

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Tese de Doutorado

**CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO SUBMETIDO A  
ATAQUE POR ÁCIDO CLORÍDRICO**

Autor: Felipe de Souza Abreu

Orientador: Prof. Vicente Tadeu Lopes Buono

Coorientadora: Profa. Carmen Couto Ribeiro

Felipe de Souza Abreu

**CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO SUBMETIDO A  
ATAQUE POR ÁCIDO CLORÍDRICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Vicente Tadeu Lopes Buono

Coorientadora: Profa. Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
2021

A162c	<p>Abreu, Felipe de Souza. Concreto reforçado com fibras de carbono submetido a ataque por ácido clorídrico [recurso eletrônico] / Felipe de Souza Abreu. – 2021. 1 recurso online (xii, 89 f.: il., color.): pdf.</p> <p>Orientador: Vicente Tadeu Lopes Buono. Coorientadora: Carmen Couto Ribeiro.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 82-89.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de Minas - Teses. 2. Ácido Clorídrico - Teses. 3. Concreto – Teses. 4. Fibras de carbono – Teses. 5. Microscopia -Teses. I. Buono, Vicente Tadeu Lopes. II. Ribeiro, Carmen Couto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622(043)</p>
-------	---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia**  
**Metalúrgica, Materiais e de Minas**



Tese intitulada "**Concreto Reforçado com Fibras de Carbono Submetido a Ataque por Ácido Clorídrico**", área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais, apresentada pelo candidato **Felipe de Souza Abreu**, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Vicente Tadeu Lopes Buono  
Orientador - Dr. (UFMG)

Prof.ª Maria Carmen Couto Ribeiro  
Coorientadora - Drª (UFMG)

Prof.ª Jacqueline Maria Flor  
Drª (UFMG)

Prof. Normando Perazzo Barbosa  
Dr. (UFPB)

Prof.ª Danielle Meireles de Oliveira  
Drª (UFMG)

Prof.ª Joana Darc da Silva Pinto  
Drª (PUC/MINAS)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 13 de julho de 2021



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram na realização deste trabalho e, em especial:

Aos meus pais, pelo amor, pela formação do meu caráter, apoio constante e pelo exemplo de vida;

Ao meu irmão, pelo incentivo e carinho;

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

Aos meus familiares e, em especial, aos meus tios, primos, cunhados e sogros;

À Prof.<sup>a</sup> Carmen Couto Ribeiro, pela confiança e dedicação no desenvolvimento de todo trabalho, por ter contribuído de forma significativa na minha capacidade de análise crítica e visão da sociedade, bem como pela ética, entusiasmo e compromisso;

Ao Arquiteto Tadeu Starling, pela sua importante contribuição neste trabalho;

À Prof.<sup>a</sup> Joana Darc Silva Pinto, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pelo exemplo como pesquisadora, interesse e por suas observações e apoio durante o período de estudos;

Ao meu Orientador Prof. Vicente Buono, pela oportunidade de fazer o doutorado no Departamento de Engenharia Metalúrgica, por ter acreditado no desenvolvimento do estudo e pela confiança durante todo o período;

À Maria Aparecida, secretária da pós-graduação, pela dedicação e presteza na solução de questões acadêmicas;

Ao Márcio Zola Santiago, pela sua importante participação nas traduções durante todo o desenvolvimento do trabalho;

À Prof.<sup>a</sup> Luciana Dias, coordenadora dos laboratórios do curso de Engenharia Civil da PUC Minas;

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

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção da PUC Minas, Roberto, Igor, Diego, André e Heider, pelo apoio e presteza na produção do concreto e nos testes de resistência mecânica;

À técnica Edilene do laboratório de microscopia avançada da PUC Minas, pelo apoio nos ensaios;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas da UFMG (PPGEM);

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG;

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) que de forma direta e indireta forneceram recursos para este trabalho científico.

