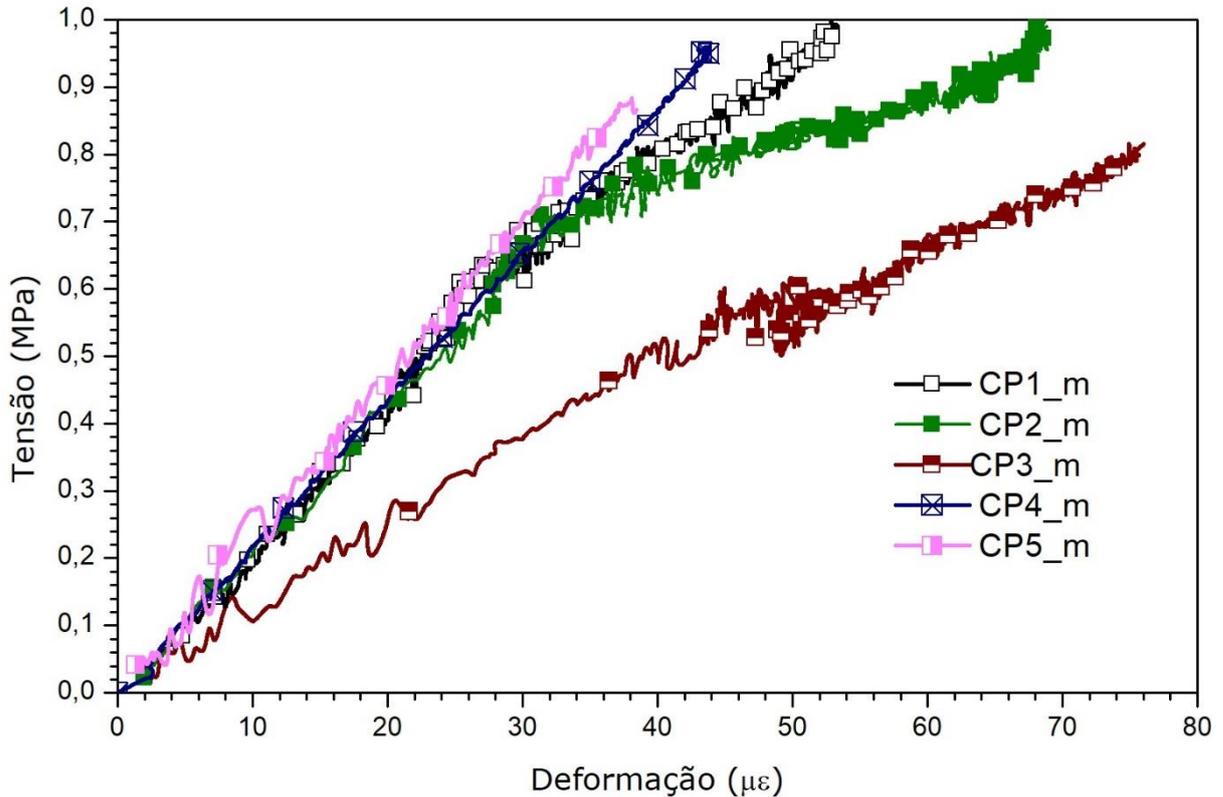
Tabela 4 – Dados do ensaio de resistência à tração de corpos de prova prismáticos sem reforço.

Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	$\sigma$ (MPa)	E (GPa)
CP 1_m	5,37	2,24	47,19
CP 2_m	4,58	1,91	47,78
CP 3_m	5,51	2,30	29,17
CP 4_m	5,31	2,21	49,97
CP 5_m	4,91	2,05	53,66
<b>Média</b>	<b>5,14</b>	<b>2,14</b>	<b>45,55</b>
<b>DP</b>	<b>0,31</b>	<b>0,13</b>	<b>6,55</b>
<b>CV</b>		<b>6,08%</b>	<b>14,38%</b>

Fonte: Autoria própria

A maior força suportada pelas matrizes foi de 5,51 KN assim a tensão gerada foi de 2,30 MPa. Com os resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio foi possível traçar o gráfico 2.

Gráfico 2 – Resistência à tração das matrizes.



