

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

TALITA FRANCINE DA ROSA

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CONCRETO REFORÇADO
COM FIBRAS DE POLIETILENO

Joinville

2019

TALITA FRANCINE DA ROSA

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CONCRETO REFORÇADO
COM FIBRAS DE POLIETILENO

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.

Orientadora: Me. Valéria Bennack

Joinville

2019

TALITA FRANCINE DA ROSA

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CONCRETO REFORÇADO
COM FIBRAS DE POLIETILENO

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.

Banca Examinadora:

Profa. Me. Valéria Bennack
Orientadora
Presidente

Profa. Dra. Helena Ravache Samy Pereira
Membro
Católica de Santa Catarina

Profa. Me. Juliana Cristina Frankowiak
Membro
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dedico este trabalho a Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por toda a fé que me proporcionou durante essa caminhada e à virgem Maria que intercede pela minha vida.

Aos meus pais, Evandro e Flavia, e minha irmã Nathalia que abraçaram meu sonho desde o início, nunca medindo forças e apoio durante meu estudo. Sempre intercedendo, me apoiando emocionalmente, financeiramente e espiritualmente. Esse sonho se tornou realidade porque vocês confiaram e acreditaram no meu potencial. Meu eterno obrigado!

Ao meu namorado Renée Roberto, que ficou ao meu lado em todo o desenvolvimento desse trabalho e incansavelmente me disse que tudo daria certo. Me auxiliou fisicamente nos ensaios, participou das horas no laboratório, respeitando pacientemente os momentos que tive que estar ausente. Muito obrigado pelo seu amor e cuidado, esse trabalho é seu também.

Aos pais do meu namorado, Magda e Wilson, meu agradecimento pelo apoio, preocupação com meu trabalho e toda mão-de-obra com as formas de pinus que me proporcionaram.

A minha orientadora Valéria que sempre esteve disposta a sanar minhas dúvidas e transmitir calma nos momentos difíceis. Obrigada pela sua orientação, paciência, alegria e todo conhecimento que me transmitiu durante esse trabalho.

Aos estagiários do Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável, Vinícius e Victor Hugo. Sempre dispostos a ajudar e transmitir seus conhecimentos. Muito obrigado por toda paciência, auxílio e orientação.

Meu obrigado a empresa MM Fibras que doou as fibras utilizadas no desenvolvimento desse trabalho e ao sócio proprietário Marcelo. Desde o primeiro contato foram atenciosos e prestativos, dispostos a investir em pesquisas no país.

Agradeço a todos os amigos, colegas e professores da UFSC que foram essenciais para minha formação acadêmica, levarei comigo todos os conhecimentos que cada um me proporcionou. Em especial a minha amiga de estágio Gabriela Lemke, que todos os dias escutou sobre meu trabalho: dúvidas, anseios, medos e vitórias. Levarei com carinho a amizade que criamos no Cosmopolitan.

Por fim, ao laboratório da Arteris Litoral Sul por ceder seu espaço para desenvolvimento do trabalho e toda a equipe que executou o ensaio de resistência.

RESUMO

Atualmente a utilização de novos materiais compósitos na construção civil vem sendo bem difundida, uma das alternativas é o concreto reforçado com fibras (CRF) em que se têm a adição de fibras proporciona um aumento da resistência do concreto. As empresas fornecedoras desse material garantem menor custo quando comparado a telas metálicas em pisos de concreto, bem como aumento da resistência. À vista disto, este trabalho apresenta o comportamento do concreto reforçado com fibras de polietileno. Para a análise realizou-se a caracterização dos agregados através do ensaio de granulometria e massa específica. Definiu-se o traço do concreto tal como os teores de fibra para adição de 0% 0,25% e 0,50% em volume onde foram produzidos corpos de prova prismáticos de 15cmx15cmx50cm. Ensaio preliminares demonstraram que a presença de fibra acaba afetando a trabalhabilidade da mistura no seu estado fresco. No seu estado endurecido, os resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova com presença de fibras acabaram por ficarem abaixo dos resultados da formulação referência. Apesar disso, apresentaram comportamento positivo em relação a fissuras, onde conforme maior o teor de fibras utilizado, menor a abertura das fissuras, provando que o teor de fibras empregadas afeta significativamente o comportamento do concreto.

Palavras-chave: CRF. Resistência. Fibra. Polietileno. Fissura.

ABSTRACT

Currently the use of new composite materials in civil construction has been widespread, one of the alternatives is fiber reinforced concrete (CRF) in which the addition of fibers provides an increase of concrete strength. Companies supplying this material guarantee lower cost when compared to wire mesh in concrete floors, as well as increased strength. In view of this, this work presents the behavior of concrete reinforced with polyethylene fibers. For the analysis the characterization of the aggregates was performed through the granulometry and specific mass test. The concrete trait was defined as the fiber content for the addition of 0% 0.25% and 0.50% v / v where prismatic specimens of 15cmx15cmx50cm were produced. Preliminary tests have shown that the presence of fiber ultimately affects the workability of the mixture in its fresh state. In its hardened state, the flexural tensile strength results of the fiber specimens were below the reference formulation results. Nevertheless, they presented positive behavior in relation to cracks, where the higher the fiber content used, the smaller the crack opening, proving that the fiber content employed significantly affects the concrete behavior.

Keywords: CRF. Resistance. Fiber. Polyethylene. Fissure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores que influenciam na resistência do concreto	18
Figura 2 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras.....	21
Figura 3 - Distribuição por tipo de aplicações de fibras poliméricas no mercado brasileiro ...	23
Figura 4 - Esquema comparativo de tensões de concreto simples e com reforço de fibras	24
Figura 5 - Compatibilidade de dimensão entre agregado/fibra (A) e incompatibilidade de dimensão entre agregado/fibra (B)	25
Figura 6 - Agregados miúdo (a) e graúdo (b) utilizados no trabalho	27
Figura 7 - Fibras de polietileno	28
Figura 8 - Conjunto de peneiras utilizadas no ensaio	30
Figura 9 - Frasco utilizado no ensaio de massa específica do agregado miúdo	31
Figura 10 - Forma prismática utilizada.....	36
Figura 11 - Determinação do abatimento de cone	37
Figura 12 - Esquema do ensaio de tração na flexão	38
Figura 13 - Pesagem do frasco (a); Pesagem do conjunto (b); Pesagem do conjunto mais água (c); Passagem da amostra após estufa (d)	42
Figura 14 - Pesagens do agregado graúdo	43
Figura 15 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.....	44
Figura 16 - Corpos de prova em repouso após confecção	45
Figura 17 - Corpo de prova posicionado na prensa hidráulica	46
Figura 18 - Comportamentos ao final do ensaio de resistência a tração na flexão.....	48
Figura 19 - Pesagens para ensaio de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	40
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	41
Gráfico 3 - Resultados de tração na flexão dos corpos de prova e o desvio padrão.....	47
Gráfico 4 - Resultados de densidade aparente para diferentes teores de fibras.....	49
Gráfico 5 - Resultados de absorção de água para diferentes teores de fibras.....	50
Gráfico 6 - Resultados de porosidade aberta para diferentes teores de fibras.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de diferentes fibras	20
Tabela 2 – Propriedades de PEBD e PEAD	22
Tabela 3 - Características técnicas do Cimento Portland utilizado	26
Tabela 4 - Ficha técnica da fibra de polietileno.....	27
Tabela 5 - Teores de fibras empregados	35
Tabela 6 - Características do agregado miúdo.....	41
Tabela 7 - Massa específica do agregado miúdo	42
Tabela 8 - Massa específica e absorção de água do agregado graúdo.....	43
Tabela 9 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone	44
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração na flexão.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP II Z 32 – Cimento Portland Classe 2 com adição de Pozolana (32 MPa)

CRF – Concreto Reforçado com Fibras

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

NBR – Norma Brasileira

DMD – Dimensão máxima característica

PE - Polietileno

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PEAD - Polietileno de alta densidade

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.	CONCRETO CONVENCIONAL	15
2.1.1.	Comportamento do concreto no estado fresco	16
2.1.2.	Comportamento do concreto no estado endurecido.....	17
2.2.	FIBRAS POLIMÉRICAS	19
2.2.1.	Fibras empregadas em matrizes cimentícias	19
2.2.2.	Polietileno	21
2.3.	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	22
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1.	MATERIAIS	26
3.1.1.	Cimento Portland	26
3.1.2.	Agregados.....	26
3.1.3.	Fibras de polietileno	27
3.2.	MÉTODOS.....	28
3.2.1.	Caracterização dos agregados.....	30
<u>3.2.1.1.</u>	<u>Distribuição Granulométrica dos agregados.....</u>	<u>30</u>
<u>3.2.1.2.</u>	<u>Determinação da massa específica do agregado miúdo</u>	<u>31</u>
<u>3.2.1.3.</u>	<u>Determinação de massa específica do agregado graúdo.....</u>	<u>33</u>
3.2.2.	Dosagem do concreto	35
3.2.3.	Preparação dos corpos de prova	35
3.2.4.	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	36
3.2.5.	Ensaio de resistência à tração na flexão	37
3.2.6.	Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	40
4.1.1.	Distribuição granulométrica	40
4.1.2.	Massa específica.....	41
4.2.	PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	43

4.2.1.	Ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.	43
4.2.2.	Preparação dos corpos de prova	45
4.2.3.	Ensaio de resistência à tração na flexão	45
4.2.4.	Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água.....	48
5.	CONCLUSÃO	52
5.1.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	52
	REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

Atualmente dois materiais são os mais empregados em obras de construção civil, o concreto e o aço. Em certas situações os dois acabam por se complementar, resultando em um compósito, em outras, concorrem entre si de maneira que ambos podem ser utilizados para construção de estruturas de mesmo tipo e função (NEVILLE; BROOKS, 2013). Esposto (2014) afirma que no século XIX notou-se que o concreto apresentava comportamento frágil e baixa resistência a tração, e por isso passou-se a utilizar barras de aço nas zonas tracionadas para suprir essa deficiência.

Tendo em vista que o concreto apresenta forte resistência quando submetido a esforços de compressão e apresenta comportamento frágil à tração, busca-se desde tempos antigos materiais que o reforcem. É o caso da aplicação de fibras naturais, sintéticas ou de aço em materiais com comportamento frágil (BENTUR; MINDESS, 1990). Segundo o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2017) a utilização de fibras na matriz cimentícia já ocorre há um longo tempo no Brasil com o emprego de telhas de fibrocimento, que atualmente caíram em desuso. Com relação ao concreto, uma técnica que vem ganhando mercado no país é o concreto reforçado com fibras (CRF) com grande aplicação no campo de pisos industriais.

O CRF é definido como um material compósito, composto pela matriz cimentícia - mistura de cimento Portland, água, agregados miúdos e graúdos; e as fibras podendo ser encontradas no mercado em diversos tipos de matéria-prima como aço, vidro ou polímeros (FIGUEIREDO, 2011).

