

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

VICTOR HUGO DUARTE DE ANDRADE

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE AÇO E MACROFIBRAS POLIMÉRICAS  
NO CONCRETO

Joinville

2020

VICTOR HUGO DUARTE DE ANDRADE

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE AÇO E MACROFIBRAS POLIMÉRICAS  
NO CONCRETO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Joinville

2020

VICTOR HUGO DUARTE DE ANDRADE

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE AÇO E MACROFIBRAS POLIMÉRICAS  
NO CONCRETO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 27 de Novembro de 2020.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Luciano Senff  
Orientador  
Presidente

---

Profa. Dra. Helena Ravache Samy Pereira  
Membra  
Centro Universitário Católica de Santa Catarina

---

Profa. Dra Valéria Bennack  
Membra  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Daniel Hastenpflug  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho a Deus.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser bondoso e misericordioso comigo todos os dias, dando-me o necessário para que eu pudesse chegar até aqui, e por sempre cuidar de mim.

Ao professor Luciano Senff, por ter aceitado ser meu orientador e por todo o apoio e incentivo que me deu nessa jornada.

A minha família, em especial ao meu pai Fábio, meu irmão Marco, minha mãe Maria da Graça (in memorian) e minha madrasta Kelly, por terem me dado todo o apoio necessário não só durante a graduação, mas ao longo da minha vida.

A minha namorada, Vitória, por ser companheira e estar sempre comigo nos diversos momentos que passei durante a graduação. Amo você.

A equipe de competição InfraTEC, por ter tornado minha graduação muito mais completa. Agradeço à oportunidade que tive de fazer parte desta família, de poder ter contribuído para o desenvolvimento da equipe, assim como a InfraTEC contribuiu para o meu desenvolvimento. Agradeço à todos os meus parceiros de equipe, em especial ao Felipe M., Túlio H.C.P, Maria Augusta M.C, Maria Eduarda P. , Monique Fin O., Douglas S., Bruna S., Vinícius R.K., Eduarda S. e Aleksander N. Moro pela amizade e companheirismo nesse tempo que estivemos trabalhando juntos.

Agradeço também àqueles que me auxiliaram no trabalho de laboratório, em especial ao Vinícius R.K e à Monique F.O, que sempre estiveram junto comigo.

As amigadas que fiz durante a faculdade, Augusto T., Amanda R., Bianca S. F, Leonardo R.C., Marcela S.S. , Murilo R.S. Obrigado pela amizade e pelo apoio que vocês me deram.

Aos meus amigos Jhônatas H.G, Rafael M e Rayza Y.O.V, agradeço a amizade e os diversos momentos que tivemos desde o ensino médio.

A empresa Perville, em especial ao Engenheiro Marco Antônio Krüger (Coordenador da Fábrica), por fornecer as fibras da Barchip MQ58 e permitir que eu pudesse utilizar de suas instalações para realizar o rompimento dos corpos de prova.

Ao Rafael C. Fronza, pelo auxílio na moldagem e no rompimento dos corpos de prova. Não foi um trabalho fácil, mas com a sua ajuda foi possível realizá-lo.

Ao Marcio da empresa MM Fibras, pelo fornecimento das fibras de aço e de polietileno.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados mundialmente. Entretanto, possui algumas limitações, como a baixa capacidade de resistência quando solicitado à tração. A adição de fibras ao concreto atua de forma a melhorar o comportamento mecânico do mesmo. Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo avaliar a influência do uso das adições de fibras de aço e de macrofibras poliméricas nas propriedades do concreto fresco e endurecido. No estado fresco, a propriedade avaliada será o abatimento do tronco de cone. Já no estado endurecido, as propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) e propriedades físicas (massa específica, absorção de água e índice de vazios) serão avaliadas até os 28 dias de cura. Para a comparação entre as fibras, foram realizadas uma formulação de referência e seis outras formulações com as fibras (duas formulações para cada tipo de fibra utilizada) com diferentes dosagens, mantendo-se o mesmo fator água cimento. Para as fibras poliméricas, o volume de adição destas na mistura manteve-se constante. Ensaio no estado fresco indicam que a adição de fibras causa a redução da trabalhabilidade da mistura. Nos ensaios para o estado endurecido, as fibras causaram o aumento dos valores de massa específica, do índice de vazios e da absorção de água, e reduziram os valores de absorção de água por capilaridade. O comportamento mecânico de resistência à tração na flexão apresentou melhores resultados com as fibras de aço e de polipropileno modificado, com aumento de 10% e 84% para fibra de aço e 23% para fibra de polipropileno modificado em relação à formulação de referência. Para elementos solicitados à tração na flexão, como pisos industriais, a adição de fibras de aço ou poliméricas é uma solução viável para melhorar o comportamento mecânico da matriz frente à resistência mecânica, deformações e abertura de fissuras.

**Palavras-chave:** Concreto reforçado com fibras. Fibras de aço. Fibras poliméricas. Resistência à tração.





## ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials worldwide. However, it has some limitations, such as the low resistance capacity in tensile strength. The addition of fibers to concrete acts to improve its mechanical behavior. In this sense, the present study aims to evaluate the influence of the use of the addition of steel fibers and polymeric macrofibers on the properties of fresh and hardened concrete. In the fresh state, the property evaluated will be the slump. In the hardened state, the mechanical properties (compressive strength and tensile strength in flexion) and physical properties (specific mass, water absorption and voids index) will be evaluated until 28 days of curing. For the comparison between the fibers, a reference formulation and six other formulations were made with the fibers (two formulations for each type of fiber used) with different mix proportioning, keeping the same water-cement ratio. For the polymeric fibers, the volume of addition of these in the mixture remained constant. Tests in the fresh state indicate that the addition of fibers reduces the workability of the mixture. In the tests for the hardened state, the fibers caused an increase in the values of specific mass, voids index and water absorption, and reduced the values of water absorption by capillarity. The mechanical behavior of tensile strength in flexion showed better results with steel and modified polypropylene fibers, with an increase of 10% and 84% for steel fiber and 23% for modified polypropylene fiber in relation to the reference formulation. For elements required for tensile strength, such as industrial floors, the addition of steel or polymer fibers is a viable solution to improve the mechanical behavior of the matrix in the face of mechanical resistance, deformations and cracking.

**Keywords:** Fiber reinforced concrete. Steel fibers. Polymeric fibers. Tensile strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b) .....	18
Figura 2 – Diagrama tensão x deformação de uma matriz de concreto e de fibras com diferentes propriedades mecânicas .....	19
Figura 3 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico.....	20
Figura 4– Curvas médias de carga por deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão de concreto de $f_{ck} = 30$ MPa reforçados com uma fibra de 36 mm e outra de 45 mm de comprimento e mesma seção transversal.....	21
Figura 5– Curvas médias de carga por deflexão obtidas no ensaio de tração na flexão de concretos de $f_{ck} = 20$ MPa e com diferentes consumos de fibra de aço .....	21
Figura 6 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	22
Figura 7– Dimensões relativas a uma fibra: a) A-I; b) C-I; c) R – I; d) A-II; e) C-II; f) R-II; g) C-III .....	24
Figura 8– Microfibras poliméricas (a) fibriladas e (b) monofilamentos .....	25
Figura 9– Fibras de polipropileno .....	25
Figura 10 – Fluxograma metodologia experimental.....	26
Figura 11 – Curva da distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	28
Figura 12 – Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	29
Figura 13 – Fibra de aço .....	30
Figura 14 - Fibra Polipropileno modificado .....	30
Figura 15 – Fibra de Polietileno .....	31
Figura 16 – Resultados de massa específica seca, saturada e real ( $g/cm^3$ ) das amostras de concreto aos 28 dias.....	41

Figura 17 - Resultados da absorção de água e índice de vazios das amostras de concreto aos 28 dias.....	42
Figura 18 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) das amostras de concreto aos 28 dias.....	43
Figura 19– Resultados resistência à compressão axial (MPa) das amostras de concreto aos 7 e 28 dias.....	44
Figura 20 – Resultados resistência à tração na flexão (MPa) das amostras em concreto aos 28 dias.....	45
Figura 21 – Seção transversal F1 – PP $4 \text{ kg}/\text{m}^3$ .....	46
Figura 22 – Seção transversal F2 – PP $6 \text{ kg}/\text{m}^3$ .....	47
Figura 23 – Seção transversal F3 – PE $4,98 \text{ kg}/\text{m}^3$ .....	47
Figura 24 – Seção transversal F4 – PE $7,47 \text{ kg}/\text{m}^3$ .....	48
Figura 25 – Seção transversal F5 – Aço $40 \text{ kg}/\text{m}^3$ .....	48
Figura 26 – Seção transversal F6 – Aço $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ .....	49



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes.....	17
Tabela 2 – Tipos e classes de fibras de aço produzidas especificamente para uso em concreto. ....	23
Tabela 3 – Propriedades do cimento CP II-Z 40 .....	27
Tabela 4 – Propriedades físicas brita 0 .....	28
Tabela 5 – Características físicas do agregado miúdo.....	29
Tabela 6 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de aço .....	30
Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de Polipropileno modificado .....	31
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de Polietileno .....	31
Tabela 9 – Parâmetros para a dosagem do traço referência .....	32
Tabela 10 - Teor de argamassa ( $\alpha$ ) .....	33
Tabela 11 – Relação água/materiais secos (H).....	33
Tabela 12 – Formulações com adição de fibras .....	36
Tabela 13- Ensaio realizados e respectivas normas técnicas .....	37
Tabela 14 – Resultados ensaio abatimento do tronco de cone ( <i>Slump test</i> ).....	39



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP II Z 40 – Cimento Portland Classe 2 com adição de Pozolana (40 MPa)

CRF – Concreto Reforçado com Fibras

CRFA – Concreto Reforçado com Fibras de Aço

CRFS – Concreto Reforçado com Fibras Sintéticas

NBR – Norma Brasileira

REF – Referência

PE – Polietileno

PP – Polipropileno

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS .....	15
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS .....	16
2.2. FIBRAS .....	17
2.3. FIBRAS DE AÇO .....	23
2.4. FIBRAS POLIMÉRICAS .....	24
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
3.1. MATERIAIS .....	26
<b>3.1.1 Água</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1.2. Cimento</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1.3. Agregado graúdo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1.4. Agregado miúdo</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1.5. Fibra de aço</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1.6. Fibras poliméricas</b> .....	<b>30</b>
3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	32
<b>3.2.1. Dosagem do concreto</b> .....	<b>32</b>
<u>3.2.1.1. Traço de referência</u> .....	<u>32</u>
<u>3.2.2.2. Traços com adição de fibras</u> .....	<u>35</u>
<b>3.2.2. Produção dos corpos de prova</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.3. Ensaio realizados</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.4. Ensaio no Estado Fresco – Abatimento do tronco de cone</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.5. Ensaio no Estado Endurecido</b> .....	<b>37</b>
<u>3.2.5.1. Propriedades Físicas</u> .....	<u>37</u>
<u>3.2.5.2. Resistência à compressão axial</u> .....	<u>38</u>
<u>3.2.5.3. Resistência à tração na flexão</u> .....	<u>38</u>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>39</b>
4.1. ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	39
<b>4.1.1. Ensaio de Abatimento do tronco de cone (<i>Slump test</i>)</b> .....	<b>39</b>



4.2. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ENDURECIDO .....	40
4.2.1. Ensaio de Propriedades Físicas.....	40
4.2.2. Ensaio de Resistência à Compressão Axial .....	44
4.2.3. Ensaio de Resistência à Tração na Flexão.....	45
5. CONCLUSÃO.....	51
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de engenharia mais utilizado no mundo por três razões principais, segundo Mehta e Monteiro (2014), sendo a excelente resistência do concreto à água, a facilidade com a qual é possível moldar elementos estruturais das mais variadas formas e tamanhos, e o baixo custo de produção do concreto. Entretanto, o concreto é um material frágil, e assim possui baixa capacidade de deformação. Ainda com relação ao comportamento do material, na tração, sua resistência é cerca de 10% da resistência à compressão. De acordo com Figueiredo (2011), o uso de fibras como reforço para o concreto é uma alternativa técnica usada para melhorar o comportamento do material frente a essas limitações.