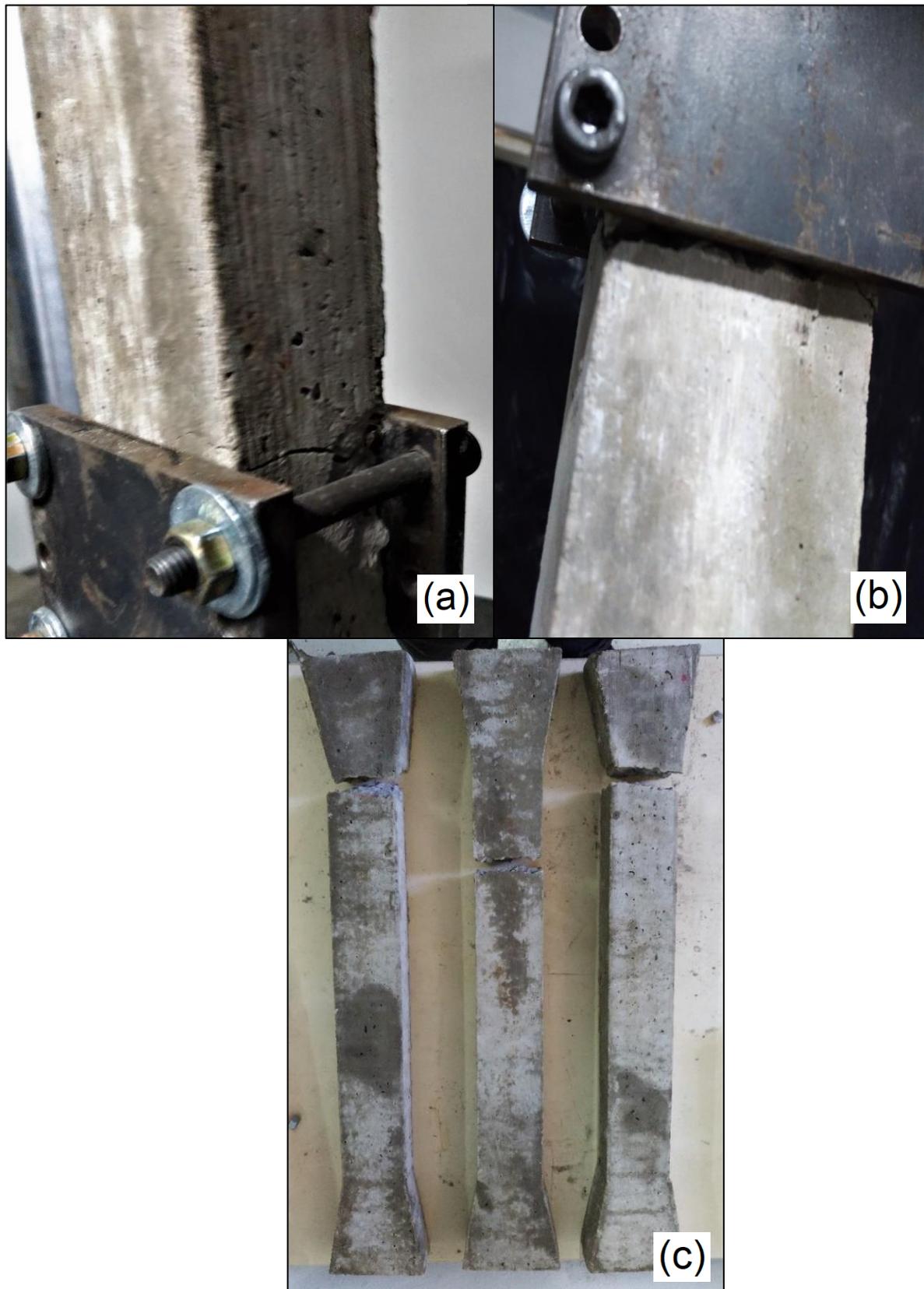
Fonte: Autoria própria

O primeiro corpo de prova rompeu na ligação inferior, amostra *versus* chapas metálicas como mostra a figura 30 (a). A ruptura do segundo corpo de prova ocorreu na ligação superior do corpo de prova com as chapas como indica a figura 30 (b).

Os corpos de prova 3 e 4 também apresentaram rupturas na ligação com a chapa metálica, apenas o corpo de prova 5 rompeu em um local intermediário da amostra como mostra a figura 30(c).

As rupturas localizadas quase que em sua totalidade em locais semelhantes, ligação chapa *versus* amostra, indica que um possível acúmulo de tensões neste local, porém, acredita-se que essa concentração não prejudicou a identificação da tensão de ruptura do material, uma vez que o coeficiente de variação foi razoavelmente baixo, e dentro dos limites encontrados por diferentes autores.

Figura 30 – Locais de ruptura dos corpos de prova.



Fonte: Autoria Própria (a) Local de ruptura do corpo de prova 1. (b) Ruptura do corpo de prova 2. (c) Locais de ruptura dos corpos de prova 3, 5 e 4 respectivamente.

#### 4.2.2. CORPOS DE PROVA REFORÇADOS COM BARRAS DE 6,3 MILÍMETROS DE DIÂMETRO,

Quatro amostras prismáticas foram reforçadas utilizando barras de aço de diâmetro de 6,3 milímetros, sendo o menor diâmetro utilizado neste trabalho. Os resultados apresentaram uma variabilidade considerável, porém aceitável devido à dificuldade do ensaio, e foram inseridos na tabela 5. Uma das amostras apresentou fissuras no momento da sua desforma e teve de ser descartada. As amostras 1 e 3 apresentaram duas fissuras antes da ruptura e a amostra 2 apresentou 3 fissuras.

Tabela 5 – Valores de resistência à tração para os corpos de prova reforçados com barras de aço CA50 de 6,3 milímetros.

Corpo de Prova	1 <sup>a</sup> Fissura (MPa)	2 <sup>a</sup> Fissura (MPa)	3 <sup>a</sup> Fissura (MPa)	Força Apl. (kN)	$\sigma$ (MPa)	E (GPa)
CP 1_6,3	1,74	2,34	-	6,98	2,91	33,29
CP 2_6,3	2,09	2,63	2,83	10,85	4,52	40,92
CP 3_6,3	1,68	5,12	-	16,51	6,88	43,34
<b>Média</b>	<b>1,83</b>	<b>3,37</b>	<b>2,83</b>	<b>11,45</b>	<b>4,77</b>	<b>39,19</b>
<b>DP</b>	<b>0,17</b>	<b>1,17</b>	<b>0</b>	<b>3,38</b>	<b>1,41</b>	<b>3,93</b>
<b>CV</b>	<b>9,29%</b>	<b>34,79%</b>	<b>0</b>	<b>29,51%</b>		<b>10,03%</b>

