

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONCRETO COM ADIÇÃO
DE MACROFIBRAS SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO
SUBMETIDO A MEIO AGRESSIVO**

TRESOR NSUMBU MBIYA

Orientadora: Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro
Co-orientadora: Profa. Dra. Joana Darc Silva Pinto

Belo Horizonte
2019

Tresor Mbiya Nsumbu

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONCRETO COM ADIÇÃO
DE MACROFIBRAS SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO
SUBMETIDO A MEIO AGRESSIVO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de Concentração: Tecnologia na Construção Civil.

Linha de Pesquisa: Materiais de Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro

Co-Orientadora: Profa. Dra. Joana Darc Silva Pinto

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

N961a

Nsumbu, Tresor Mbiya.

Análise de desempenho do concreto com adição de macrofibras sintéticas de polipropileno submetido a meio agressivo [recurso eletrônico] / Tresor Mbiya Nsumbu. – 2019.

1 recurso online (72 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Carmen Couto Ribeiro.

Coorientadora: Joana Darc Silva Pinto.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 68-72.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Concreto - Teses. 4. Durabilidade (Engenharia) - Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto. II. Pinto, Joana Darc da Silva. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)

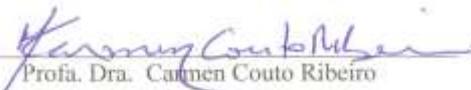
TRESOR MBIYA NSUMBU

**"ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE
MACROFIBRAS SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO SUBMETIDO A MEIO
AGRESSIVO"**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2019

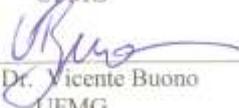
BANCA EXAMINADORA



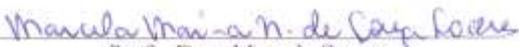
Prof.ª. Dra. Carmen Couto Ribeiro
Orientadora
UFMG



Prof.ª. Dra. Danielle Meireles de Oliveira
UFMG



Prof. Dr. Vicente Buono
UFMG



Prof.ª. Dra. Marcela Soares
CEFET/MG

AGRADECIMENTO

Agradeço,

Em primeiro lugar a Deus, autor da vida, por me proporcionar essa vitória.

A todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram na realização deste sonho que se tornou uma realidade, e em especial:

Aos meus pais, na República Democrática do Congo, que se encontram no outro lado do Oceano e não puderam participar deste momento ímpar de seu filho, pela formação do meu caráter, apoio constante e pelo exemplo de vida.

À minha esposa, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

À Prof.^a Dr.^a Carmen Couto Ribeiro, pela orientação e por ter contribuído para ampliar minha capacidade de análise crítica e visão da sociedade.

À Prof.^a. Dr.^a Joana Darc Silva Pinto, pela co-orientação, pela importante contribuição, pelo incentivo e apoio fundamental.

Ao doutorando Felipe Souza de Abreu, por sua importante contribuição neste trabalho.

Aos professores do Departamento de Materiais e da Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, pelo apoio essencial em todas as etapas da realização do meu mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG,

Adimilson Caetano e Ariela Monteiro pelo apoio e presteza.

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção da UFMG, Ricardo Barbosa e Ederson Correa, pelo apoio e dedicação em todas as etapas de ensaios dos concretos.

A Benhur Brescia e Cibele Brescia pelas fibras cedidas a fim de realizar este trabalho.

Aos Engenheiros Pietro Araújo e João Felipe Martins Abala da MC-Bauchemie pelas proteções superficiais cedidas.

RESUMO

Inúmeras pesquisas vêm abordando as vantagens de utilização de compósitos na construção civil. Dentre esses compósitos, está o concreto com fibras incorporadas, que apresenta características modificadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. As fibras na matriz cimentícia reduzem a propagação de fissuras, sendo que as mais utilizadas são as fibras de aço e sintéticas. As macrofibras sintéticas têm sido cada vez mais utilizadas devido ao seu baixo custo, leveza, e, sobretudo, por serem inertes. Esta dissertação teve como objetivo analisar o desempenho do concreto reforçado com 1% de macrofibras sintéticas de polipropileno comparado ao concreto de referência submetido a meio agressivo. A partir do estudo de dosagem foi selecionado e produzido concreto de referência com 370 kg/m^3 de cimento, relação água/cimento 0,50 e aditivo plastificante, que apresentou resistência à compressão de 27,4 MPa, resistência à tração indireta de 7,5 MPa e absorção menor que 10%, o que o caracteriza como um concreto durável, podendo ser submetido a classe de agressividade II segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). O concreto reforçado com 1% de fibras foi produzido com as mesmas características do concreto de referência e apresentou resistência à compressão de 33,3 MPa e resistência à tração indireta de 10,8Mpa, o que permite comprovar a eficiência das macrofibras como reforço a matriz cimentícia, reduzindo a propagação de fissuras e aumentando a resistência mecânica. A avaliação da durabilidade foi feita imergindo corpos de prova de concreto, sem e com proteção superficial, em uma solução de ácido sulfúrico, e os parâmetros analisados foram: inspeção visual, absorção de água, perdas de massa e perdas de resistência. Os resultados demonstraram que o concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno apresentou melhor desempenho que o concreto de referência. No que se refere às duas proteções superficiais analisadas, a de poliuretano e a de epóxi, a proteção epóxi apresentou uma melhor aderência ao substrato e também maior eficiência ao reduzir a penetração do agente agressivo, minimizando a degradação e conseqüentemente aumentando a durabilidade do concreto reforçado com fibras.

Palavras-chave: Concreto; Durabilidade; Macrofibras sintéticas; Meio agressivo.

ABSTRACT

Numerous studies have approached the advantages of using composites in construction. Among these composites, concrete is embedded with fibers, having characteristics both changed in the fresh state and in the hardened state. The fibers in the cementitious matrix reduces crack propagation, and the most used are steel and synthetic fibers. The synthetic macrofibers have been increasingly used due to their low cost, light weight, and especially because they are inert. This work aimed to analyze performance concrete reinforced with 1% polypropylene synthetic macrofibers compared to the reference concrete subjected to the aggressive environment. From the dosage study was selected and produced with reference concrete 370 kg / m³ of cement, water / cement ratio 0.50 and plasticizer additive, which showed compression strength of 27.4 MPa, tensile strength of 7.5 MPa indirect and less than 10% absorption, which is characterized as a durable concrete may be subjected to aggression class II according to NBR 6118 (ABNT, 2014). The concrete reinforced with 1% fiber was produced with the same characteristics of the reference concrete and showed compression strength of 33.3 MPa and Traction Resistance indirect 10.8 MPa, which allows to check the effectiveness of the matrix as reinforcement macrofibers cement, crack propagation reducing and increasing the mechanical strength. The evaluation of durability was made by immersing concrete specimens with and without surface protection in a sulfuric acid solution, and parameters were analyzed: visual inspection, water absorption, weight loss and strength loss. The results showed that the concrete reinforced with polypropylene synthetic macrofibers showed better performance than the reference concrete. With regard to the two superficial protections analyzed, the polyurethane and epoxy, the epoxy protection presented better adhesion to the substrate and also more efficient by reducing the penetration of aggressive agent, thereby increasing the durability of fiber reinforced concrete

Key words: Concrete. Synthetic macrofibers. Durability. Aggressive environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Classificação geral das fibras -----	22
Figura 3.2 - Mecanismos de transferência de tensões entre matriz e fibras -----	26
Figura 3.3 - Papel de fibras como reforço da matriz cimentícia-----	26
Figura 3.4 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto -----	27
Figura 3.5 - Fatores que afetam a durabilidade do concreto -----	30
Figura 3.6 - Visão holística da durabilidade-----	31
Figura 3.7 - Fontes de ataque por sulfatos -----	34
Figura 3.8 - Mecanismo de ataque por íons sulfatos -----	34
Figura 3.9 - Processo de deterioração do concreto por íons sulfatos -----	35
Figura 3.10 - Sistemas de proteção superficial dos concretos: (a) Formadores de película; (b) Bloqueadores de poros; Hidrofugantes de superfície. -----	37
Figura 4.1 - O preparo de mistura do concreto reforçado com fibras-----	40
Figura 4.2 - Acondicionamento dos corpos de prova na câmara úmida-----	41
Figura 4.3 - Processo de cura dos corpos de provas-----	42
Figura 5.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo-----	46
Figura 5.2 - Curva granulométrica do agregado graúdo-----	47
Figura 5.3 - Comprimento da fibra de polipropileno-----	48
Figura 5.4 - Rompimento do corpo de prova por ensaio da compressão axial -----	50
Figura 5.5 - Ensaio de abatimento (SlumpTest) -----	55
Figura 5.6 - Rompimento à tração indireta -----	55
Figura 5.7 - Comportamento da resistência à tração indireta -----	56
Figura 5.8 - O papel de fibra como um obstáculo ao desenvolvimento de fissuras -----	57
Figura 5.9 - Avaliação visual de aderência fibra-matriz através de lupa microscópica-----	58

Figura 5.10 – Ataques dos corpos de provas	59
Figura 5.11 - Inspeção visual dos corpos de provas	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais compostos químicos do clínquer -----	17
Tabela 3.2 - Tipos de cimento Portland em função das adições -----	18
Tabela 3.3 - Propriedades de diversas fibras sintéticas -----	24
Tabela 3.4 - Características dos principais sistemas de proteção para concreto - -----	38
Tabela 5.1 - Ensaio de caracterização do cimento CPIIE-32 -----	44
Tabela 5.2 - Ensaio de caracterização de areia -----	45
Tabela 5.3 - Ensaio de caracterização da brita gnaisse -----	46
Tabela 5.4 - Características da fibra de polipropileno -----	48
Tabela 5.5 - Dosagem do concreto de referência -----	49
Tabela 5.6 - Primeira dosagem -----	51
Tabela 5.7 - Segunda dosagem -----	51
Tabela 5.8 - Terceira dosagem -----	52
Tabela 5.9 - Quarta dosagem -----	52
Tabela 5.10 - Quinta dosagem -----	53
Tabela 5.11 - Resistência à compressão axial da dosagem selecionada -----	54
Tabela 5.12 - Absorção por imersão dos concretos sem e com revestimentos -----	61
Tabela 5.13 - Resultados das perdas de massas -----	62
Tabela 5.14 - Resistência à compressão axial antes e depois do ataque -----	63

LISTA DE SIGLAS

ACI - American Concrete Institute

CR – Concreto de referência

CRF - Concreto reforçado de fibras

CPs – Corpos de prova

ETE – Estação de Tratamento de Esgotos

DEMC - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

Fck - Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

MPa - Megapascal

MG - Minas Gerais

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

Kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

l/m³ - Litro por metro cúbico

mm - Milímetro

GPa - Gigapascal

UFMG -Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1.	Objetivos específicos	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1.	Concreto e suas propriedades	16
3.1.1	Materiais constituintes do concreto.....	16
3.1.2	Resistência à compressão	19
3.1.3	Permeabilidade e absorção de água.....	20
3.2	Concreto reforçado com Fibras	20
3.2.1	Tipos de fibras.....	22
3.2.2	Importância das fibras na matriz cimentícia.....	25
3.3	Durabilidade do concreto	28
3.4	Mecanismo do ataque por sulfato e cloreto	32
3.4.1	Mecanismos de ataque por sulfatos.....	33
3.5	Camadas protetoras dos concretos	36
4	METODOLOGIA	39
4.1	Dosagem dos concretos	39
4.2	Produção dos concretos	40
4.3	Análise dos concretos no estado fresco	41
4.5	Análise dos concretos no estado endurecido	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Caracterização dos Materiais	44
5.1.1	Cimento Portland.....	44
5.1.2	Agregado miúdo	45
5.1.3	Agregados graúdos.....	46
5.1.4	Fibras.....	47
5.2	Dosagem dos Concretos	48
5.3	Resistência dos concretos	49
5.3.1	Ensaio de Compressão Axial	49
5.3.2	Ensaio de resistência à tração indireta.....	55
5.4	Interface Matriz - Fibra	56
5.4.1	Visualização do papel das fibras como obstáculo à propagação de fissuras	56
5.4.2	Visualização de aderência Matriz-Fibras	57
5.5	Avaliação das camadas protetoras através de ataques acelerados dos concretos	58
5.5.1	Inspeção visual do processo de degradação dos corpos de prova	59

5.5.3	Perdas de massa dos corpos de provas	62
5.5.4	Resistência à compressão com e sem proteção antes e após ataque.....	63
6	CONCLUSÕES	65
7	SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção civil mais consumido em quase todo mundo. E este destaque se dá por causa das vantagens que lhe são atribuídas, tais como facilidade de encontrar os seus constituintes a um custo relativamente baixo e a capacidade de resistir a esforços, principalmente os de compressão, apresentando uma durabilidade importante. Embora possua essas vantagens, nem sempre o concreto preenche certos requisitos que possam caracterizá-lo como resistente. De uma forma geral, o concreto responde muito bem quando solicitado à compressão conforme dito anteriormente, porém apresenta baixa resistência aos esforços de tração, permanecendo em torno de 10% em relação à resistência à compressão. Esta baixa resistência à tração é responsável pela aparição de fissuras e constitui um ponto vulnerável, pois forma um caminho preferencial para o transporte de fluidos e gases através do concreto, reduzindo assim, substancialmente, a durabilidade do mesmo (METHA e MONTEIRO, 2006; RIBEIRO et.al. 2013).

Para remediar tais desvantagens, várias pesquisas têm abordado a associação de outros materiais aos convencionais, formando compósitos. Dentre eles, tem-se o concreto com incorporação de fibras, que apresenta características modificadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (FIGUEIREDO, 2011). Entre as fibras mais utilizadas, estão as fibras de aço, as sintéticas, as de vidro e as fibras naturais. As fibras sintéticas, em particular as macrofibras sintéticas de polipropileno, objeto deste estudo, têm ganhando cada vez mais o espaço no seu uso como reforço a matriz cimentícia. Esse interesse pelas fibras sintéticas é comprovado pelas pesquisas já realizadas com esta temática. Cita-se, por exemplo, o trabalho que analisou comparativamente de concreto reforçado com as macrofibras sintéticas e com fibras de aço. Os autores, Salvador e Figueiredo (2014), concluíram que se deve determinar o teor de equivalência das macrofibras sintéticas para que se possam substituir convenientemente fibras de aço no concreto. Quando o fator determinante estiver relacionado com o custo e a durabilidade, esta substituição pode se tornar uma alternativa extremamente relevante, pois o custo da produção das fibras sintéticas é bem menor do que as de aço e, em meio agressivo, elas podem se comportar melhor sem sofrer corrosão. Já em comparação com as fibras de vidro, as sintéticas apresentam um custo de produção de aproximadamente 10

vezes menor, e também não apresentam efeitos prejudiciais ao ambiente interno do concreto (MU et al.2002).