A adição de fibras em materiais frágeis não é atual, Carnio (2017) cita que os romanos e egípcios já utilizavam fibras naturais para reforço de pastas de argila. No entanto, segundo Carnio (2017) só a partir da segunda metade do século XX é que o concreto reforçado com fibras (CRF) passou a ser utilizado em aplicações com importância na construção civil. Segundo Mehta e Monteiro (2014), o primeiro uso das fibras para reforço estrutural no concreto ocorreu em 1971, para a produção de painéis desmontáveis de 3250 mm<sup>2</sup> e 65 mm de espessura para um estacionamento no Aeroporto Heathrow, em Londres. Desde então o CRF tem sido utilizado em diversas aplicações, como pisos industriais, pavimentos, revestimentos de túneis, elementos pré-fabricados em geral, proteção de encostas, concreto projetado, dentre outros.

No Brasil, de acordo com Carnio (2017), o CRF tem sido utilizado na área dos pisos industriais desde meados de 1995, com a construção do Centro de Distribuição das Casas Bahia em Jundiaí, na qual foram feitos 135 mil m<sup>2</sup> de piso com o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), sendo essa obra um importante marco para o uso de CRFA no país. Desde então, outras obras com o uso de CRF em pisos foram realizadas, a exemplo dos aeroportos de Viracopos (São Paulo) e Galeão (Rio de Janeiro). As fibras sintéticas também têm sido utilizadas no país como material estrutural, o chamado concreto reforçado com fibras sintéticas (CRFS). Carnio (2017) afirma por serem constituídas por polímeros, as fibras sintéticas não sofrem corrosão e apresentam maior durabilidade no meio alcalino, sendo essas características bastante importantes, pois proporcionam maior durabilidade à vida útil da estrutura, visto que a maioria das construções estão sujeitas à degradação pela exposição ao ambiente. Mehta e Monteiro (2014) destacam que independente do tipo de fibra, a adição

destas ao concreto reduz a trabalhabilidade, sendo esta redução proporcional ao volume de fibras adicionado.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do uso individual das fibras de aço e de macrofibras poliméricas nas propriedades do concreto no estado fresco, nomeadamente, o ensaio de fluidez (abatimento do tronco de cone – *slump test*) e endurecido. Dentre as propriedades no estado endurecido, as propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) e propriedades físicas (porosidade, densidade e absorção de água) serão avaliadas até os 28 dias de cura.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar a influência de fibras de aço e de macrofibras poliméricas no concreto.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Investigar o impacto da adição de fibras de aço e poliméricas (polipropileno modificado e polietileno) no concreto fresco e endurecido até os 28 dias de cura;
- Avaliar o comportamento mecânico do concreto (compressão para 7 e 28 dias e tração na flexão para 28 dias);
- Analisar o impacto da adição de fibras de aço e poliméricas (polipropileno modificado e polietileno) nas propriedades físicas de: massa específica real, massa específica superfície saturada, massa específica superfície seca, absorção de água, índice de vazios e absorção de água por capilaridade ( aos 28 dias).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados temas e definições correlatos ao tema estudado. A fundamentação teórica está dividida em tópicos relacionados ao concreto com fibras e aos tipos de fibras disponíveis atualmente. Com relação ao concreto com fibras, serão abordadas as principais propriedades das fibras que influenciam na resistência do concreto, como volume de adição, comprimento crítico, características físicas e mecânicas das fibras. Com relação às fibras, serão apresentados os tipos de fibras existentes no mercado, suas características físicas e mecânicas.

### 2.1. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

A adição de fibras ao concreto causa modificações nas propriedades mecânicas do material. A capacidade de absorção de energia (tenacidade), a ductilidade, o controle de fissuração e a resistência às ações dinâmicas e de impacto são algumas das propriedades beneficiadas (CARNIO, 2017).

A resistência à tração do concreto é uma propriedade importante que é influenciada pela adição de fibras. Figueiredo (2011) afirma que a baixa capacidade de resistência à tração do concreto pode ser associada com a dificuldade que este possui em interromper a propagação das fissuras quanto é submetido a este tipo de esforço.

Desse modo, Neville e Brooks (2010) afirmam que a adição de fibras no concreto tem como objetivo aumentar a resistência à tração por meio da diminuição da abertura de fissuras, pois as fibras transmitem a tensão através da fissura, possibilitando assim maiores deformações quando comparada à matriz sem fibras, além de proporcionar maiores valores de tenacidade à flexão ao material.

Outra característica importante e relacionada à adição de fibras é a maior durabilidade do concreto. Os concretos contendo fibras de aço possuem em geral maiores teores de cimento e baixa relação água/cimento, quando bem compactado e bem curado, melhorando a durabilidade, desde que as fibras permaneçam envolvidas pela pasta de cimento (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

## 2.2. FIBRAS

De acordo com Bentur e Mindess (1990) fibras são elementos descontínuos que podem ser produzidos em diferentes materiais, podendo ser de materiais naturais (celulose, amianto, fibra de madeira, sisal), sintéticos (polipropileno, acrílico, polietileno) aço ou vidro, como demonstrado na Tabela 1, onde temos os valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para alguns tipos de fibras.

Tabela 1– Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190 - 210	0,5 - 2	0,5 - 3,5
Vidro	9-15	2,60	70 - 80	2 - 4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,4	2,60	160 - 200	3 - 3,5	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	1 - 7,7	0,5 - 0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,6	2,1 - 4,0
Carbono	9	1,90	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,10	4,0	0,9	13 - 15
Celulose	-	1,20	10	0,3 - 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	7,00E-04	10
Fibra de madeira	-	1,50	71	0,9	-
Sisal	10 - 50	1 - 50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,50	10 - 45	3,7	0,02

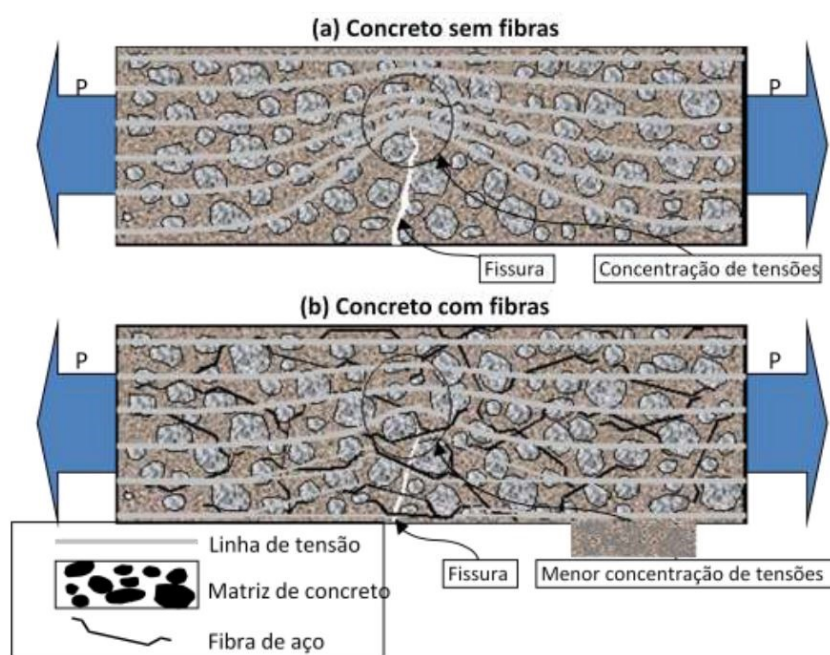
Fonte: Bentur e Mindess (1990, p.2).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o concreto apresenta falha frágil no momento em que a deformação correspondente à tensão última de tração na flexão é superada e que o concreto reforçado com fibras suporta cargas e deformações superiores, pois o elemento reforçado com fibras não rompe após a primeira fissura, como ocorre com o concreto convencional.

Além disso, Figueiredo (2011) afirma que a adição de fibras reduz a velocidade de propagação de fissuras no material e que este passa a comportar-se de maneira pseudo-dúcil.

Na Figura 1 está representado o comportamento das fibras como pontes de transferência de tensões na matriz de concreto.

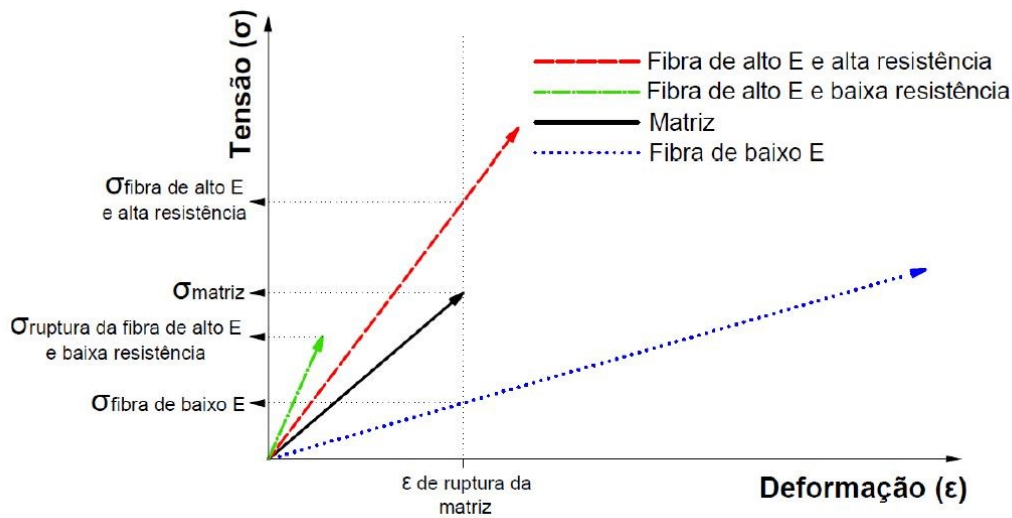
Figura 1– Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b)



Fonte: Figueiredo (2000, p.14).

O material constituinte da fibra definirá o módulo de elasticidade e a resistência mecânica da mesma, propriedades que mais influenciam a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto segundo (FIGUEIREDO, 2011). Na Figura 2 é apresentado um gráfico comparando o comportamento tensão vs deformação de uma matriz reforçada com três tipos de fibras, sendo duas de alto módulo de elasticidade, com alta e baixa resistência mecânica, e uma com baixo módulo de elasticidade.