## RESUMO

A utilização de fibras artificiais metálicas ou sintéticas para reforço do concreto na construção, tem sido cada vez mais difundida. Experimentos voltados para avaliação da durabilidade demonstraram que o concreto reforçado com fibras pode apresentar menores variações de massa, boa aparência e boa resistência mecânica. Neste contexto, as fibras de carbono têm se destacado entre a nova geração de compósitos cimentícios reforçados porque este tipo de fibra possui baixa densidade, baixo coeficiente de expansão, alta resistência à tração, boa estabilidade química e excelente durabilidade. Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência aos esforços mecânicos, a microestrutura e a durabilidade do concreto especial com adição de fibras de carbono através de ensaios específicos e da exposição a um meio agressivo ácido. O desempenho do novo compósito foi avaliado em diversos experimentos, entre eles a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade. Imagens das fibras e de superfícies fraturadas de concreto foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A adição de fibras de carbono resultou em aumentos estatisticamente significativos nas resistências à compressão e à tração do concreto e não resultou em alterações significativas em seu módulo de elasticidade. A fibra de carbono atua diretamente no mecanismo de fissuração do concreto no momento da ruptura, restringindo a formação de grandes fissuras a partir de microfissuras e garantindo a integridade da zona de transição mantendo o agregado graúdo aderido à matriz cimentícia. O desempenho desse material compósito quando submetido a ambientes agressivos foi avaliado através da exposição do concreto a um ataque ácido por cloreto ( $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  10%) durante 7 dias. As propriedades mecânicas antes e depois do ataque ácido mostraram que o concreto com adição de fibras de carbono permaneceu mesmo após o ataque químico, com valores superiores aos encontrados para o concreto convencional. A pesquisa permitiu concluir que a adição de fibras de carbono no concreto é positiva, proporcionando melhorias mecânicas, reduzindo a fissuração do concreto e melhorando o desempenho quando submetido ao ataque ácido, quando comparado ao concreto convencional, ampliando a durabilidade e conseqüentemente a vida útil das estruturas.

**Palavras chave:** Concreto, fibra de carbono, concreto com fibras, durabilidade, ataque ácido por cloreto, análise microestrutural, controle de fissuração.

## ABSTRACT

Artificial metallic or synthetic fibers used to reinforce concrete in construction has been increasingly widespread. Durability tests have shown that fiber-reinforced concrete can present smaller variations in mass, good appearance and good mechanical strength. In this context, carbon fibers have stood out among the new generation of reinforced cementitious composites because this type of fiber has low density, low coefficient of expansion, high tensile strength, good chemical stability and excellent durability. This study aims to evaluate the mechanical resistance, microstructure and durability of special concrete with the addition of carbon fibers in specific tests and exposure to an aggressive acidic environment. In order to explain the relationship of structure and property of the new composite, images of the fibers and fractured surfaces of the concrete were evaluated by scanning electron microscopy (SEM). The addition of carbon fibers resulted in statistically significant increases in the compressive and tensile strengths of concrete and did not result in significant changes in its modulus of elasticity. The carbon fiber acts directly on the concrete cracking mechanism at the moment of rupture, restraining the formation of large cracks from microcracks and maintaining the transition zone of the coarse aggregate adhered to the matrix. The performance of this innovative composite material under exposure to aggressive environments was determined by a 7-day chloride acid (HCl(aq) 10%) attack experiment. The mechanical properties, assessed before and after the chemical attack, indicated that, both before and after an acid exposure, the concrete added with carbon fibers presented a compressive strength superior to the minimum value for concrete structures (20MPa), which was not reached by conventional concrete. The research concludes that the addition of carbon fiber waste into the concrete is positive, providing mechanical improvements and performance improvements when subjected to acid attack, when compared to conventional concrete, increasing the durability and consequently the service life of the structures.

**Keywords:** Concrete, carbon fibers, fiber concrete, durability, chloride acid attack, microstructural analysis, concrete cracking control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ensaio de abatimento pelo método do abatimento do tronco de cone, para medida da consistência do concreto fresco.....	11
Figura 3.2 – Ensaio de tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico. ....	14
Figura 3.3 – Gráfico de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto. ....	15
Figura 3.4 – Representação ilustrada da zona de transição do concreto.....	17
Figura 3.5 – Zona de transição agregado graúdo/pasta – Ampliação de 100X e 500X. ....	18
Figura 3.6 – Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto devido a corrosão das armaduras.....	23
Figura 3.7 – Fissuração e deslocamento da camada de cobrimento em estruturas de concreto litorâneas. ....	26
Figura 3.8 – Concreto no estado fresco com fibras sintéticas.....	29
Figura 3.9 – Diagrama de tensão por deformação de matriz e fibras de alto e baixo módulo e elasticidade trabalhando em conjunto.....	30
Figura 3.10 – Esquema de concentração de tensões: (a) para um concreto sem fibras e (b) com adição de fibras. ....	31
Figura 3.11 – Fissuras em tirantes submetidos à tração: (a) para o concreto convencional, (b) concreto com adição de fibras, (c) controle da propagação de fissuras para fibras longas e curtas. ....	32
Figura 3.12 – Desenvolvimento da demanda global de fibra de carbono de 2010 a 2023 (* Estimativas de 09/2019). ....	33
Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental.....	35
Figura 4.2 – Ensaio de módulo de elasticidade de corpo de prova cilíndrico.....	38
Figura 4.3 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Microscopia Avançada da PUC Minas. ....	39
Figura 5.1 – Curva granulométrica da areia lavada média.....	45
Figura 5.2 – Curva granulométrica da brita de gnaiss (nº 1).....	45
Figura 5.3 – Manta de fibra de carbono.....	46
Figura 5.4 – Aglomerado de fibras de carbono cortada sem ampliação. ....	47