Tendo em vista as vantagens supracitadas, o presente trabalho se propôs a analisar o desempenho e a durabilidade de concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno quando submetido a meio agressivo. Para isto, foram confeccionados corpos de provas com dois tipos de compósitos: o primeiro sem adição, ou concreto de referência, e o concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno. Após o período da cura de 28 dias, foram realizados diversos ensaios para avaliar o desempenho mecânico destes corpos de prova. E também foi feita a avaliação da durabilidade através de imersão dos mesmos em uma solução de ácido sulfúrico.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno submetido a um ambiente agressivo, e compará-lo com concreto de referência submetido às mesmas condições.

2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão divididos entre as seguintes etapas:

- Selecionar e caracterizar os materiais utilizados: cimento, areia, brita e fibras;
- Produzir, avaliar e comparar concreto de referência com um concreto reforçado com fibras, visando atender aos requisitos de resistência à compressão, à tração indireta e durabilidade;
- Realizar ensaios de absorção de água por imersão, para verificar a influência da porosidade na vulnerabilidade dos concretos ao ingresso do agente agressivo;
- Avaliar o desempenho do concreto reforçado de macrofibras e de concreto de referência, antes e depois de exposição aos ataques;
- Analisar a eficiência e o desempenho da camada protetora aplicada aos concretos com fibras e sem fibras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a seguir aborda conceitos sobre o concreto, seus materiais constituintes, e algumas propriedades. Também faz uma abordagem sobre o concreto reforçado com fibras, a durabilidade do concreto e uso das proteções desenvolvidas atualmente, a fim de assegurar ao concreto uma proteção superficial satisfatória contra os agentes químicos agressivos.

3.1. Concreto e suas propriedades

O concreto é um material de larga utilização na indústria da construção civil. Ele é composto por aglomerantes, sendo o mais utilizado o cimento Portland, os agregados miúdos e graúdos, e a água, podendo conter ou não adições minerais e aditivos químicos, permitindo a melhora do seu desempenho mecânico.

Embora o concreto tenha várias propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, a resistência à compressão tem sido considerada como a mais importante, pois é um parâmetro determinante que revela a qualidade e as características dos materiais envolvidos (MEHTA e MONTEIRO, 2006; RIBEIRO et.al. 2013). Devido a sua heterogeneidade, faz-se necessário estudar todos os seus componentes, pois tais podem influenciar o produto final.

3.1.1 Materiais constituintes do concreto

A qualidade do produto final, que é o concreto, depende inteiramente do conhecimento e qualidade dos elementos que o compõem. Sendo assim, a seguir são apresentadas algumas considerações sobre os constituintes do concreto.

Cimento Portland

O cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil, se apresenta em forma de pó e também é conhecido como um aglomerante hidráulico, pois em contato com água, desenvolve propriedades adesivas e coesivas, tornando-se um sólido com uma resistência à água e outros agentes agressivos. A designação Portland é devido a semelhança do calcário conhecido com a pedra Portland extraído em Dorset, na Inglaterra (NEVILLE, 2016; RIBEIRO et.al. 2013).

O cimento Portland é obtido basicamente a partir do processo de calcinação das matérias primas (calcário e argila) em uma temperatura de aproximadamente 1450° C. A reação de calcinação concluída leva a formação de clínquer que, após o resfriamento, é moído com adição de sulfato de cálcio (gesso), formando finalmente um pó fino, o cimento Portland. Na Tabela 3.1 estão os compostos químicos do clínquer depois do resfriamento e da moagem (RIBEIRO et al. 2013).

Tabela 3.1 - Principais compostos químicos do clínquer

Compostos	Fórmula Química	Abrev.	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 50 – 65%	C_3S	Endurecimento rápido, alto calor de hidratação, alta resistência inicial.
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 15 – 25%	C_2S	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação, baixa resistência inicial.
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 6 – 10%	C_3A	Pega muito rápida controlada com adição de gesso, suscetível ao ataque de sulfatos, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final.
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 3 – 8%	C_4AF	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não tem contribuição para resistência, cor escura.
Cal livre	CaO 0,5 – 1,5%	C	Aceitável somente em pequenas quantidades; em maiores quantidades, causa aumento de volume e fissuras.

Fonte: Ribeiro et al. 2013.

Além dos elementos mostrados na Tabela 3.1, os diferentes tipos de cimentos existentes no mercado são diferenciados por suas propriedades e diferentes adições, tais como: escória de alto-forno, pozolana, materiais carbonáticos e outros.

Os principais tipos de cimento Portland, normalizados pela ABNT em função das adições, estão relacionados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Tipos de cimento Portland em função das adições

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			
		Clínquer	Escoria	Pozolana	Materiais Carbonáticos
CP comum sem adição	CP I	100	0	0	0
CP comum com adição	CP I-S	95 - 99	-	1 - 5	
CP composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10
CP composto com material pozolânico	CP II-Z	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10
CP composto com material carbonático	CP II-F	90 - 94	-	-	6 - 10
CP de alto-forno	CP III	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5
CP pozolânico	CP IV	50 - 85	-	15 - 50	0 - 5
CP de alta Resistência Inicial	CP V ARI	95 - 100	0	0	0 - 5

Fonte: Ribeiro et al. 2013.

Com exceção dos tipos de cimento apresentados na Tabela 3.2, existem outros tipos desenvolvidos para proporcionar ao produto final certas características especiais e, sobretudo, garantir a durabilidade sob diversas condições de uso (NEVILLE, 2016). Outros tipos de cimentos desenvolvidos em função do uso são:

- Cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- Cimento Portland resistente aos sulfatos ou o cimento com baixo teor de C_3A ;
- Cimento Portland branco e pigmentado: mais empregados para fins arquitetônicos;
- Cimento Supersulfatado: usualmente na Europa, é um tipo de cimento conforme comentado por Neville (2016), que pode resistir melhor sem ser deteriorado em condições de pH inferior a 3,5;
- Outros cimentos: cimento bactericida (previne a fermentação microbológica) e cimento hidrófugo (forma uma película repelente ao redor de cada partícula de cimento).

Agregados

Os agregados como constituintes precisam apresentar uma qualidade inquestionável, pois são responsáveis por aproximadamente 75% do volume total do concreto. A maioria das propriedades mecânica do concreto, em seu estado fresco e endurecida, é influenciada pelas características dos agregados, entre elas a resistência mecânica, porosidade, densidade, módulo de deformação, etc. Os agregados utilizados em concreto devem possuir características como a qualidade, a mineralogia, a forma e textura superficial e composição granulométrica, resistência mecânica, absorção e umidade superficial e isenção de substâncias nocivas para garantir a formação de um bom concreto (NEVILLE 2016; RIBEIRO et al. 2013).

Os agregados podem ser classificados de acordo com a dimensão de seus grãos (miúdos ou graúdos). Os miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira 4,8 mm e ficam retidos na peneira 0,075 mm, como por exemplo, a areia. E os graúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira 76 mm e ficam retidos na peneira 4,8 mm: a brita é um exemplo (RIBEIRO et al. 2013).

3.1.2 Resistência à compressão

De acordo com Neville (2016), embora outras características como durabilidade e permeabilidade possam ser primordiais e exigidas em muitas situações, a resistência à compressão do concreto é tida como uma propriedade importante, pois por meio dela se pode ter uma ideia sobre a qualidade dos materiais envolvidos (cimento, agregados miúdos e agregados graúdos), e do próprio concreto. Tendo esses materiais em bom estado e qualidade inquestionável, o único parâmetro capaz de influenciar negativa ou positivamente a resistência é a relação água-cimento. E a subdivisão da resistência do concreto em função de f_{ck} é especificada através da NBR 8953 (ABNT, 2015) que estabelece as classes do concreto em função de sua massa específica, resistência à compressão axial e consistência. A norma citada se aplica a diferentes tipos de concreto: concretos leves, normais ou pesados, misturados em canteiro de obra ou dosados em central, no próprio local da obra ou fora dela,

utilizados em elementos de concreto simples, armado ou protendido, bem como em elementos armados com perfis rígidos de aço.

3.1.3 Permeabilidade e absorção de água

A durabilidade do concreto depende muito da facilidade com que os fluidos podem penetrar e se movimentar no interior do mesmo. A permeabilidade é a propriedade responsável pelo estudo da percolação dos fluidos no concreto, e é um parâmetro importante, sendo dependente da porosidade capilar. A existência dos poros e a sua interconexão faz com que o concreto se torne mais permeável. E no concreto, o seu coeficiente diminui substancialmente com a diminuição da relação a/c (NEVILLE, 2016).

A absorção normalmente mede o volume de poros no concreto e é diferente da facilidade com o qual os fluidos podem penetrar na matriz cimentícia. E segundo o Neville (2016), a absorção de água não pode ser usada como medida de qualidade de um concreto, porém a grande maioria dos concretos de boa qualidade apresenta uma absorção abaixo de 10%. Portanto, um concreto durável necessariamente deve ser menos poroso possível, dificultando a penetração de agentes agressivos.

3.2 Concreto reforçado com Fibras

O concreto, como já mencionado, é um material importante e amplamente utilizado na indústria da construção civil, podendo ser visto facilmente em diversos tipos empreendimentos. A mistura dos seus constituintes (aglomerantes, agregados, águas e aditivos) deve satisfazer as exigências requeridas no projeto, principalmente a de resistência a compressão. Apesar de existirem outras propriedades, a resistência à compressão se apresenta como sendo a mais importante, pois por meio dela se pode obter uma noção mais clara sobre a qualidade dos materiais envolvidos na produção do concreto e especificados no projeto estrutural. Mas, apesar do concreto ser o material mais importante e conseguir atingir o

quesito de resistência estipulado no projeto, nem sempre ele atende às outras necessidades também importantes como a durabilidade (NEVILLE, 2016).

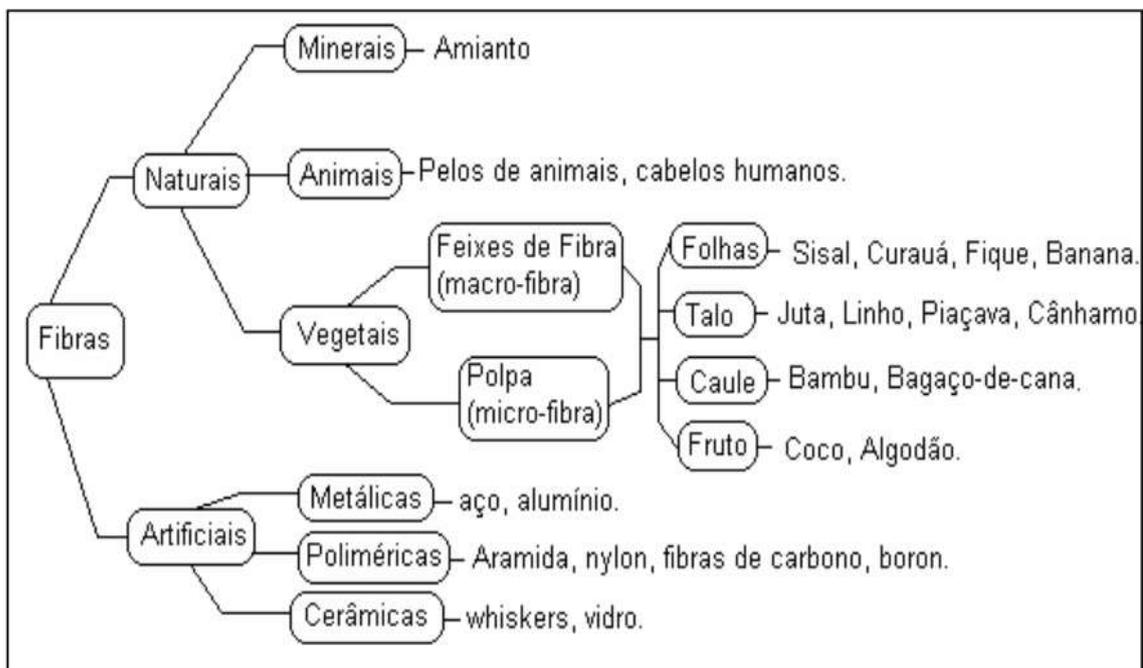
A redução da vida útil das estruturas do concreto em grande maioria dos casos tem o seu início na retração plástica, enquanto o concreto está ainda no seu estado fresco. A redução do volume do concreto por evaporação (retração) constitui um dos sérios problemas das estruturas de concreto armado, pois determina efetivamente a durabilidade. De acordo Giroto et al. (2014), independentemente do tipo de retração (plástica, endógena ou por secagem), ela é responsável por causar fissurações, devido à diminuição do volume do concreto, sendo este o fator comprometedor da vida útil de estruturas de concreto armado, porque aumenta a possibilidade de ingresso dos agentes agressivos.

Dentre as soluções existentes para tal problema, tem-se o uso das fibras, que surgiu como uma alternativa para remediar a fissuração devida à retração do concreto. É importante mencionar que reforçar certas matrizes frágeis pelo uso das fibras não é um tema atual. Há, por exemplo, relatos do Egito antigo de incorporação de palhas em argilas para fazer tijolos, conseguindo-se assim maior resistência à flexão e, conseqüentemente, uma boa manipulação após seu cozimento ao sol (METHA e MONTEIRO, 2006). Apenas em recentes décadas a comunidade científica despertou para estudar e pesquisar este assunto, tendo em vista a necessidade de garantir a durabilidade das estruturas. Os primeiros trabalhos publicados dedicaram-se a estudar as fibras de aço e vidro, e posteriormente, as fibras sintéticas e naturais (FIGUEIREDO, 1999). Atualmente, vários estudos têm sido realizados, tendo como vertente não somente a incorporação de fibras na matriz cimentícia, mas também de outros elementos com intuito melhorar as propriedades do concreto conforme as solicitações e exposição do meio. Assim, define-se o concreto reforçado de fibras (CRF) como sendo um novo concreto, diferente do convencional, que apresenta características e propriedades modificadas devido à presença de fibras descontínuas incorporadas em sua matriz. De uma forma geral, a incorporação das fibras melhora o comportamento pós-fissuração, controlando a abertura e a propagação das fissuras, a resistência à fadiga e a resistência à tração. A Figura 3.1 retrata as diferentes fibras existentes.