Figura 2 – Diagrama tensão x deformação de uma matriz de concreto e de fibras com diferentes propriedades mecânicas

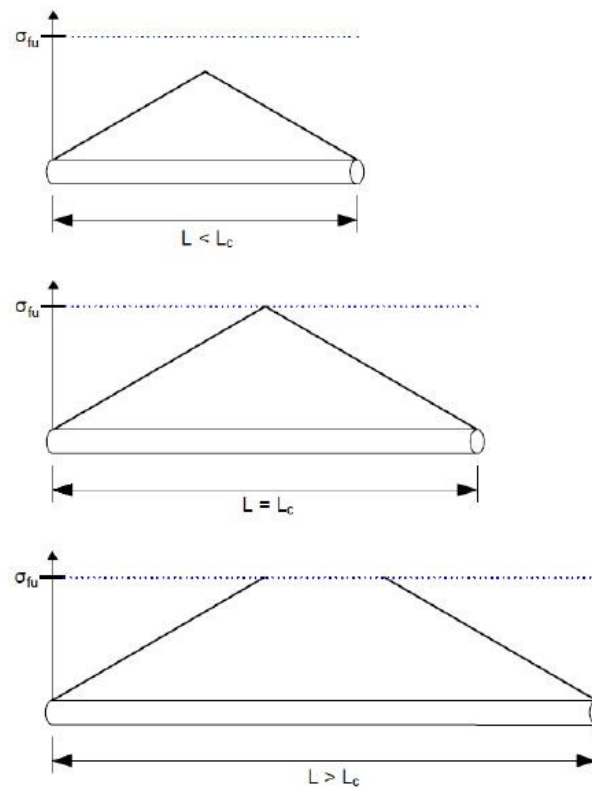


Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011, p.16).

Analisando a Figura 2 nota-se que a fibra de baixo módulo possui maior deformação que a matriz quando solicitadas ao mesmo nível de tensão. Esse comportamento acarreta numa grande abertura de fissura na matriz. Desse modo, fibras com baixo módulo apresentam baixa capacidade de reforço pós-fissuração. Já a fibra de alto módulo e alta resistência deforma menos que a matriz, em tensões de solicitação mais baixas. De acordo com Figueiredo (2011), para que possam ser consideradas com reforço das matrizes cimentícias as fibras que possuem capacidade de deformação na ruptura e resistência à tração superior às da matriz de concreto. Assim, a fibra com alto módulo e alta resistência seria ideal.

Outro fator que afeta a existência da matriz é o comprimento da fibra, que pode ser superior ou inferior ao comprimento crítico. De acordo com Bentur e Mindess (1990) o comprimento crítico é o mínimo comprimento necessário para que a tensão atuante na fibra torne-se igual à tensão última de resistência da fibra. Na Figura 3 são representadas as três situações relativas à distribuição de tensão na fibra em relação ao  $L_c$ , sendo  $L = L_c$ ,  $L > L_c$  e  $L < L_c$ , onde  $L$  é o comprimento da fibra.

Figura 3 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico



Fonte: adaptado de Bentur e Mindess (1990, p.78).

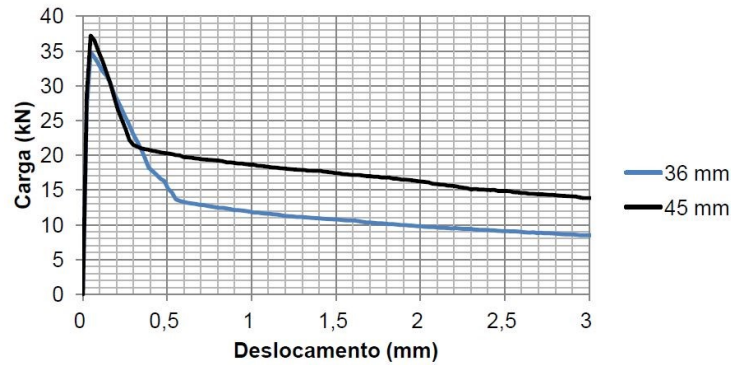
Segundo Neville e Brooks (2010), para o caso em que a fibra possui comprimento inferior ao comprimento crítico, ela será arrancada da matriz por falha na ancoragem, e no caso em que o comprimento é superior ao crítico ocorrerá a ruptura da fibra.

Além do comprimento crítico, outro fator que exerce influência na resistência pós-fissuração ao concreto é o fator de forma da fibra. O fator de forma é a relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra. Segundo Figueiredo (2011), fibras com maiores fatores de forma proporcionam maior capacidade de resistência pós-fissuração ao concreto, desde que não ultrapassem o comprimento crítico da fibra.

Na Figura 4 pode-se comparar o valor de resistência pós-fissuração de duas fibras com a mesma seção transversal, porém com comprimentos diferentes. Desse modo, a fibra que possui maior comprimento tem o maior fator de forma.



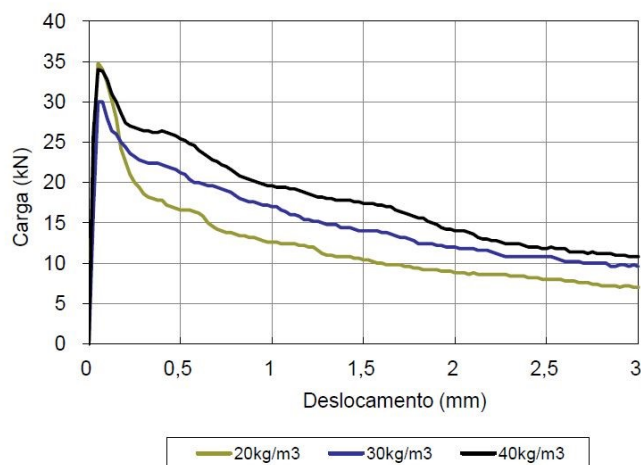
Figura 4– Curvas médias de carga por deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão de concreto de  $f_{ck} = 30$  MPa reforçados com uma fibra de 36 mm e outra de 45 mm de comprimento e mesma seção transversal



Fonte: Figueiredo, Ceccato e Torneri (1997) apud Figueiredo (2011, p.42).

A resistência da matriz também depende do volume de fibras utilizadas. Como as fibras atuam como ponte de transferência de tensões entre as fissuras do concreto, quanto maior o volume de fibras, maior a quantidade de pontes que estas formarão com a matriz, aumentando a capacidade de reforço pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011). Na Figura 5 é possível observar que com o aumento do consumo de fibras resulta no aumento da carga resistida após a fissuração da matriz.

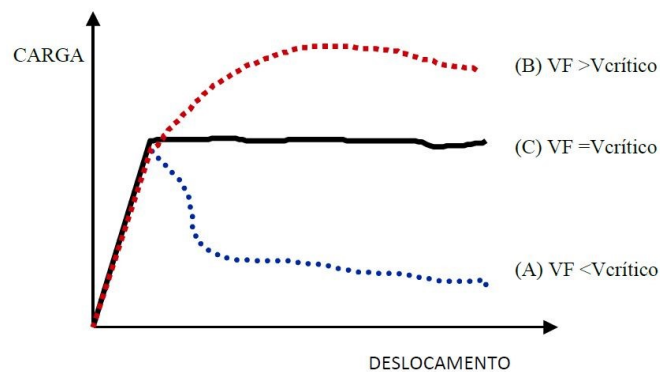
Figura 5– Curvas médias de carga por deflexão obtidas no ensaio de tração na flexão de concretos de  $f_{ck} = 20$ MPa e com diferentes consumos de fibra de aço



Fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000) apud Figueiredo (2011, p.33)

Entretanto, Figueiredo (2000) afirma que há um volume crítico que corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Assim, para teores de fibra abaixo do volume crítico após a ruptura da matriz, há uma queda na capacidade de carga que o material suporta, e para teores acima do volume crítico, mesmo após a ruptura da matriz, o material continua aceitando níveis crescentes de carregamento. Esse comportamento é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão



Fonte: Figueiredo (2000, p.15).

Para dosagens com baixa e moderada concentração de fibras, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a principal contribuição do reforço da fibra no concreto não está relacionada ao aumento da resistência à tração, mas sim ao aumento da tenacidade à flexão do material.

A adição das fibras provoca uma diminuição da trabalhabilidade da mistura cimentícia. Alguns dos fatores que influenciam nesse processo são: o material que compõem a fibra, o volume de fibra adicionado, a geometria da fibra e sua resistência mecânica. Bentur e Mindess (1990) afirmam que aumentos sucessivos no fator de forma da fibra acarretam em maior redução da trabalhabilidade na mistura. Figueiredo (2011) afirma que com a adição de fibras, ocorre um aumento da área superficial, o que acarreta em maior consumo de água para molhagem, gerando aumento da coesão e perda da trabalhabilidade do material no estado fresco. Figueiredo (2011) ainda cita que a propriedade com maior influência na trabalhabilidade é a dimensão e a rigidez da fibra, visto que fibras mais rígidas proporcionam maior dificuldade à mobilidade dos agregados. Bentur e Mindess (1990) citam que o uso da vibração para o adensamento da mistura com fibras produz bons resultados, pois durante a

vibração o efeito de rigidez proporcionado pelas fibras desaparece, e a mistura pode ser trabalhada do mesmo modo que uma mistura sem fibras nos termos de mobilidade e habilidade para fluir.

### 2.3. FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço são normalizadas no Brasil pela NBR 15530 – Fibras de aço para concreto - Especificação, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2007a), que classifica as fibras de aço de acordo com: a conformação da fibra – tipo (A): com ancoragem nas extremidades; tipo (C): corrugada e tipo (R): reta; e quanto ao processo de produção – classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio; classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio e classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado. Na Tabela 2 estão presentes os requisitos para as fibras de aço para uso em concreto e na Figura 7 são apresentados exemplos da classificação das fibras.

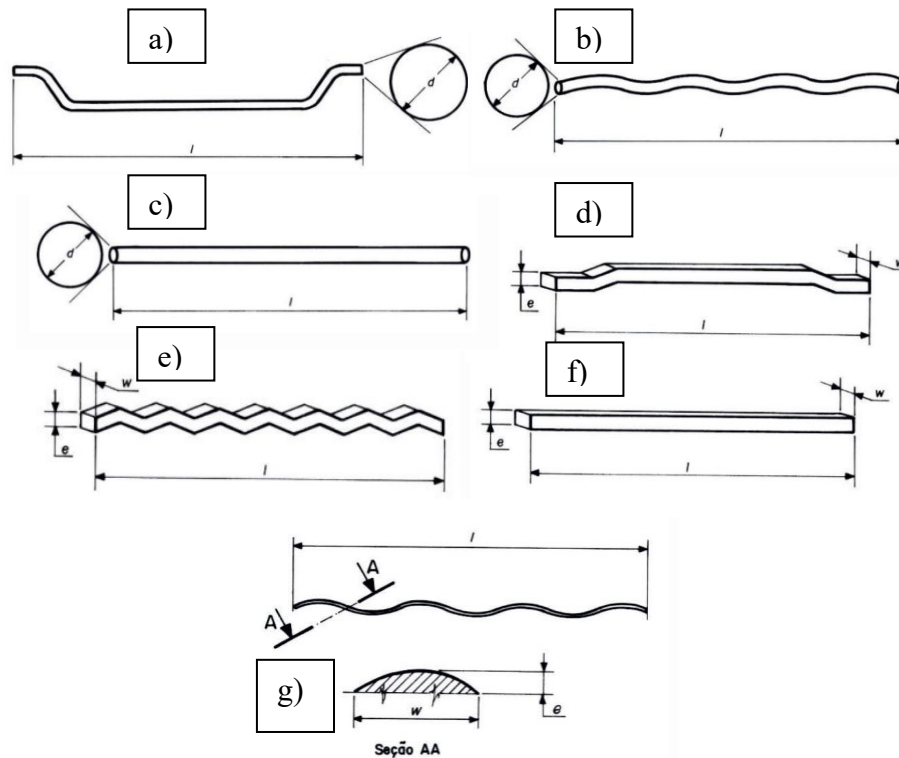
Tabela 2 – Tipos e classes de fibras de aço produzidas especificamente para uso em concreto.