Fonte: Autoria própria

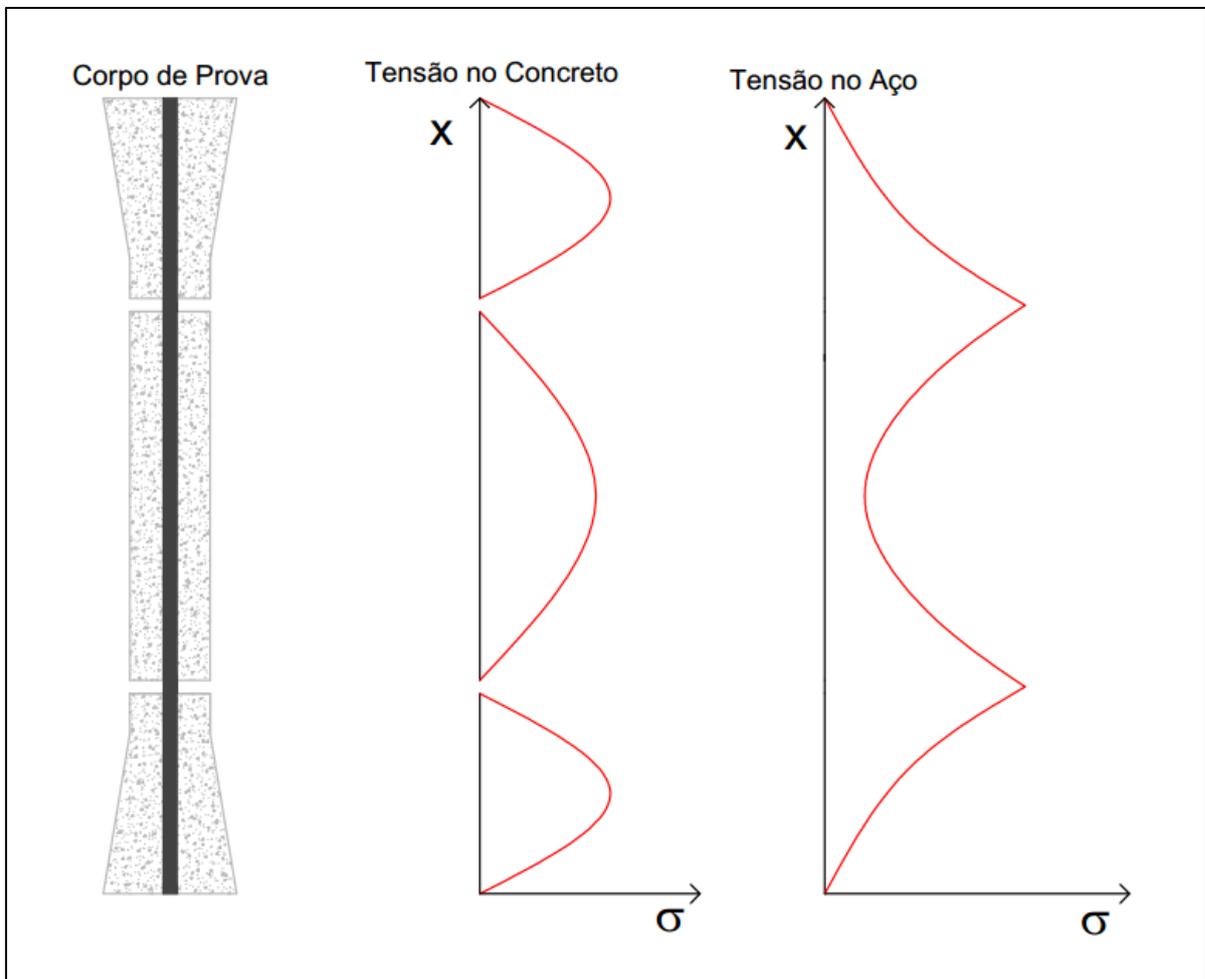
Para representar melhor a deformação que ocorre na amostra os gráficos das amostras reforçadas foram plotados de uma maneira em que todas as deformações da amostra fossem incluídas no traçado do gráfico. Pensando desta maneira entende-se que antes da primeira fissura o concreto e a barra de aço embebida estão suportando a tensão aplicada pela máquina, trabalhando juntos, e o extensômetro é capaz de medir a deformação pois, antes da primeira fissura, a amostra encontra-se no regime linear elástico. Quando a primeira fissura ocorre a amostra se divide e a tensão no concreto é zerada no local fissurado. Assim o concreto não é mais o condutor principal da tensão e a barra de aço age como uma costura interligando as partes da amostra. Existe uma transferência de tensões do concreto para a barra por meio de tensões tangenciais de aderência.

Na amostra pré-fissuração o concreto está com uma tensão uniforme e a deformação pode ser medida pelo extensômetro, pois o concreto está se deformando igualmente. Já com o surgimento das fissuras a tensão se distribui de maneira

disforme (figura 31) e o extensômetro não é mais capaz de medir a deformação do corpo de prova, pois este limita-se a medir a deformação em apenas uma porção do corpo de prova.

Desta maneira o gráfico foi construído com dois eixos horizontais, o primeiro gráfico apresenta a tensão *versus* deformação da amostra até a ocorrência da primeira fissura. O segundo gráfico mostra a tensão a partir da primeira fissura até a ruptura sendo um gráfico tensão *versus* deslocamento, deslocamento este executado e medido pela máquina do teste.

Figura 31 - Tensões no corpo de prova.

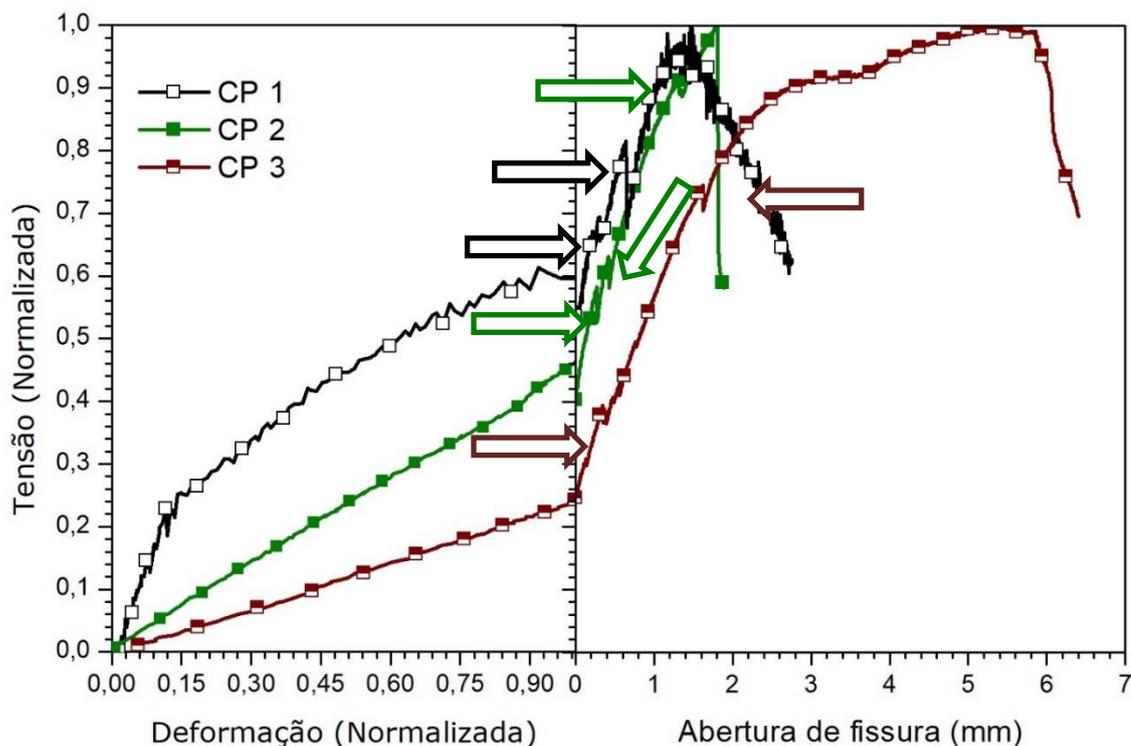


Fonte: Autoria própria

A ocorrência da primeira fissura variou pouco em relação à tensão aplicada, tendo uma média de 1,83 MPa, entretanto a variação da deformação em que esta fissura ocorreu foi maior, dificultando a inserção de vários corpos de prova em um mesmo gráfico.

Optou-se, então, pela normalização do primeiro eixo horizontal (deformação) para que todos os gráficos terminassem com o mesmo valor (um). Esta normalização se deu da seguinte maneira: o valor da deformação no momento da primeira fissura foi usado como divisor para todos os outros valores de deformação chegando a um máximo de 1. Este procedimento foi realizado em todas as amostras e também foi utilizado no eixo vertical (tensão). No caso do eixo vertical a tensão de ruptura de cada amostra foi utilizada para normalizar este eixo, possibilitando uma visualização melhor do traçado do gráfico.