3.2.1 Tipos de fibras

Quanto ao tipo de fibras, o American Concrete Institute (ACI) classifica basicamente as fibras em quatro categorias, que são: as fibras de aço, as de vidro, as sintéticas e as fibras naturais. Embora possam existir vários tipos, esta classificação apresenta apenas as fibras mais utilizadas como reforço a matriz cimentícia. A Figura 3.1 mostra a variedade de fibras amplamente utilizadas como reforço ao concreto.

Figura 3.1 - Classificação geral das fibras



Fonte: Picanço (2005).

- Fibras metálicas

As fibras de aço são as mais utilizadas por apresentarem valores expressivos de resistência à tração e são classificadas com fibras de alto módulo de elasticidade, pois resistem e conseguem garantir por mais tempo o reforço mesmo depois da ruptura da matriz cimentícia. O custo das fibras de aço é bem mais alto que as outras fibras empregadas na construção civil e, por sofrer o processo de corrosão, as fibras de aço podem influenciar a redução da

durabilidade do concreto quando expostas a um meio agressivo (ACI 544.1R-96; FIGUEIREDO, 2011).

- Fibras de vidro

O ambiente do concreto é totalmente alcalino com um pH em torno de 14, inviabilizando a incorporação das fibras de vidro. Conforme comentado por Bentur e Mindens (1990), a exposição das fibras de vidro a um meio alcalino pode ocasionar uma acelerada degradação, podendo resultar em perda excessiva de massa e resistência da matriz.

- Fibras naturais

A falta de recursos e a necessidade de atender as questões da sustentabilidade têm levado inúmeros pesquisadores a encontrarem nos recursos naturais alternativas interessantes para suprir certas deficiências dos materiais de construção civil. Tem-se, por exemplo, o uso de fibras naturais incorporadas ao concreto. As fibras naturais estão disponíveis em grandes quantidades na maioria dos países, podem ser obtidas a um custo muito baixo e não necessitam passar por nenhum processo industrial para a sua utilização como reforço na matriz cimentícia. As fibras naturais são consideradas como recursos renováveis, diferentemente de outras fibras.

Contudo, Juarez. C et al. (2009) assim com outros pesquisadores, apontaram algumas deficiências no uso de fibras naturais no concreto, como por exemplo a fragilidade e a baixa aderência entre fibra-matriz, sendo esta desvantagem reduzida quando as fibras são submetidas a tratamentos prévios antes de seu uso em compósitos cimentícios. Outra deficiência atribuída às fibras naturais é a perda de sua capacidade como elemento de reforço ao concreto em longo prazo, devido a sua degradação em meio alcalino. Tolêdo filho, et al (2000), comentaram sobre essa desvantagem que apresentam as fibras naturais, quanto à perda de suas características quando incorporadas na matriz. De acordo com os autores, esta perda se dá pela desintegração da lignina e hemicelulose, elementos constituintes da grande maioria de fibras, ao reagirem com o hidróxido de cálcio presente em materiais cimentícios.

Atualmente, para remediar o problema da falta de aderência entre fibras e matrizes é feito tratamento na superfície das fibras. Assim, o uso das fibras naturais para os fins deste trabalho também se torna inviável.

O uso de fibras sintéticas (poliméricas) vem ganhando importância, com destaque especial para fibras de polipropileno. Essas fibras sintéticas são subdivididas em duas categorias: as fibras monofilamento (microfibras) que possuem um diâmetro inferior a 0,3 mm e as macrofibras com um diâmetro superior a 0,3 mm (RICHADSON e LANDLESS, 2009). A Tabela 3.3 apresenta as propriedades de algumas fibras sintéticas.

Tabela 3.3 - Propriedades de diversas fibras sintéticas

Tipo de Fibra	Diâmetro (mm)	Densidade g/cm³	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Acrílica	20 - 350	1,16 - 1,18	0,2 - 1,0	14 - 19	10 - 50
Aramida (Kevlar)	10 - 12	1,44	2,3 - 3,5	63 - 120	2 - 4,5
Carbon (PAN)	8 - 9	1,6 - 1,7	2,5 - 4,0	230 - 380	0,5 - 1,5
CARBON (Pich)	9 - 18	1,6 - 1,21	0,5 - 3,1	30 - 480	0,5 - 2,4
Nylon	23 - 400	1,14	0,75 - 1,0	4,1 - 5,2	16 - 20
Poliéster	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,2	10 - 18	10 - 50
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,6	5	3 - 100
Polilefina	150 - 635	0,91	275	2,7	15
Polipropileno	20 - 400	0,9 - 0,95	0,46 - 0,76	3,5 - 10	15 - 25
PVA	14 - 650	1,3	0,8 - 1,5	39 - 36	4,7
Aço	100 - 1000	7,84	0,5 - 2,6	210	0,5 - 3,5

Fonte: Bentur e Mindens (1990).

A presente dissertação está voltada às fibras sintéticas de polipropileno cujo processo de produção é feito a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero em vários tamanhos e formas, e com diferentes propriedades. As principais vantagens dessas fibras são: relativo alto ponto de fusão (165 °C), resistência a álcalis e o baixo preço do material. Estão disponíveis a baixo custo e peso e, sobretudo não apresentam efeitos nocivos e não reagem quando incorporadas na matriz cimentícia, ou seja, elas são inertes (BANTHIA e GUPTA 2006).

Pelisserf et al. (2010) avaliaram o efeito da adição de diversas fibras sintéticas (polipropileno, vidro, nylon e pet) nas lajes de concreto, e comprovaram que a adição das fibras de polipropileno para a mistura de argamassa apresentava um resultado muito eficiente, restringindo consideravelmente a formação de fissuras oriundas da retração plástica. Também

as fibras de vidro e PET mostraram resultados semelhantes, enquanto as fibras de nylon mostraram os piores resultados. Quanto ao teor ótimo, os autores inferiram que as frações de volume de fibra de 0,10 % ou mais nas lajes seriam necessárias para reduzir significativamente as aberturas de fissuras.

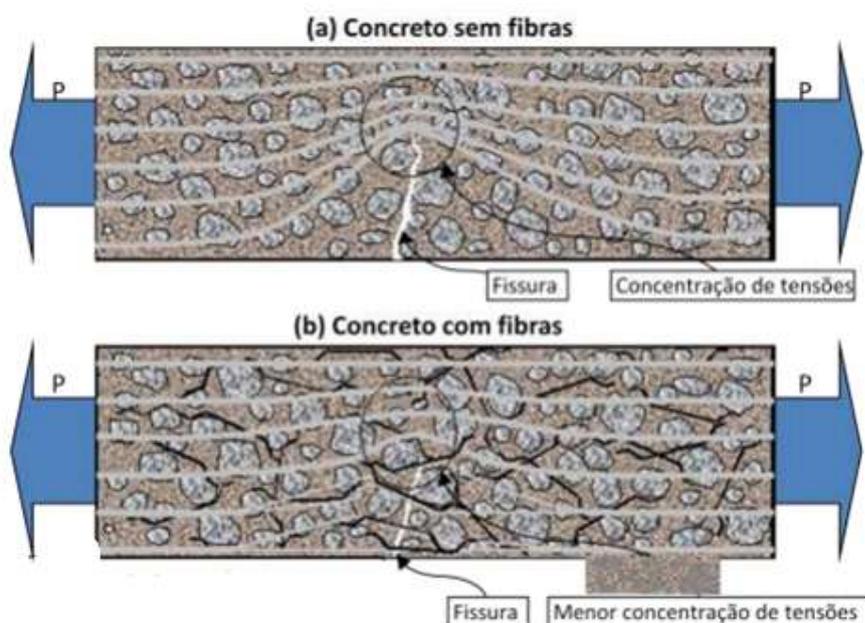
ACI 544.1R (1996) apresenta praticamente a mesma constatação ao se referir ao uso de fibras sintéticas no concreto, afirmando que a principal função delas é minimizar a fissuração que ocorre no estado plástico, e elevar resistência já nas suas primeiras horas.

Enfim, as fibras proporcionam ao concreto um ganho da resistência à compressão a tração indireta e à tração na flexão, e podem conferir da mesma maneira outros ganhos, como: a diminuição da retração do concreto, maior resistência ao impacto, melhoria no comportamento pós-fissuração, e etc.

3.2.2 Importância das fibras na matriz cimentícia

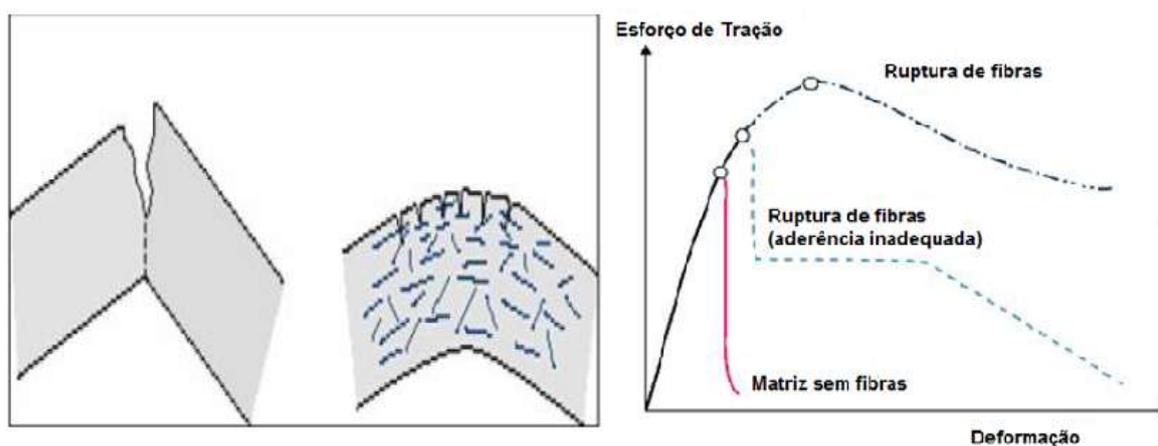
Mehta e Monteiro (2006) associaram o comportamento frágil da matriz cimentícia, quando submetida à tração, à sua dificuldade de interromper as propagações das fissuras. Este comportamento frágil se dá ao fato que as fissuras tendem a se propagar mais rapidamente enquanto permanecer o carregamento. E esta propagação das fissuras tende a se intensificar até ocasionar a ruptura do material. Neste contexto, o emprego das fibras se torna uma alternativa muito interessante pois, diferentemente do concreto sem as fibras, o compósito reforçado quando solicitado à tração tem uma parte de seus esforços suportados pelas fibras, evitando conseqüentemente a ruptura frágil do material, aumentando a resistência residual e a durabilidade de concreto (Figueiredo, 2011; Fritih, 2009), como ilustrado nas Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2 - Mecanismos de transferência de tensões entre matriz e fibras



Fonte: Figueiredo (2011)

Figura 3.3 - Papel de fibras como reforço da matriz cimentícia

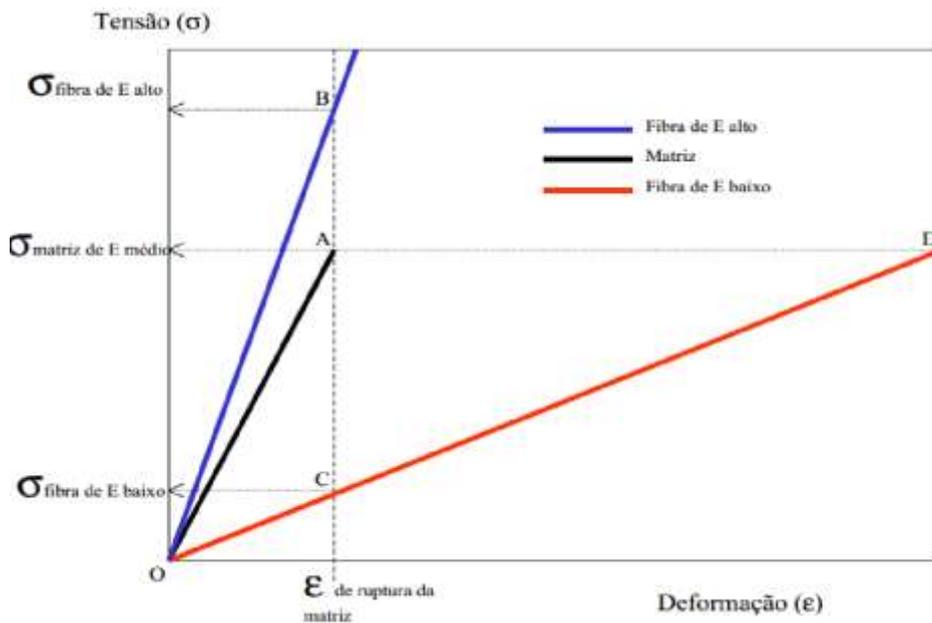


Fonte: Fritih (2009) adaptada

Ainda no que se refere às propriedades do concreto com adição de fibras, a incorporação das fibras na matriz cimentícia, a um teor apropriado, pode aumentar a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade. E isso ocorre porque as fibras incorporadas servem como pontes de transferência de tensões, propiciando a redução considerável da velocidade de propagação

das fissuras. De acordo com Figueiredo et al. (2011), para as fibras oferecerem a condição de reforço após a ocorrência de fissuração, elas precisam apresentar um módulo de elasticidade maior do que a matriz. No entanto, as fibras sintéticas são classificadas como fibras de baixo módulo, razão da limitação da sua aplicabilidade em controlar apenas as fissurações, conforme demonstrado pela Figura 3.4.

Figura 3.4 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto



Fonte: Figueiredo (2011)

Pela análise da Figura 3.4, e conforme os resultados dos ensaios realizados, os autores perceberam que as fibras sintéticas (baixo módulo) não apresentavam um comportamento capaz de oferecer um reforço quando a matriz chegava ao ponto de ruptura. Em contrapartida, as fibras de aço e de carbono (alto módulo de elasticidade) são as únicas que responderam as exigências de alta resistência e alto módulo de elasticidade, podendo então ser usadas como reforço do concreto no seu estado endurecido. A questão que limita a ampla utilização dessas fibras em reforço das estruturas é a econômica (FIGUEIREDO, 2011).

Quanto ao ganho da resistência à compressão proporcionada pela adição das fibras de Polipropileno no concreto, não se viu um consenso dentre os pesquisadores consultados. Alguns alegam que a fibra de polipropileno não oferece nenhum ganho, e que pelo contrário pode até diminuir consideravelmente a resistência à compressão do mesmo. Em contrapartida,

outros autores observaram um pequeno acréscimo de 5% da resistência a compressão em relação ao concreto convencional, em um teor de volume de fibras de 0,18% (SAEED et al. 2006).