A aplicação do CRF se dá pelo feito que este fornece à estrutura um reforço em toda a seção transversal onde é aplicado, diferentemente do concreto armado com telas metálicas utilizado em pisos que apresentam reforço somente na posição da tela na seção transversal. Fibras sintéticas, conhecidas como macrofibras, conseguem melhorar as características do concreto já no seu estado endurecido, agindo em matrizes cimentícias de forma a controlar a propagação de fissuras e também sua abertura (IBRACON, 2017).

Apesar do Brasil apresentar grande utilização do CRF, este não possui normatização para seu controle da qualidade tornando-o uma atividade empírica. De acordo com Figueiredo (2011) a Europa e os Estados Unidos da América são líderes da aplicação do CRF, tendo já uma normatização bem estabelecida.

Portanto, é fundamental estar constantemente analisando o comportamento do concreto reforçado com fibras em diferentes ensaios e teores, para dessa forma identificar

fatores que favorecem sua utilização e quais as variáveis que afetam seu desempenho. Logo, a proposta desse trabalho é analisar, de maneira experimental, a resistência à tração na flexão do concreto reforçado com diferentes teores de fibras de polietileno, bem como verificar sua consistência e propriedades físicas do concreto.

Tendo em vista o objetivo proposto para este estudo e as questões de investigação que o conduziram, o trabalho é organizado em 4 capítulos. No primeiro, é realizada fundamentação teórica sobre concreto, concreto reforçado com fibras e fibras poliméricas. No segundo capítulo são detalhados os materiais e metodologia utilizada para a realização deste estudo. Já no terceiro capítulo são apresentados os resultados e discussões. Por fim, o último capítulo aponta as conclusões, de maneira a realizar uma análise dos resultados que foram significativos obtidos na pesquisa. Neste capítulo, são sugeridas também propostas para futuras pesquisas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a resistência à tração na flexão do concreto reforçado com fibras de polietileno em diferentes teores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente os agregados;
- Definir o traço referência e teores de fibras para o concreto;
- Verificar a consistência do concreto para diferentes teores de fibras (*Slump test*);
- Analisar a resistência à tração na flexão - 28 dias;
- Determinar as características físicas (densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta do concreto).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da problemática do comportamento do concreto reforçado com fibras de polietileno, faz-se essencial buscar na literatura referências sobre concreto convencional, concreto reforçado com fibras e fibras poliméricas.

2.1. CONCRETO CONVENCIONAL

De acordo com Callister (2012), concreto é um material compósito que se constitui de um agregado de partículas ligadas pelo aglomerante, o cimento. Já Neville e Brooks (2013) afirmam que concreto, de maneira mais ampla, pode ser qualquer produto ou massa que seja elaborado com base no uso de um meio cimentante. Existem dois tipos de concreto: Concreto de cimento Portland, utilizado como material estrutural na área de construções; e concreto asfáltico, largamente empregado na pavimentação (CALLISTER, 2012).

De acordo com Ambrozewicz (2012), Cimento Portland é a denominação técnica do material que é amplamente utilizado na construção civil como cimento, o qual possui propriedades aglutinantes que sob a ação da água se torna endurecido. Este permanece estável mesmo se em contato com a água novamente, denominado assim aglomerante hidráulico.

Atualmente existem diversos tipos de Cimento Portland, que são classificados conforme seu tipo e classe. Com relação ao tipo são classificados com números romanos de I a V de acordo com a sua composição, já com relação a classe são expressos por número (25, 32 e 40) que indicam sua resistência à compressão, em MPa.

A mistura de concreto de cimento Portland é composta por cimento Portland, agregado fino (areia), agregado graúdo (brita) e água. Callister (2012) afirma que a utilização da composição de agregado miúdo e graúdo se faz necessária para reduzir o custo do concreto produzido, visto que os agregados são baratos se comparados ao cimento. Além disso, esses devem ser adicionados em proporções corretas e em dois tamanhos diferentes, para que se obtenha um empacotamento denso e um bom contato interfacial.

Segundo Bauer (2013) os agregados correspondem a cerca de 80% do peso e 20% do custo de um concreto estrutural sem aditivos. Podem apresentar variadas características, então é imprescindível um estudo cuidadoso, bem como controle da sua qualidade antes e durante a execução da obra. Segundo Neville e Brooks (2013) se existir uma relação elevada entre o

volume do agregado graúdo em relação ao agregado miúdo, isso poderá causar segregação, de maneira que a distribuição não seja mais uniforme.

A quantidade de água utilizada na mistura também deve ser dimensionada corretamente, tendo em conta que a quantidade da pasta cimento-água deve realizar a total cobertura das partículas de agregados (miúdo e graúdo). Caso contrário, uma ligação incompleta ocorre utiliza-se pouca água e uma excessiva porosidade quando utiliza-se água demais. Ambas as situações resultarão em uma resistência final inferior à ótima (CALLISTER, 2012).

Neville e Brooks (2013) afirmam que a durabilidade é um fator de elevada importância no estado endurecido do concreto. A durabilidade relaciona-se à capacidade do mesmo de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão ou qualquer outra deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para que exista uma boa durabilidade, a massa de concreto deve possuir o mínimo possível de volume de vazios, fazendo assim que a permeabilidade diminua e dificulte a penetração de substâncias nocivas (AMBROZEWICZ, 2012). Segundo Mehta e Monteiro (2008), a presença de água geralmente causa a deterioração de obras de construção e a facilidade com que essa penetra nos sólidos porosos é o que vai definir a taxa de deterioração. Logo um concreto que seja durável irá preservar a sua forma, qualidade e sua capacidade de uso mesmo quando exposto ao ambiente para qual foi projetado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.1. Comportamento do concreto no estado fresco

De acordo com Neville e Brooks (2013) o concreto deve possuir bom desempenho tanto no seu estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco deve possuir boa consistência de maneira que possa ser adensado e também ser coeso, para que no transporte e lançamento não sofra segregação.

Ambrozewicz (2012) afirma que a consistência do concreto é a propriedade que diz respeito a sua fluidez e está ligada com a sua composição, quantidade de água, granulometria dos agregados e presença de aditivos.

Sua consistência garante a trabalhabilidade, isto é, a facilidade com que poderá ser manuseado. Por isso é de tamanha importância que a dosagem do concreto leve em conta o tipo de obra em que a mistura será aplicada para assim definir sua consistência e garantir uma trabalhabilidade adequada. Como exemplo pode-se citar peças que sejam finas e fortemente

armadas que necessitarão de uma mistura mais fluida do que obras que possuam armadura mais leve, como pisos de concreto (AMBROZEWICZ, 2012).

Um teste normatizado no Brasil quanto à consistência do concreto é a NBR 8953 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2015) em que é ensaiada a massa de concreto no seu estado fresco com abatimento de tronco de cone, mais conhecido como *Slump Test*.

2.1.2. Comportamento do concreto no estado endurecido

Com relação ao seu desempenho no estado endurecido, as resistências à compressão e tração do concreto são as principais de interesse (CARVALHO, 2014). A resistência de um material é a capacidade que esse tem de resistir à tensão sem romper, ou seja, a tensão máxima que esse suporta antes do seu rompimento, que em alguns casos sua ruptura já é identificada com o surgimento de fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o concreto é projetado considerando que resistirá às tensões de compressão e não de tração. Isso se dá devido ao concreto não apresentar bom comportamento à tração (CARVALHO, 2014). Esposto (2014) afirma que o concreto apresenta comportamento frágil e baixa capacidade de deformação antes da sua ruptura quando submetido a esforços de tração. De acordo com Adão e Hemerly (2010), a resistência à tração do concreto é somente cerca de 10% da resistência a compressão do mesmo.

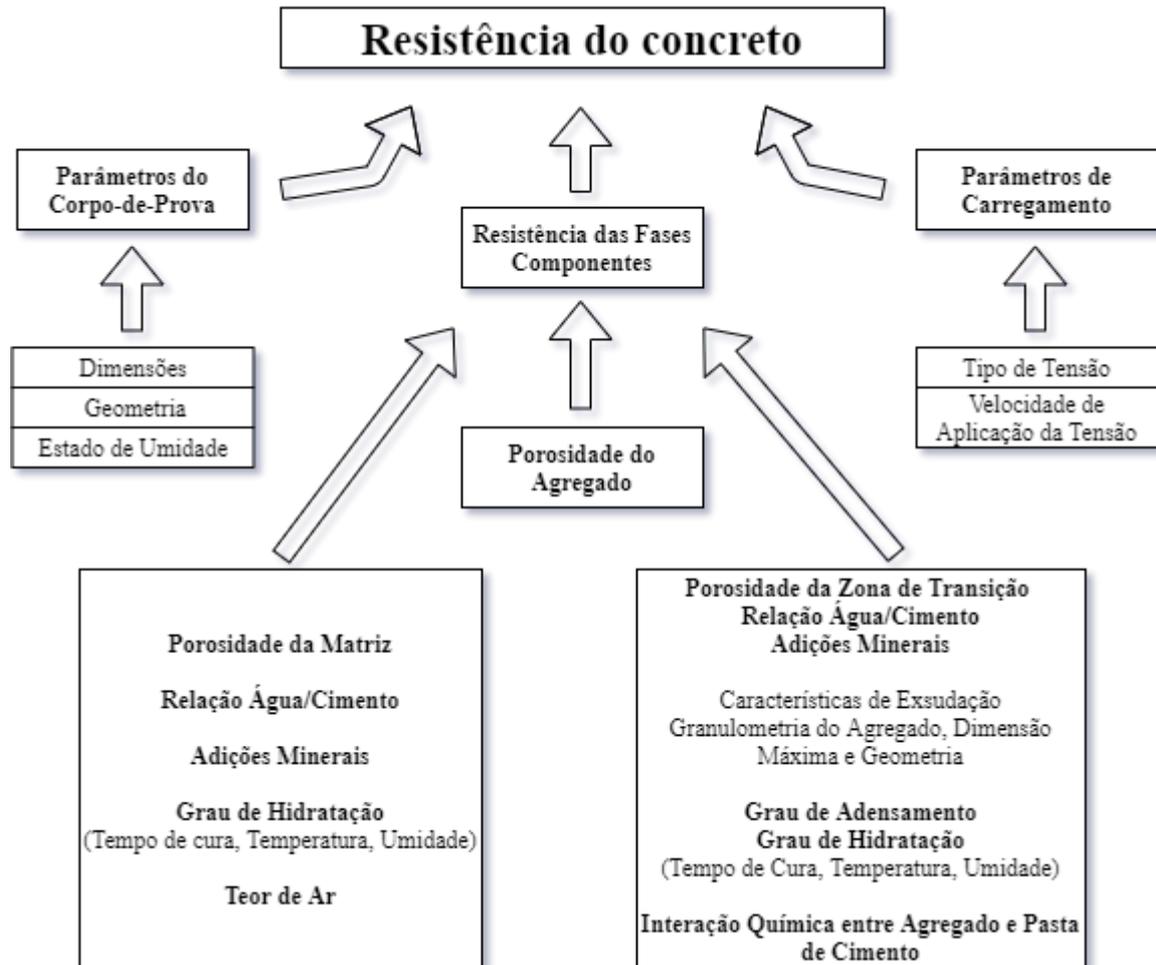
Materiais sob esforço de tração uniaxial necessitam de energia relativamente baixa para que ocorra o início e desenvolvimento das fissuras na matriz, logo, esse avanço rápido poderá contribuir para a ruptura frágil. Já sob esforço de compressão, o modo de ruptura é menos frágil, dado que essa necessita de mais energia para que as fissuras se formem e se desenvolvam na matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) fatores como as propriedades e proporções dos materiais utilizados no traço do concreto, grau de compactação e condições de cura podem afetar a maneira que o concreto responderá as tensões aplicadas sobre o mesmo. Já quanto à resistência, a relação água/cimento é extremamente importante visto que essa determinará a porosidade da matriz.