<b>Tipo (geometria)</b>	<b>Classe da fibra</b>	<b>Fator de forma mínimo <math>\lambda</math></b>	<b>Limite de resistência à tração do aço <math>f_u</math> MPa*</b>
A	I	40	1000
	II	30	500
C	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

\* Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

Fonte: ABNT (2007a).

Figura 7– Dimensões relativas a uma fibra: a) A-I; b) C-I; c) R – I; d) A-II; e) C-II; f) R-II; g) C-III

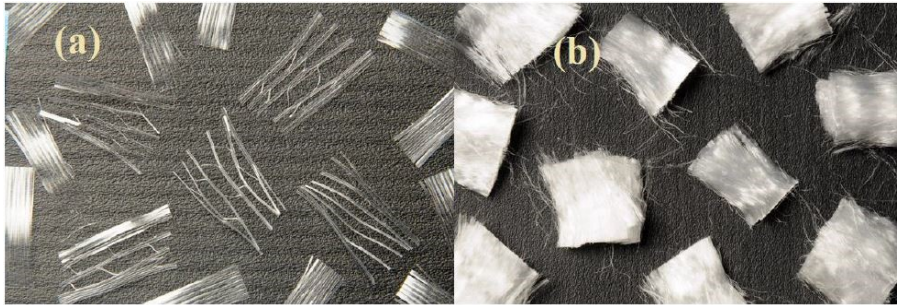


Fonte: ABNT (2007a).

## 2.4. FIBRAS POLIMÉRICAS

As fibras poliméricas, como as de polipropileno ou polietileno por exemplo, tem sido bastante utilizadas como reforço para concreto, pois como citam Bentur e Mindess (1990), estas fibras proporcionam melhores resultados para a capacidade de deformação, resistência ao impacto e controle de fissuração para matrizes de concreto. Medeiros (2012) afirma que as fibras poliméricas são divididas em microfibras (utilizadas para reduzir a fissuração e exsudação do concreto, não possuindo função estrutural) e as macrofibras (atuam como reforço estrutural). As microfibras são fornecidas de duas formas: fibriladas e monofilamento, conforme Figura 8. Na Figura 9 há um exemplo de macrofibra polimérica disponível no mercado.

Figura 8– Microfibras poliméricas (a) fibriladas e (b) monofilamentos



Fonte: ABC Polymer (2019).

Figura 9– Fibras de polipropileno

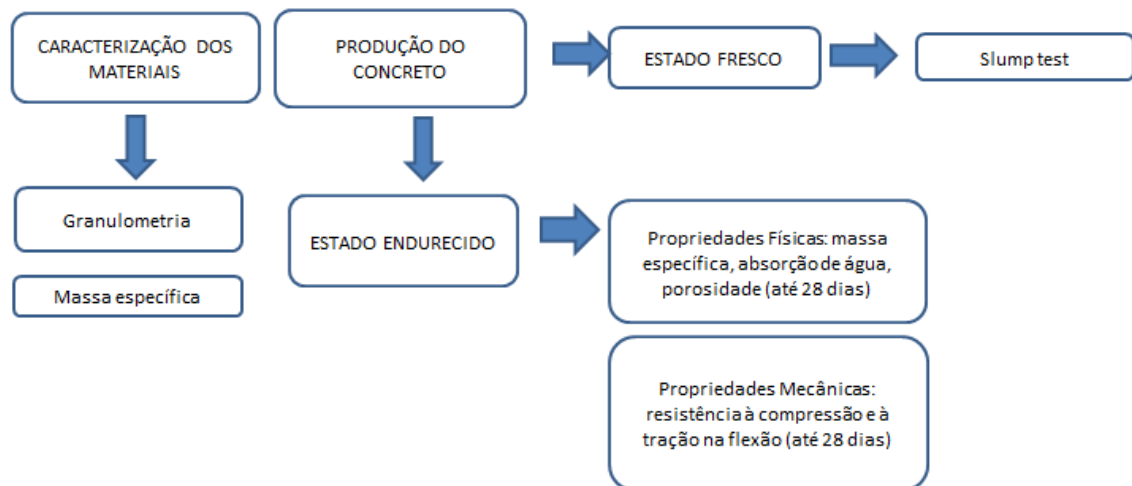


Fonte: TEC MACHINE – Fibra para concreto (2019).

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e a metodologia adotada no desenvolvimento experimental do trabalho. A Figura 10 apresenta o fluxograma da metodologia experimental.

Figura 10 – Fluxograma metodologia experimental



Fonte: Autor (2020).

#### 3.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados foram: água, cimento CP II-Z 40, brita, areia, fibra de aço, fibra de polipropileno e fibra de polietileno.

##### 3.1.1 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Joinville/SC.

##### 3.1.2 Cimento

O cimento utilizado no trabalho é o cimento CP II-Z 40, com adição de material pozolânico. Na Tabela 3 são apresentadas as características físicas do cimento utilizado.

Tabela 3 – Propriedades do cimento CP II-Z 40

<b>Designação normalizada</b>	<b>Sigla</b>	<b>Classe de resistência</b>	<b>Sufixo</b>	<b>Clínquer + Sulfatos de Cálcio</b>	<b>Escória Granulada de Alto Forno</b>	<b>Material Pozolânico</b>	<b>Material carbonático</b>
Cimento Portland Composto com Material Pozolânico	CP II-Z	40	RS ou BC	71-94	0	6-14	0-15

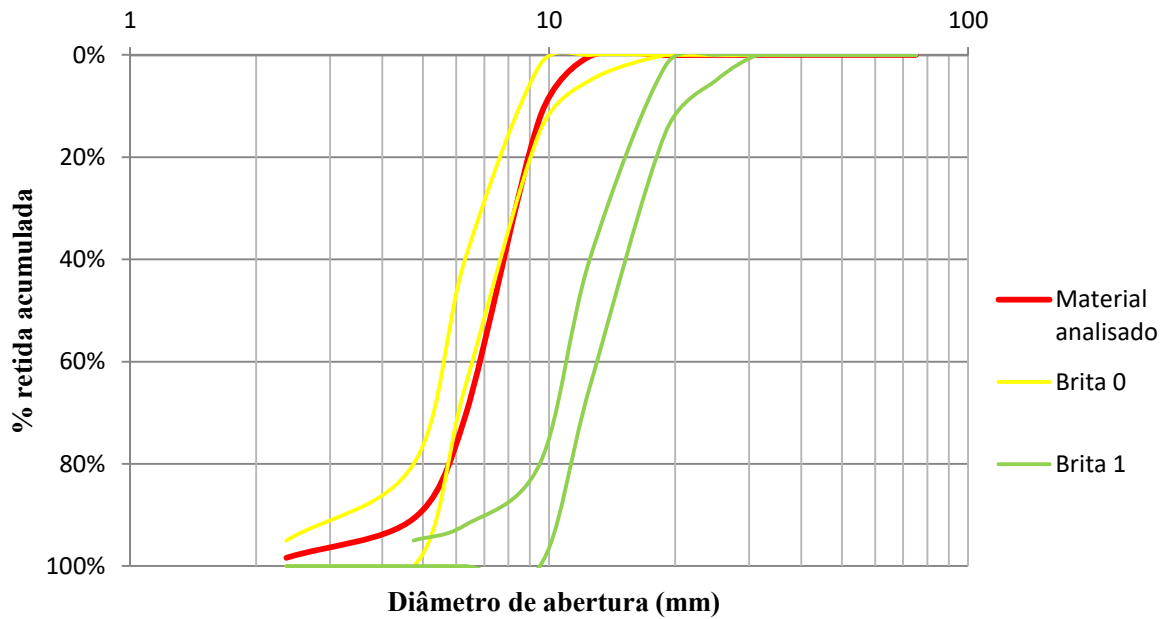
Fonte: Adaptado da NBR 16697 da ABNT (2018).

### 3.1.3. Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado uma brita granítica obtida na região de Joinville/SC. O material foi caracterizado por meio dos ensaios de granulometria e de massa específica.

O ensaio de granulometria foi realizado seguindo a norma NBR NM 248:2009, utilizando um peneirador vibratório e peneiras com abertura de 25,4 mm a 2,36 mm. Com os dados obtidos foi possível gerar a curva granulométrica do material. Comparando a curva obtida com os limites apresentados pela norma, nota-se que o material é classificado como brita 0.

Figura 11 – Curva da distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 4 estão as características físicas da brita 0, obtidas por meio do ensaio de granulometria e massa específica, obtida pela NBR NM 52: 2009.

Tabela 4 – Propriedades físicas brita 0

Material	Massa específica brita	Diâmetro máximo
Brita 0	2,94 g/cm <sup>3</sup>	12,5

Fonte: Autor (2019).

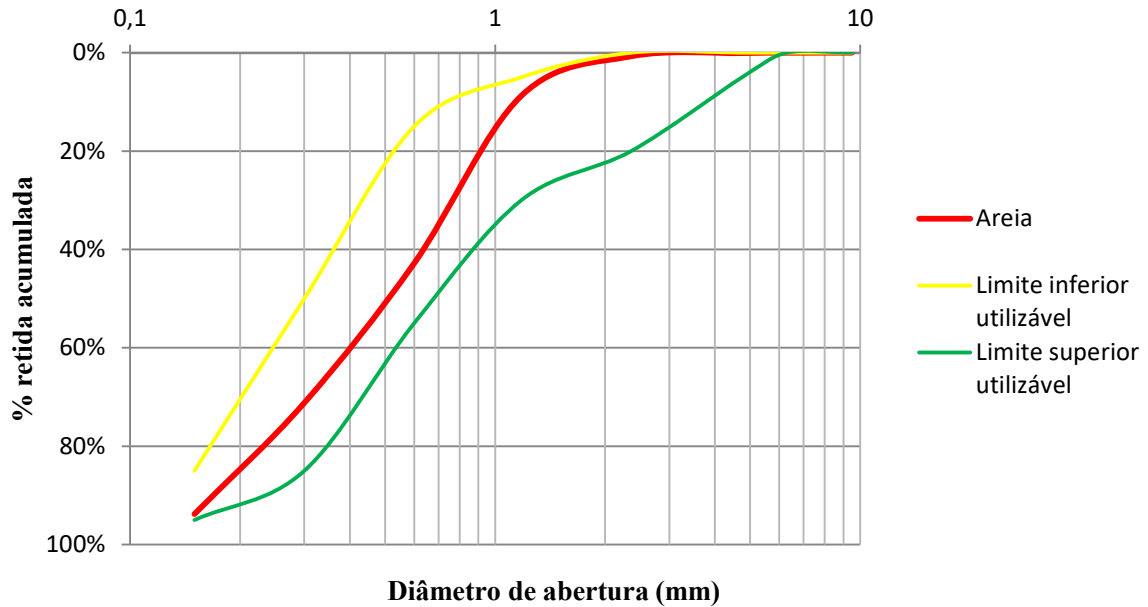
### 3.1.4. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia fina de origem natural (leito de rio) da região de Joinville/SC. Os ensaios de granulometria e de massa específica foram usados para a caracterização do material.

Para o ensaio granulométrico foram utilizadas peneiras com abertura de 6,3mm a 0,15 mm e um peneirador vibratório. Com base nos dados obtidos, foi possível plotar a curva da distribuição granulométrica da areia analisada, conforme Figura 12.