Gráfico 3 – Resistência à tração dos corpos de prova reforçados com barras de aço CA50 6,3 milímetros de diâmetro.



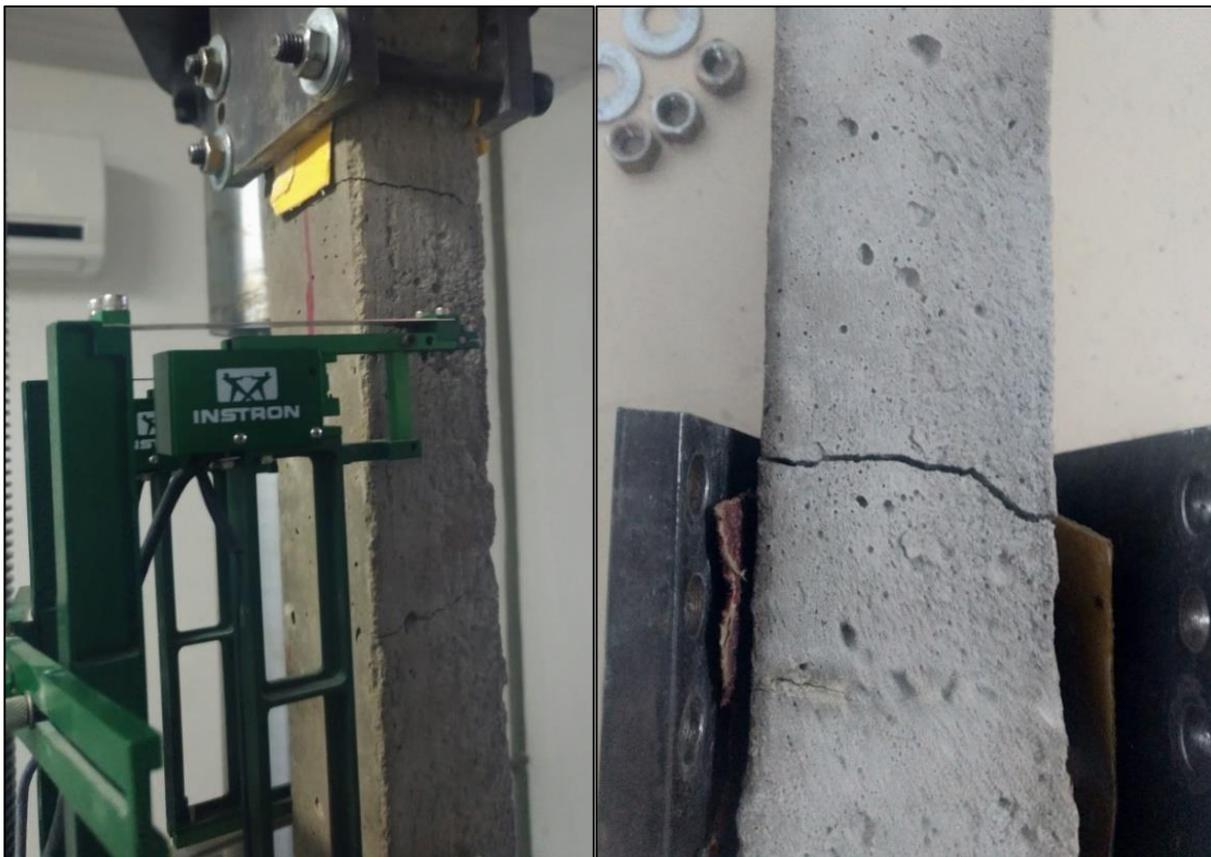
Fonte: Autoria própria

Observando os gráficos e a tabela 5 pode-se visualizar claramente as fissuras que ocorreram nas amostras. Cada queda no gráfico indica a abertura de uma nova fissura.

No corpo de prova 1 uma fissura é observada com tensão de 1,73 MPa e a segunda fissura, já de maior abertura, acontece com 2,34 MPa. Em alguns corpos de prova ocorreu um leve deslocamento das chapas metálicas ocasionando perda de tensão da máquina, porém a gravata do corpo de prova travou os parafusos das

placas após o deslocamento fazendo com que as amostras continuassem a suportar maiores resistências. Na figura 32 (a) é mostrado o corpo de prova 1 o qual sofre duas fissuras antes do rompimento. O corpo de prova 2 rompeu na ligação entre chapa metálica e amostra como mostra figura 32 (b).

Figura 32 – Múltiplas fissurações na amostra.



Fonte: Autoria própria (a) Corpo de prova 1 com duas fissuras. (b) Local de ruptura de corpo de prova 2.

As fissuras surgiram ao longo do corpo de prova indicando uma distribuição uniforme da força aplicada na amostra. A resistência aumentou consideravelmente em relação as matrizes, mostrando que a transmissão das tensões para a barra de aço aconteceu. Os valores encontrados foram considerados aceitáveis, pois mostraram um aumento da resistência e ocorrência de fissurações nas amostras.

### 4.2.3. CORPOS DE PROVA REFORÇADOS COM BARRAS DE 8 MILÍMETROS DE DIÂMETRO

As respectivas tensões no momento em que cada fissura ocorreu, bem como as tensões de rompimento dos corpos de prova estão especificados na tabela 6.

Tabela 6 – Valores de resistência à tração para os corpos de prova reforçados com barras de aço CA50 de 8 milímetros.