Segundo Ambrozewicz (2012) a resistência mecânica do concreto está diretamente ligada à relação água/cimento, a idade da existência em dias e a forma (geometria) do concreto. Já a resistência à tração está diretamente ligada ao tipo de método que será medida, a qualidade do concreto, características do agregado, aditivos ou adições (MEHTA;

MONTEIRO, 2008). Os fatores que podem afetar a resistência do concreto são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Fatores que influenciam na resistência do concreto



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

A solução para o emprego do concreto que sofrerá sob esforços de tração é a adição de materiais que apresentem bom comportamento sob esse esforço, como barras contínuas de aço (concreto armado). Atualmente veem se buscando novos materiais para empregar junto da matriz cimentícia, é como o concreto reforçado com fibras, que em pesquisas já realizadas apresentou um bom.

2.2. FIBRAS POLIMÉRICAS

De acordo com Mano (1999) polímeros são macromoléculas que se caracterizam por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Nem todas as macromoléculas são polímeros, mas todos os polímeros são macromoléculas, esses ainda podem ser classificados de diversas maneiras.

Segundo Callister (2012) o polímero pode ser classificado conforme seu comportamento frente a uma elevação na temperatura, sendo dividido entre termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos quando aquecidos tendem a amolecer e quando resfriados endurecem, sendo processos que podem ser reversíveis e repetidos. Já os termofixos tornam-se rígidos permanentemente durante sua formação e mesmo quando aquecidos não amolecem. Logo, os termofixos são mais duros e mais resistentes que os termoplásticos.

A partir do comportamento mecânico os polímeros podem ser divididos em três grupos (MANO, 1999). Segundo Canevarolo Jr. (2002) esse comportamento está ligado à estrutura química do material, do número médio de mero por cadeia e do tipo de ligação covalente sendo divididos em borrachas, plásticos e fibras.

Fibra pode ser definida como um corpo flexível, cilíndrico, de pequena seção transversal e que apresenta elevada razão entre seu diâmetro e comprimento, podendo ser polimérica ou não (MANO, 1999). De acordo com Canevarolo Jr (2002), atualmente no mundo existem fibras industriais, naturais e sintéticas, no qual as últimas representam grande parte do total de polímeros que são consumidos no planeta.

2.2.1. Fibras empregadas em matrizes cimentícias

Fibras sintéticas (polímero) acabaram por se tornarem mais atrativas nos últimos anos para o reforço de materiais cimentícios. As propriedades das fibras sintéticas acabam por variar muito, principalmente no que diz respeito ao módulo de elasticidade, conforme se pode verificar na Tabela 1 (BENTUR; MINDESS, 199).

Tabela 1 - Características de diferentes fibras

Fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5 - 2,0	0,5 - 3,5
Vidro	9-15	2,60	70 - 80	2 - 4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,4	3,40	196	3,1	2 - 3
Polipropileno	0,02 - 0,4	2,60	164	0,5 - 0,75	8
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,6	2,1 - 4,0
Carbono	9	1,90	230	2,6	1,0
Náilon	-	1,10	4,00	0,90	13,0 - 15,0
Celulose	-	1,20	10,00	0,3 - 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,30	0,7x10 ⁻³	10
Fibra de madeira	-	1,50	71	0,9	-
Sisal	10 - 50	1,50	-	0,8	3,0
Matriz cimentícia (Para comparação)	-	2,50	10 - 45	3,7x10 ⁻³	0,02

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (1990).

Segundo Callister (2012) as fibras, quando empregadas como reforços em matrizes, são submetidas a diversas deformações mecânicas. Em consequência disso para que possam oferecer um bom desempenho, essas devem possuir um elevado limite de resistência à tração, alto módulo de elasticidade bem como resistência à abrasão. Entretanto Bentur e Mindess (1990) afirmam que pesquisas apontaram que mesmo com a utilização de fibras de baixo módulo, ainda se conseguem melhorias significativas em relação à capacidade de deformação, tenacidade, resistência ao impacto e controle de trincas no concreto.

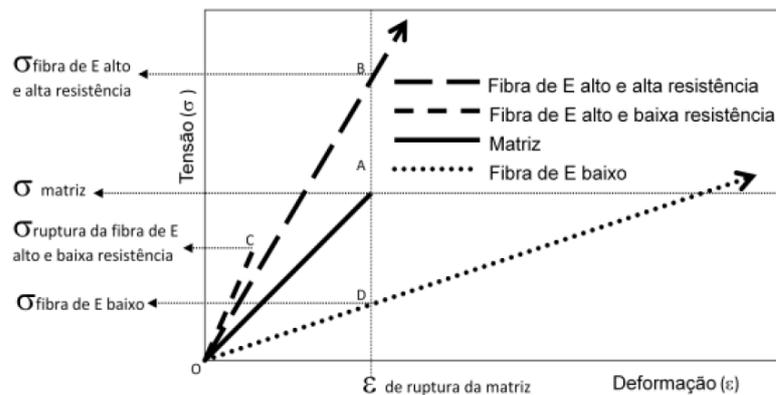
As fibras ainda podem ser classificadas em microfibras e macrofibras. As microfibras, mais comumente empregadas as fibras de vidro, geralmente possuem diâmetro de 10 a 30 μ m e seu comprimento varia de 3 a 18 mm. São geralmente empregadas para o controle de tração e fissuração de matrizes cimentícias na fase plástica. Já as macrofibras, como de polipropileno, polietileno e náilon, possuem diâmetro maior que 0,30 mm e os comprimentos variam entre 30 e 60 mm. Essas são indicadas para proporcionar um aumento da capacidade de absorção de energia após o rompimento da matriz (SALVADOR, 2013).

A eficiência da fibra dependerá da sua atuação como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura. Portanto, a capacidade do reforço depende diretamente do teor de fibras

empregado à matriz e se bem dispersas. Dessa forma, quanto maior o teor, maior será a quantidade de fibras atuando como ponte de transferência ao longo da fissura, maior será a resultante de tração e sua capacidade resistente (FIGUEIREDO, 2011).

Conforme Figueiredo (2011) apresenta na Figura 5 pode-se verificar que quando a matriz se rompe, a fibra de baixo módulo de elasticidade está apresentando um módulo mais baixo que ela. Portanto para que a fibra tenha capacidade de reforçar a matriz, essa precisa estar presente em elevados teores a fim de que a tensão por fibra não exceda a tensão de ruptura.

Figura 2 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras



Fonte: Figueiredo (2011, p. 16).

Fibras poliméricas (sintéticas) vêm sendo muito utilizadas devido sua maior durabilidade quando em meio alcalino, não estando sujeitas à oxidação como acontece com o aço, tornando sua utilização mais vantajosa. Visto que, a maioria das obras são sujeitas à degradação pela exposição ao ambiente, dispor de material com boa durabilidade é vantajoso para vida útil da estrutura (IBRACON, 2017).

2.2.2. Polietileno

O polietileno (PE) é definido como um polímero parcialmente cristalino, flexível e termoplástico. Antigamente o polietileno era classificado pela sua densidade e pelo tipo de processo usado em sua fabricação, entretanto, hoje os polietilenos são mais apropriadamente descritos como polietilenos ramificados e polietilenos lineares. Os PE representam 40% da demanda mundial de termoplásticos (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003).

Fibras de polietileno podem ser encontradas de baixa densidade (PEBD) ou de alta densidade (PEAD), onde essas diferem em propriedades, como apresenta a Tabela 2. O PEBD apresenta ramificações longas, logo, essas aumentam a resistência ao impacto, diminuem a densidade e facilitam o processamento. Já o PEAD apresenta ramificações curtas em que essas aumentam a cristalinidade e a resistência à tração em relação ao polietileno de baixa densidade (COUTINHO et al. 2003).

Tabela 2 – Propriedades de PEBD e PEAD

Propriedade	Polietileno (PE)	
	Baixa densidade (BD)	Alta densidade (AD)
Densidade (g/cm ³)	0,912 - 0,925	0,950 - 0,960
Temperatura de fusão (°C)	102 - 112	128 - 135
Resistência à tração (MPa)	6,9 - 16	20 - 40
Alongamento máximo (%)	100 - 800	50 - 1200

Fonte: Adaptado de Coutinho et al. (2003).

O PEAD e o PEBD possuem muitas aplicações em comum, toda via no geral o PEAD é mais duro e resistente e o PEBD é mais flexível e transparente (COUTINHO et al. 2003). O polietileno parece estar atraindo grande interesse para utilização em fibras para reforços de concreto, sendo que uma das suas vantagens é que o PE pode ser produzido com alta densidade (BENTUR; MINDESS, 1990).

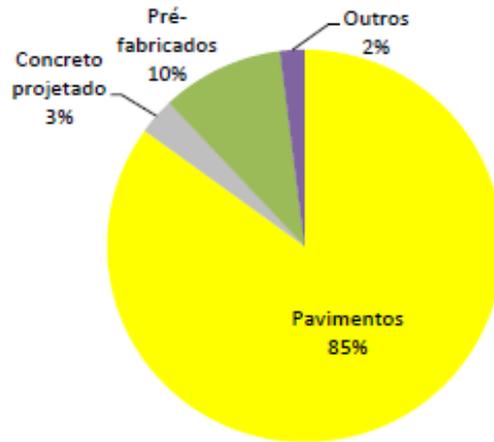
2.3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

De acordo com o IBRACON (2017) a adição de fibras em materiais frágeis ocorre desde a época dos romanos e egípcios, onde se utilizavam fibras naturais para reforçar as pastas de argila, mas sua aplicação com importância na construção civil só se deu na metade do século passado. No Brasil pode-se citar a utilização de fibras em matriz cimentícia em telhas de fibrocimento, onde eram empregadas fibras de amianto na mistura de argamassa que resultaria na telha. Estas que acabaram caindo em desuso devido a agressividade a saúde das pessoas que lhe manuseavam (IBRACON, 2017).