Figura 12 – Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo



Foram também obtidos o módulo de finura e o diâmetro máximo característico do agregado a partir do ensaio granulométrico. A massa específica foi obtida segundo a NBR NM 52: 2009.

Tabela 5 – Características físicas do agregado miúdo

Material	Massa específica areia seca	Diâmetro máximo	Módulo de finura
Areia fina	2,42 g/cm <sup>3</sup>	2,36 mm	2,17

Fonte: Autor (2019).

### 3.1.5. Fibra de aço

As fibras de aço utilizadas são produzidas com aço carbono ASTM A 820 e classificadas como fibras tipo C-III de acordo com a NBR 15530:2007a. A Tabela 6 apresenta as propriedades físicas e mecânicas da fibra.

Figura 13 – Fibra de aço



Fonte: Autor (2019).

Tabela 6 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de aço

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	7,85
Comprimento (mm)	40
Fator de forma	40
Módulo de Elasticidade (GPa)	Não fornecido
Resistência à tração (MPa)	800

Fonte: Fabricante (2019).

### 3.1.6. Fibras poliméricas

As macrofibras utilizadas foram Polipropileno modificado (PP) e de Polietileno (PE).

Figura 14 - Fibra Polipropileno modificado



Fonte: Autor (2019).

Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de Polipropileno modificado

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	0,90 - 0,92
Comprimento (mm)	58
Fator de forma	Não fornecido
Módulo de Elasticidade (GPa)	> 10
Resistência à tração (MPa)	> 640

Fonte: Fabricante (2019).

Figura 15 – Fibra de Polietileno



Fonte: Autor (2019).

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de Polietileno

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,12
Comprimento (mm)	45
Fator de forma	50
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,85 – 1,2
Resistência à tração (MPa)	350

Fonte: Fabricante (2019).

## 3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.2.1. Dosagem do concreto

#### 3.2.1.1. Traço de referência

O traço de referência, denominado REF, foi dosado segundo o método Cientec, proposto por Recena (2017). Os parâmetros definidos para a dosagem do traço de referência estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros para a dosagem do traço referência

Resistência característica à compressão do concreto (fck)	40 MPa
Areia	Fina
Brita	0
Cimento	CP II Z 40
<i>Slump</i> desejado (mm)	100

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a classificação da brita e o tipo de cimento utilizado, os valores do teor de argamassa ( $\alpha$ ) e da relação água/materiais secos (H) podem ser obtidos na Tabela 10 e Tabela 11, de acordo com Recena (2017).

Tabela 10 - Teor de argamassa ( $\alpha$ )

Natureza da rocha	Classificação da brita	Teor de argamassa $\alpha$ (%)
Granítica	0	60
	1	53
	2	51
	3	49
Basáltica	0	60
	1	55
	2	53
	3	51

Fonte: Recena (2017, p. 43).

Tabela 11 – Relação água/materiais secos (H)

Tipo de cimento	Classificação da brita	H (%)
Pozolânico (CPIV)	0	10,50
	1	9,80
	2	9,60
	3	9,40
Comum (CPI e CPII) e de alta resistência inicial (CPV)	0	10,20
	1	9,60
	2	9,40
	3	9,20

Fonte: Recena (2017, p. 45).

Assim, é possível calcular a relação água cimento ( $a/c$ ) por meio da Equação 1:

$$a/c = \frac{2,15 - \log(fck)}{1,27} = \frac{2,15 - \log(40)}{1,27} = 0,431 \quad (1)$$

A quantidade de materiais secos a ser utilizada foi obtida pela Equação 2:

$$m = \frac{100 \times a/c}{H} = \frac{100 \times 0,431}{10,20} = 4,23 \quad (2)$$

Onde:

m – quantidade de materiais secos

O teor de cimento é obtido pela equação Equação 3:

$$\text{Cimento (\%)} = \frac{100}{m} = \frac{100}{4,23} = 23,64\% \quad (3)$$

O teor de areia é obtido pela Equação 4:

$$\text{Areia (\%)} = \alpha(\%) - \text{Cimento (\%)} = 60 - 23,64 = 36,36 \% \quad (4)$$

O teor de brita é obtido pela Equação 5:

$$\text{Brita (\%)} = \text{Total materiais secos (100\%)} - \alpha(\%) = 100 - 60 = 40 \% \quad (5)$$

O traço unitário de areia e brita é obtido por meio da Equação 6 e Equação 7, respectivamente:

$$a = \frac{\% \text{ Areia}}{\% \text{ Cimento}} = \frac{36,36}{23,64} = 1,54 \quad (6)$$

$$b = \frac{\% \text{ Brita}}{\% \text{ Cimento}} = \frac{40}{23,64} = 1,69 \quad (7)$$

Onde:

a – quantidade de areia (kg)

b – quantidade de brita (kg)

Assim, considerando que a quantidade de cimento é unitária e que a relação água/cimento é equivalente a 0,431, conclui-se que o traço unitário em massa é: 1 : 1,54 : 1,69 : 0,431 (cimento: areia: brita: água).

O *slump* desejado para a mistura é 100 mm. Porém, ao produzir a mistura, o *slump* obtido foi de 10 mm. Para realizar a correção do traço, foi utilizado o método proposto por Recena (2017), no qual há a correção do teor de água/materiais secos (H) por meio da Equação 8:

$$H_f = H_i \times \left(\frac{S_f}{S_i}\right)^x = 10,20 \times \left(\frac{100}{10}\right)^{0,1} = 12,84 \quad (8)$$

Onde:

H<sub>f</sub> – Relação água/materiais secos corrigida

H<sub>i</sub> – Relação água/materiais secos inicial

S<sub>f</sub> – *Slump* desejado (mm)

S<sub>i</sub> – *Slump* encontrado (mm)

x – Coeficiente que depende do tipo de cimento. Neste caso, x = 0,1 (CP II Z).

Com o novo valor de H, recalculam-se os valores de m, % Cimento e % Areia por meio das fórmulas anteriormente utilizadas. Por fim, obteve-se o traço corrigido: 1 : 1,02 : 1,34 : 0,43 (cimento : areia : brita : água).

### 3.2.2.2. Traços com adição de fibras

Após a formulação do traço de referência foram adicionados diferentes teores de fibras, de acordo com a Tabela 12. A dosagem de adição para as fibras de aço, 40 kg/m<sup>3</sup> e 50 kg/m<sup>3</sup>, para a PP (PP) 4 kg/m<sup>3</sup> e 6 kg/m<sup>3</sup> e para PE (PE) 4,98 kg/m<sup>3</sup> e 7,47 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. O volume da adição para as fibras PP e PE é constante. Os teores iniciais foram definidos de acordo com as recomendações dos fabricantes e manteve-se a relação água/cimento constante para todas as formulações.

Tabela 12 – Formulações com adição de fibras

<b>Formulação</b>	<b>Fibra</b>	<b>Dosagem (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Água/Cimento</b>
REF	-	-	0,43
F1	PP	4	0,43
F2	PP	6	0,43
F3	PE	4,98	0,43
F4	PE	7,47	0,43
F5	Aço	40	0,43
F6	Aço	50	0,43

Fonte: Autor (2019).

### 3.2.2. Produção dos corpos de prova

Para a produção dos corpos de prova utilizou-se uma betoneira de 120 litros e um vibrador de mangote para o adensamento dos corpos de prova. Escolheu-se utilizar o vibrador de mangote pelo fato deste equipamento não orientar as fibras no momento do adensamento, sendo que com o uso da haste para adensamento há a orientação das fibras no momento do adensamento dos corpos de prova.

### 3.2.3. Ensaio realizados

Os ensaios realizados nas amostras produzidas seguiram as normas descritas na Tabela 13.



Tabela 13- Ensaios realizados e respectivas normas técnicas

<b>Ensaio</b>	<b>Norma Técnica</b>	<b>Nº de cps</b>	<b>Idades</b>
			Estado fresco
Abatimento do tronco de cone	NM 67	-	fresco
Massa específica	NBR 9778	3	28 dias
Porosidade	NBR 9779	3	28 dias
Absorção d'água	NBR 9778	3	28 dias
Resistência à compressão axial simples	NBR 5739	4	7 e 28 dias
Resistência à tração na flexão	NBR 12412	3	28 dias

Fonte: Autor (2019).

### 3.2.4. Ensaios no Estado Fresco – Abatimento do tronco de cone

Normalizado pela NBR NM 67: 1998, o ensaio especifica um método para a determinação da consistência do concreto fresco através da medida do seu assentamento, em laboratório ou em obra. Para a realização do ensaio foi necessário um molde tronco cônico, uma haste de adensamento, uma placa base e uma trena para medir a diferença de altura entre o molde e o corpo de prova. Esse método foi utilizado para analisar a influência da adição das fibras na trabalhabilidade do concreto.

### 3.2.5. Ensaios no Estado Endurecido

Para avaliar as propriedades mecânicas à compressão e físicas no estado endurecido foram produzidos 70 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para a resistência à tração foram produzidos 18 corpos de prova prismáticos com 150 mm de altura, 150 mm de largura e 500 mm de comprimento.

#### 3.2.5.1. Propriedades Físicas

Para a obtenção das propriedades físicas massa específica e absorção de água foram realizados os ensaios prescritos na NBR 9778:2005, e para a porosidade o ensaio prescrito na NBR 9779:2012.

### *3.2.5.2. Resistência à compressão axial*

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo a NBR 5739: 2018, na Perville. Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram para uma retífica, com o objetivo de corrigir as superfícies superior e inferior. Para este ensaio, foram produzidos corpos de prova cilíndricos de dimensão (10x20) cm.

### *3.2.5.3. Resistência à tração na flexão*

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a NBR 12412:2010, na Perville. Para a realização do ensaio foram produzidos corpos de prova prismáticos com dimensões (15x15x50) cm, dentro do estabelecido pela NBR 5738: 2015a.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões relativos às propriedades estudadas.

### 4.1. ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 4.1.1. Ensaio de Abatimento do tronco de cone (*Slump* test)

Os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone são apresentados na Tabela 14. Comparando a REF com as misturas com fibras de aço, nota-se que num primeiro momento (40 kg/m<sup>3</sup>) houve o aumento da trabalhabilidade da mistura, e na segunda dosagem (50 kg/m<sup>3</sup>) houve a diminuição da mesma. As misturas com a fibra PP apresentaram valores de *slump* similares, abaixo da referência. Já a fibra PE, apresentou *slump* inferior ao valor da referência na primeira dosagem (7,47 kg/m<sup>3</sup>), e na segunda (4,98 kg/m<sup>3</sup>) atingiu um *slump* superior ao da referência. Destaca-se que o teor de argamassa e a relação água/cimento foram as mesmas para todas as misturas, e que a alteração no *slump* das misturas foi proveniente da adição das fibras. Fatores como dosagem, volume de fibra adicionado, tipo de fibra e fator de forma são responsáveis pelo comportamento distinto das misturas estudadas.

Tabela 14 – Resultados ensaio abatimento do tronco de cone (*Slump* test)

Formulação	Fibra	Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (mm)
REF	-	0	90
F1	PP	4	70
F2	PP	6	80
F3	PE	4,98	100
F4	PE	7,47	70
F5	Aço	40	120
F6	Aço	50	80

Fonte: Autor (2020).