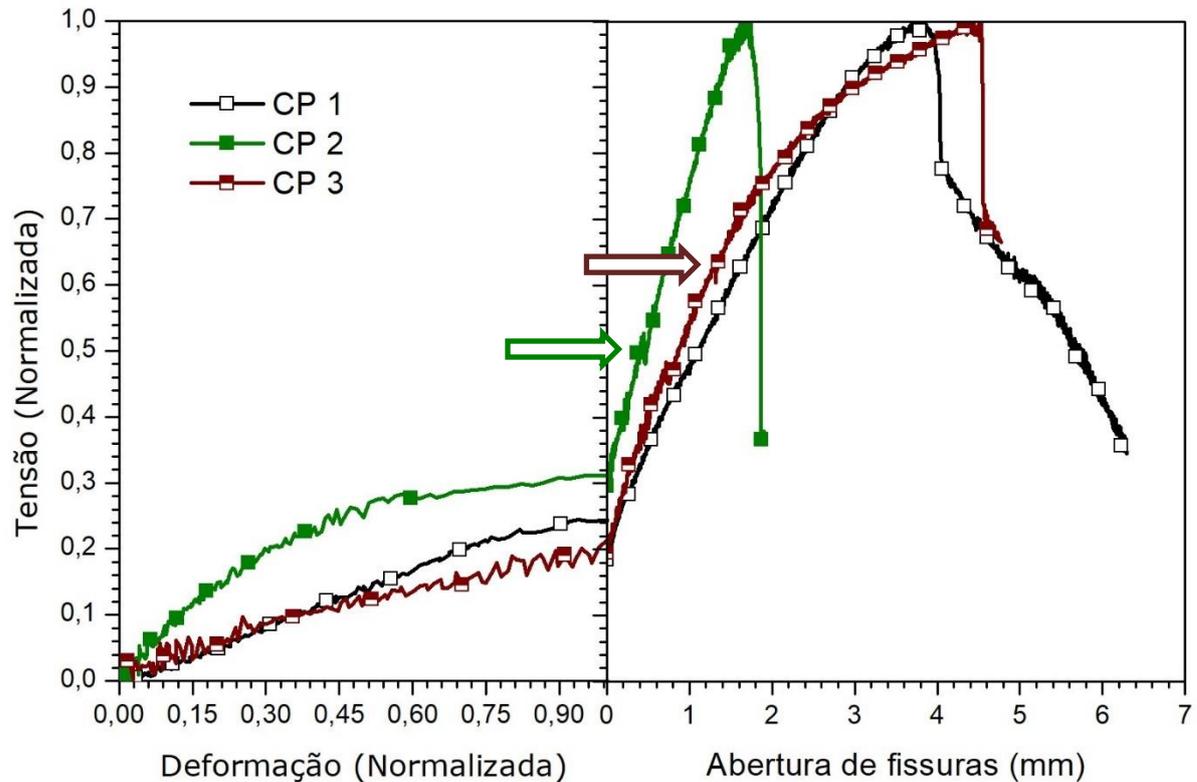
Corpo de Prova	1 <sup>a</sup> Fissura (MPa)	2 <sup>a</sup> Fissura (MPa)	Força Aplicada (kN)	$\sigma$ (MPa)	E (GPa)
CP 1_8	1,70	-	16,78	6,99	29,69
CP 2_8	1,36	2,31	10,51	4,38	-
CP 3_8	2,94	4,32	21,79	9,08	32,63
<b>Média</b>	<b>2,00</b>	<b>3,31</b>	<b>16,36</b>	<b>6,82</b>	<b>31,16</b>
<b>DP</b>	<b>0,63</b>	-	<b>3,90</b>	<b>1,62</b>	-
<b>CV</b>	<b>31,26%</b>	-	<b>23,83%</b>		-

Fonte: Autoria própria

A amostra 3 foi a que mais suportou a força nela aplicada, chegando a 21,79 kN, suportando assim uma tensão de 9,08 MPa. As tensões no momento da fissura inicial apresentaram um coeficiente de variação de 31,26% sendo razoavelmente alto. Em média o módulo de elasticidade foi de 31,16 GPa.

A partir dos valores fornecidos pelo equipamento traçou-se o gráfico 4, seguindo a mesma premissa adotada para o traçado do gráfico das amostras reforçadas com barras de 6,3 milímetros de diâmetro. Setas indicam os momentos das segundas fissuras nos corpos de prova 2 e 3. O corpo de prova 1 apresentou apenas uma fissura antes de sua ruptura.

Gráfico 4 – Resistência à tração dos corpos de prova reforçados com barra de aço CA50 8 milímetros de diâmetro.