Atualmente um campo que tem grande aplicação do CRF no país é o de pisos industriais, como ilustra a Figura 2. Obras como o Aeroporto de Viracopos, Aeroporto do

Galeão, e galpões da área automotiva são exemplos no Brasil que utilizaram do concreto reforçado com fibras na sua construção (IBRACON, 2017).

Figura 3 - Distribuição por tipo de aplicações de fibras poliméricas no mercado brasileiro



Fonte: Figueiredo (2011).

Bentur e Mindess (1990) afirmam que estudos sobre fibras de aço em CRF tiveram início nas décadas de 1950 e 1960. Hoje são empregadas fibras de aço, poliméricas e naturais, cada qual com seu tipo de aplicação como pisos industriais, revestimentos de túneis ou para evitar aparecimento de fissuras.

De acordo com Figueiredo (2011), concretos reforçados com fibras poliméricas ou de aço são materiais compostos, mais conhecidos como compósitos. O concreto em si, como já dito anteriormente, é definido como um compósito. Entretanto, as bibliografias utilizam o termo mais frequentemente para os materiais que apresentam algum reforço, como o concreto com fibras ou o concreto armado.

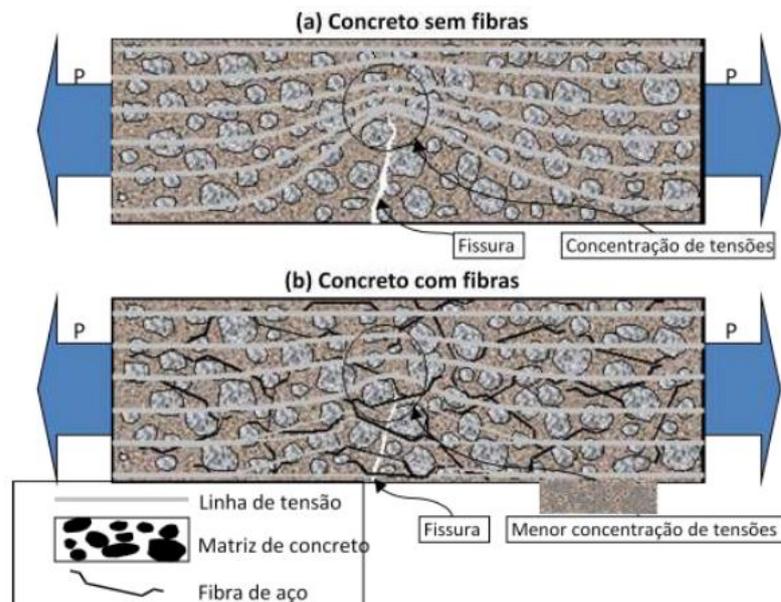
Esses compõem um grupo de compósitos que são formados por: uma matriz frágil, que confere estrutura ao compósito de forma que preencha os vazios entre os materiais; e algum tipo de reforço, que tem como objetivo a melhora das propriedades mecânicas do material como um todo. O CRF apresenta características como resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e comportamento pós-fissuração mais favoráveis se comparados aos materiais isolados que o compõem (LUCENA, 2017).

Segundo Bentur e Mindess (1990) matrizes cimentícias simples caracterizam-se por apresentar baixa resistência à tração. Portanto requerem reforço para que sejam utilizadas em estruturas que sofram esse esforço. Ao longo dos anos esse reforço tem sido realizado com o

emprego de barras contínuas colocadas nos locais favoráveis a tensões de tração e cisalhamento. De acordo com Figueiredo (2011) no caso da aplicação de reforço com fibras, essas são dispersas na matriz cimentícia de modo que atuam tridimensionalmente auxiliando no controle de fissuras. Logo se adicionadas a mistura fibras com propriedades adequadas e em teores apropriados, o concreto deixa de ser extremamente frágil.

As fibras adicionadas ao concreto apresentam um controle de fissuração na retração (fase plástica) e na fase endurecida. Logo as fibras continuam a suportar tensões de tração mesmo após a fissuração da matriz cimentícia, ajudando a manter a integridade estrutural do concreto e a coesão do material (PILLAR, 2014). Dessa forma a fibra faz uma ponte para transferir as tensões pelas fissuras minimizando a concentração de tensões nas extremidades como ilustra a Figura 3 (FIGUEIREDO, 2011).

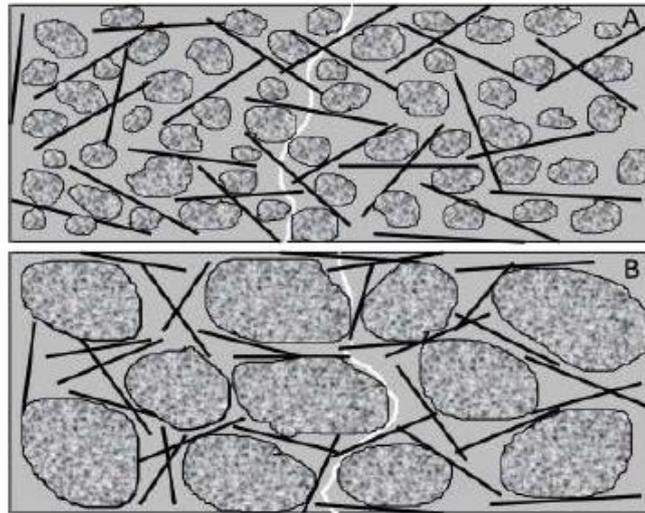
Figura 4 - Esquema comparativo de tensões de concreto simples e com reforço de fibras



Fonte: Figueiredo (2011).

Figueiredo (2011) afirma também que as fibras utilizadas no CRF devem ter comprimentos que sejam igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado que é empregado na mistura do concreto. Fazendo com que ocorra uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, como se pode visualizar na Figura 4.

Figura 5 - Compatibilidade de dimensão entre agregado/fibra (A) e incompatibilidade de dimensão entre agregado/fibra (B)



Fonte: Figueiredo (2011).

Segundo Monte (2015) as vantagens que este material apresenta, junto com o número crescente de estudos podem ter resultado num aumento do uso do concreto reforçado com fibras para fins estruturais. É fundamental que se utilize um método de caracterização do comportamento mecânico que seja confiável e econômico, para garantir qualidade na aplicação deste material. Logo, o método de ensaio mais utilizado atualmente é na flexão de pequenas vigas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta desse trabalho é verificar, de maneira experimental, o comportamento do CRF de teores de 0% (concreto referência), 0,25% e 0,50% de fibra de polietileno quanto à trabalhabilidade, resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos e suas propriedades físicas. Portanto, neste capítulo são detalhados os materiais e os ensaios realizados no desenvolvimento experimental do trabalho.

3.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho são: Cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e fibra de polietileno. Tais materiais, suas características e normas regulamentadoras são apresentados a seguir.

3.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado na mistura é classificado como CP II – Z 32, da linha de cimentos da Votoran. A Tabela 3 apresenta as características técnicas do produto, que é especificado pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 3 - Características técnicas do Cimento Portland utilizado

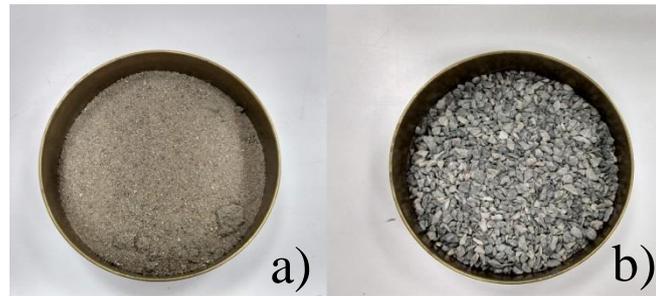
Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + Sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II - Z	25, 32 ou 40	RS ou BC	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15

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

3.1.2. Agregados

Para a elaboração do concreto foram utilizados agregados miúdos e graúdos: areia média e brita 0, respectivamente. Ambas têm origem na região de Joinville – SC e são ilustrados na Figura 6 a seguir.

Figura 6 - Agregados miúdo (a) e graúdo (b) utilizados no trabalho



Fonte: Autora (2019).

3.1.3. Fibras de polietileno

As fibras utilizadas no trabalho experimental foram fornecidas pela empresa fabricante MM FIBRAS, que se localiza em São José – Santa Catarina. As características das fibras poliméricas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Ficha técnica da fibra de polietileno

Matéria-prima	Monofilamentos de polietileno
Comprimento	45 mm (frisada)
Resistência à tração	350 MPa por filamento
Densidade	1,12 g/cm ³
Fator forma	50 FF
Tipo de ancoragem	Twist
Alongamento por ruptura	110%

Fonte: Adaptado de MM Fibras (2019).

De acordo com MM Fibras (2019), as fibras de polietileno (Figura 7) quando adicionadas ao concreto elevam a resistência à tração na compressão diametral e ao impacto, além de aumentar a propriedade dúctil do concreto, e melhorar a tração direta. Essas podem ser utilizadas em obras marítimas, subterrâneas ou de superfície, como pisos industriais e concretos projetados.