Com isto, nota-se que para a fibra de aço a influência no valor de *slump* não foi tão significativa, apesar das diferentes dosagens. Deve-se isso ao fato de que as fibras de aço utilizadas apresentarem o menor comprimento, menor fator de forma e maior rigidez (diminui

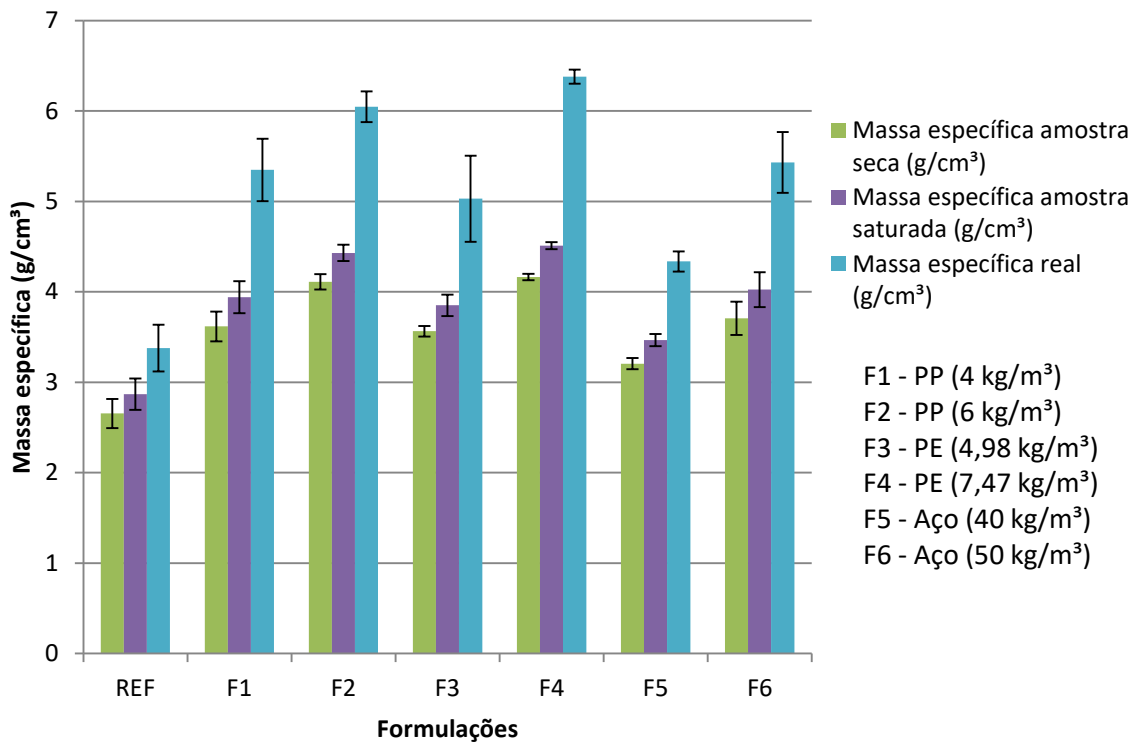
a capacidade de intertravamento) dentre as três fibras selecionadas para o trabalho. Já no caso das fibras poliméricas PE, estas são maiores que as fibras de aço, apresentando assim maior valor de fator de forma, o que explica a diminuição do valor de *slump* relacionado com o aumento do teor de fibras na mistura. Por último, a fibra PP foi a que apresentou maior influência das fibras no valor de *slump*. Esta possui um comprimento de 58 mm (superior à de aço e à polimérica PE, que possuem 40 e 50 mm, respectivamente) e conseqüentemente maior fator de forma (este dado não foi fornecido pela empresa fabricante). Ressalta-se também o formato e a rigidez das fibras, onde o primeiro está relacionado com a superfície específica e o segundo com a capacidade da fibra se entrelaçar na mistura. Dentre as fibras estudadas, a PP é a que apresenta a menor rigidez, acarretando em maior facilidade de entrelaçamento na mistura, causando assim a formação de vazios dentro da mistura. Estes vazios são preenchidos por água, diminuindo dessa forma a quantidade de água disponível para amassamento, impactando diretamente o resultado do *slump*. Além da menor rigidez, a PP possui um formato nervurado, com maior comprimento e maior fator de forma, fatores contribuintes para a redução dos valores de *slump* das misturas com esta fibra.

## 4.2. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ENDURECIDO

### 4.2.1. Ensaio de Propriedades Físicas

Na Figura 16 e Figura 17 serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de propriedades físicas como: massa específica real, massa específica da amostra seca a saturada, índice de vazios, absorção de água e por capilaridade.

Figura 16 – Resultados de massa específica seca, saturada e real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) das amostras de concreto aos 28 dias

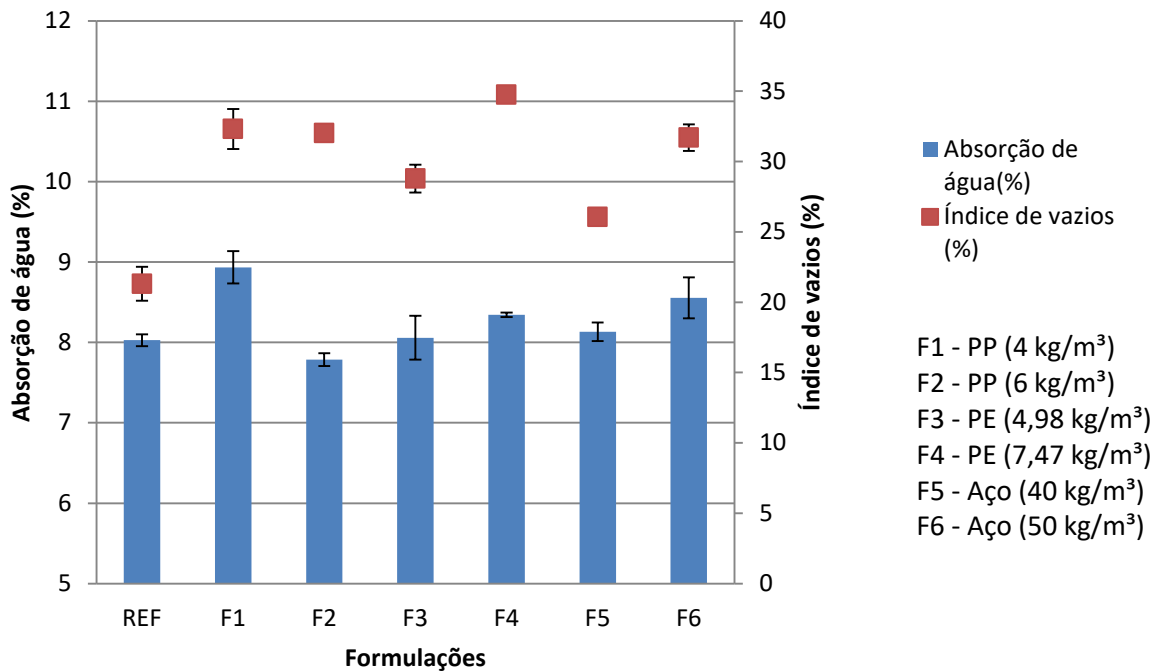


Fonte: Autor (2020).

Com base na Figura 16 nota-se que os valores de massa específica real, de amostra seca e de amostra saturada foram influenciados pela adição de fibras nas misturas, sendo que os valores aumentaram em relação à REF. Este aumento é justificado pelo fato da adição de fibras aumentarem o teor de sólidos da mistura, sendo que o volume da mistura continua constante em relação à REF. Para as formulações da fibra PP, o aumento da massa específica para amostras seca e saturada foi de 36% (F1) e 57% (F2) e o aumento para massa específica real foi de 58% (F1) e 79% (F2). Já para as fibras PE, o aumento da massa específica amostras seca e saturada foi de 35% (F3) e 57% (F4) e para massa específica real 49% (F3) e 89% (F4). Por último, a fibra de aço apresentou os seguintes resultados: aumento de 20% (F5) e 40% (F6) para amostras seca e saturada e aumento de 29% (F5) e 60% (F6) para massa específica real. Os valores apresentados indicam que a massa específica para amostras seca e

saturada e a massa específica real aumentam de acordo com o aumento do teor de dosagem das fibras na mistura.

Figura 17 - Resultados da absorção de água e índice de vazios das amostras de concreto aos 28 dias

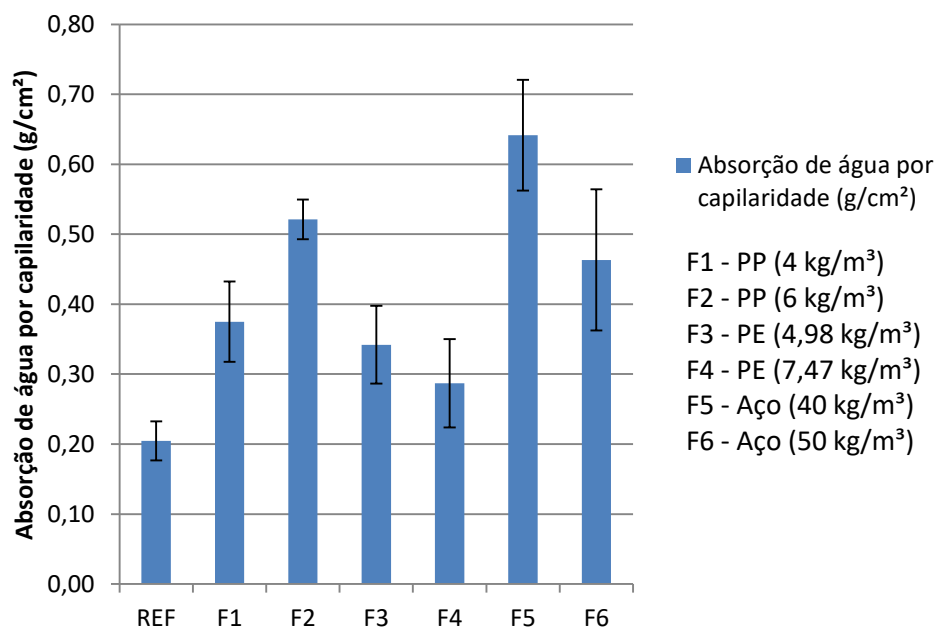


Fonte: Autor (2020).

Os resultados para o ensaio de absorção de água mostram que, para as formulações com fibras de aço, quanto maior a dosagem de fibras maior foram os resultados das absorções de água 1,31% (F5) e 6,58% (F6), acima do valor da formulação REF. Caso semelhante aconteceu com a fibra polimérica PE (F3 e F4), com valores de absorção 0,39% e 3,93% acima da REF, respectivamente. Para a fibra PP (F1 e F2) ocorre o inverso. A formulação F2 apresenta queda de 2,98% e F1 apresenta aumento de 11,30% em relação à REF. Observando os resultados de índice de vazios, nota-se que para a PP a alteração de dosagem da fibra não influenciou significativamente no valor de índice de vazios, pois as ambas as formulações (F1 e F2) apresentam aumento de aproximadamente 51% em relação à REF. Já para as formulações com as fibras de aço (F5 e F6) e as poliméricas PE (F3 e F4) o aumento da presença de fibras na mistura levou ao aumento do índice de vazios. Apesar do aumento do

número de vazios e da absorção de água, a massa específica para amostras seca e saturada e a massa específica real das formulações F3, F4, F5 e F6 não apresentou redução de seu valor, mas sim um aumento deste, conforme Figura 16. Este comportamento é diferente do esperado, pois com o aumento do volume de vazios a tendência é que haja maior absorção de água e que a massa específica do material apresente redução em seu valor.