Já na análise da trabalhabilidade, tanto usando microfibras quanto as macrofibras, houve uma concordância entre todos os pesquisadores sobre a redução da mesma no manuseio do concreto fibroso em comparação com o convencional. Salvador et al. (2014), em seu estudo sobre análise comparativa de comportamento mecânico usando macrofibras poliméricas, mostrou que o aumento do teor da macrofibra polimérica apresentava um efeito inversamente proporcional ao ensaio de abatimento. Também se mostrou um consenso sobre o ganho da resistência à tração dos compósitos fibrosos quando comparado com os concretos sem nenhuma adição.

3.3 Durabilidade do concreto

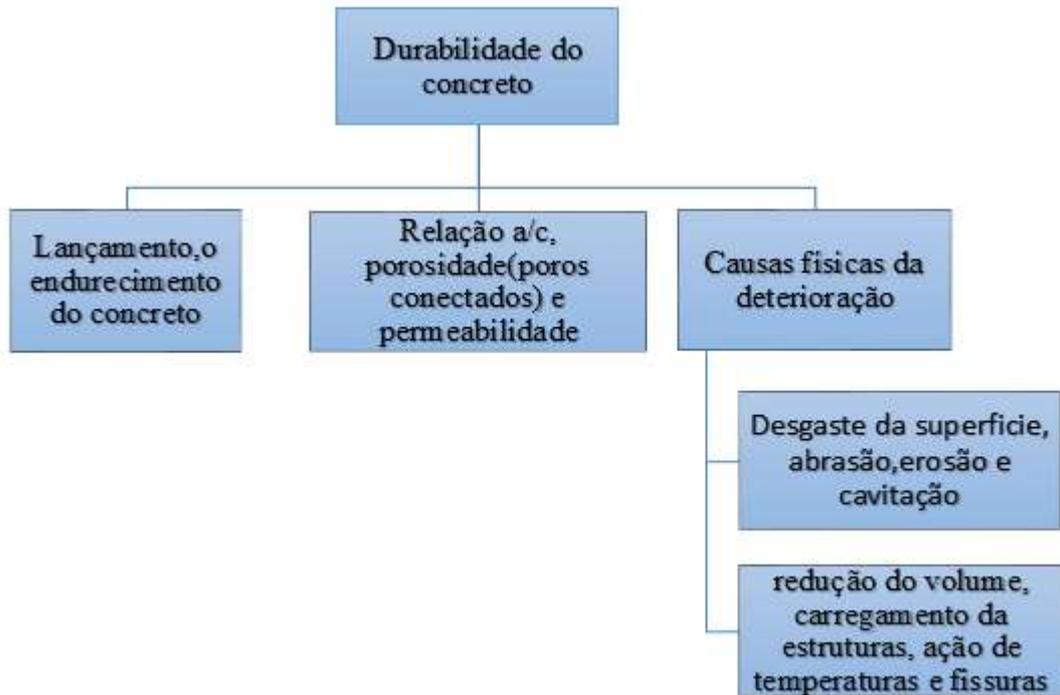
A grande preocupação nos últimos anos, que tem sido o motivo de estímulo de estudo e pesquisas tanto no meio acadêmico quanto do mercado, é a garantia da durabilidade das estruturas do concreto armado. Os avanços tecnológicos aliados a construção civil têm facilitado desenvolver e produzir concretos capazes de atingir expressivos valores de resistência à compressão, no entanto, as demandas de intervenção para os reparos e recuperações têm crescido praticamente no mesmo ritmo. Na grande maioria dos casos, essas demandas de intervenção são solicitadas porque as estruturas tiveram a sua vida útil reduzida, em função de ataques químicos. Vários estudos têm sido orientados nos últimos anos, não apenas com o objetivo de resolver os problemas de desempenho mecânico, mas também para produzir as estruturas mais duráveis possíveis.

De acordo com Souza e Ripper (1998), a garantia de durabilidade do concreto depende das características e propriedades do próprio material, e também das condições do meio no qual o concreto está inserido. As fissurações, por exemplo, que são consideradas como manifestações patológicas mais características de concreto, e que são resultados da retração endógena, plástica, ou até do próprio carregamento, podem se tornar caminhos preferenciais, favorecendo a percolação e a infiltração no interior do concreto dos fluidos e agentes

químicos capazes de reduzir a vida útil do mesmo. De acordo com os autores, a expressão mais clara desta redução é traduzida pela perda de desempenho do concreto, e o agravamento desse último pode levar a perda de funcionalidade, podendo ocasionar até o colapso do concreto. Para os autores, o estudo voltado a levantar as principais causas de deterioração por agentes deletérios ao concreto é extremamente complexo, mas de forma geral é atribuído a dois fatores, internos e externos ao material. Quanto aos aspectos internos, os mesmos estão ligados aos constituintes que formam o próprio material (cimento, agregados, água, aço, adições e aditivos), a qualidade de mistura formada, e reações químicas internas. Além disso, outro fator importante, podendo facilitar a deterioração precoce das estruturas de concreto armado, ocorre na etapa de execução, quando não são observados adequadamente os procedimentos para uma melhor concretagem, e também as condições de cura, entre outros. Os aspectos internos são restringidos a qualidade dos materiais envolvidos na produção de concreto e também na observância de boa técnica durante a execução. Já fatores externos que afetam negativamente as estruturas estão associadas as condições do meio, o tipo de exposição, a existência de substâncias agressivas do meio, o clima, dentre outros. Deve-se tomar todos os cuidados necessários desde a escolha dos materiais, no processo de materialização do projeto (execução), e por fim analisar melhor as condições de exposição.

A durabilidade está inteiramente relacionada com a capacidade de uma estrutura de concreto de demonstrar um desempenho satisfatório durante o tempo previsto no projeto. Ao realizar um projeto, os projetistas estabelecem a vida útil do mesmo, levando em consideração vários fatores que fazem com que a estrutura possa perdurar e satisfazer seus usuários. Portanto, deve-se ter em mente priorizar tanto a resistência quanto a durabilidade em qualquer processo construtivo (NEVILLE, 2016). A durabilidade é afetada por vários fatores, entre eles: físicos, efeito da temperatura, o ciclo gelo e degelo, como mostrado na figura 3.5,

Figura 3.5 - Fatores que afetam a durabilidade do concreto



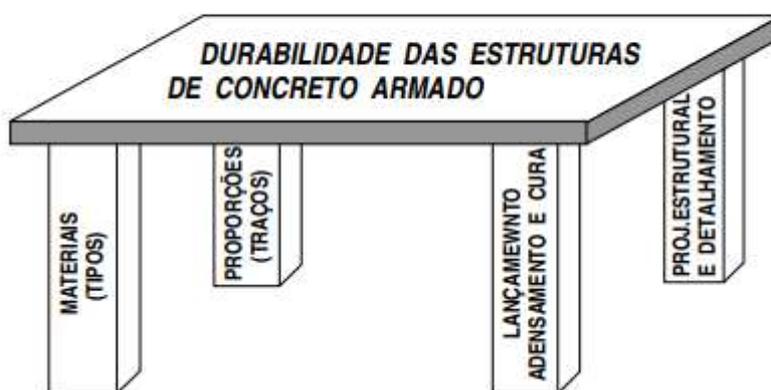
Fonte: Bhargava (2004) - adaptada.

A Figura 3.5 ilustra que, desde o lançamento do concreto, a mistura dos constituintes para formar a matriz cimentícia, a cura e o endurecimento, a durabilidade é totalmente governada pela relação água cimento, a porosidade e a existência dos poros interligado. O melhor entendimento e controle dessas variáveis podem proporcionar uma vida útil considerável às estruturas de concreto armado (BHARGAVA, 2004).

Conforme comentado por Neville (2016), com exceção das causas mecânicas, o principal fator da redução da durabilidade está intimamente ligado com o transporte dos fluídos no interior do concreto. Este transporte só é possível de um lado, quando no estado ainda fresco a mistura do concreto sofre retração plástica, que é a diminuição do tamanho real da estrutura devido à evaporação de água de amassamento. Esta retração gera em seguida a aparição das fissuras, que posteriormente servirão como caminho preferencial para a percolação dos agentes químicos. E de outro lado, no estado endurecido, havendo um concreto que apresente diferentes poros interligados, facilitando a passagem de fluídos e gases através do concreto, acarretando em redução da vida útil do mesmo.

De acordo com Dotto J.M.R (2006), para se garantir a durabilidade desde a concepção do projeto, além do f_{ck} , deve-se considerar outros parâmetros, tais como: o consumo mínimo de cimento, a máxima relação água cimento, adições especiais, o cobrimento mínimo, o tipo de cimento a ser utilizado e o meio ao qual estará exposta a estrutura. Há um resumo destes parâmetros na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Visão holística da durabilidade



Fonte:Dotto (2006).

Por meio da Figura 3.6, fica claro que os cuidados a serem tomados se iniciam desde a concepção do projeto, passando pela escolha dos materiais e as proporções (traço), até a funcionalidade da estrutura. Ou seja, a falha ou a inadequação em qualquer processo ou etapa construtiva pode interferir diretamente sobre a durabilidade e, conseqüentemente, afetar o equilíbrio do sistema como todo.

De uma forma geral, pode-se afirmar que não foram encontrados trabalhos relacionados à durabilidade dos concretos reforçados com fibras, considerando o mesmo tipo de fibra e as condições agressivas propostas nesta dissertação. A seguir, citamos dois trabalhos realizados com esta temática:

- No trabalho do Kim et al. (2011) sobre o desempenho de durabilidade do concreto reforçado com fibras em ambientes severo, foram utilizadas as fibras de Polipropileno (0,5%), de Poliacetato de vinila (0,75%) e as fibras de Aço (1% em volume de concreto), submetidos a três ambientes diferentes. No primeiro ambiente, foi simulada a exposição do concreto às

águas do mar, com uma concentração de 5% de cloretos e 1% de sulfato. No segundo, em uma condição cíclica nas mesmas concentrações, e finalmente no terceiro ambiente, foi exposta uma amostra de viga em uma concentração de pH 4,5, controlado pela adição de vinagre. Os autores concluíram que as amostras ensaiadas apresentaram uma degradação significativa da resistência residual, porém entre as três fibras estudadas, as de aço tiveram bons resultados nas três condições de exposições citadas.

- Outro estudo foi feito avaliando propriedades e durabilidade dos concretos de alta resistência reforçados com fibras, considerando os teores de 0,25%; 0,5%; 0,85% e 1% para as fibras de aço e 0,15%; 0,30% e 0,45% para fibras de polipropileno. O comportamento quanto a durabilidade foi avaliado usando o ensaio de absorção e entre os compósitos fibrosos de aço e polipropileno, e os concretos que apresentaram melhor desempenho foram aqueles reforçados com 0,85 % de aço e 0,15% de polipropileno. Os autores concluíram que a introdução de fibras em concreto resultou em uma diminuição na absorção de água, indicando uma possível melhoria com relação à durabilidade. A absorção de água é um fator importante por estar diretamente ligada à porosidade do concreto (AFROUGSABET et al. 2015). Grande parte de trabalhos consultados sobre a durabilidade de compósitos reforçado de fibras tratava das microfibras de Polipropileno incorporadas no concreto, mas não foram encontrados trabalhos sobre a durabilidade considerando macrofibras sintéticas de Polipropileno.

3.4 Mecanismo do ataque por sulfato e cloreto

Os produtos constituídos de cimento Portland, por apresentar um meio altamente alcalino, não resistem ao ataque por ácidos, ou por compostos que podem se converter em ácidos. Sua utilização em ambientes considerados altamente agressivos deve estar associada à uma proteção (NEVILLE, 2016).

Esta dissertação focou no efeito que os ácidos sulfúricos podem exercer sobre a durabilidade do concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno, uma vez que as estruturas de concreto com adição de fibras, em sua maioria, ficam expostas aos vários meios, como: ambientes industriais, túneis, canalizações de esgotos e outros. De acordo com Neville (2016), certas exposições do concreto, como por exemplo à chuva ácida, constituída essencialmente pelos ácidos sulfúricos e nítrico, podem causar a deterioração superficial do concreto. Esta

dissertação traz um estudo destes ataques ao compósito fibroso, lembrando que o mecanismo de ataque por sulfato difere do ataque por cloretos.

3.4.1 Mecanismos de ataque por sulfatos

O ataque por sulfato vem sendo alvo de estudos há muitos anos, e tais pesquisas mostram que os fenômenos associados a ele continuam desconhecidos. O processo de ataque é inicialmente químico mas, depois de um tempo, virá a afetar as propriedades mecânicas da pasta, conforme descrito a seguir. O contato dos materiais cimentícios com um ambiente com ácido sulfúrico resulta em dissolução do hidróxido de cálcio, que é um composto formado pela hidratação de cimento, responsável de manter o ambiente alcalino da matriz e preservar as armaduras. A dissolução de hidróxido de cálcio permite que ocorra expansão importante da pasta, ocasionando o aumento da porosidade, aparição de fissuras, a perda excessiva da resistência e de coesão, podendo levar ao colapso do material.

De acordo com Divet (2001), há duas fontes de ataques por sulfatos: o sulfato de origem interna está associado com a contaminação de um dos compostos do próprio material (areia ou brita, ou aditivo) e o sulfato de origem externa, ou seja, quando a estrutura se encontra exposta em um ambiente com alto teor de concentração de ácido sulfúrico, a forma de ataque abordada neste trabalho. O autor comenta ainda o aspecto evolutivo da degradação das duas fontes de ataques por íons sulfatos: quando este ataque é proveniente de um meio externo, a degradação se processa da superfície do concreto para o interior da matriz. No caso do ataque interno, todo o concreto é afetado, sem necessitar de uma ação externa.

Esses ambientes podem ser, por exemplo, o sol contaminado com sulfatos, chuvas ácidas resultados de poluição industrial, sobretudo nas tubulações de esgotos e estações de tratamento de esgotos (ETE). A Figura 3.7 mostra as duas fontes de ataque por íons sulfatos (interno e externamente).