Figura 7 - Fibras de polietileno

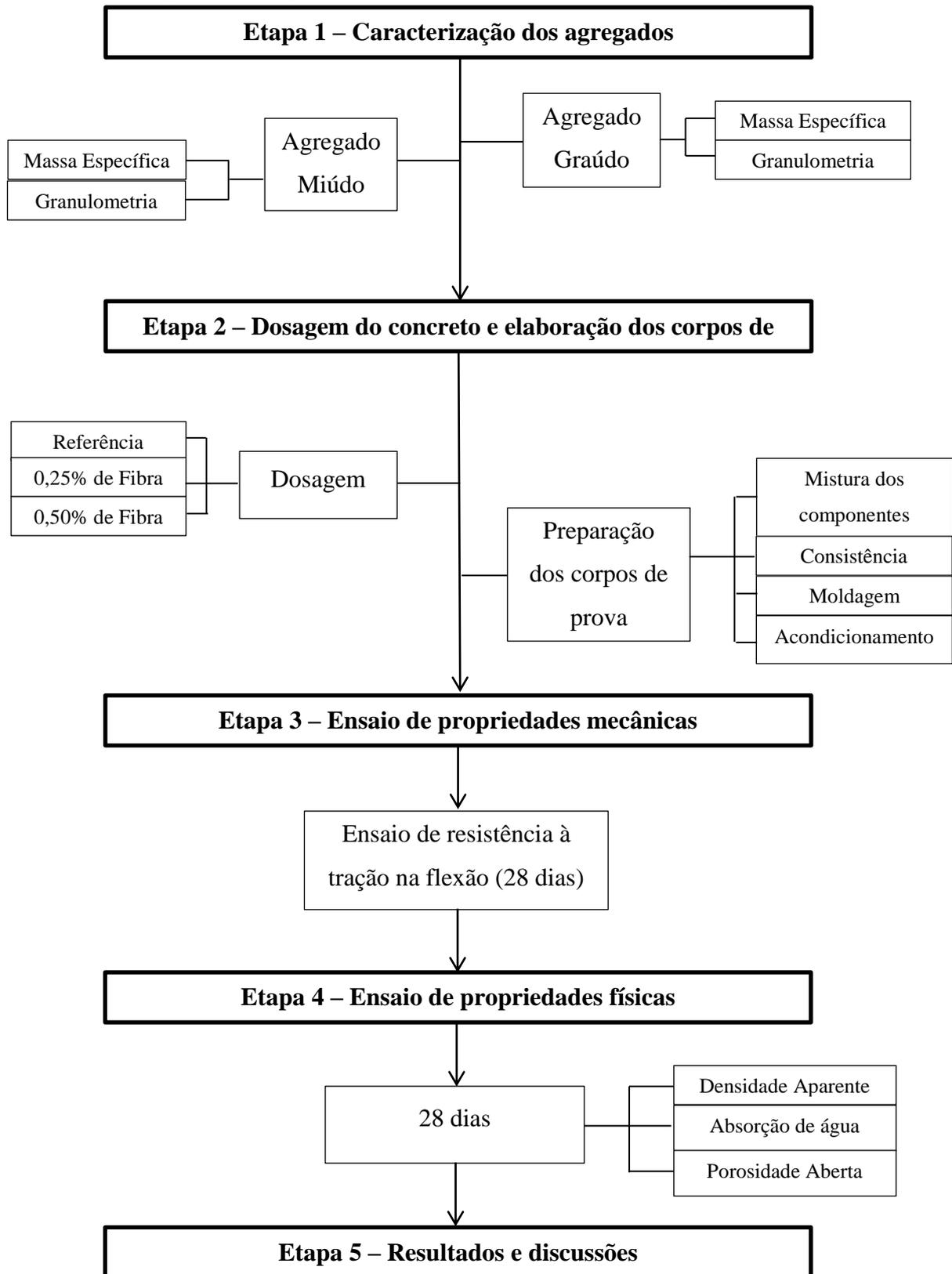


Fonte: Autora (2019)

3.2. MÉTODOS

O Fluxograma 1 apresenta a sequência das atividades realizadas para o desenvolvimento do trabalho.

Fluxograma 1: Sequência de atividades realizadas na elaboração do trabalho



Fonte: Autora (2019)

3.2.1. Caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização realizados neste trabalho foram executados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável da UFSC - Joinville. As normas vigentes de cada ensaio são apresentadas a seguir.

3.2.1.1. Distribuição Granulométrica dos agregados

A granulometria consiste na distribuição, em porcentagem, das dimensões dos grãos retidos nas peneiras de série normal ou intermediária bem como a determinação do módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado. O ensaio de composição granulométrica de agregados, para concreto, é normatizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a realização do ensaio foram coletadas amostras de agregados miúdos e graúdos, onde ambas foram secas na estufa à 105°C e depois esfriadas à temperatura ambiente. Em seguida foram separadas duas amostras de cada agregado (miúdo e graúdo) como indica a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). As peneiras utilizadas foram previamente limpas e encaixadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Conjunto de peneiras utilizadas no ensaio



Fonte: Autora (2019).

Os agregados miúdo e graúdo, testados separadamente, foram colocados sobre a peneira superior do conjunto. Em seguida, foi promovida a agitação mecânica das peneiras por cerca de 5 minutos, de modo a permitir o peneiramento de todos os grãos. Após o

processo de agitação, as peneiras foram retiradas individualmente para que o material retido em cada uma delas fosse pesado. Com isto pode-se obter a porcentagem média retida das amostras bem como a porcentagem acumulada em cada malha, resultando na definição do módulo de finura, dimensão máxima característica e curvas granulométricas.

3.2.1.2. Determinação da massa específica do agregado miúdo

De acordo com a NBR NM 52 (ANBT, 2009) “massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis”. E ainda que “massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis”.

Para execução do ensaio pesou-se 500g de amostra do agregado miúdo seco e em seguida esse foi despejado no frasco, apresentado na Figura 9, para registro da massa do conjunto. Em seguida adicionou-se água até a marca de 500ml e com intuito de remover as bolhas de ar foram realizados movimentos circulares com o frasco, para posteriormente levá-lo a banho maria mantido a temperatura constante de 21°C aproximadamente por 1 hora.

Figura 9 - Frasco utilizado no ensaio de massa específica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2019)

Completada 1 hora de repouso, o frasco foi preenchido com água até a marca de 500 cm³ e novamente realizou-se a pesagem da massa total do conjunto. Por fim o agregado foi retirado do frasco e levado a estufa a 105°C até massa constante, em seguida esfriado a temperatura ambiente e pesado. Finalizado o ensaio realizou-se os cálculos conforme as Equações 1, 2, 3 e 4.

- Massa específica aparente do agregado seco

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (1)$$

Onde:

d_1 – massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m – massa da amostra seca em estufa (g);

V – volume do frasco (cm^3);

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm^3).

- O volume de água que é adicionado ao frasco (V_a) foi obtido através da Equação 2.

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (2)$$

Onde:

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm^3);

m_1 – massa do conjunto (frasco + agregado) (g);

m_2 – massa total (frasco + agregado + água) (g);

ρ_a – massa específica da água (g/cm^3).

- Massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2)

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (3)$$

Onde:

d_2 – massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3);

m – massa da amostra seca em estufa (g);

m_s – massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V – volume do frasco (cm^3);

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm^3).

- Massa específica do agregado (d_3)

$$d_3 = \frac{m}{(V - Va) - \frac{ms - m}{\rho a}} \quad (4)$$

Onde:

d_3 – massa específica do agregado (g/cm³);

m – massa da amostra seca em estufa (g);

ms – massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V – volume do frasco (cm³);

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm³);

3.2.1.3. Determinação de massa específica do agregado graúdo

O ensaio de determinação de massa específica do agregado graúdo seguiu as diretrizes da NBR NM 53 (ABNT, 2009). Inicialmente uma amostra do agregado foi peneirada com a peneira de abertura 4,75 mm de forma que todo material passante foi separado da amostra utilizada. Essa ainda foi lavada para garantir que todo pó presente na superfície fosse retirado e posteriormente levada a estufa com temperatura (105±5)°C.

Amostra foi resfriada durante 1h para alcançar temperatura ambiente e depois do preparo foi pesada de maneira que atingisse 2 kg para realização do ensaio, como determina a norma. Em seguida foi submergida em água à temperatura ambiente durante (24±4)h. Passado o período, essa foi retirada da água e enxugada com papel absorvente de forma que toda água visível fosse eliminada, em seguida pesou-se e obteve-se a massa do agregado saturado com superfície seca.

Para obtenção da massa em água, essa foi submergida novamente em água e pesada com auxílio de um recipiente acoplado a balança. E por fim, foi novamente seca em estufa até massa constante e resfriada para sua pesagem para obtenção da massa do agregado seco. Com esses valores obtidos nas pesagens, realizaram-se os cálculos conforme as Equações 5, 6, 7 e 8 a seguir.

- Massa específica do agregado seco

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (5)$$

Onde:

d - massa específica do agregado seco (g/cm³);

m - massa ao ar da amostra seca (g);

m_a - massa em água da amostra (g).

- Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca

$$d = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (6)$$

Onde:

d_s - massa específica do agregado na condição saturado superfície seca(g/cm³);

m_s - massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a - massa em água da amostra (g).

- Massa específica aparente

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (7)$$

Onde:

d_a - massa específica aparente do agregado seco (g/cm³);

m - massa ao ar da amostra seca (g);

m_s - massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a - massa em água da amostra na condição saturada superfície seca (g).

- Absorção de água

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

A - absorção de água (%);

ms - massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m - massa ao ar da amostra seca (g).

3.2.2. Dosagem do concreto

A dosagem do concreto foi realizada pelo método CIENTEC que utiliza valores médios das propriedades dos materiais através de tabelas pré-definidas para elaboração do traço. Para a elaboração do concreto foi considerado o traço 1 : 0,65 : 1,10 : 0,35 e *Slump* de 100 ± 20 mm.

Segundo o fabricante MM Fibras (2019), a quantidade de fibras estruturais adicionadas ao concreto deve sempre estar relacionada às cargas e demais solicitações do projeto. Ainda recomenda-se que esta dosagem esteja entre 3 a 12 kg/m³ de concreto, mais comumente utilizada em torno de 6 kg/m³ de fibras no concreto.

As porcentagens utilizadas nos teores foram definidas pelo cálculo da quantidade de fibras (kg/m³) pela massa específica do concreto convencional, geralmente encontrado como 2200 kg/m³. Baseado nestas informações definiu-se três teores de utilização de fibras para ensaio, que são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Teores de fibras empregados

Formulação	%	kg/m³
Referência	0	0
0,25%	0,25	6
0,50%	0,50	12

Fonte: Autora (2019).

3.2.3. Preparação dos corpos de prova

Os agregados miúdo e graúdo foram secos em estufa a 105°C por 24 horas e posteriormente armazenados em recipientes fechados até alcançarem a temperatura ambiente para serem utilizados. Em seguida, os materiais foram separados e pesados para a mistura de concreto ser realizada. Para execução do trabalho foram confeccionadas 4 formas de madeira de pinus, com dimensões internas de 15 cm x 15cm x 50cm apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Forma prismática utilizada



Fonte: Autora (2019)

Depois da separação e pesagem dos materiais, esses foram colocados na betoneira para realização da mistura seguindo a ordem: brita, areia, cimento Portland, água e fibras. Realizou-se o ensaio de determinação da consistência e logo após foram confeccionados 4 corpos de prova com a mistura de concreto, de forma que foram moldados em duas camadas com 75 golpes por camada para o adensamento manual, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) para corpos de prova prismáticos com dimensão d igual à 150 mm.

Após a moldagem foram deixados em repouso durante 48 horas sobre superfície estável seguido da desforma dos mesmos, conforme indicação da NBR 5738 (ABNT, 2015). Sua cura foi feita após deforma, no qual os corpos de prova foram submetidos à cura saturada em água com cal durante 96 horas, retirados e armazenados em local sem intempéries.