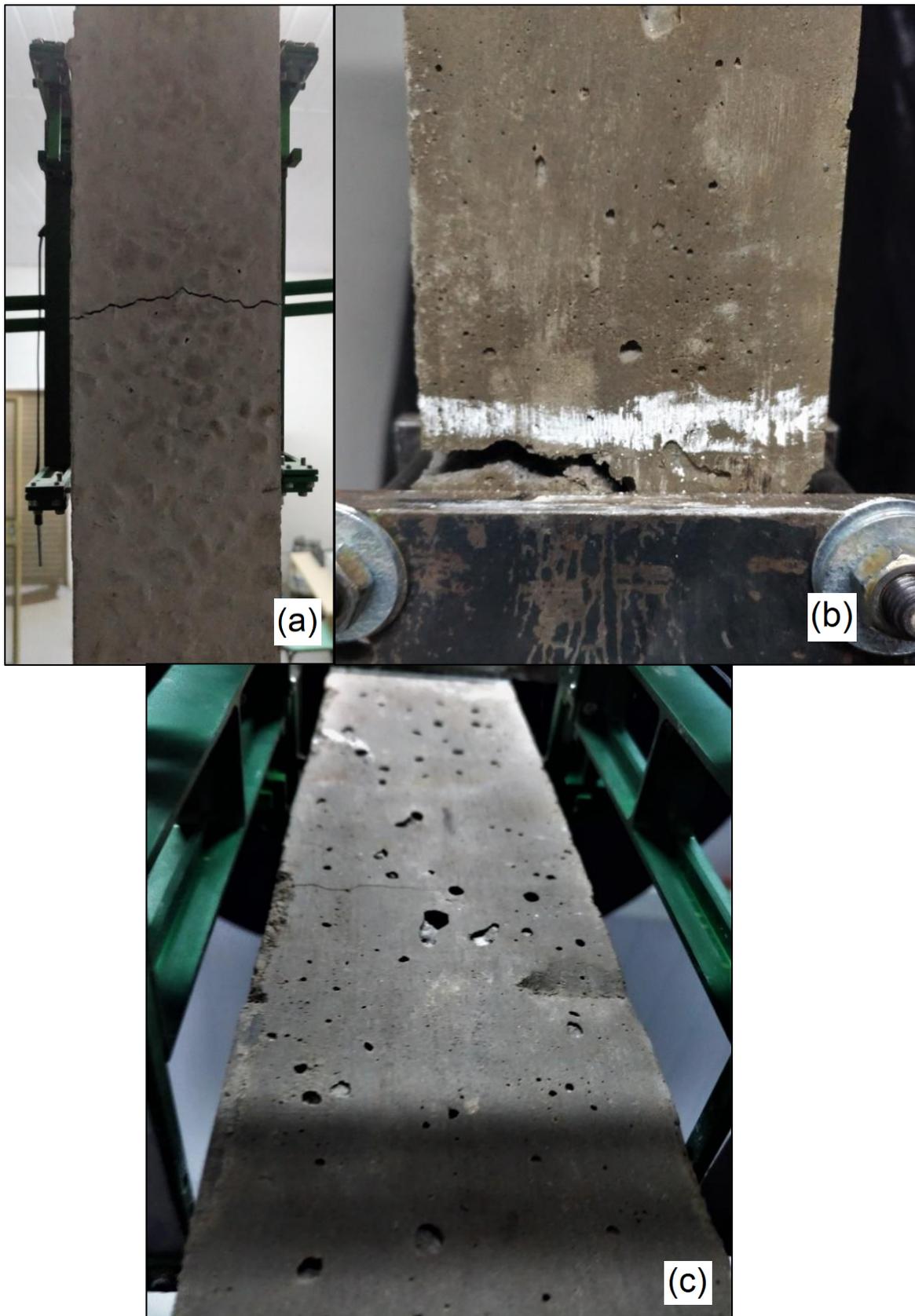


Fonte: Autoria própria

O gráfico gerado apresentou a curva inicial pré-fissuração com traçados semelhantes, indicando um módulo de elasticidade análogo nestas amostras, principalmente nas amostras 1 e 3, as quais apresentaram, também, aberturas de fissuras próximas no momento da ruptura. Ao longo dos traçados é possível visualizar pequenas quedas nas curvas indicando o momento em que as fissuras surgem na amostra.

Os corpos de prova reforçados com barra de 8 milímetros de diâmetro apresentaram uma fissura inicial no centro do corpo de prova. As fissuras podem ser observadas na figura 33 (a) para o corpo de prova 1 e na figura 33 (b) para o corpo de prova 2. Entretanto, a ruptura de todos os corpos de prova ocorreu na ligação destes com as placas metálicas. Na figura 33 (c) podemos observar o local de ruptura do corpo de prova 3.

Figura 33 – Fissuras e rachaduras nas amostras.



Fonte: Autoria própria (a) Fissura central da amostra 1. (b) Local de ruptura da amostra 3. (c) Fissura centralizada na amostra 2.

#### 4.2.4. CORPOS DE PROVA REFORÇADOS COM BARRAS DE 10 MILÍMETROS DE DIÂMETRO

Os corpos de prova apresentaram múltiplas fissuras indicando que, a partir da primeira fissura, o reforço passou a suportar as tensões aplicadas pelo equipamento. A força em que surge cada fissura, bem como a tensão máxima suportada pelo compósito estão exibidas na tabela 7.

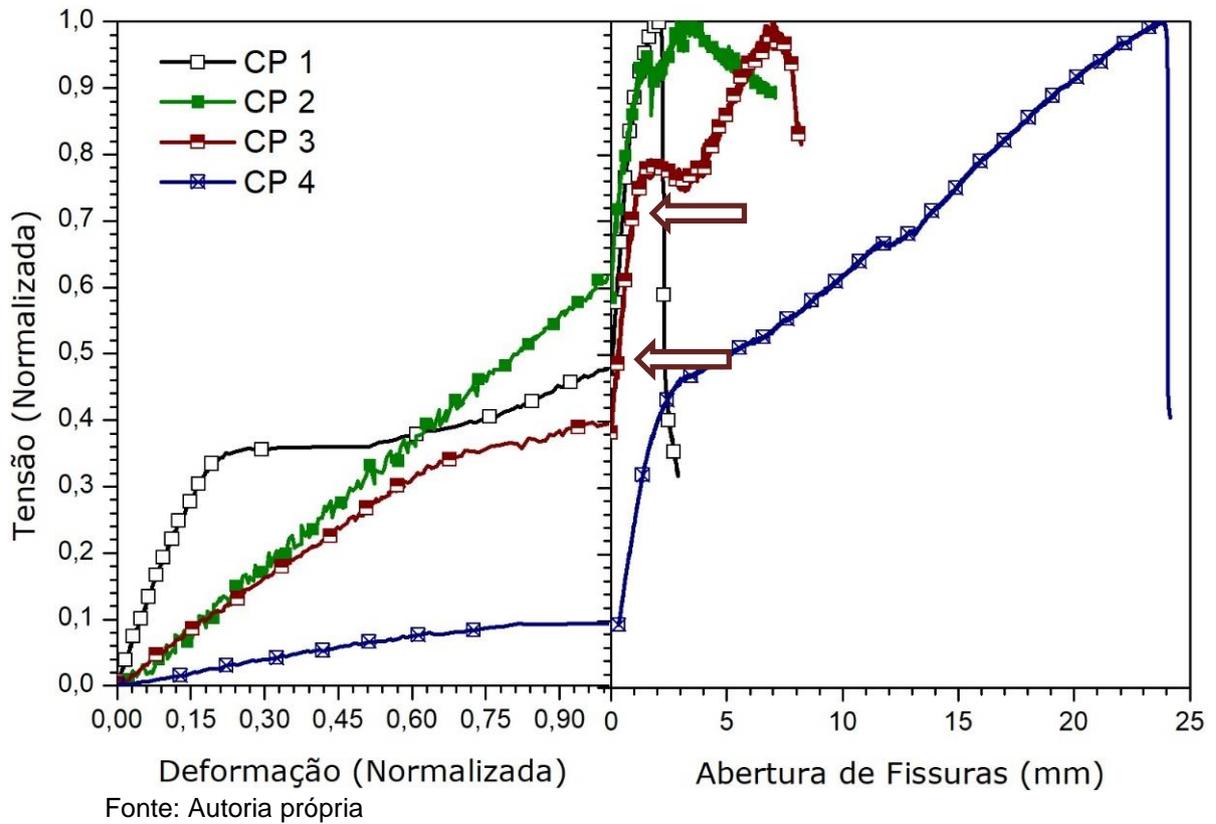
Tabela 7 – Valores de resistência à tração para os corpos de prova reforçados com barras de aço CA50 de 10 milímetros.