Figura 5.5 – Aspecto da fibra de carbono em lupa. Ampliação original: (a) 8 vezes; (b) 20 vezes; (c) 50 vezes. ....	47
Figura 5.6 – Imagens de elétrons secundários de monofilamentos de fibra de carbono em diferentes ampliações: (a) 5.000X ; e (b) 20.000X.....	48
Figura 5.7 – Diâmetros de fibra de carbono obtida em imagens MEV. ....	48
Figura 5.8 – Concreto fresco: (a) convencional de referência; (b) concreto com adição de 2% de fibras de carbono.....	50
Figura 5.9– Ensaio de abatimento do tronco de cone: (a) concreto de referência; (b) concreto com fibras de carbono. ....	51
Figura 5.10 – Conjunto de fibras de carbono aglutinadas e incrustadas na superfície retificada de um corpo de prova cilíndrico. ....	52
Figura 5.11– Ensaio de abatimento do tronco de cone: (a) concreto de referência; (b) concreto com fibras de carbono. ....	57
Figura 5.12 – Ataque submerso com solução ácida de $HCl_{(aq)}$ a 10%. (a) Momento em que o ácido entrou em contato com as amostras (b) Amostras após 7 dias de ataque com ácido.....	58
Figura 5.13 – Resistência à compressão do concreto antes e depois do ataque por ácido clorídrico. ....	60
Figura 5.14 – Resistência à tração dos concretos antes e depois do ataque por ácido clorídrico. ....	62
Figura 5.15 – Resultados individuais da taxa de absorção e índice de vazios antes e depois do ataque ácido. ....	64
Figura 5.16 – Peso seco individual e perdas de massa dos corpos de prova de concreto após ataque por ácido clorídrico.....	67
Figura 5.17 – Concreto convencional: (a) antes do ataque; (b) depois do ataque. ....	68
Figura 5.18 – Concreto com 2% de fibras de carbono: (a) antes do ataque; (b) depois do ataque. ....	69
Figura 5.19 – Inspeção visual da seção do concreto: (a) 2% de fibras de carbono; (b) convencional.....	70
Figura 5.20 – Amostra da microestrutura do concreto de referência após ruptura por compressão, antes do ataque: (a) Amostra 01 – ampliação de 150X; (b) Amostra 01 – ampliação de 450X.....	71
Figura 5.21 – Zona de transição da microestrutura da amostra do concreto de referência após a ruptura por compressão, antes do ataque: Amostra 02 - ampliação de 400X. ....	72

Figura 5.22 – Zona de transição da microestrutura da amostra do concreto de referência após a ruptura por compressão, depois do ataque: Amostra 03 – ampliação de 100X. ....	73
Figura 5.23 – Amostra da microestrutura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, antes do ataque: Amostra 04 – (a) ampliação de 50X; (b) ampliação de 150X. ....	74
Figura 5.24 – Amostra da microestrutura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, após ataque ácido: Amostra 05 – ampliação de 100X. ....	75
Figura 5.25 – Amostra da microestrutura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, após ataque ácido: Amostra 06 – ampliação de 500X. ....	76
Figura 5.26 – Microfissuração do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após a ruptura por compressão, antes do ataque ácido: Amostra 07 – (a) ampliação de 100X; (b) ampliação de 500X. ....	77
Figura 5.27 – Interação entre matriz cimentícia e as fibras de carbono no concreto com adição de 2% de fibras de carbono após a ruptura por compressão, antes do ataque ácido: Amostra 08 – ampliação de 2500X. ....	78
Figura 5.28 – Interação entre matriz cimentícia e as fibras de carbono no concreto com adição 2% de fibras de carbono após a ruptura por compressão, depois do ataque ácido: Amostra 09 – (a) ampliação de 500X; (b) ampliação de 2500X. ....	79