3.2.4. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

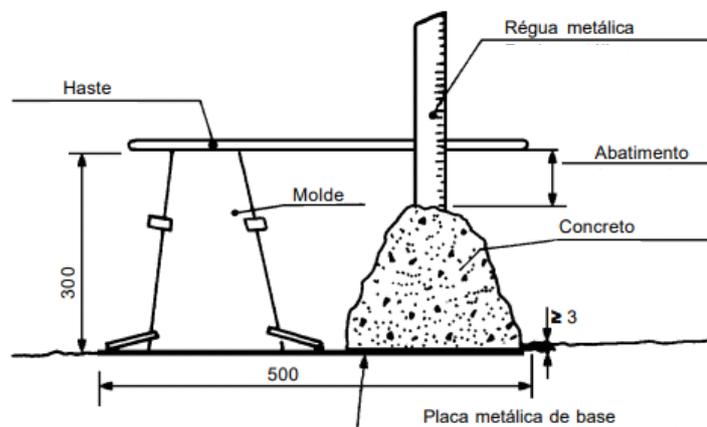
A consistência da mistura de concreto está ligada com a mobilidade da massa e a coesão entre seus componentes, sendo um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade do concreto. Com a mistura ainda em seu estado fresco, foi realizada a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, mais comumente conhecido como *Slump Test*, normatizado pela NBR 67 (ABNT, 1998).

Inicialmente foram umedecidas a placa metálica de base e o molde, posicionados em uma superfície rígida e plana para execução do ensaio. Em seguida o molde foi preenchido em três camadas com o auxílio de uma concha de seção U, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado. Cada camada foi compactada com 25 golpes com

auxílio da haste de socamento de maneira a distribuir uniformemente os golpes. Por fim, a superfície do concreto foi arrasada com uma desempenadeira e movimentos rolantes da haste de compactação.

Finalizada essa etapa, foi retirado o molde levantando-o cuidadosamente para posicioná-lo ao lado da amostra e medir o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova, conforme a ilustração da Figura 11.

Figura 11 - Determinação do abatimento de cone

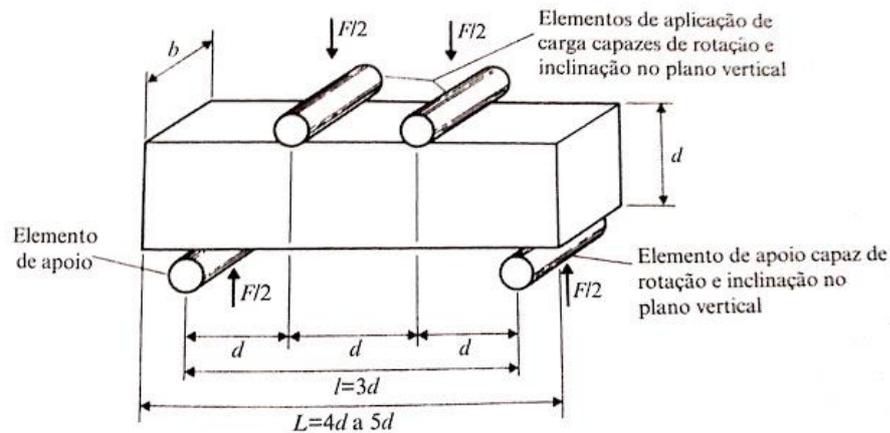


Fonte: ABNT NBR 67 (1998).

3.2.5. Ensaio de resistência à tração na flexão

Passados 28 dias de cura do concreto esses foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão, realizado no laboratório da Arteris Litoral Sul, em Joinville/SC. seguindo as diretrizes da NBR 12142 (ABNT, 2010). Posicionou-se o corpo de prova prismático no equipamento conforme a Figura 12 para sua realização.

Figura 12 - Esquema do ensaio de tração na flexão



Fonte: Neville e Brooks (2013).

O cálculo para o resultado da sua resistência à tração na flexão se dá pela Equação 9:

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bd^2} \quad (9)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (Mpa)

F - força máxima registrada na máquina de ensaio (N)

l - dimensão do vão entre apoios (mm)

b - largura média do corpo de prova (mm)

d - altura média do corpo de prova (mm)

3.2.6. Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Após o rompimento dos corpos de prova no ensaio de resistência à tração na flexão, foram separados testemunhos oriundos do rompimento de cada teor de fibra para execução do ensaio de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água do concreto, de acordo com NBR 9778 (ABNT, 2005).

Primeiramente foram secos os corpos de prova na estufa à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por período de 72h e resfriados à temperatura ambiente para pesá-los e determinar a massa seca da amostra. Em seguida foram submersos em água à temperatura $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante 72h e pesados para obtenção da sua massa imersa em água. E por fim foram secos superficialmente com papel absorvente e pesados para determinação da massa saturada com superfície seca.

Por meio dos valores obtidos nas pesagens foi possível determinar as propriedades físicas do concreto para cada teor de fibra utilizando as Equações 10, 11 e 12.

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (10)$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_i} \quad (11)$$

$$\text{Porosidade Aberta} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_i} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

M_{SSS} – Massa saturada com superfície seca (kg)

M_s – Massa seca em estufa (kg)

M_i – Massa imersa em água (kg)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

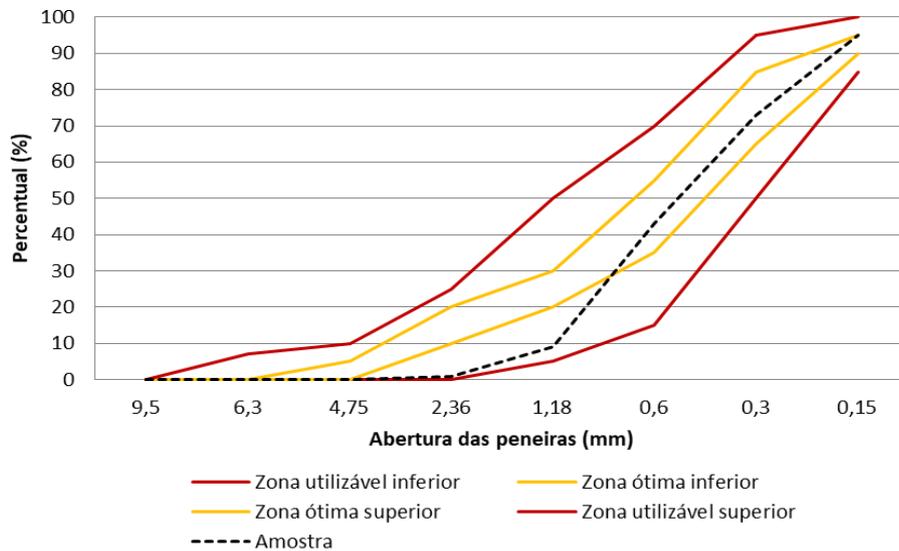
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na caracterização das matérias-primas e na caracterização do concreto, bem como os resultados do ensaio mecânico e ensaios físicos realizados com os corpos de prova em diferentes teores de fibras de polietileno.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1. Distribuição granulométrica

A partir dos dados coletados no ensaio de granulometria pode-se produzir a curva granulométrica do agregado miúdo conforme diretrizes da NBR 7211 (ABNT, 2009). Essas são apresentadas no Gráfico 1 onde se pode constatar que a curva do agregado permanece em toda a zona utilizável e uma parte encontra-se na zona ótima determinada pela norma.

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio também foi determinado o módulo de finura e o diâmetro máximo característico do agregado miúdo, exposto na Tabela 6. Pode-se afirmar que o agregado utilizado localiza-se na zona ótima, visto que a NBR 7211 (ABNT, 2009) diz que o módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

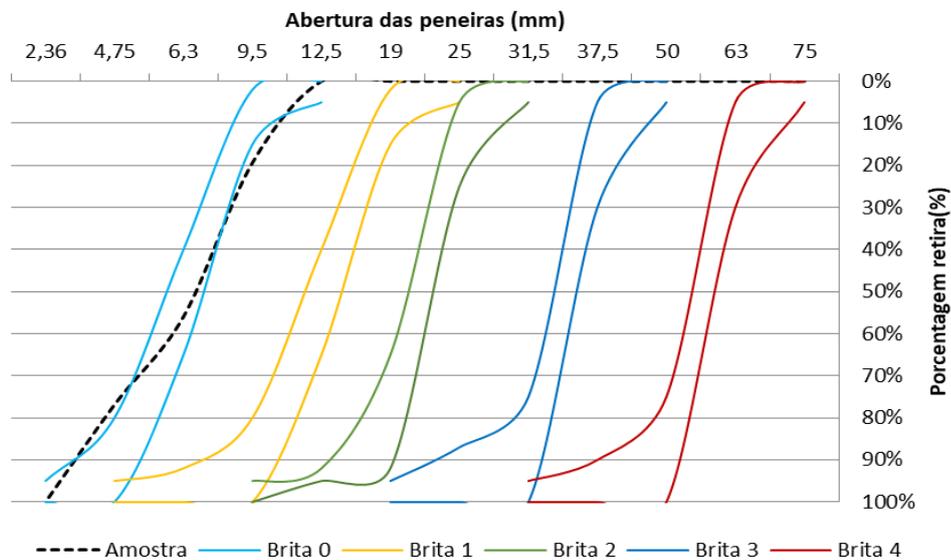
Tabela 6 - Características do agregado miúdo

Agregado Miúdo	
Módulo de finura	2,20
Dimensão máxima característica	2,4 mm

Fonte: Autora (2019).

Com os valores obtidos no ensaio para o agregado graúdo foi possível traçar a curva granulométrica do material e compará-la às curvas granulométricas de classificação de agregados graúdos conforme NBR 7211 (ABNT, 2009). Pode-se verificar no Gráfico 2 que a brita utilizada na elaboração do concreto se encontra na área classificada como brita 0. Seu DMD encontrado foi de 12,5 mm e seu módulo de finura como 2,54.

Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autora (2019)

4.1.2. Massa específica

A Figura 13 ilustra as pesagens realizadas no ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo.

Figura 13 - Pesagem do frasco (a); Pesagem do conjunto (b); Pesagem do conjunto mais água (c); Passagem da amostra após estufa (d)



Fonte: Autora (2019).

A partir das pesagens e execução dos cálculos obtiveram-se os resultados que são exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa específica do agregado miúdo

Propriedade	Agregado (g/cm³)
Massa específica do agregado seco(d ₁)	2,59
Massa específica do agregado saturado superfície seca(d ₂)	2,60
Massa específica (d ₃)	2,61

Fonte: Autora (2019)

As pesagens realizadas durante o ensaio de determinação de massa específica do agregado graúdo são ilustradas na Figura 14.