Figura 3.7 - Fontes de ataque por sulfatos

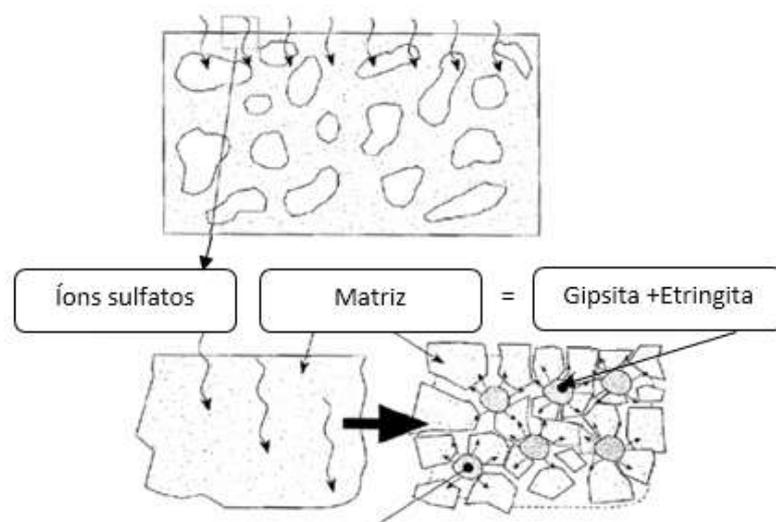


Figura 3.7 - Fontes de ataque por sulfatos

Fonte: Divet (2001) – adaptada

De todas as formas, o seu mecanismo se dá inicialmente pela difusão dos íons sulfatos e suas reações com os constituintes hidratados do cimento, levando a expansão da matriz cimentícia, conforme ilustrada na Figura 3.8. A expansão dessa reação química provoca a perda de coesão do material e a fissuração do concreto, aumentando a permeabilidade do concreto e facilitando a penetração dos agentes agressivos.

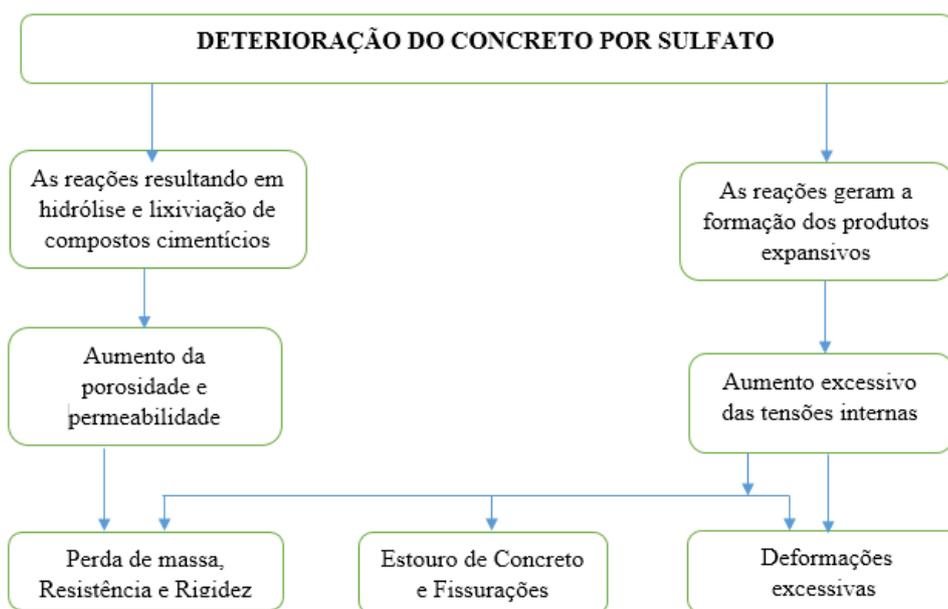
Figura 3.8 - Mecanismo de ataque por íons sulfatos



Fonte: Courard (2008) – adaptada

A perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento, e a fissura ocasionadas pelo ataque por sulfato podem também provocar uma perda progressiva de massa e resistência do concreto, conforme resumido na Figura 3.9. (MEHTA e MONTEIRO, 1994; SOUZA, 2006).

Figura 3.9 - Processo de deterioração do concreto por íons sulfatos



Fonte : Khelifa (2009) adaptada

3.4.2 Mecanismos de ataque por cloretos

Segundo Dotto (2006), o mecanismo do ingresso de íons cloretos ao concreto se dá pela difusão das estruturas imersas nas águas do mar, através do uso de água no amassamento dos agregados contaminados com sais, ou às vezes por meio de uma adição intencional no aditivo usado no concreto, e este ingresso na matriz cimentícia é responsável por causar danos nas armaduras deste. Nos dois casos, independentemente de como se processa o ingresso dos agentes nas estruturas de concreto armado, a durabilidade fica completamente comprometida.

Esta dissertação se limitou a abordar o ataque por íons sulfatos, pois é um dos ataques mais suscetíveis de ocorrer em grandes centros urbanos devido à ação de chuvas ácidas, em canalizações de esgotos domésticos e estação de tratamento de esgotos (ETE). Vale também

ressaltar que as suas ações ficam mais evidentes em curto período de tempo que o ataque por cloretos.

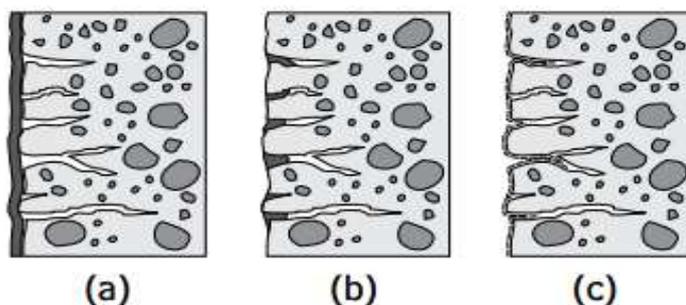
3.5 Camadas protetoras dos concretos

A durabilidade do concreto tem ocupado um espaço de destaque em quase todas as pesquisas na área de materiais de Construção Civil. Esta preocupação é o resultado de vários e recorrentes problemas de deterioração precoce das estruturas de concreto armado. De um lado, a própria construção civil realiza estudos e pesquisas para satisfazer os quesitos resistência e durabilidade, e por outro lado, as indústrias químicas vêm produzindo diversos sistemas de proteção para então garantir esta durabilidade às estruturas. De acordo com Medeiro et al. (2009), as pesquisas desenvolvidas na construção civil, na sua grande maioria, têm a sua aplicabilidade voltada as estruturas novas. Contudo, a utilização de proteção superficial tem uma vantagem sobre os métodos citados, pois se apresenta como alternativa que pode ser bem usada tanto em obras novas quanto em antigas.

Os sistemas de proteção desenvolvidos têm como função: restringir o ingresso de água no concreto, reduzir a velocidade de contaminação da estrutura de concreto submetido a um ambiente com água do mar, por meio da penetração de sais e agentes agressivos.

Ainda de acordo com Medeiro et al, 2009, apesar da contribuição comprovada que trazem os sistemas de proteção superficial ao concreto, proporcionando-o uma barreira superficial que impede o ingresso de gases e fluidos, deve-se estabelecer um programa de manutenção periódica para manter um alto grau de proteção e funcionalidade de toda estrutura, pois a eficiência desses sistemas de proteção tende a diminuir ao longo do tempo de exposição. Também, de acordo com estes autores, os sistemas de proteção superficial dos concretos são classificados em três categorias: os que têm a propriedades hidrófobas, os bloqueadores de poros e os formadores de película, conforme mostrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Sistemas de proteção superficial dos concretos: (a) Formadores de película; (b) Bloqueadores de poros; Hidrofugantes de superfície.



Fonte: Medeiros e Helene (2009).

(a) Formadores de película: este sistema de proteção a base de tinta tem como função principal a formação de uma película que protege o concreto frente aos agentes deletérios. Eles são divididos em duas categorias: as tintas e vernizes.

(b) Bloqueadores de poros: são produtos compostos por silicato de sódio que, ao penetrarem nos poros do concreto, reagem com o hidróxido de cálcio formando C-S-H, e posteriormente resultará na formação cristalina não solúvel que sela os poros e capilares do concreto.

(c) Hidrofugantes de superfície: esse sistema de proteção tem como o principal efeito em impedir ou dificultar a absorção de água pelo concreto.

Os sistemas de proteção superficial dos concretos também estão caracterizados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Características dos principais sistemas de proteção para concreto

Proteção	Características
Hidrófobos	<ul style="list-style-type: none">- Redução da capacidade de absorção de água;- Redução da permeabilidade;- Permissão da secagem do concreto, através da troca de vapor de água com o ambiente;- Não interfere na aparência da superfície do concreto;- Boa capacidade de penetração nos poros capilares do concreto;- Pode ser aplicado em superfícies rugosas;- Reduz a lixiviação;- Não impede a carbonatação.
Formador de película	<ul style="list-style-type: none">- Redução da permeabilidade e difusividade a sais solúveis;- Redução da lixiviação;- Redução da carbonatação;- Redução do aparecimento de mofo ou alastramento de fungos e bactérias;- Manutenção da umidade do concreto não permitindo a secagem;- Modificação da aparência da superfície do concreto conferindo cor e brilho;- Exigência de uma superfície uniforme e homogênea, não apresentando boa aderência em superfícies rugosas, com desmoldante ou de baixa permeabilidade.

Fonte: Helene (2000).

Já Almussallam et al. (2003) classificam os sistemas de proteções superficiais em cinco diferentes grupos, que são: as proteções acrílicas, emulsões de polímero, as resinas epóxi, poliuretanos e as borrachas cloradas. Nesta dissertação, foram utilizados dois sistemas de proteção caracterizados como os formadores de película na superfície do concreto: o primeiro à base de Poliuretano, tendo como nomenclatura MC-FLEX, e o segundo sistema é a base epóxi, com a nomenclatura de MC-DUR. Ambos os sistemas de proteção são fornecidos pela empresa MC-Bauchimie.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas do concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno e do concreto sem adição antes e depois de ataque. Também foi possível avaliar a influência de camadas protetoras à base de poliuretano e epóxi na minimização dos efeitos de deterioração provenientes dos agentes químicos (sulfatos), seguindo as etapas apresentadas a seguir:

4.1 Dosagem dos concretos

Os concretos produzidos neste trabalho foram dosados a partir de resultados obtidos em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, de acordo com os métodos de dosagem do American Concrete Institute (ACI) e do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT), tendo como finalidade a obtenção de um concreto com qualidade e resistência satisfatórias, atendendo às exigências estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

A dosagem teve início com a definição das características que o concreto produzido deveria apresentar aos 28 dias, além de uma resistência à compressão de 25 MPa, considerando uma relação água e cimento (a/c) de 0,5, ou seja, um concreto que apresenta baixo valor de absorção de água, e uso de aditivo plastificante polifuncional. Para avaliar as propriedades mecânicas, foram dosados os concretos com e sem adição das fibras de Polipropileno. O concreto sem nenhuma adição de fibras, em sua composição, foi considerado como o concreto de referência, e o concreto reforçado com fibras foi classificado de acordo com teor de adição de 1,0 % de fibras em massa de cimento.

Quanto aos constituintes dos concretos produzidos, foi utilizado nas dosagens o cimento CP II E 32, Cimento Portland composto de escória, que tem como característica principal a adição de escória granulada de alto forno (6 a 34%). O agregado miúdo utilizado foi a areia lavada natural, e o agregado graúdo utilizado foi a brita de gnaiss natural, ambos provenientes da região metropolitana de Belo Horizonte, MG, Brasil.

4.2 Produção dos concretos

Os concretos foram confeccionados a partir da dosagem anteriormente citada, utilizando os equipamentos disponíveis no Laboratório de concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção (DEMC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A produção seguiu o processo convencional, e a pré-mistura dos componentes foi feita a seco e permitiu uma boa homogeneização antes mesmo do lançamento na betoneira, e posteriormente a adição de água e o aditivo. A ordem desta mistura a seco iniciou-se com agregado miúdo e o cimento, de maneira a se obter uma mistura bem uniforme dos dois materiais. Em seguida, foram adicionadas as macrofibras sintéticas, e por fim os agregados graúdos. Estes permitiram desagregar e espalhar melhor as fibras, conforme apresentado na Figura 4.1. A falta desta mistura deixa as fibras soltas e grudadas nas paredes da betoneira, e isto se dá devido as características hidrofóbicas das fibras em repelir as moléculas de águas e apresentar uma adesão bem reduzida com cimento. Essa característica pode ocasionar redução substancial no teor de fibras incorporadas nas moldagens de corpos de prova, com conseqüente alteração nos resultados finais.

Figura 4.1 - O preparo de mistura do CRF



Depois da mistura a seco dos materiais, os mesmos foram lançados na betoneira, e foram adicionados também a água e o aditivo. Aguardou-se 3 minutos de mistura para uma boa homogeneização, conforme recomenda a norma.

4.3 Análise dos concretos no estado fresco

A avaliação no estado fresco foi realizada por meio do ensaio de abatimento do cone, normalizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), que permite visualizar a consistência do material. Ela tem como objetivo verificar a trabalhabilidade ao avaliar a influência da relação água/cimento de 0,50, aliado ao aditivo plastificante polifuncional.

4.4 Moldagem dos corpos de prova

Após a retirada da betoneira, os materiais homogeneizados foram colocados nos corpos de prova de 10 x 20 cm, e foram adensados utilizando o vibrador mecânico para eliminar os possíveis vazios existentes na matriz. O intuito deste último procedimento foi obter um aumento na resistência, e por consequência, reduzir a permeabilidade.

Logo após o adensamento, os corpos de prova ficaram nos moldes nas primeiras 24 horas, e desmoldados em seguida e acondicionados em uma câmara úmida, conforme ilustradas nas Figuras 4.2 e 4.3, ao longo dos dias estipulados para os ensaios de propriedades mecânicas, que foram de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias.

Figura 4.2 - Acondicionamento dos corpos de prova na câmara úmida



Figura 4.3 - Processo de cura dos corpos de provas



Observa-se que o acondicionamento na câmara úmida é importante e tem a função de evitar a evaporação da água de amassamento, necessária para garantir uma boa hidratação do cimento. A ausência desta etapa pode ocasionar uma retração plástica, e finalmente a aparição das fissuras no concreto (RIBEIRO et al. 2013).

4.5 Análise dos concretos no estado endurecido

Inicialmente, foram moldados os corpos de prova cilíndricos, de 10 x 20 cm, e rompidos de acordo com as NBR's 5738 (ABNT, 2015) e 5739 (ABNT, 2018).