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Classes de consistência do concreto.....	12
Tabela 3.2 – Classes de resistência do concreto estrutural.....	13
Tabela 3.3 – Desvio padrão para cada tipo de controle.....	19
Tabela 3.4 – Classes de agressividade ambiental.....	20
Tabela 3.5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto. ....	21
Tabela 3.6 – Agentes agressivos externos e efeitos no concreto. ....	24
Tabela 5.1 – Ensaio de caracterização do cimento Portland CII-E-32. ....	43
Tabela 5.2 – Ensaio de caracterização e qualificação do agregado miúdo.....	43
Tabela 5.3 – Ensaio de caracterização e qualificação do agregado graúdo.....	44
Tabela 5.4 – Características mecânicas da fibra de carbono. ....	46
Tabela 5.5 – Consumo de materiais para produzir 1m <sup>3</sup> de concreto.....	49
Tabela 5.6 – Resistência à compressão de 28 dias para concreto de referência e concreto com adição de 2% de fibras de carbono. ....	53
Tabela 5.7 – Resistência à tração por compressão diametral de 28 dias para concreto de referência e concreto com adição de 2% de fibras de carbono.....	54
Tabela 5.8 – Módulo de elasticidade de 28 dias para concreto de referência e concreto com adição de 2% de fibras de carbono.....	55
Tabela 5.9 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto convencional e do concreto com adição de 2% fibras de carbono.....	56
Tabela 5.10 – Resistência à compressão dos concretos antes e depois do ataque. ...	59
Tabela 5.11 – Resistência à tração dos concretos antes e depois do ataque.....	61
Tabela 5.12 – Módulo de elasticidade dos concretos antes e depois do ataque.....	63
Tabela 5.13 – Absorção média de água no concreto antes e depois do ataque de ácido clorídrico. ....	65
Tabela 5.14 – Absorção média de água no concreto antes e depois do ataque de ácido clorídrico. ....	66



## LISTA DE NOTAÇÕES

a/c - relação água/cimento

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

DEMC - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

DEMET - Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais

$D_{max}$  - Dimensão máxima característica (mm)

$f_{cj}$  - Resistência do concreto à compressão prevista para a idade de j dias

$f_{ck}$  - Resistência característica do concreto à compressão

FEG - Field Emission Gun

GPa - Gigapascal

INT - Instituto Nacional de Tecnologia

IPT - Instituto De Pesquisa Tecnológica

ITERS - Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

MF - Módulo de Finura

MPa - Megapascal

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

p - "p-value" estatístico

PPGEM - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas

PUC - Pontifícia Universidade Católica

Sd – Desvio padrão

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: Introdução</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 2: Objetivos</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 3: Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Características do concreto</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Trabalhabilidade .....	10
3.1.2 Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade .....	12
3.1.3 Permeabilidade e absorção .....	16
3.1.4 Microfissuração e zona de transição .....	16
<b>3.2 Dosagem do concreto</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3 Durabilidade das estruturas de concreto</b> .....	<b>19</b>
<b>3.4 Mecanismo de ataques ácidos</b> .....	<b>22</b>
3.4.1 Ataque por ácido clorídrico .....	22
<b>3.5 Patologias</b> .....	<b>25</b>
<b>3.6 Concreto com adição de fibras</b> .....	<b>27</b>
<b>3.7 Sustentabilidade do concreto com adição de fibras de carbono</b> .....	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 4: Metodologia</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1 Método</b> .....	<b>36</b>
4.1.1 Dosagem do concreto .....	36
4.1.2 Produção do concreto .....	37
4.1.3 Características físicas e mecânicas do concreto .....	37
4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	38
4.1.5 Ataque por ácido clorídrico .....	40
4.1.6 Perdas de massa .....	41
<b>CAPÍTULO 5: Resultados e Discussão</b> .....	<b>42</b>
<b>5.1 Caracterização dos materiais constituintes</b> .....	<b>42</b>
5.1.1 Aglomerante e agregados .....	42
5.1.2 Fibras de carbono .....	45
<b>5.2 Consumo de materiais</b> .....	<b>49</b>
<b>5.3 Produção do concreto com adição de fibras de carbono</b> .....	<b>50</b>

<b>5.4 Primeira série de dosagem</b> .....	<b>51</b>
5.4.1 Resistência à compressão.....	52
5.4.2 Resistência à tração .....	54
5.4.3 Módulo de elasticidade.....	55
5.4.4 Absorção e índice de vazios.....	56
<b>5.5 Segunda série de dosagem</b> .....	<b>57</b>
5.5.1 Ataque por ácido clorídrico .....	58
5.5.2 Resistência à compressão.....	59
5.5.3 Resistência à tração .....	61
5.5.4 Módulo de elasticidade .....	63
5.5.5 Absorção e índice de vazios.....	64
5.5.6 Perdas de massa .....	66
5.5.7 Inspeção Visual .....	67
5.5.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	70
<b>CAPÍTULO 6: Conclusões</b> .....	<b>80</b>
<b>6.1 Conclusões gerais</b> .....	<b>80</b>
<b>6.2 Contribuições originais</b> .....	<b>82</b>
<b>6.3 Sugestões de trabalhos futuros</b> .....	<b>83</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>84</b>