Figura 18 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) das amostras de concreto aos 28 dias



Fonte: Autor (2020).

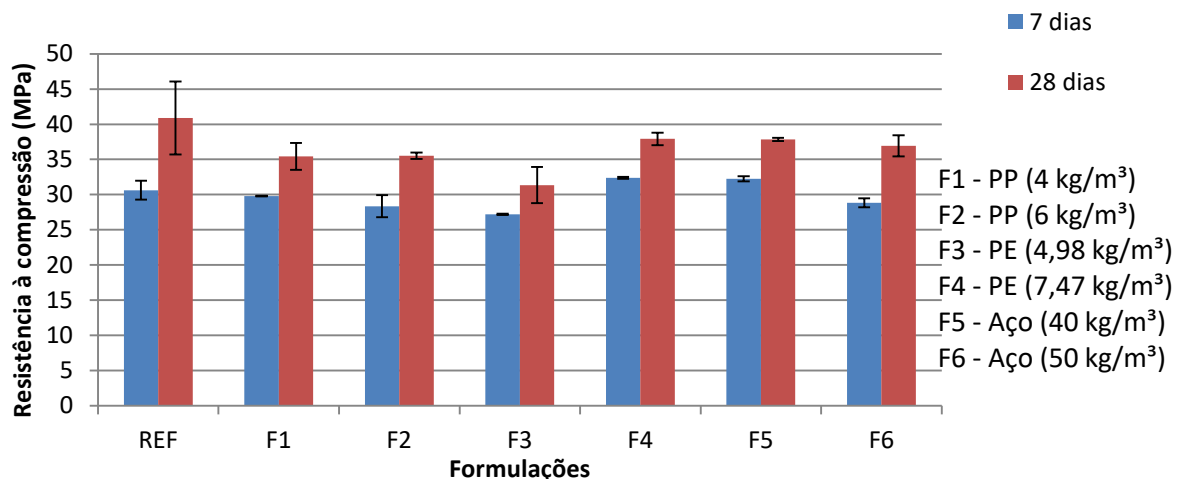
Os resultados na Figura 18 mostram que não apenas o teor de fibra na mistura exerce influência sob a absorção de água por capilaridade, como também o material da fibra e seu formato. As formulações F5 e F6 (fibras de aço) apresentaram um aumento em relação à REF de 214 e 127%. Para PP (F1 e F2) o aumento em relação à REF foi de 126 e 155%. Por último, a fibra PE teve um comportamento semelhante à de aço, com aumento de 67% e 40% para as formulações F3 e F4. Nota-se que para as fibras de aço e PE o aumento da dosagem resultou em menor absorção de água por capilaridade, pois nas misturas com maior dosagem há maior quantidade de fibras, o que diminui a quantidade de caminhos disponíveis para a água percolar pelo corpo de prova. Já a fibra PP apresentou comportamento diferente das

fibras de aço e PE, pois o aumento do teor de fibras na dosagem resultou no aumento da absorção de água por capilaridade.

#### 4.2.2. Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Os resultados de resistência à compressão das amostras são apresentados na Figura 19. Estes são a média dos resultados de quatro corpos de prova ensaiados por formulação, sendo dois corpos de prova para a idade de 7 dias e dois para a idade de 28 dias.

Figura 19– Resultados resistência à compressão axial (MPa) das amostras de concreto aos 7 e 28 dias



Fonte: Autor (2020).

Analisando os resultados a compressão nota-se que independentemente da fibra adicionada, o desempenho mecânico foi inferior à referência (REF). As misturas com desempenho aos 28 dias mais próximos da referência foram as que tinham fibras de aço (dosagem de 40 e 50 kg/m<sup>3</sup>) e a fibra PE (dosagem de 7,97 kg/m<sup>3</sup>). Estas misturas apresentaram uma redução de 7 a 9% em relação à REF. A mistura que mais foi afetada pela presença de fibras é a F6 (4,98 kg/m<sup>3</sup> da fibra polimérica PE), com redução de 23% em comparação à referência. Com a adição das fibras nas misturas, ocorre o aumento do índice de vazios nos corpos de prova, pois estas interferem na mobilidade dos agregados na mistura.

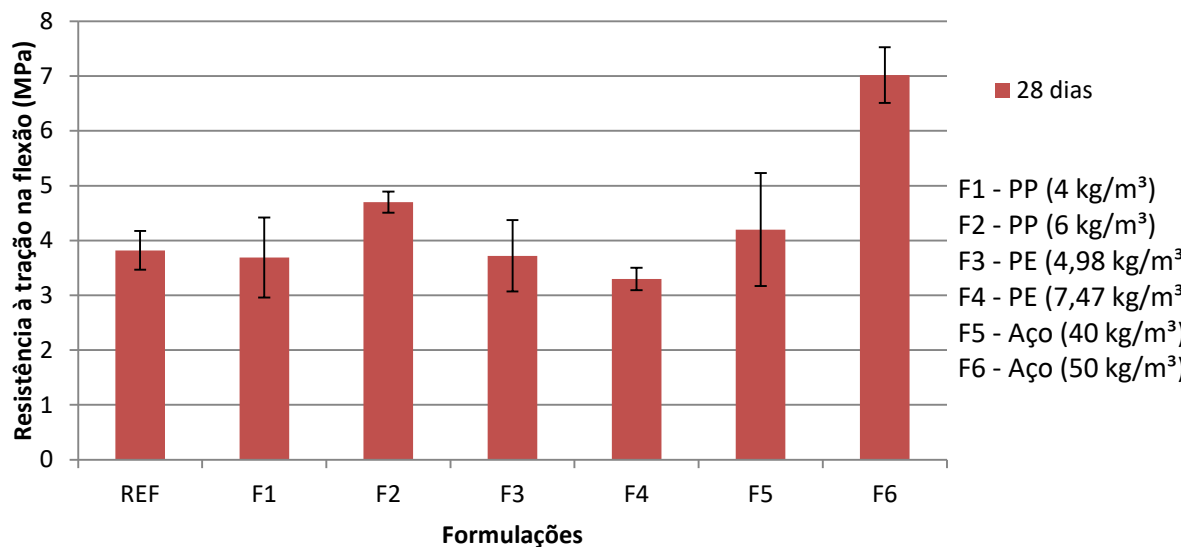


Esse aumento é comprovado na Figura 17, onde nota-se que todas as formulações com fibras apresentaram o valor de índice de vazios superior à REF. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que quando o ar é incorporado na mistura, seja devido ao processo inadequado de compactação ou ao uso de incorporadores de ar, estes vazios de ar incorporados aumentam a porosidade e diminuem a resistência do sistema.

#### 4.2.3. Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão são apresentados na Figura 20:

Figura 20 – Resultados resistência à tração na flexão (MPa) das amostras em concreto aos 28 dias



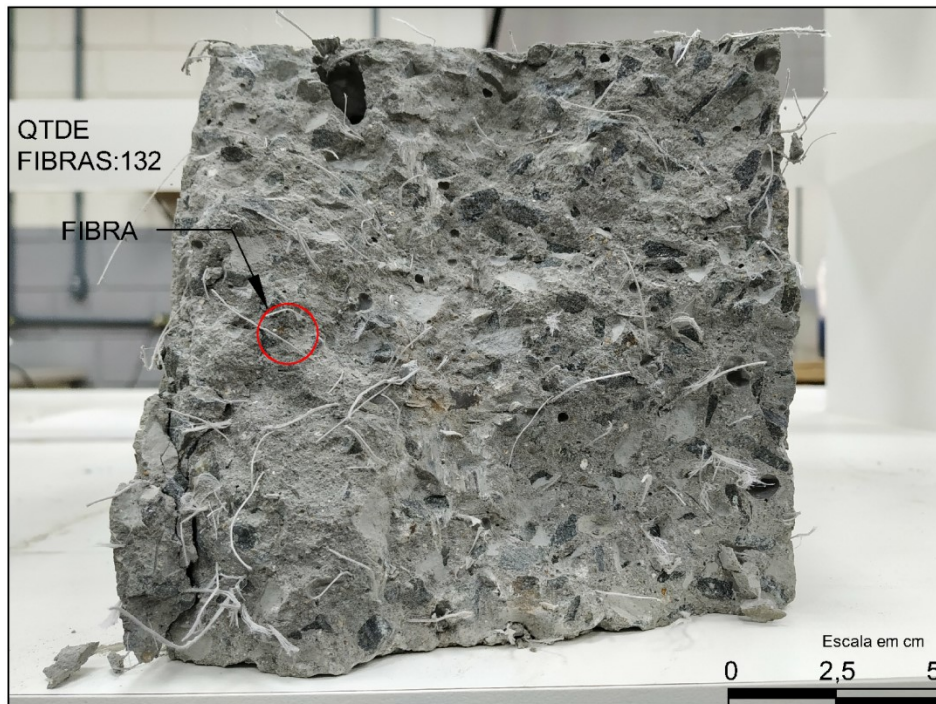
Fonte: Autor (2020).

Os resultados das formulações F2, F5 e F6 (6 kg/m<sup>3</sup> PP, 40 kg/m<sup>3</sup> aço e 50 kg/m<sup>3</sup> aço) foram superiores a REF cujos aumentos foram 23%, 10% e 84%, respectivamente. A fibra de aço obteve melhor desempenho pelo fato de apresentar maior resistência à tração (800 MPa), proporcionado assim que ela suporte maiores tensões quando comparada com as fibras PP e

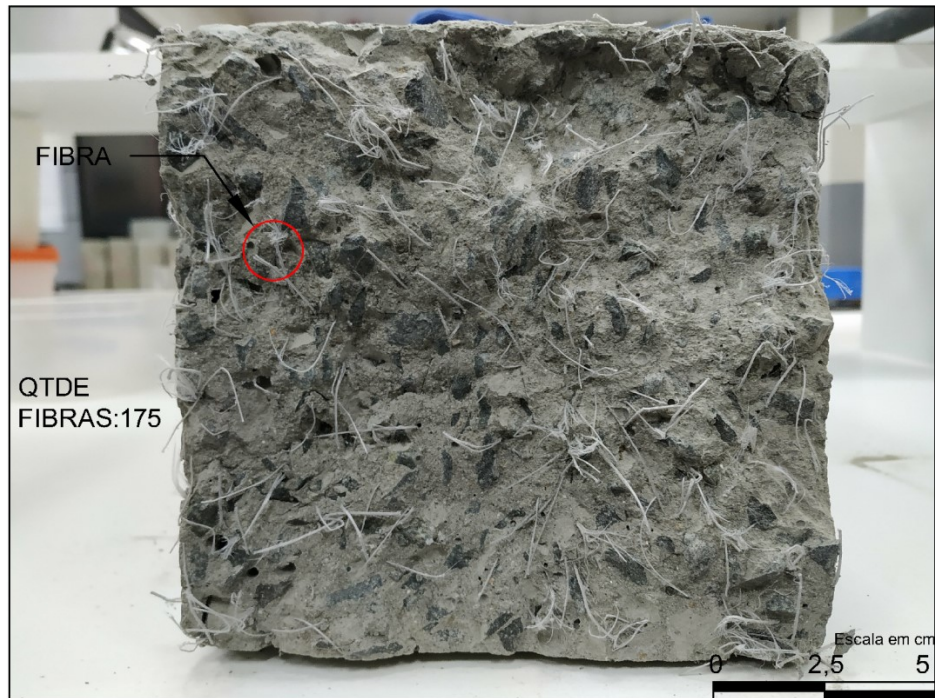
PE. Além disso, devido ao seu formato (ondulado), possui maior aderência à matriz em relação às outras fibras utilizadas

Nas figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 será possível identificar a distribuição das fibras na seção de ruptura de cada formulação com a quantidade visível aproximada destas.