Figura 14 - Pesagens do agregado graúdo



Fonte: Autora (2019)

Com os dados das pesagens e os cálculos executados determinaram-se os resultados de massa específica e absorção de água do agregado graúdo, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa específica e absorção de água do agregado graúdo

Propriedades	Agregado (g/cm³)
Massa específica do agregado seco (d)	2,72
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (d _s)	2,61
Massa específica aparente (d _a)	2,55
Absorção de água	2,39%

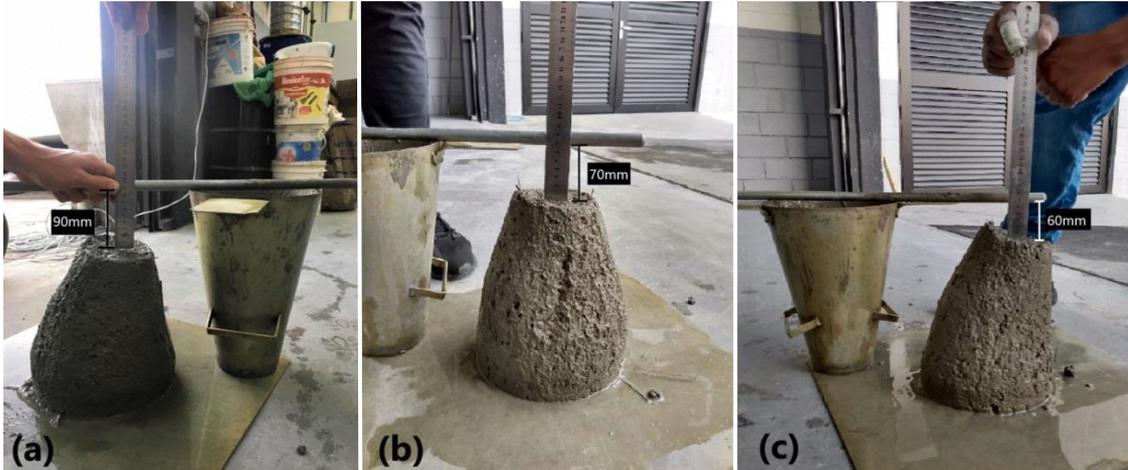
Fonte: Autora (2019)

4.2. PRODUÇÃO DO CONCRETO

4.2.1. Ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Como apresentado anteriormente, a determinação da consistência deve ser realizada em seu estado fresco, sempre que ocorrer alteração ou adição na mistura de concreto. A Figura 15 apresenta os ensaios executados para formulação referência (a), formulação com adição de 0,25% (b) e formulação com adição de 0,50% (c).

Figura 15 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: Autora (2019).

A Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio conforme as formulações utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone

Formulações	Abatimento (mm)
Referência	90
0,25%	70
0,50%	60

Fonte: Autora (2019).

Verifica-se que a formulação de referência está conforme o abatimento previsto para o traço considerado, já a formulação com 0,25% de adição de fibra sofre uma diminuição do seu abatimento, bem como a formulação de 0,50% de adição de fibra. Percebe-se que a formulação de 0,25% de fibras apresenta um *Slump* maior do que a formulação com 0,50% de fibra. Entretanto, apesar da mistura apresentar diminuição do seu abatimento conforme o aumento do teor de adição de fibras ao concreto, essa não apresentou aglomerados de fibras (ouriços) que condizem com a afirmação do fabricante MM FIBRAS (2019).

É evidente que a adição de fibras altera as condições de consistência do concreto e, conseqüentemente, a sua trabalhabilidade. Segundo Figueiredo (2000) isso acontece principalmente porque ao se adicionar à fibra ao concreto está se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Figueiredo (2011) ainda afirma que

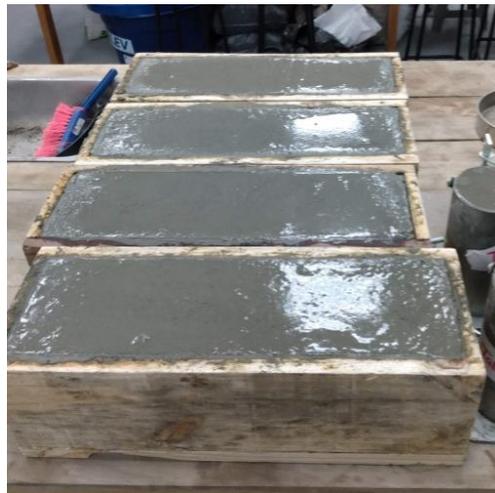
as fibras adicionadas à mistura de concreto poderão dificultar a mobilidade das partículas maiores fazendo assim com que se obtenha uma fluidez menor do material.

Segundo Bentur e Mindess (1990) a redução do *Slump* pode ser compensada usando aditivos superplastificantes ou aumentando o conteúdo de água na mistura até que se obtenha a trabalhabilidade desejada.

4.2.2. Preparação dos corpos de prova

Após a mistura dos materiais da massa de concreto na betoneira, o concreto foi colocado nas formas previamente preparadas com desmoldante, adensando em duas camadas com 75 golpes cada e sua superfície foi arrasada com auxílio de uma colher de pedreiro. Por fim os corpos de prova foram colocados em superfície estável para repouso até sua desforma, como apresenta da Figura 16.

Figura 16 - Corpos de prova em repouso após confecção



Fonte: Autora (2019).

4.2.3. Ensaio de resistência à tração na flexão

Concluído o tempo de cura de 28 dias dos corpos de prova, esses foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão. A prensa hidráulica utilizada foi preparada para as dimensões dos corpos de prova, de forma que a distância dos apoios inferiores até a borda do prisma fosse de 25mm, conforme indica a NBR 12142 (ABNT, 2010). O acionamento da carga foi realizado de forma manual e com velocidade constante. A Figura 17 ilustra como os corpos de prova foram posicionados.

Figura 17 - Corpo de prova posicionado na prensa hidráulica



Fonte: Autora (2019).

Após os ensaios de resistência à tração na flexão realizaram-se os cálculos necessários e os resultados obtidos de todos os corpos de prova rompidos são apresentados na Tabela 10.

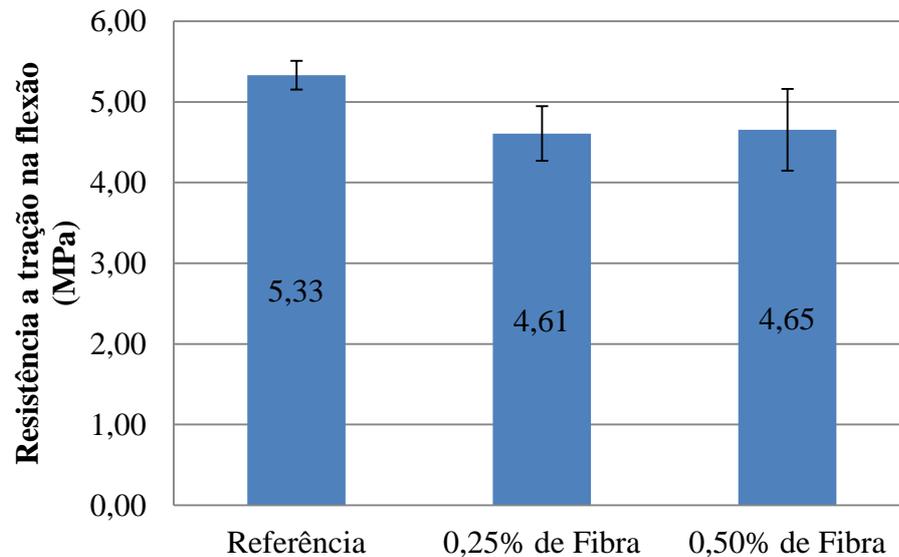
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração na flexão

Identificação do corpo de prova	Concreto Referência (MPa)	0,25% de Fibra (MPa)	0,50% de Fibra (MPa)
1	5,48	5,09	4,98
2	5,50	4,68	3,80
3	5,06	4,14	5,09
4	5,28	4,52	4,75

Fonte: Autora (2019).

Os resultados apresentados na Tabela 9 podem ser melhor visualizados no Gráfico 3, em que se observa a carga média de ruptura dos diferentes teores de fibras adicionados e o desvio padrão dos corpos de prova.

Gráfico 3 - Resultados de tração na flexão dos corpos de prova e o desvio padrão



Fonte: Autora (2019).

Observa-se uma redução da carga média suportada nas formulações com presença de fibras. Na formulação com 0,25% de fibras de polietileno a redução encontrada é de 15,50% quando comparada com a formulação referência e na formulação de 0,50% de fibras de 12,75%.

Uma justificativa para o resultado da resistência da formulação referência ser maior que o encontrado para as formulações com fibra é da diminuição da água de hidratação do cimento. Dado que, como dito anteriormente por Figueiredo (2000), com a adição das fibras na mistura está se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Outro fator que pode afetar o resultado da resistência à tração na flexão é a má compactação dos corpos de prova, de forma a criar porosidade e diminuir sua resistência.

Entretanto ao final do ensaio de resistência, os corpos de prova com presença de fibras apresentaram comportamentos mais favoráveis do que o referência, conforme apresenta a Figura 18 com os corpos de prova.

Figura 18 - Comportamentos ao final do ensaio de resistência a tração na flexão



Fonte: Autora (2019).

Onde:

- (a) Corpo de prova da dosagem referência;
- (b) Corpo de prova da dosagem de 0,25%;
- (c) Corpo de prova da dosagem de 0,50%.

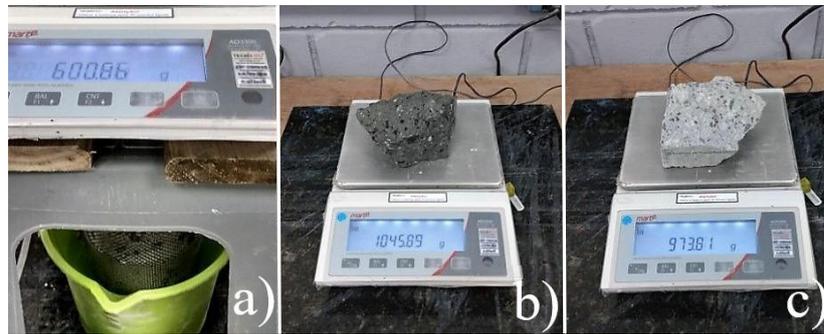
Nota-se que o concreto referência (0% de adição de fibra) apresenta um comportamento frágil e alcança seu colapso completo. Já o corpo de prova com 0,25% de fibras não se rompe por completo, apresentando fissuras que não se propagam devido à presença das fibras no concreto. O corpo de prova de 0,50% de adição de fibras também não se rompe por completo como na formulação citada anteriormente, porém apresenta uma abertura da fissura bem menos aparente.

Os comportamentos dos corpos de prova com fibras se justifica, uma vez que Pillar (2014) afirma que as fibras serão puxadas ao invés de se romperem, fazendo uma transferência de tensão da matriz frágil (concreto) para as fibras. Assim, o trabalho que será necessário para arrancar a fibra através da fissura melhora a capacidade de absorver energia durante a fratura, diminuindo a propagação e o aumento das fissuras.