## **CAPÍTULO 1: Introdução**

O concreto é um material versátil que pode se adaptar a diferentes locais e circunstâncias com custo competitivo em relação a outros materiais estruturais, garantindo excelente durabilidade. A fissuração é fator decisivo para a durabilidade e o conceito do concreto reforçado com fibras vem sendo aprimorado desde o ano 1900, quando fibras de amianto foram adicionadas à pasta de cimento, visando melhorar suas propriedades. Os grupos básicos de fibras aplicadas para concretos podem ser classificadas de acordo com seu material: fibras de carbono; fibras naturais; fibras de aço de diferentes formas e dimensões; fibras de vidro; fibras sintéticas feitas com materiais como polipropileno e polietileno.

As fibras de carbono têm se destacado na nova geração de compósitos cimentícios reforçados. Este tipo de fibra possui baixa densidade, baixo coeficiente de expansão, alta resistência à tração, boa estabilidade química e excelente durabilidade. A adição das fibras de carbono no concreto pode atuar na redução da propagação de fissuras causadas por retrações ou movimentações de ordem estrutural.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência aos esforços mecânicos, a microestrutura e a durabilidade do concreto com adição de fibras de carbono através de ensaios específicos e da exposição ao ácido clorídrico (HCl(aq) 10%) durante 7 dias. A partir de imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram analisados os mecanismos de ruptura do concreto, visando compreender como as fibras de carbono alteram as propriedades físicas, mecânicas e como esta adição pode garantir uma maior durabilidade.

O desempenho mecânico do novo compósito foi avaliado pela resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Imagens das fibras e de superfícies fraturadas de concreto obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite compreender como a fibra de carbono atua diretamente no mecanismo de fissuração do concreto no momento da ruptura e no processo de formação e propagação de fissuras na zona de transição.

A revisão bibliográfica revelou que há uma demanda por novas alternativas de reciclagem de fibra de carbono, e que as opções devem ser seguras para o ser humano, de baixo custo com menores emissões e demanda de energia. Este trabalho pode ainda viabilizar a utilização de resíduo das fibras de carbono oriundos de indústrias como a construção, aeroespacial, automotiva e esportiva. Por ser utilizado em larga escala em todo mundo, o concreto justifica a possibilidade do viés sustentável, uma vez que, a adição de resíduos na mistura deste material pode resultar na economia de matéria-prima, de energia e de emissão de gases tóxicos na atmosfera.

As propriedades físicas/mecânicas foram analisadas e através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível compreender como as fibras de carbono atuaram na melhoria das propriedades do concreto. Além disso, a análise da degradação do concreto submetido a um meio agressivo ácido é crucial para avaliar a durabilidade do concreto com fibras de carbono. Desta maneira o trabalho buscou criar umnexo entre as macroestruturas e a microestrutura deste novo tipo de concreto, justificando sua possibilidade de utilização na construção civil.

## **CAPÍTULO 2: Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho foi avaliar as características de um concreto com fibras de carbono e compará-lo a um concreto convencional de referência submetido às mesmas condições. Posteriormente, submeter os concretos a um meio agressivo ácido para verificar a durabilidade deste novo compósito. Abaixo estão listados os objetivos específicos deste trabalho.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Estudar o concreto com adição de 2% de fibras de carbono, visando analisar as propriedades mecânicas e a microestrutura;
- Compreender como a adição das fibras de carbono alteram as propriedades físicas e mecânicas do concreto;
- Analisar a microestrutura do concreto e dos efeitos da adição das fibras de carbono através da microscopia eletrônica de varredura – MEV;
- Analisar o concreto após ataque ácido por cloreto ( $\text{HCl}_{(aq)}$  10%) com exposição submersa durante 7 dias;
- Verificar a influência da porosidade e da permeabilidade na vulnerabilidade do material ao ingresso de agentes agressivos através de ensaios de absorção de água por imersão;
- Avaliar a degradação da matriz cimentícia do concreto através de ensaios de perdas de massa, inspeção visual e microscopia.

## **CAPÍTULO 3: Revisão Bibliográfica**

Esta revisão aborda estudos que vêm sendo realizados, nas últimas décadas, sobre o concreto, seus materiais constituintes e sua estrutura, analisando propriedades como: resistência, trabalhabilidade, impermeabilidade, controle de fissuração, patologias e durabilidade das estruturas de concreto armado.