Corpo de Prova	1 <sup>a</sup> Fiss. (MPa)	2 <sup>a</sup> Fiss. (MPa)	3 <sup>a</sup> Fiss. (MPa)	4 <sup>a</sup> Fiss. (MPa)	5 <sup>a</sup> Fiss. (MPa)	Força Apl. (kN)	$\sigma$ (MPa)	E (GPa)
CP 1_10	2,70	2,96	3,50	-	-	13,56	5,65	45,81
CP 2_10	3,29	3,79	4,29	5,03	5,31	12,79	5,33	49,57
CP 3_10	2,70	3,46	4,72	-	-	16,39	6,83	48,35
CP 4_10	1,06	2,31	-	-	-	27,19	11,33	35,98
<b>Média</b>	<b>2,43</b>	<b>3,13</b>	<b>4,17</b>	-	-	<b>23,31</b>	<b>7,29</b>	<b>44,93</b>
<b>DP</b>	<b>0,69</b>	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>	-	-	<b>4,85</b>	<b>2,02</b>	<b>4,47</b>
<b>CV</b>	<b>28,26</b>	<b>15,88</b>	<b>10,71</b>	-	-	<b>27,76</b>		<b>9,95</b>

Fonte: Autoria própria

Gerou-se o gráfico 5 com os valores obtidos para as amostras reforçadas com as barras de 10 milímetros. O traçado do gráfico 5 obedeceu às considerações utilizadas para as amostras com barras de 6,3 milímetros. Setas indicam a ocorrência de fissuras na amostra número 3, após as duas fissuras ocorreu um escorregamento na placa metálica ocasionando um desvio do traçado do gráfico.

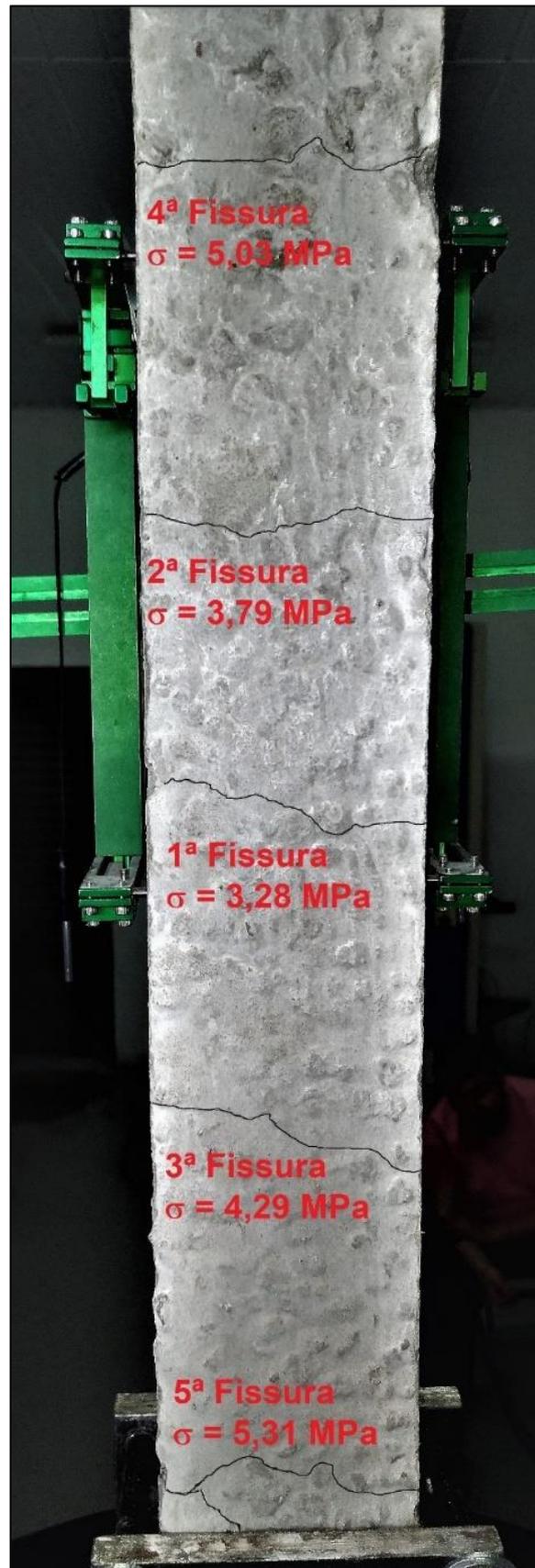
Gráfico 5 – Resistência à tração dos corpos de prova reforçados com barra de aço CA50 de 10 milímetros de diâmetro.



A primeira fissura ocorreu nas amostras novamente em uma tensão média de 2,43 um pouco acima das tensões médias de primeira fissura das outras amostras. O corpo de prova 4 apresentou uma elevada resistência sendo a curva que excedeu a diferença entre as demais.

As amostras com reforço de barras de 10 milímetros de diâmetro apresentaram múltiplas fissurações ao longo do corpo de prova. No corpo de prova 2, o que apresentou mais fissuras, a primeira fissura surge no meio do corpo de prova e as subsequentes surgem do centro em direção as pontas da amostra, como mostra a figura 34 onde estão indicadas a ordem das fissuras e a tensão em que cada uma surge.

Figura 34 – Múltiplas fissuras ocorrem em todo o corpo de prova.



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os valores de resistência à tração do concreto simples obtidos no presente estudo, podem ser considerados satisfatórios, se comparados a outros estudos ora referenciados

Os valores médios de todos os corpos de prova são apresentados na tabela 8 para facilitar a comparação entre os mesmos.

Tabela 8 – Resultados médios de todos os ensaios de resistência à tração.

Corpo de Prova	1 <sup>a</sup> Fiss.	2 <sup>a</sup> Fiss.	3 <sup>a</sup> Fiss.	4 <sup>a</sup> Fiss.	5 <sup>a</sup> Fiss.	Força Apl.	$\sigma$	E	Área de Aço
Unid.	MPa					KN	MPa	GPa	cm <sup>2</sup>
Matrizes	2,14	-	-	-	-	5,14	2,14	45,55	0
CP's_6,3	1,83	3,37	-	-	-	11,45	4,77	39,19	237,50
CP's_8	2,00	3,31	-	-	-	16,36	6,82	31,16	301,59
CP's_10	2,34	3,13	4,17	5,03	5,31	23,31	7,29	44,93	376,99

Fonte: Autoria própria

A partir da análise da tabela 8 pode-se observar que os valores médios das tensões de primeira fissura de todos os corpos de prova são próximos a tensão média de ruptura das matrizes. Isto indica que a resistência do concreto se apresenta similar em todas as amostras. O aumento da resistência das amostras aumenta simultaneamente com o aumento do diâmetro das barras utilizadas mostrando a importância do uso do reforço no concreto. Isto ocorre porque o aço possui uma enorme resistência a tração e, a boa aderência entre o concreto e o aço, permite que as tensões impressas na amostra sejam transmitidas para o aço.

É claro o aumento da resistência conforme o aumento do diâmetro das barras utilizadas como reforço. O concreto transmite a tensão para a barra de aço através de forças tangenciais de aderência, as quais são melhores transmitidas se a área de contato entre concreto e aço for maior. Com o aumento do diâmetro das barras de aço há também um aumento na área de contato concreto *versus* aço. Na tabela 8 foram adicionadas as áreas de contato para cada diâmetro de barra.