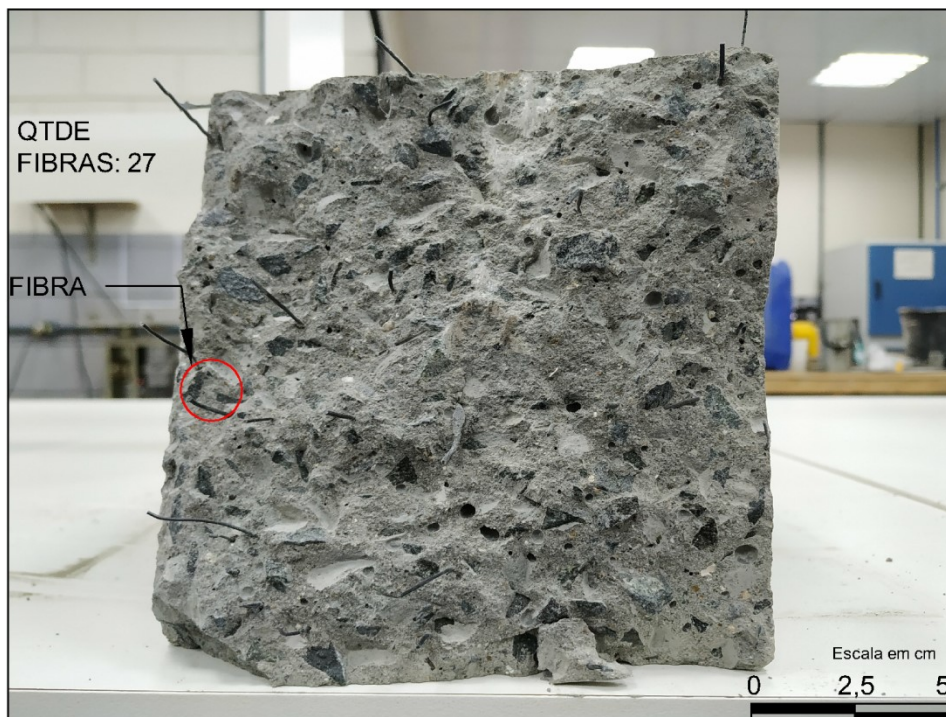
Figura 21 – Seção transversal F1 – PP 4 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: Autor (2020).

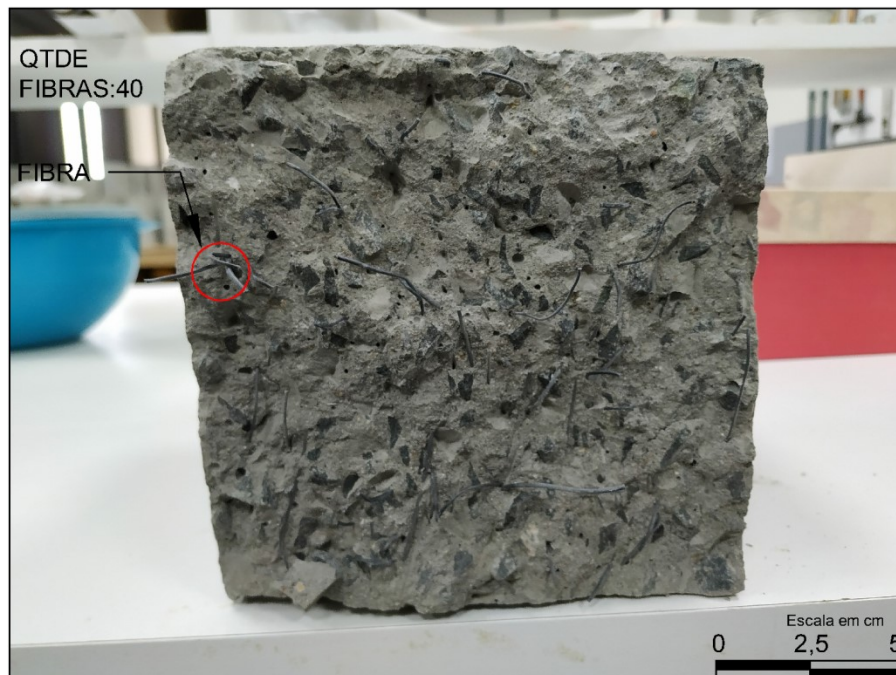
Figura 22 – Seção transversal F2 – PP 6 kg/m<sup>3</sup>

Fonte: Autor (2020).

Figura 23 – Seção transversal F3 – PE 4,98 kg/m<sup>3</sup>

Fonte: Autor (2020).



Figura 24 – Seção transversal F4 – PE 7,47 kg/m<sup>3</sup>

Fonte: Autor (2020).

Figura 25 – Seção transversal F5 – Aço 40 kg/m<sup>3</sup>

Fonte: Autor (2020).

Figura 26 – Seção transversal F6 – Aço 50 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: Autor (2020).

Com base nas figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 nota-se que as fibras estão dispersas de forma aleatória na seção e que a quantidade de fibras na seção varia de acordo com a dosagem delas na mistura.

Comparando a quantidade de fibras presentes na seção transversal para cada formulação constata-se que a fibra PP foi a que apresentou maior número de elementos distribuídos na seção, conforme a Figura 21 e Figura 22. Deve-se isto ao fato de ser a fibra que apresenta a menor densidade (0,90 a 0,91 g/cm<sup>3</sup>) dentre as fibras utilizadas, o que resulta em maior quantidade de fibras por unidade de massa. Outro ponto importante a ser destacado é a distribuição da fibra PP na seção de maneira homogênea. Por obter baixo módulo de elasticidade, a fibra PP possui baixa rigidez. Essa característica permite que durante a mistura do concreto haja maior envolvimento da fibra na argamassa e com o agregado graúdo, além de facilitar a dispersão dela na mistura.

Analisando o comportamento das misturas com fibras de aço observa-se que a distribuição das fibras na seção não é homogênea e que a quantidade destas é inferior ao apresentado pela fibra PP. O aço tem densidade de 7,85 g/cm<sup>3</sup>, acarretando em menor quantidade de fibras por unidade de massa, como é evidenciado na Figura 25 e Figura 26.

Uma vez que as fibras de aço apresentam uma elevada rigidez, quando comparada com as outras fibras, a possibilidade de entrelaçamento das fibras de aço é menor.

Já a fibra PE, apesar de ser uma fibra polimérica, apresenta quantidade e distribuição de fibras na seção semelhantes à fibra de aço, pois possui maior densidade e rigidez quando comparada à Fibra PP.

Por último, ressalta-se que as fibras PP e PE apresentaram ruptura das fibras, como poder ser observado nas 21, 22, 23 e 24, caso este que não ocorre com as fibras de aço. Assim, no momento em que as tensões foram transmitidas à fibra (mecanismo de ponte de tensões das fibras), esta não foi suficiente para causar a ruptura da fibra de aço. Desse modo, o lado da fibra que tinha menor ancoragem no concreto foi arrancado, mantendo-se a dimensão inicial da fibra, conforme visto nas figuras 25 e 26.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados a principal influência das fibras no estado fresco foi a redução da trabalhabilidade da mistura, sendo que a magnitude desta redução foi influenciada pelo material, características geométricas e dosagem da fibra analisada.

Com relação ao estado endurecido do concreto, as fibras influenciaram de forma diferente nas propriedades físicas. Para os ensaios de massa específica, o aumento da dosagem de fibra causou o aumento dos valores dos resultados em relação à formulação de referência. Os ensaios de absorção de água e índice de vazios apresentaram comportamentos diferentes para as fibras. Enquanto que para as fibras de aço e PE o aumento da dosagem de fibras resultou no aumento do índice de vazios e da absorção de água em relação à formulação de referência, para a fibra PP o aumento da dosagem fez com que o índice de vazios e a absorção de água diminuíssem de uma formulação para outra. O aumento no índice de vazios é o fator responsável pela queda na resistência mecânica à compressão axial das misturas.

O comportamento mecânico do concreto foi também influenciado pela adição de fibras na mistura. Com relação ao ensaio de resistência à compressão do concreto, a adição de fibras resultou na diminuição da resistência das misturas, chegando a 23% em relação à referência aos 28 dias. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, a adição de fibras de aço apresentou melhor desempenho, com aumento da resistência de 10% e 84%, para as dosagens de 40 e 50 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. A fibra PP apresentou aumento de 23% em relação à referência para a dosagem de 6 kg/m<sup>3</sup>. Para a dosagem de 4 kg/m<sup>3</sup> houve a diminuição de 3,4%. A fibra PE apresentou redução do valor de resistência para as duas formulações (7,47 e 4,98 kg/m<sup>3</sup>).

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a adição de fibras proporciona ao material maior resistência à tração na flexão, mas causa a diminuição da resistência à compressão axial. Assim, indica-se o uso do material estudado para situações em que o elemento será tracionado na flexão, como no caso de pisos industriais, pois desse modo o material apresentará melhor comportamento frente ao concreto convencional sem adição de fibras.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise do comportamento das fibras utilizadas neste trabalho na resistência pós-fissuração da matriz de concreto;
- Avaliar comportamento das fibras nas dosagens indicadas pelos fabricantes mantendo-se o *slump* da mistura constante;
- Avaliar as fibras utilizadas em dosagens superiores às indicadas pelos fabricantes, mantendo o *slump* da mistura constante.



## REFERÊNCIAS

- ABC POLYMER INDUSTRIES. **Fiberforce 100**. Disponível em: <https://abcpolymerindustries.com/fibers/fiberforce-100/>. Acesso em: 03 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABTN NBR 15530**. Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 7p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 12412**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. 2 ed. Rio de Janeiro: 2010. 5p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro: 2015a. 9p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. 3 ed. Rio de Janeiro: 2018. 9p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. 3 ed. Rio de Janeiro: 2009. 9p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro: 2005. 4p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. 2 ed. Rio de Janeiro: 2012. 3p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: 2018. 12p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: 2003. 6p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. 2 ed. Rio de Janeiro: 2009. 6p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro: 2009. 8p.
- \_\_\_\_\_. **ABTN NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: 1998. 8p.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. Reino Unido. Elsevier Science Publishers LTD, 1990.
- CARNIO, M.A. Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização. **Concreto e Construções**, São Paulo, ed.87, p. 26-32, jul./set. 2017.
- EPC DO BRASIL. **Macrofibra BarChip MQ 58**. Disponível em: <http://epcdobrasil.hospedagemdesites.ws/produto/macrofibra-barchip-mq58>. Acesso em: 03 nov. 2019.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. *In*: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 2v. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1327-1366.

\_\_\_\_\_. **Concreto com fibras de aço**. 2000. Boletim Técnico (BT/PCC/260) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

\_\_\_\_\_. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

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

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**. Microestrutura, Propriedades e Materiais. 4ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MM FIBRAS. **Macrofibras estruturais de polietileno**. Disponível em: <https://www.mmfibras.com/untitled-c1enr>. Acesso em: 03 nov. 2019.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland**. 4ª ed. Rio Grande do Sul: EDIPUCRS, 2017. 120p.

TECH MACHINE - FIBRAS DE AÇO. **Fibra para concreto**. Disponível em: <http://www.tecmachinefm.com.br/fibra-concreto>. Acesso em: 03 nov. 2019.