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, adaptando-se a todos os locais e circunstâncias conforme suas propriedades como versatilidade, durabilidade e desempenho, que proporciona vida útil adequada às construções a um custo competitivo com outros materiais estruturais. Além disso, o concreto é um dos materiais que mais se adaptam ao conceito de sustentabilidade através de adições e a possibilidade de qualquer pequeno ganho unitário, pode se transformar em valores muito expressivos na economia de matéria-prima, de energia e de emissão de gases tóxicos à atmosfera, além da possibilidade de utilização, em larga escala, de resíduos potencialmente poluidores do meio ambiente (BASSUONI e NEHDI, 2007; ISAIA, 2011).

### **3.1 Características do concreto**

#### ***3.1.1 Trabalhabilidade***

A trabalhabilidade pode ser definida como consistência e plasticidade adequada às condições de utilização, definidas pelo transporte, lançamento e adensamento do concreto (NEVILLE, 2016). Uma medida da trabalhabilidade pode ser realizada pelo abatimento do cone e segundo a ABNT NBR 16889:2020 que tem como objetivo determinar a consistência do concreto fresco através de medida de seu assentamento. Este ensaio consiste na colocação do concreto em um molde no formato de tronco de cone e após uma série de etapas é retirado o molde e medido o abatimento do material na placa de base, ou seja, a diferença entre a altura do material no molde e a altura do material após a retirada do molde, figura 3.1 (ABNT NBR 16889:2020).

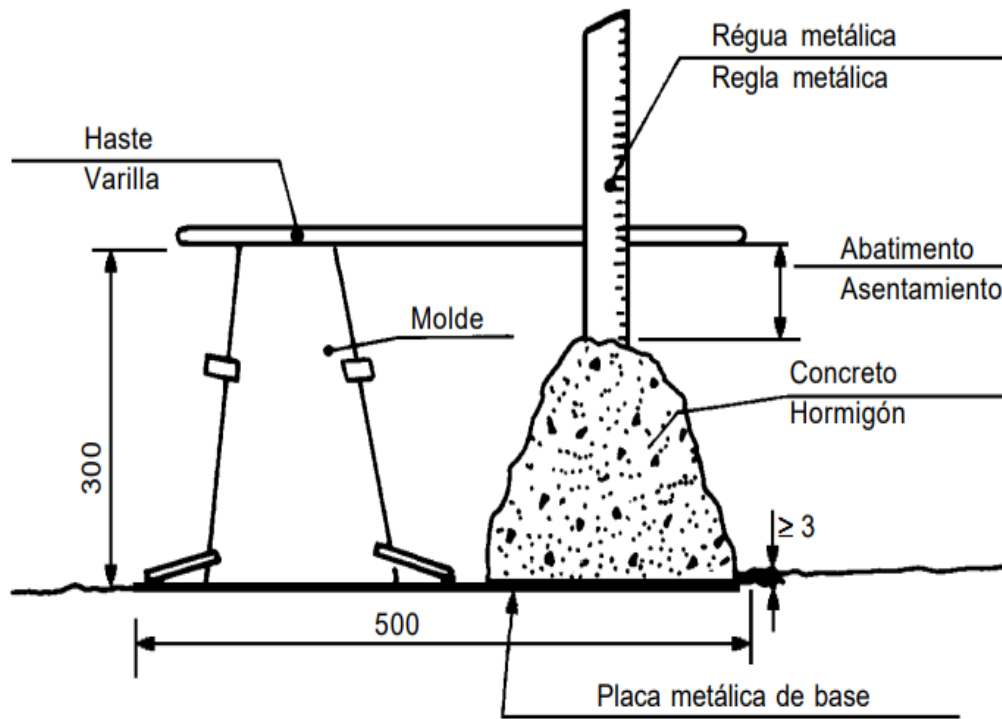


Figura 3.1 – Ensaio de abatimento pelo método do abatimento do tronco de cone, para medida da consistência do concreto fresco.

Fonte: ABNT NBR 16889:2020.

Segundo METHA e MONTEIRO (2014), os dois componentes principais da trabalhabilidade são a fluidez, entendida como a facilidade de mobilidade, e a coesão que é a estabilidade ou resistência à exsudação e segregação. As condições impostas para produção, transporte e utilização do concreto são fatores que podem afetar a trabalhabilidade. A tabela 3.1 relaciona os tipos de trabalhabilidade às aplicações típicas do concreto. Quanto maior o abatimento do tronco, maior a fluidez do concreto.



Tabela 3.1 – Classes de consistência do concreto.