4.2.4. Densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

Após o ensaio de tração na flexão, os testemunhos foram submetidos ao ensaio de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água. A execução das pesagens dos testemunhos é ilustrada na Figura 19.

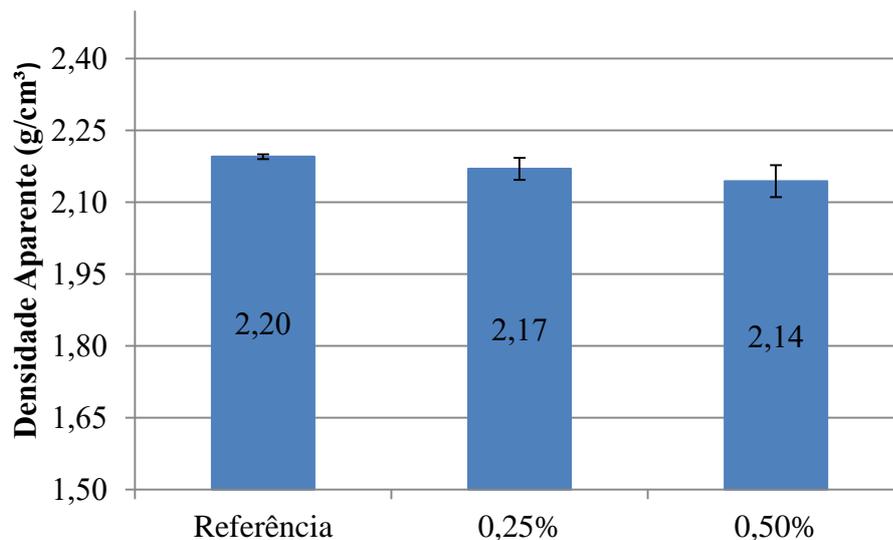
Figura 19 - Pesagens para ensaio de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água



Fonte: Autora (2019).

Realizados os cálculos do ensaio, obtiveram-se os resultados de densidade aparente, ilustrados no Gráfico 4 abaixo.

Gráfico 4 - Resultados de densidade aparente para diferentes teores de fibras

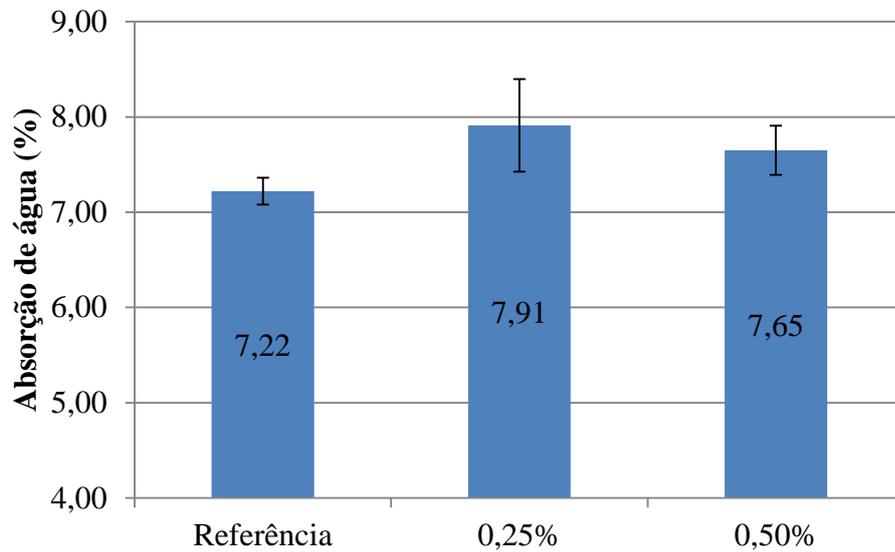


Fonte: Autora (2019).

Percebe-se uma diminuição da densidade conforme o aumento do valor das formulações da adição de fibras. Da formulação do concreto referência para a formulação com 0,25% de adição de fibras de polietileno ocorre uma diminuição de 1,15% na sua densidade. Já da formulação com de 0,50% de fibras há uma diminuição de 2,33% quando comparada com a referência, justificado pela densidade das fibras de polietileno que são incorporadas na mistura.

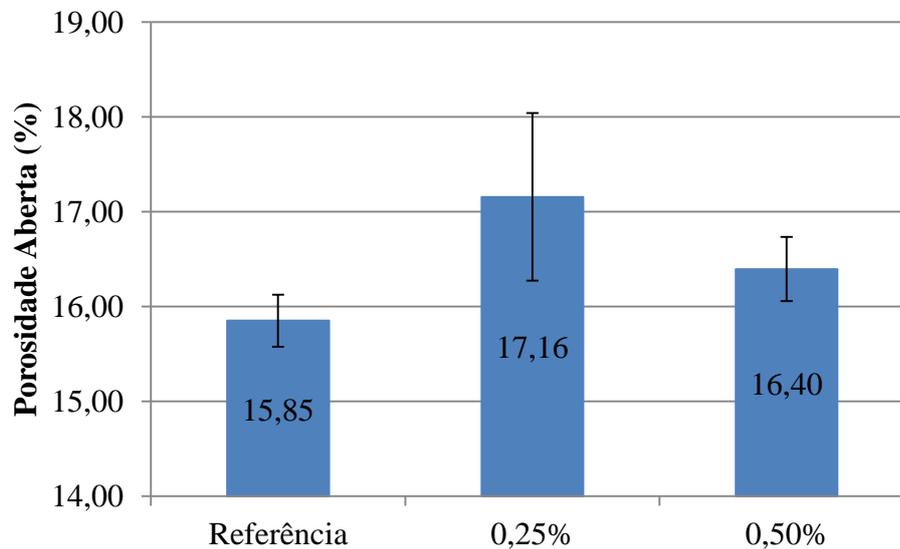
Além da densidade, obteve-se os resultados de absorção de água e porosidade aberta que são apresentados nos Gráficos 5 e 6, respectivamente.

Gráfico 5 - Resultados de absorção de água para diferentes teores de fibras



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 6 - Resultados de porosidade aberta para diferentes teores de fibras



Fonte: Autora (2019).

Verifica-se que a formulação com 0,25% de fibra é a que possui maior absorção de água e conseqüentemente uma maior porosidade aberta em sua mistura endurecida. As formulações de 0,25% e de 0,50% de fibras, quando comparadas ao concreto referência,

apresentam um aumento de 9,56% e 5,94% respectivamente em absorção de água, e porosidade aberta exibem um aumento de 8,23% e 3,43%.

Os resultados de absorção de água e porosidade podem estar diretamente relacionados com os resultados de resistência, visto que as formulações com presença de fibras apresentaram resultados inferiores ao concreto referência. Os resultados se justificam novamente pela menor quantidade de água de hidratação do cimento, visto que as fibras necessitam de água para sua molhagem, logo, uma maior porosidade aberta é identificada nas formulações.

5. CONCLUSÃO

O concreto reforçado com fibras poliméricas vem sendo bastante utilizado ao longo dos anos, contudo não possui uma norma regente para controle da sua qualidade e aplicação. Desse modo faz-se necessário verificar o comportamento do concreto reforçado com fibras de polietileno. Nas caracterizações dos agregados utilizados neste trabalho constatou-se que o agregado miúdo é classificado como areia média, seu DMD é 2,4 mm e seu módulo de finura é 2,20. Já o agregado graúdo foi classificado como brita 0 com DMD de 12,5 mm.

Nesse trabalho constatou-se também que a presença de fibras na mistura fresca de concreto acaba por afetar sua trabalhabilidade. Logo, conforme ocorre o aumento dos teores de fibras adicionados à mistura de concreto, sua trabalhabilidade diminui, podendo ser ajustada com a utilização de aditivos superplastificantes ou alterando a quantidade de água.

Quanto ao ensaio de tração na flexão, os corpos de prova com adição de fibras obtiveram resultados de resistência inferiores quando comparados ao concreto referência. Sendo que as resistências médias de tração na flexão entre as formulações de 0,25% de fibras e 0,50% de fibras acabaram por ficarem muito próximas, alcançando 4,61 MPa e 4,65 MPa respectivamente. Uma justificativa para esse acontecimento é a má compactação dos corpos de prova em sua elaboração, onde este está diretamente ligado com os resultados do ensaio de porosidade aberta.

Apesar disso, os corpos de prova com presença de fibra na sua mistura apresentaram comportamento positivo ao seu colapso, ocorrendo somente o aparecimento de fissuras e não o colapso total, diferente da formulação do concreto referência. Também conclui-se que conforme maior o teor de fibras, menor será a abertura da fissura, condizendo com as literaturas sobre o tema.

Por fim, nos ensaios físicos constate-se que conforme o aumento do teor de fibras adicionadas na mistura, menor sua densidade. Consequentemente também ocorre um aumento da sua absorção de água e porosidade aberta.

5.1. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Analisar o comportamento do CRF com maiores teores de fibras;
- Verificar o comportamento do CRF em ensaios de tenacidade;
- Comparar o comportamento de diferentes tipos de fibras sintéticas;

- Verificar o comportamento do CRF por resultados de tensão-deformação para diferentes teores de fibras poliméricas;
- Analisar a resistência à tração na flexão do concreto reforçado com fibras de polietileno.

REFERÊNCIAS

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

_____. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 12142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

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

ADÃO, Francisco Xavier; HEMERLY, Adriano Chequetto. **Concreto armado**: novo milênio - cálculo prático e econômico. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção**: Normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção 1**. 5 ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; MARIA, Luiz C. de Santa. **Polietileno**: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros: Ciência e tecnologia*, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

- ESPOSTO, Ricardo Francisco. **Avaliação das características mecânicas de compósitos de cimento Portland reforçados com fibras de polipropileno aditivadas com modificadores de superfície.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Centro de ciências exatas e de tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto com fibras de aço.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP, 2000.
- FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras.** 2011. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO (IBRACON). **CONCRETO & CONSTRUÇÕES.** São Paulo: IBRACON, v. 87. Jul/Set. 2017. ISSN 1809-7197.
- LUCENA, Júlio César Tavares de. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- MANO, Eloisa Biasotto. **Introdução a polímeros.** 2. ed. São Paulo: Editora Blücher, 1999.
- MM FIBRAS. **Macrofibras estruturais de polietileno.** São José, 2018. Disponível em: <https://www.mmfibras.com/untitled-c1enr>. Acesso em: 29 out. 2019.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Ibracon, 2008.
- MONTE, Renata. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos.** 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- PILLAR, Nora Maria de Patta. **Propriedades mecânicas nas primeiras idades como preditoras das tensões induzidas e fissuração de concreto projetado reforçado com fibras.** 2014. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- SALVADOR, Renan Pícolo. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.