Para os concretos no estado endurecido, serão realizados os seguintes ensaios:

- **Resistência à compressão axial e à tração indireta:** os ensaios em corpos de prova de resistência à compressão axial e à tração na compressão diametral de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2018), após o processo de hidratação convencional, e acelerado no Laboratório de Concreto e Materiais de Construção da UFMG;
- **Absorção de água por imersão:** o ensaio de absorção, tanto para os corpos de provas de referência como para os corpos de prova reforçados, seguiu as recomendações especificadas na norma NBR9778 (ABNT, 2009). Tal teste consiste em secar os corpos de prova em estufa,

e depois submetê-los à imersão parcial, imersão total e saturação, pelo período de 72 horas e assim determinar o teor de absorção, índice de vazios e a massa específica real;

- **Ataque por agentes agressivos aos concretos:** a composição iônica de precipitações nos grandes centros urbanos tem um teor elevado de acidez, possível de comprometer as estruturas de concreto armado. Neste trabalho foi analisado o ataque do concreto de forma acelerada, para o concreto com variações de teor de fibras e concreto de referência. Para isto, os corpos de prova foram imersos em uma condição contínua e de imersão em ciclo molhagem e secagem numa solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentração de 2,5 %. O ensaio permitiu avaliar os efeitos da exposição tanto dos concretos reforçados de fibras quanto dos concretos sem adição em meio altamente agressivo.

- **Perdas de Massa:** a perda de massa é um parâmetro quantitativo importante para medir o efeito do ataque causado por agentes químicos. A degradação dos concretos foi avaliada através das perdas de massa em corpos de prova de concretos, reforçados com fibras e sem nenhuma adição, antes e após o ataque químico.

- **Avaliação da eficiência da camada protetora:** para este trabalho, foi utilizado o sistema de proteção à base do poliuretano e epóxi tanto para o concreto referência, quanto para o reforçado com fibras. O ensaio permitiu avaliar a capacidade de proteção da camada protetora no concreto com adição de fibras e sem adição de fibras.

A escolha destes sistemas de proteções foi baseada pelas propriedades que possuem em resistir aos agentes químicos. A proteção à base de poliuretano, com a nomenclatura MC-FLEX, referindo-se a um sistema de proteção que apresenta características flexíveis, podendo ser utilizado em ambiente externo ou aberto. Já o segundo sistema à base de epóxi, com a nomenclatura de MC-DUR, apresenta características rígidas, limitando a sua utilização em ambiente interno.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais constituintes, para o concreto referência e para o CRF. A seguir, são apresentados os resultados obtidos.

5.1 Caracterização dos Materiais

Seguem os resultados de caracterização dos materiais constituintes para a produção do concreto reforçado de fibras e o concreto convencional.

5.1.1 Cimento Portland

Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento CII-E-32 são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Ensaio caracterização do cimento Portland CP II-E-32.

Ensaio	Normas	Resultados	Limites Normalizados NBR 16697:2008
Massa Específica (Kg/dm³)	ABNT NBR NM 23:2011	3,0	-
Finura – Método Blaine (m²/Kg)	ABNT NBR NM 76:1998	310,0	≥ 260
Finura – Peneira n° 200-75 µm (%)	NBR 11579:2012	2,6	≤ 12
Expansibilidade a frio (mm)	NBR 11582:2016	0	≤ 5 mm
Resistência à compressão (MPa)	NBR 7215:2019	34	≥ 32 MPa

5.1.2 Agregado miúdo

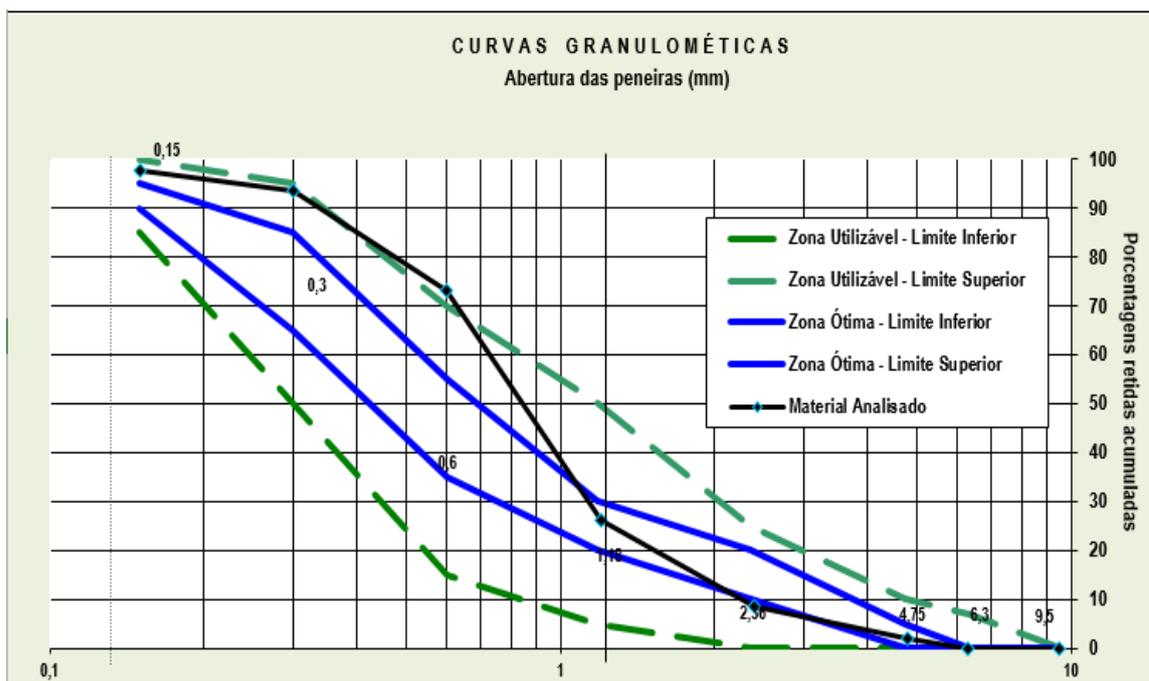
Foi utilizada a areia lavada média da região metropolitana de Belo Horizonte, MG, Brasil, por ser uma das mais utilizadas na construção civil. Os resultados dos ensaios de caracterização da areia estão na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Ensaio de caracterização areia média lavada.

Ensaio	Normas	Resultados	Limites Normalizados NBR7211: 2009
Massa Unitária (Kg/dm³)	NM 45: 2006	1,40	Normal
Massa Específica (Kg/dm³)	NBR NM 52:2003	2,55	-
Torrões de Argila- TA (%)	NBR 7218:2010	1,5	3 a 5 %
Materiais Pulverulentos – M.P. (%)	NBR NM 46:2003	3,8 %	3 a 5 %
Impurezas Orgânicas – I.O	NBR NM 49 :2001	Solução de ensaio mais clara do que a solução padrão	-
Módulo de Finura	NMN 248:2003	3,52	1,55 <MF<3,0
Dimensão Máxima Característica (mm)	NMN 248:2003	2,4	≤ 4,8 mm

A partir de análise da Tabela 5.2, observa-se que a areia utilizada apresentou um diâmetro máximo de 2,4 mm, podendo ser caracterizada como areia média. E a sua curva granulométrica está situada próximo ao limite superior da zona utilizável determinada pela NBR 7211 (ABNT, 2009), e é representada pela Figura 5.1.

Figura 5.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo



5.1.3 Agregados graúdos

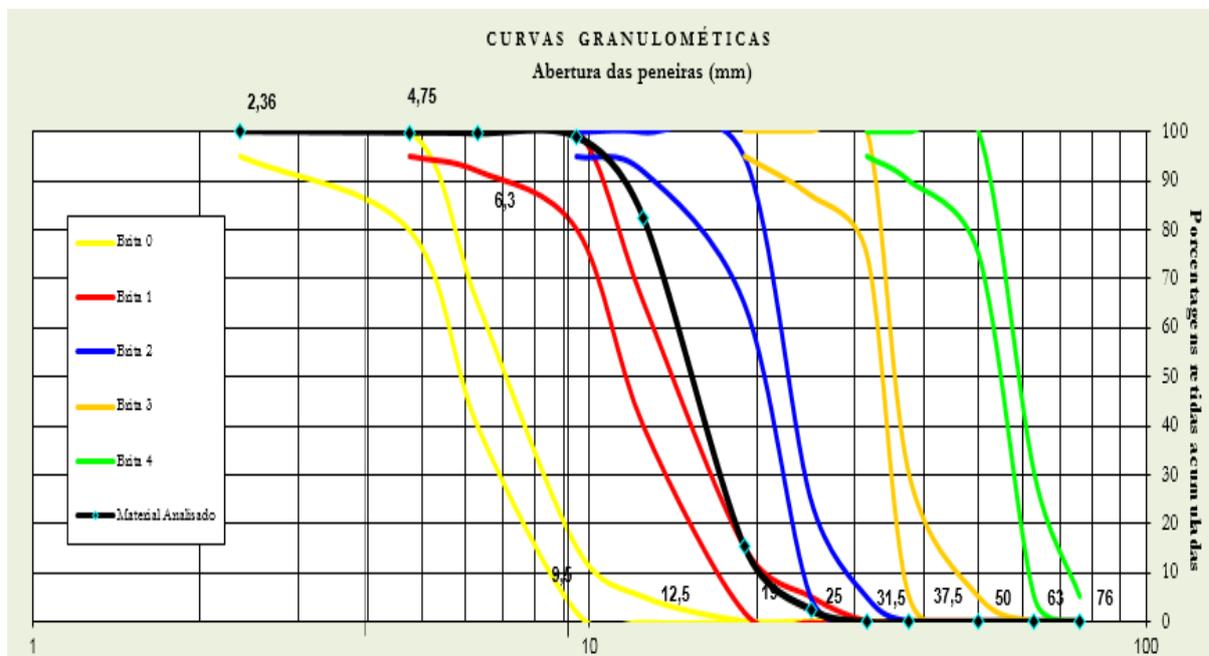
Os resultados de ensaios de caracterização realizados para a brita de gnaiss, utilizada no concreto de referência, estão na Tabela 5.3, bem como a norma referente a cada ensaio.

Tabela 5.3 - Ensaio de caracterização da brita de gnaiss.

Ensaio	Normas	Resultados	Limites Normalizados NBR7211: 2009
Massa Unitária (Kg/dm ³)	NBR NM 45:2006	1,53	
Torrões de Argila – T.A. (%)	NBR 7218:2010	1,0	1 a 3 %
Materiais Pulverulentos – M.P. (%)	NBR NM 46:2003	0,8	1 %
Impurezas Orgânicas – I.O. (%)	NBR NM 49:2001	-	-
Desgaste Superficial - A (%)	NBR NM 51:2001	29	< 50 %
Dimensão Máxima Característica (mm)	NM 248:2003	12,50	≥ 6,3 mm
Módulo de Finura	NMN 248:2003	7,14	-

Analisando a Figura 5.2, que representa a curva granulométrica do agregado graúdo utilizado, e comparando-a com as curvas da britas de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), pode-se observar que a curva da brita caracterizada se enquadra como sendo uma brita 1.

Figura 5.2 - Curva granulométrica do agregado graúdo



5.1.4 Fibras

As fibras estudadas neste trabalho são as fibras sintéticas, em particular as macrofibras sintéticas de polipropileno, do tipo Forta Ferro 54 (FF54PRO). Esta escolha se baseou nas vantagens que as fibras sintéticas apresentam quando comparadas com as outras fibras. Estas fibras são utilizadas como reforço e resultam da mistura de macrofibras estruturais sintéticas para uso em concretos à base de cimento tipo Portland. Elas são produzidas com 100% de copolímero virgem e polipropileno, e são compostas por macrofibras estruturais de monofilamento em feixe trançado e microfibras tipo fibriladas (multifilamentos), conforme exposto na Figura 5.3. Não são corrosíveis, nem magnéticas, não afloram na superfície, e são totalmente resistentes aos álcalis presentes no concreto, de acordo com a norma ASTM C 1116/C 1116M-08 a. De acordo com as especificações do fabricante, a dosagem deve variar de 3,0 a 9,0 kg/m³, e também salienta que a quantidade necessária deverá ser determinada por um projetista. Suas propriedades estão resumidas na Tabela 5.4 (CONSTRUQUÍMICA, 2014).

Figura 5.3 - Comprimento da fibra de polipropileno



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Tabela 5.4 - Características da fibra de polipropileno

Especificação	Comprimento (mm)	Peso específico (g/cm ³)	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Dosagens usuais (Kg/m ³)
Fibra de Polipropileno (FF54PRO)	54	0,91	550 a 650	6	3,0 a 6,0

Fonte: Informações cedidas pela empresa Construquímica (2017).

5.2 Dosagem dos Concretos

O estudo de dosagens permitiu que fosse selecionado um concreto que apresentasse uma relação água/cimento, de 0,50, valor estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), que normatiza os tipos de concretos sujeitos aos ambientes que são considerados agressivos.

Esta escolha se justificou pelos melhores resultados obtidos nos ensaios de consistência e resistência à tração indireta. E também visou à necessidade de se garantir a durabilidade, e de

se produzir um concreto menos poroso possível. A Tabela 5.5 apresenta a dosagem do concreto selecionada.

Tabela 5.5 - Dosagem do concreto de referência

Cimento CP II – 32 Kg/m ³	Areia Kg/m ³	Brita Gnaisse kg/m ³	Água l/m ³	Aditivo plastificante (%)	Relação A/C
370	740	1110	186	2,0 a 3,0 %	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O concreto de referência foi produzido com 370 kg/m³ de cimento, CP II-E-32, relação água/cimento de 0,50 e aditivo plastificante polifuncional, 2,5 % para o concreto de referência (CR), e 3,0% para o concreto reforçado com fibras (CRF) e, a fim de evitar a desagregação do concreto fresco. A dosagem do concreto reforçado com fibras foi feita com 1 % de fibras, mantendo as mesmas proporções dos materiais empregados na produção do concreto de referência.

5.3 Resistência dos concretos

Os resultados do ensaio de compressão axial e de tração indireta são apresentados na sequência.

5.3.1 Ensaio de Compressão Axial

A resistência do concreto é um elemento fundamental e estipulado no projeto estrutural, e também é a partir dela que se consegue avaliar a qualidade de todo concreto (NEVILLE, 2016). Para determinar a resistência à compressão foram usados os corpos de prova 10 x 20 cm, rompidos nas idades de 7 e 28 dias, de acordo com as prescrições da NBR 5739 (ABNT,

2018) que regula os procedimentos de ensaios de compressão. A Figura 5.4 mostra um corpo de prova sendo rompido a compressão axial.

Figura 5.4- Rompimento do corpo de prova por ensaio da compressão axial



Fonte: Acervo do autor (2018).

Adiante, estão apresentadas as tabelas de resumo dos estudos comparativos das diferentes dosagens realizadas, e sua relação com outras variáveis como a resistência, a relação água-cimento, a quantidade de aditivo, entre outras.

A Tabela 5.6, que corresponde a primeira dosagem, apresenta valores de resistência à compressão bem abaixo do estipulado neste trabalho. Isto ocorreu por haver o excesso de fibras na mistura, que foi de mais de 2%, demandando uma quantidade maior de água de amassamento, e reduzindo assim os valores de resistências.