<b>Classe Abatimento</b>	<b>Abatimento (mm)</b>	<b>Aplicações típicas</b>
<b>S10</b>	10 < A < 50	Concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado
<b>S50</b>	50 < A < 100	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
<b>S100</b>	100 < A < 160	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
<b>S160</b>	160 < A < 220	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
<b>S220</b>	> 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

**NOTA 1:** De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.

**NOTA 2:** Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

### **3.1.2 Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade**

Em geral, a resistência à compressão do concreto, está diretamente relacionada a dois importantes parâmetros: da relação água/cimento e do grau de adensamento. O valor da resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento, desde que o concreto seja plenamente adensado e tenha recebido o mesmo procedimento de cura, ou seja, mantendo a quantidade de cimento constante e reduzindo a quantidade de água, obtém-se um concreto com maior resistência à compressão (BRANDT, 2008; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O concreto estrutural é classificado por grupos de resistência, sendo dividido em 2 grupos, em função da resistência característica à compressão especificada no projeto estrutural. A tabela 3.2 especifica as classes de cada grupo, sendo que os concretos do Grupo I considerados estruturais, começam com  $f_{ck}$  20MPa e vão até  $f_{ck}$  50MPa. Os concretos do Grupo II, considerados estruturais de alto desempenho, começam com  $f_{ck}$  55 MPa e atingem até  $f_{ck}$  100MPa (ABNT NBR 8953:2015).

Tabela 3.2 – Classes de resistência do concreto estrutural.

<b>Grupo</b>	<b>Classe de Resistência</b>	<b>Resistência Característica à Compressão (MPa)</b>
I	C20	20
	C25	25
	C30	30
	C35	35
	C40	40
	C45	45
	C50	50
II	C55	55
	C60	60
	C70	70
	C80	80
	C90	90
	C100	100

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

A resistência à tração é de interesse para estruturas de concreto na verificação do estado limite último de ruptura, é necessário conhecer seu valor porque desempenha um papel importante em certos problemas como a fissuração, a deformação, o esforço cortante, a aderência e deslizamento das armaduras, etc. Além disso, pode ser um indicador de durabilidade do concreto, uma vez que está relacionada com microfissuração. A resistência à tração do concreto pode ser obtida através de ensaios de tração por flexão, tração direta e tração por compressão diametral (CHAN et al., 2019; GAMBHIR, 2006).

No ensaio de tração por compressão diametral, aplica-se uma carga de compressão em um corpo de prova cilíndrico posicionado com seu eixo horizontal entre os pratos da

prensa. Esta montagem promove tensões internas de tração que são responsáveis pela ruptura do corpo de prova, conforme demonstrado na figura 3.2 (ABNT NBR 7222:2011).

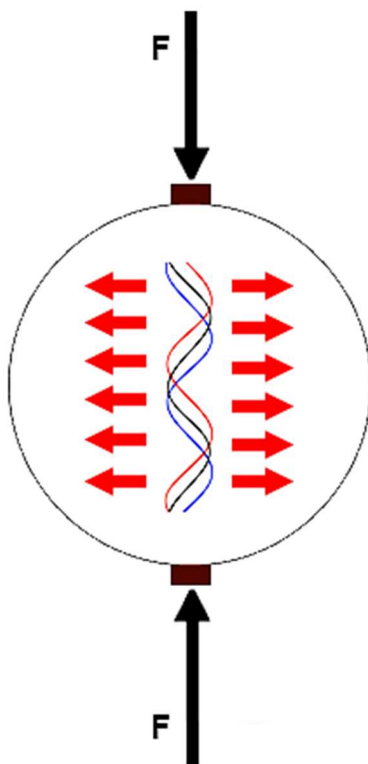


Figura 3.2 – Ensaio de tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico.

Fonte: Autor.

Segundo BALBO (2013), as resistências à tração em ensaios de compressão diametral costumam ser menores do que as aferidas nos ensaios de flexão. O ensaio de tração por compressão diametral apresenta resultados mais uniformes do que os outros tipos de ensaios de tração. Sendo a resistência obtida neste ensaio, a mais próxima da resistência à tração direta do concreto.

O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados nos cálculos estruturais, que relaciona a tensão aplicada à deformação instantânea obtida, conforme a ABNT NBR 8522:2017. Sob ação dos carregamentos e forças da natureza, as estruturas de concreto podem apresentar deformações que, por sua vez, podem ter como consequências patologias no elemento estrutural, como por exemplo a ocorrência de fissuras (BATTAGIN, 2008; BENETTI, 2012).