A tabela 9 apresenta os valores encontrados por diferentes autores em ensaios de tração direta, bem como os valores encontrados em ensaios realizados neste trabalho. A tabela 9 contém as resistências de compressão e tração e a porcentagem da resistência de tração direta em relação a tração de compressão.

Tabela 9 – Resultados médios de todos os ensaios de resistência à tração.

Método	$f_t$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	Relação Compressão/Tração (%)
Schuman e Tucker (1943)	2,79	31,92	8,74
	3,38	39,23	8,62
	CP menores	CP maiores	
	1,70	2,42	26
	1,91	2,61	32,45
	1,74	2,99	30,85
Nianxiang Wenyan (1989)	1,10	2,03	25,75
	2,65	3,75	35,90
	1,93	2,89	30,75
	1,84	3,21	32,20
	1,60	2,58	31,90
	1,44	2,35	27,95
	2,81	28,90	9,72
	2,73	35,90	7,60
	2,97	49,66	5,98
	3,03	60,16	5,04
Zheng et al. (2001)	2,91	34	8,56
	2,97	40	7,43
	3,14	58	5,41
	2,44	29,2	8,36
	2,80	49	5,71
	3,12	69,60	4,48
Marangon (2011)	4,20	69,91	6,01
	4,63	70,20	6,59
Moreno et al. (2015)	3,90	36,90	10,57
	2,60	40,30	6,45
	2,80	31,30	8,95
Fontoura (2015)	1,57	23,37	6,72
Resultados encontrados	2,14	31,19	6,86

Fonte: Autoria própria

Analisando a tabela 9 vemos que os valores encontrados por este trabalho estão dentro dos padrões encontrados por diversos autores. A relação entre a resistência de tração e de compressão para os corpos de prova prismáticos reforçados com barras de 8 e 10 milímetros encontradas por FONTOURA (2015) foi de 25,85% e 28,20%. Para efeito de comparação as porcentagens da mesma relação encontradas neste trabalho foram de 21,86% e 23,37%. A porcentagem menor ocorre devido a diferença na resistência a compressão do concreto. O  $f_{ck}$  de FONTOURA

(2015) é menor que o obtido neste trabalho, assim a relação tração/compressão é menor apesar das tensões serem maiores.

## 5. CONCLUSÕES

A resistência a compressão média do concreto foi de 31,19 MPa, o coeficiente de variabilidade foi de 4,41%, com um coeficiente de variabilidade baixo e uma resistência condizente com um concreto de  $f_{ck}$  30, pode-se dizer que o concreto atendeu as expectativas no que concerne a resistência a compressão, também apresentando curvas de tensão *versus* deformação com traçados semelhantes e típicos.

Quando as amostras foram submetidas a tração pode-se notar uma similaridade na tensão no momento da primeira fissura. Isto é importante para observarmos o momento em que o aço inicia sua atuação como elemento resistente a tração. Os ensaios de tração apresentaram valores em ordem crescente conforme o aumento do diâmetro das barras de aço, devido ao fato do aumento da área do material que possui maior resistência a tração. O aço agiu como ligação entre as partes fissuradas do concreto, aumento assim sua resistência.

No concreto não armado, em média, o valor da resistência à tração direta correspondeu a 6,86% do valor da resistência à compressão do mesmo material. Houve um ganho substancial de resistência no material quando este passou de concreto simples para armado. O casamento entre aço e concreto se mostra muito satisfatório para aumentar a resistência à tração do concreto, não sendo por acaso a utilização deste elemento estrutural em larga escala no mundo inteiro.

A adição das barras de 6,3 milímetros de diâmetro conferiu um aumento na resistência de 222,90% em relação ao concreto não-armado. O aumento foi de 318,70% quando o reforço utilizado foram barras de 8 milímetros de diâmetro, e um acréscimo ainda maior foi gerado quando utilizadas as barras de diâmetro igual a 10 milímetros: 453,74% em relação ao concreto simples.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é recomendado a fabricação de um número alto de amostras, principalmente das matrizes. As matrizes são muito frágeis e nem todas as amostras confeccionadas estarão aptas a serem ensaiadas.

Outros tipos de concreto, como o auto adensável, podem ser utilizados, assim como a utilização de aditivos e variados reforços como a fibra de aço.

O acoplamento da amostra na máquina pode ser melhorado. Um possível gabarito para a colocação da amostra poderia diminuir a interferência das tensões secundárias. Recomenda-se também a troca dos parafusos pela cola epóxi na fixação das chapas metálicas nas amostras, tendo em vista que ao aplicar-se o torque nos parafusos algumas amostras já tiveram de ser descartadas.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Determinação de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

FONTOURA, L. N., **Análise da influência do uso de barra e fibras de aço no concreto submetido à tração**. 2015. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

LIMA, P. R. L., **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. Tese de doutorado-PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MARANGON, E., **Caracterização Material e Estrutural de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Aço**. 2011, 309f. Tese de Doutorado - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª Edição. São Paulo. IBRACON, 2008.

MORENO, D. M. *et al.* Tension-Stiffening in reinforced high-performance fiber reinforced cement-based composites under direct tension. In: NAAMAN, A. E., REINHARDT, H. W., PARRA-MONTESINOS, G. J. (Org.). **High performance fiber reinforced cement composites 6**. 3 ed., Nova York: Rilem, 2012.

NEVILLE, A. M. BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª Edição. São Paulo. Bookman Editora, 2013.

NIANXIANG, X.; WENYAN, L. Determining Properties of Mass Concrete by Direct Tensile Test. **ACI Materials Journal**, Vol. 86, p. 214-219, Maio - Junho, 1989.

OLUOKUN, F. A. Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete. **ACI Materials Journal**. p. 302-309. Maio-Junho 1991.

Rangel, C.S., Amario, M, Pepe, M., Yao, Y., Mobasher, B., Toledo, R.D.F., Tension Stiffening Approach for Interface Characterization in Recycled Aggregate Concrete. **Cement and Concrete Composites 82**, p. 176-189, 2017.

SCHUMAN, L.; TUCKER, J. Tensile and Other Properties of Concretes Made With Various Types of Cements. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, vol.31 p. 107-124, 1943.

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

ZHENG, W.; KWAN, K. H.; LEE, P. K. K. Direct Tension Test of Concrete. **ACI Materials Journal**, Vol. 98, p. 63-71, Janeiro-Fevereiro, 2001.