Tabela 5.6 - Primeira dosagem

Dosagem	Tipo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aditivo	Slump (mm)	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)	
						7 dias	28 dias
1	Concreto de referência	370	3,3 %	120	0,66	14,0	20,0
	Concreto reforçado		5,5 %	90,0	0,66	13,75	21,5

Na segunda dosagem exposta na Tabela 5.7, foi possível observar a melhoria na resistência à compressão do concreto de referência em razão de mudança do aditivo utilizado. Porém, o excesso de fibras utilizadas, que foi de 1,5%, também não permitiu a obtenção de resistência para o concreto reforçado com fibras.

Tabela 5.7 - Segunda Dosagem

Dosagem	Tipo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aditivo	Slump (mm)	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)	
						7 dias	28 dias
2	Concreto de referência	370	1,5 %	85	0,55	15,6	23,7
	Concreto reforçado		2,5 %	30	0,55	13,0	16,0

A Tabela 5.8, retrata a terceira dosagem, que foi realizada com os corpos de prova de 5 x 10 cm, no intuito de evitar o desperdício dos materiais e de acertar a quantidade exata das fibras. Os valores de resistência obtidos para os dois compósitos atenderam às expectativas. Esta melhoria também ocorreu devido a uma nova mudança de aditivo diferente do que foi utilizado nas duas dosagens anteriores, e também pela obtenção do teor ótimo de fibras adicionadas no concreto reforçado.

Tabela 5.8- Terceira Dosagem

Dosagem	Tipo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aditivo	Slump (mm)	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)	
						7 dias	28 dias
3	Concreto de referência	370	2,5 %	70,0	0,5	32,3	37,7
	Concreto reforçado		3,0 %	30,0	0,5	36,9	46,2

A quarta dosagem ilustrada na Tabela 5.9 foi realizada tendo com a base a dosagem anterior (a terceira), porém com os corpos de prova de 10 x 20 cm, e seguindo as especificações propostas pela NBR 5739 (2018). Os resultados obtidos foram satisfatórios.

Tabela 5.9 - Quarta dosagem

Dosagem	Tipo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aditivo	Slump (mm)	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)	
						7 dias	28 dias
4	Concreto de referência	370	2,5 %	80	0,5	18,65	28,70
	Concreto reforçado		3,0%	35	0,5	23,50	33,65

A última dosagem, reproduzida pela Tabela 5.10, foi realizada no intuito de averiguar e confirmar os resultados obtidos na quarta dosagem que estão na Tabela 5.9.

Nesta última dosagem é notável que, embora se tenha optado pela redução da quantidade de aditivos, os valores de resistências obtidos permaneceram em uma faixa de variação próxima a dosagem anterior e atinge os objetivos estipulados nesta pesquisa.

Tabela 5.10 - Quinta dosagem

Dosagem	Tipo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aditivo	Slump (mm)	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)	
						7 dias	28 dias
5	Concreto de referência	370	2,0%	83	0,5	17,84	27,44
	Concreto reforçado		2,9%	40	0,5	19,80	30,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A premissa estabelecida em um dos objetivos específicos, que era a produção de um concreto que atendesse aos requisitos de resistência e durabilidade, norteou a seleção da dosagem nº 4. A obtenção dos valores de resistência tanto de concreto de referência quanto o de reforçado com fibras, foi possível em função dos devidos cuidados durante todo o processo, ou seja, desde a mistura, o adensamento e cura durante os 28 dias em ambiente saturado (tanque), minimizando, portanto, a aparição de micro fissuração precoce do concreto.

Os concretos foram produzidos com o objetivo de cumprir o valor estabelecido pela NBR6118 (2014), norma para concretos submetidos a ambientes agressivos, sendo as amostras preparadas com 370 kg/m³, cimento CII-E-32 e relação água/cimento de 0,50.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), e o comportamento do concreto em relação a tal resistência foi analisado nas idades de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias. Os resultados de resistência da dosagem selecionada são expressos na Tabela 5.11, e comprovaram um ganho de resistência do concreto reforçado de macrofibras sintéticas de polipropileno em relação ao concreto de referência.

Tabela 5.11 - Resistência à compressão da dosagem selecionada

Concreto	Consumo de Cimento (Kg/m ³)	Aditivo plastificante Polifuncional (%)	Relação água/cimento	Slump (mm)	Resistência à Compressão (MPa)	
					7 dias	28 dias
Referência (Brita Gnaisse)	370	2,5	0,50	83	18,65	28,70
Concreto reforçado	370	3,0	0,50	40	23,50	33,65

Um dos parâmetros importantes utilizados para avaliar o concreto em seu estado fresco é o ensaio do abatimento de cone, conhecido universalmente como o Slump Test, conforme mostrado na Figura 5.5. Este ensaio é realizado para avaliar o manuseio ou a trabalhabilidade da matriz cimentícia, e permite avaliar a consistência do concreto. De acordo com Salvador e Figueiredo (2014), o aumento da quantidade de macrofibra polimérica resulta em um efeito inversamente proporcional ao do ensaio de abatimento. Para efeito de comparação, neste trabalho foi mantida fixa a quantidade de água de amassamento, variando apenas a dosagem de aditivo que passou de 2,5 para 3,0%, para o concreto com a adição de fibras.

Constatou-se, como refletido na Tabela 5.10, que a consistência do concreto reforçado com fibras foi em torno de 40 mm, em contrapartida com a do concreto de referência, que obteve aproximadamente um valor de 85 mm. Esta diferença entre os dois compósitos analisados era esperada, conforme comentado por Neville (2016) e outros autores, já que o fator de forma e a quantidade de fibras são responsáveis por esta redução da trabalhabilidade. A Figura 5.5 mostra o ensaio de abatimento do concreto reforçado com fibras.

Figura 5.5- Ensaio de abatimento (Slump Test)



5.3.2 Ensaio de resistência à tração indireta

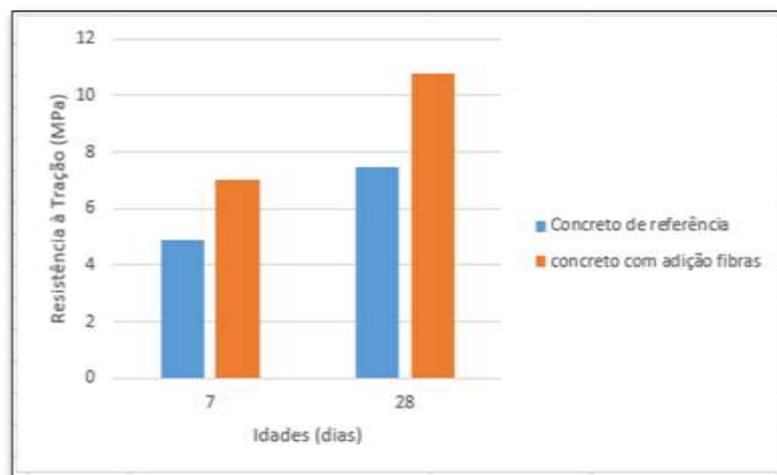
O ensaio da resistência à tração indireta foi realizado utilizando os corpos de prova nas mesmas condições da resistência à compressão, e na mesma máquina. A Figura 5.6 mostra um corpo de prova sendo rompido por ensaio de tração indireta.

Figura 5.6 - Rompimento do corpo de prova pela tração indireta



São descritos na Figura 5.7 os resultados do ensaio da resistência à tração (compressão diametral), considerando os valores médios da resistência. Analisando estes resultados, é possível observar uma influência positiva das fibras, através do aumento da resistência à tração indireta quando comparada à mistura de referência. E ainda de acordo com a Figura 5.7, a resistência à tração indireta para o concreto de referência foi em torno de 7,5 MPa e 10,80 MPa para o concreto reforçado com fibras.

Figura 5.7 - Comportamento da resistência à tração indireta



5.4 Interface Matriz - Fibra

5.4.1 Visualização do papel das fibras como obstáculo a propagação de fissuras

Conforme já comentado na revisão bibliográfica, as fibras, ao serem incorporadas na matriz cimentícia, tendem a absorver as tensões responsáveis por causar a propagação de fissuras e, por conseguinte, tornam a matriz menos frágil quando comparada com o concreto convencional. Utilizando a lupa microscópica, foi possível observar o concreto convencional e o concreto CRF: a imagem destes dois está na Figura 5.8.

Figura 5.8 - O papel de fibra como um obstáculo ao desenvolvimento de fissuras

(a) Fibra impedido a propagação da fissura na matriz

(b) Matriz sem reforço



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A fissura do concreto convencional (Figura 5.8 b) tenderá a se propagar com mais intensidade, levando o material ao colapso. Em contrapartida, no concreto reforçado, as fibras tendem a reduzir esta velocidade de propagação de fissuras, servindo como pontes que absorvem as tensões (Figura 5.8 a).

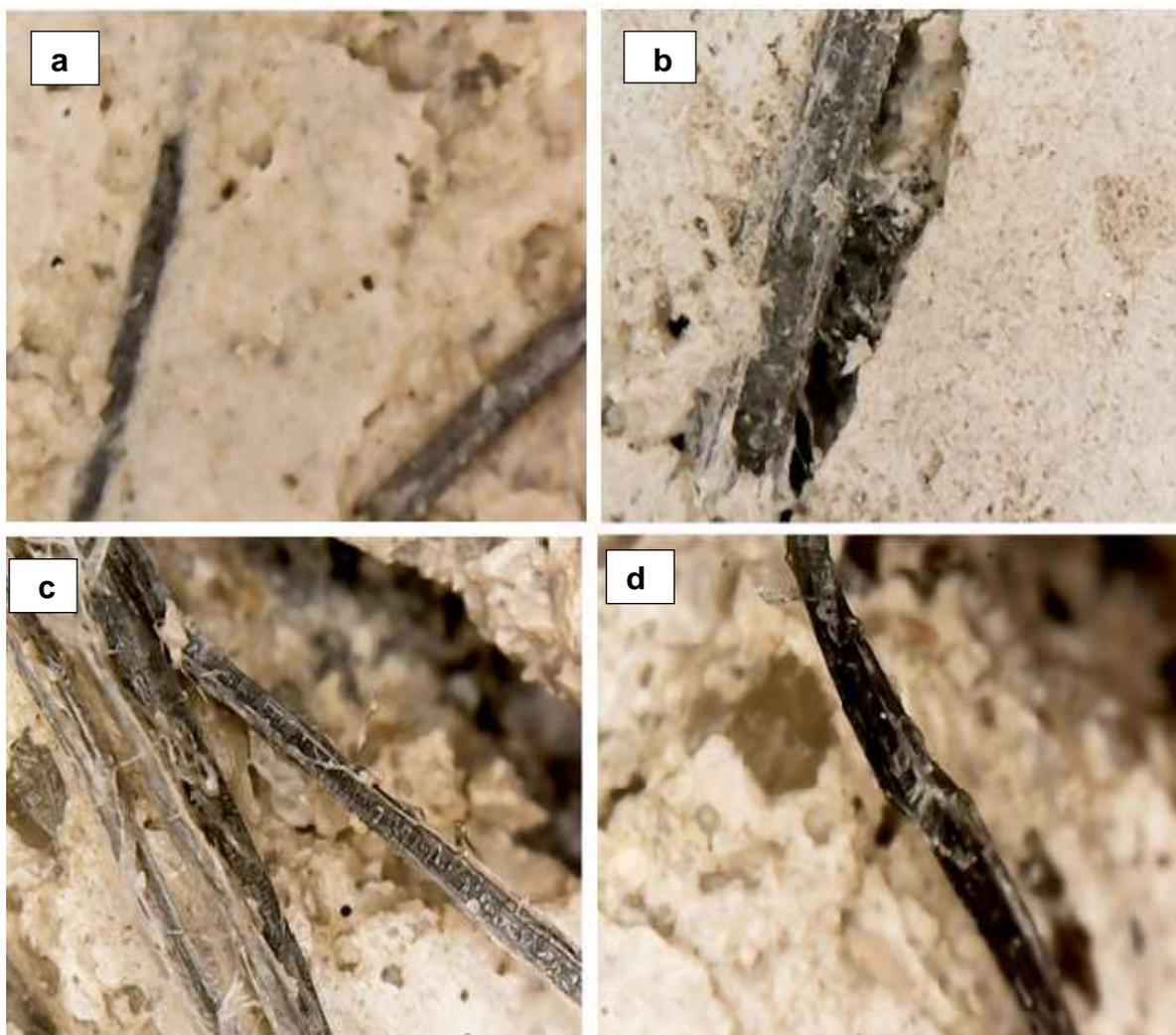
5.4.2 Visualização de aderência Matriz-Fibras

A interface entre a fibra e a matriz é de extrema importância, pois todos os benefícios que o novo compósito, formado pelo concreto e as fibras, pode oferecer está relacionado diretamente com a eficiência de aderência entre estes dois materiais. Por meio da lupa microscópica, cuja imagem é ilustrada pela Figura 5.9, pode-se visualizar a aderência da fibra na matriz. Nos dois primeiros casos, (a) e (b), as fibras se aglutinaram melhor na matriz e houve mais aderência do que nos casos (c) e (d), da mesma amostra estudada.

Figura 5.9 - Avaliação visual de aderência fibra-matriz através de lupa microscópica

(a) e (b) uma boa aderência fibra-matriz

(c) e (d) com uma aderência fraca de fibra-matriz



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

5.5 Avaliação das camadas protetoras através de ataques acelerados dos concretos

O ataque aos concretos foi realizado imergindo os corpos de provas em uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_2) 2,5% no período de sete dias, conforme refletido na Figura 5.10.

O objetivo deste ensaio acelerado é avaliar o comportamento dos concretos em contato com o meio agressivo estudado. O desempenho e o grau de degradação dos corpos de prova, que foram imersos em solução de ácido sulfúrico, foram avaliados a partir dos seguintes métodos:

- A inspeção visual dos corpos de prova, comparando a aparência do dois corpos de prova, com a finalidade de avaliar o teor da degradação causado pela imersão prolongada em um ambiente agressivo;
- A absorção de água por imersão, para verificar a influência da porosidade na vulnerabilidade dos concretos na inserção do agente agressivo;
- A medição das massas dos corpos de prova, antes e depois do período de imersão, com intuito de obter o percentual da perda ou de acréscimo de massa dos corpos de provas;
- E também, a obtenção dos valores da resistência à compressão das amostras antes e depois de ataque.

Figura 5.10 - Ataque dos corpos de provas



5.5.1 Inspeção visual do processo de degradação dos corpos de prova

A inspeção visual, reproduzida na Figura 5.11, permitiu avaliar visualmente a degradação superficial dos corpos de prova, após o ataque químico, e demonstra o início da desagregação do material, com o surgimento de compostos expansivos causados pelo ataque por ácido

sulfúrico, e também expõe as camadas superficiais de poliuretano e epóxi, que servem de barreira contra esse ataque químico.

Figura 5.11- Inspeção visual dos corpos de provas

Tipo de CPs	Estado dos corpos de Prova	Constatação
<p>Concreto de referência e reforçado com fibras</p>		<p>Os dois concretos apresentaram um aspecto mais esbranquiçado, desagregação fácil do material (na forma de pó), portanto um desgaste superficial mais evidente.</p>
<p>Concreto de referência e reforçado com fibras com camadas superficiais à base de epóxi</p>		<p>A proteção superficial serviu de barreira para evitar a desagregação do material.</p>
<p>O concreto de referência e reforçado com fibras com camadas superficiais à base de Poliuretano</p>		<p>A proteção superficial serviu de barreira para evitar a desagregação do material.</p>

5.5.2 Absorção por imersão de água após ataque

A seguir, estão apresentados na Tabela 5.12 os resultados obtidos no ensaio de absorção por imersão dos concretos, realizado de acordo com as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009).

Tabela 5.12 - Absorção por imersão dos concretos sem e com revestimentos

Proteção	Concreto de Referência	Concreto Reforçado com fibras
	Absorção (%)	Absorção (%)
Sem proteção	2,5	2,1
Com proteção Poliuretano	1,5	1,5
Com proteção epóxi	1,1	0,8

Os resultados do ensaio de absorção, demonstrado na tabela 5.12, permitiram avaliar que o concreto de referência teve um índice médio de absorção de 2,5 % e o concreto reforçado apresentou um índice de absorção menor, de 2,1%. O índice de absorção, nesta comparação, foi reduzido consideravelmente depois que os corpos de provas foram protegidos superficialmente. Dentre as duas proteções utilizadas, o epóxi apresentou um desempenho melhor que a proteção à base de poliuretano.

5.5.3 Perdas de massa dos corpos de provas

Na Tabela 5.13 são exibidos os resultados obtidos no ensaio de perdas de massa do concreto de referência e do concreto reforçado, antes e após ataque por ácido sulfúrico, em um período de sete dias corridos.

Tabela 5.13- Resultados das perdas de massas

Proteção	Concreto de Referência	Concreto Reforçado com fibras
	Perdas de massa (%) *	Perdas de massa (%) *
Sem Proteção	1,9	1,6
Com Proteção à base de poliuretano	1,2	1,1
Com Proteção à base de epóxi	0,8	0,4

$$PM(\%) = \frac{M_f - M_s}{M_s} \cdot 100$$

Onde: M_s é a massa antes do ataque

M_f é a massa após ataque

PM é a perda de massa

Os resultados apresentados indicam uma perda maior de massa dos concretos sem proteção, sendo que a do concreto de referência foi de 1,9 % contra 1,6 % do concreto reforçado. Já com a proteção dos concretos, observa-se uma redução considerável dessa perda: na proteção com a camada a base de poliuretano as perdas de massa foram de 1,2 % a 1,1 %; e para a

proteção a base de epóxi, que se mostrou mais eficiente, os resultados obtidos foram de 0,8% e 0,4%, para os concretos de referência e reforçado, respectivamente.

5.5.4 Resistência à compressão com e sem proteção antes e após ataque

Prosseguindo, tem-se na Tabela 5.14 os resultados obtidos nos ensaios de perdas de resistência do concreto de referência e do concreto reforçado, antes e após ataque por ácido sulfúrico em um período de sete dias corridos.

Tabela 5.14 - Resistência à compressão antes e depois do ataque

Concreto	Tipo Proteção	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	
		Antes do ataque	Após ataque
Concreto de referência	Poliuretano	27,44	17,95
	Epóxi	27,44	18,0
Concreto reforçado com fibras	Poliuretano	33,3	18,3
	Epóxi	33,3	24,1

A partir dos resultados obtidos, observou-se que os concretos de referência tanto para proteção superficial à base de poliuretano como para o epóxi apresentaram o mesmo nível de perda de resistência, variando de 27,4 MPa antes do ataque para 18,0 MPa após o ataque, ou seja, uma redução de resistência de 33%. Isto ocorreu devido a menor aderência das proteções na superfície dos concretos analisados.

No que se refere ao concreto reforçado protegido por poliuretano, observou-se também uma grande perda de resistência, de 33,3 MPa para 18,0 MPa. Esta baixa eficiência de proteção a base de poliuretano observada ocorreu devido a uma reação indesejada e inesperada, na qual foi constatado que a proteção apresentou um aspecto pastoso na superfície dos concretos ao sofrer um severo ataque de ácido sulfúrico. Referindo-se ainda ao concreto reforçado com

fibras, que desta vez foi protegido por epóxi, apresentou uma menor perda de massa, de 33,3 MPa antes do ataque para 24,1 MPa após o ataque, quando comparado com os dois casos anteriores. Isto demonstra a eficiência da proteção superficial do epóxi em servir como barreira, evitando assim o ingresso dos agentes químicos.

6 CONCLUSÕES

O desempenho do concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno foi avaliado através da comparação de um concreto com 1% de fibras e um concreto de referência.

O concreto de referência produzido com 370 kg/m³ de cimento, relação água/cimento 0,50 e aditivo plastificante apresentou resistência à compressão de 27,4 MPa, resistência à tração indireta de 7,5 MPa e absorção menor que 10%, o que o caracteriza como um concreto durável, podendo ser submetido a uma agressividade de nível II segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014)

O concreto reforçado com 1% de fibras, produzido com as mesmas características do concreto de referência, apresentou uma resistência à compressão de 33,3 MPa e uma resistência à tração indireta de 10,8 MPa, o que permite comprovar a eficiência das macrofibras como reforço a matriz cimentícia, reduzindo a propagação de fissuras e aumentando a resistência mecânica.

O comportamento e o desempenho do concreto de referência, e do concreto reforçado de fibras, quanto submetido a meio agressivo foi avaliado através da comparação de um concreto com proteção à base de poliuretano e de um concreto com epóxi. Os resultados mostraram que os concretos sofreram alterações importantes em suas propriedades físicas e químicas devido às condições de exposição. A inspeção visual evidenciou claramente que tanto o concreto de referência quanto o concreto reforçado sofreram um desgaste superficial importante, apresentando um material esbranquiçado e de fácil desagregação em sua superfície. A perda de massa é um parâmetro importante na avaliação da durabilidade, e os resultados obtidos em corpos de provas, antes e após ataque, demonstraram que o concreto reforçado com fibras apresentou menor perda de massa e menor perda de resistência à compressão quando comparado ao concreto de referência, comprovando que o concreto com fibras tem mais durabilidade e conseqüentemente uma maior vida útil. Um concreto mesmo com características de durabilidade, quando submetido a meios agressivos demanda uma proteção extra obtida através de um revestimento superficial a fim evitar danos expressivos.

Foram analisados neste trabalho o comportamento e desempenho do concreto de referência e do concreto com fibras revestidas com proteções superficiais, uma tinta à base de poliuretano e uma tinta epóxi.

A avaliação das proteções foi obtida mediante a comparação de corpos de prova através da inspeção visual, pela avaliação de perdas de massa e de perdas de resistência. Os resultados mostraram que as perdas de massa do concreto de referência foram de 1,2 % para o concreto protegido por poliuretano e de 0,8 % para o concreto protegido com epóxi. As perdas de massa do concreto reforçado com fibras foram de 1,1 para o concreto protegido de poliuretano e 0,4 para o concreto com a proteção epóxi. Os resultados mostraram que a proteção à base de epóxi apresentou um melhor desempenho do que a proteção à base de poliuretano.

No que se refere às perdas de resistência, o concreto de referência teve uma perda de resistência de 27,4 MPa para 18 MPa tanto para o concreto com proteção à base de poliuretano como para o concreto com proteção epóxi. O concreto reforçado com fibras teve uma perda de resistência similar a do concreto de referência para o concreto protegido por poliuretano e uma perda de resistência de 33,3 MPa para 24,1 MPa para o concreto protegido com epóxi, demonstrando mais uma vez a eficiência da proteção superficial à base de epóxi em concretos submetidos ao ataque por ácido sulfúrico.

Este estudo, ao demonstrar o desempenho do concreto reforçado com macrofibras tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração indireta, se propõe a contribuir com as pesquisas de materiais compósitos. Os resultados obtidos permitem evidenciar também a eficiência do concreto reforçado com fibras quando submetido a meio agressivo, comprovando seu potencial no aumento da vida útil das estruturas.

7 SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS

A seguir, apresentamos possíveis considerações para estudos posteriores, listando alguns pontos que podem ser explorados:

- 1.** Analisar, comparativamente, o ganho proporcionado pela incorporação das macrofibras sintéticas de polipropileno aos concretos formados com diferentes tipos de cimento.
- 2.** Avaliar o processo de degradação do concreto reforçado com macrofibras sintéticas de polipropileno ao longo do tempo.
- 3.** Verificar a influência das macrofibras sintéticas de Polipropileno no comportamento do concreto em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 544. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544-97). Farmington Hills: American Concrete Institute; 1997. 66 p.

ALMUSALLAM, A.A.; KHAN, F.M.; DULAIJAN, S.U.; B.AL-AMOUDI, O.S. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. Cement & Concrete Composites, n. 25, p.473-481, 2003

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS.ASTM C1116/C 1116M-08a, Standard specification for Fiber-reinforced Concrete and Shortcrete. Philadelphia, 2012. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS.ASTM C1666 / C1666M-08, Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement. Philadelphia, 2008. 4p.

AFROUGHSAKET. V, OZBAKKALOGLU. T Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, Jornal construction Building Materials. V 94, p. 73-82, Jun.2015.

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação de Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. NBR NM 67,1998, ABNT, Rio de Janeiro.

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: 2009 Versão Corrigida: 2009 Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

____ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014 Versão Corrigida:2014 Projeto de estruturas de concreto — Procedimento

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218:2010 Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2015 Versão Corrigida: 2016 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: 2018 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

____ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372:2015 Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:

2009 Agregados para concreto - Especificação

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: C 2006

Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52:2003

Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 49:2001

Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas

ABNT NBR NM 248: 2003 Agregados - Determinação da composição granulométrica

ABNT NBR NM 46:2003 Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52:2009

Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR

8953:2015 Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência

____ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 51:2001

Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"

BELHADJ. A. H, MAHIB. A, DERBAL. R, AOUANE. R. Comportement des bétons légers fibrés à base des granulats pouzzolaniques vis-à-vis des milieux acides, 23^o congrés français de Mécanique, Lille, Août, 2017.

BANTHIA N, GUPTA. R, Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete, Cem. Concr. Res. 36 (7) (2006) 1263–1267.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

BHARGAVA, A, Permeability of fiber reinforced concrete under stress, 2004, Theses (master in civil engineering) at University of Columbia, 2004.

COURARD L. Compositions, fabrication, nomenclature, essais, emplois. In :Cours de matériaux de construction 2008, [slides].Liège, Université de Liège,116p, inédit.

DOTTO, J.M.R, Corosão do Aço induzida por íons cloretos- uma análise critica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolona, 2006. 357 p. Teses (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2006.

FIGUEIREDO, A. D. Rheological Behavior of Dry-Mix Shotcrete. In: II International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. ACI/CANMET and UFRGS/UFSC/USP. Proceedings. Gramado, Brazil, June 1-4, 1999.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto reforçado com Fibras. 2011.Tese (Livre-docência) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo.

FRITIH, Y Apport d'un renfort des fibres sur le Comportement d'elements en beton autoplaçant armé. These de doctorat, Université de Toulouse, 246 p, France, 2009

GIROFFO L.S, Barbosa M. P, Maciel G. F, Rheology behavior study of plastic shrinkage and cracking os self-compacting concrete mortars. Ibrancon de estruturas andmaterials, vol 7 nº01, p 24-52, Feb.2014.

HELENE, P. Protección y Mantenimiento de las Superfícies de Hormigón. In: CASANOVAS, X. Manual de Diagnosis e Intervención em Estructuras de HormigónArmado. Espanha: Col-legi d'Aparelladors i ArquitectesTècnics de Barcelona, 2000. Capítulo 12, p.115-126.

JUAREZ. C, FAJARDO. G, VALDEZ. P; Caractérisation microstructurale des fibres naturelles pour des matériaux composites à base de ciment, Canadian Journal of Engineering, nm] 36, v3, p- 449-462 2009

KIM. B; Boyd A. J; Lee J.Y, Durability performance of fiber reinforced concrete in sever environementes, Jornal of composite Materials, nº45, v 23, p- 2379-2389 2011.

Khelifa, M.R, Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants. 2009. 179 p. These de doctorat, Université d'orléans, 2009.

LEAL T. F.M; Fontenele A.P.G; Pedrotti J. J, Composição iônica majoritária de águas de chuvas na grande São Paulo, revista química nova, vol 27, nº6 p.855 – 861, Abril, 2004.

MEDEIROS, M.H.F e HELENE P, Durabilidade e proteção do concreto armado, revista Técnica v 150, Setembro de 2009.

MEHTA P and Monteiro PJ. Concrete: microstructure, properties, and materials. New York: McGraw-Hill, 2006.

MU, B; MEYER, SHIMANOVICH, S improving the interface bond cement fiber mesh and cementitious matrix. Cement and Research, 32, May 2002 pp 783-787

NEVILLE, A. M, Propriedades do Concreto. Trad. Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PICANÇO, M. S. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá. 2005. 25 p. Dissertações (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PELISSER. F, Neto.A.B.S.S.,Rovere.A.L, Pinto.R.CA Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking, Journal Construction and Building Materials, v. 50, p. 271-2176, Apr. 2010.

RIBEIRO, M.C. PINTO SILVA, J.D., STARLING, T. Materiais de construção Civil. Belo Horizonte: Editora UFMG, 4ª edição. 2013.

SALVADOR R. P, FIGUEIREDO A. D, Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço, revista matéria, V18 N.2, p. 1273 – 1285, Jun.2014.

SAEED A., IMRAM A.B, JAVED I. S, SHAHZAD A. Q, a study on properties of polypropylene fiber reinforced, concrete Singapore, 2006 p-

SOUZA, R. B. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – Método de ensaio acelerado. 2006. 139 p. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TOLEDO FILHO, R. D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement & Concrete Composites*, v.22, p.127-143, 2000