A partir de curvas típicas tensão-deformação para agregado, pasta (cimento e água) endurecida e concreto, carregados e submetidos à em compressão uniaxial, figura 3.3, torna-se imediatamente aparente a constatação de que, em relação ao agregado e à pasta de cimento, o concreto não é realmente um material elástico (BATTAGIN, 2008; MEHTA e MONTEIRO, 2014)

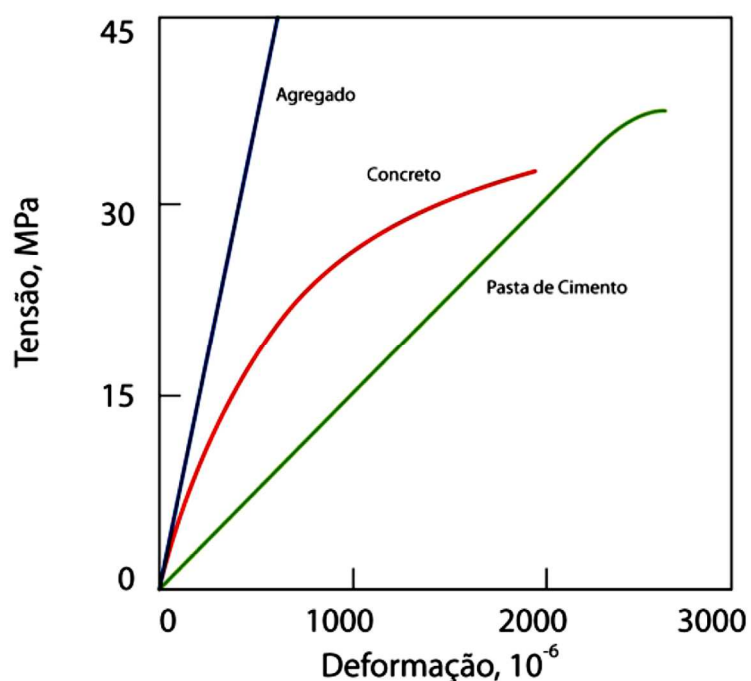


Figura 3.3 – Gráfico de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.

Fonte: METHA e MONTEIRO, 2014.

Em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito. Alterações no módulo de elasticidade do concreto podem interferir na possibilidade de utilização em estruturas, o que deve ser avaliado na etapa de cálculo estrutural do concreto armado (BATTAGIN, 2008; BENETTI, 2012).

### **3.1.3 Permeabilidade e absorção**

Um dos principais fatores que determinam a permeabilidade do concreto é a relação água/cimento, pois a saída da água do concreto deixa vazios, outro fator é a incorporação de ar durante a mistura dos seus materiais constituintes. As interconexões destes vazios tornam o concreto permeável a água, ou seja, quanto maior a resistência da pasta, menor é a sua permeabilidade (PETRUCCI, 1980).

A absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares e é medida, normalmente, secando uma amostra até a constância de massa, imergindo-a, em seguida, em água e determinando o acréscimo de massa expressa em porcentagem de massa seca (ABNT NBR 9778:2009). A absorção de água não pode ser usada como medida da qualidade de um concreto, porém grande parte dos concretos de boa qualidade têm absorção abaixo de 10%. Portanto, um concreto durável tem que ser impermeável, dificultando a penetração de substâncias agressivas (BEUSHAUSEN, 2019; FRIGIONE e LETTIERI, 2018; NEVILLE e BROOKS, 2013).

A absorção e a permeabilidade são propriedades determinantes para a durabilidade de um concreto que sofre ataques ácidos externos. Ensaio realizados com concretos submetidos a ataques ácidos, demonstram que o processo de degradação é mais significativo em concretos com maior taxa de absorção e permeabilidade. Além disso a degradação promove a diminuição da resistência à compressão, aumento das perdas de massa e amplia ainda mais as taxas de absorção e permeabilidade, tornando o composto cada vez menos resistente mecanicamente e mais vulnerável a ataques externos sequentes (ABREU et al., 2020b).

### **3.1.4 Microfissuração e zona de transição**

A zona de transição do concreto, que faz parte da sua microestrutura, segundo MEHTA e MONTEIRO (2014), é a interface entre a superfície do agregado graúdo e a pasta de cimento. Quando o concreto é submetido a uma tensão, a região crítica de ruptura é a zona de transição, por ser a região mais frágil. Essa interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, é pobre em C-S-H gel, composto químico responsável pela boa resistência mecânica do concreto (figura 3.4), isto implica em uma menor resistência localizada promovendo no carregamento, ponto de partida para a falha do concreto, ou

seja, local onde se iniciam os processos de fissuração e propagação de trincas, o que é determinante para propriedades como a resistência mecânica e a durabilidade (SAFIUDDIN et al., 2018).

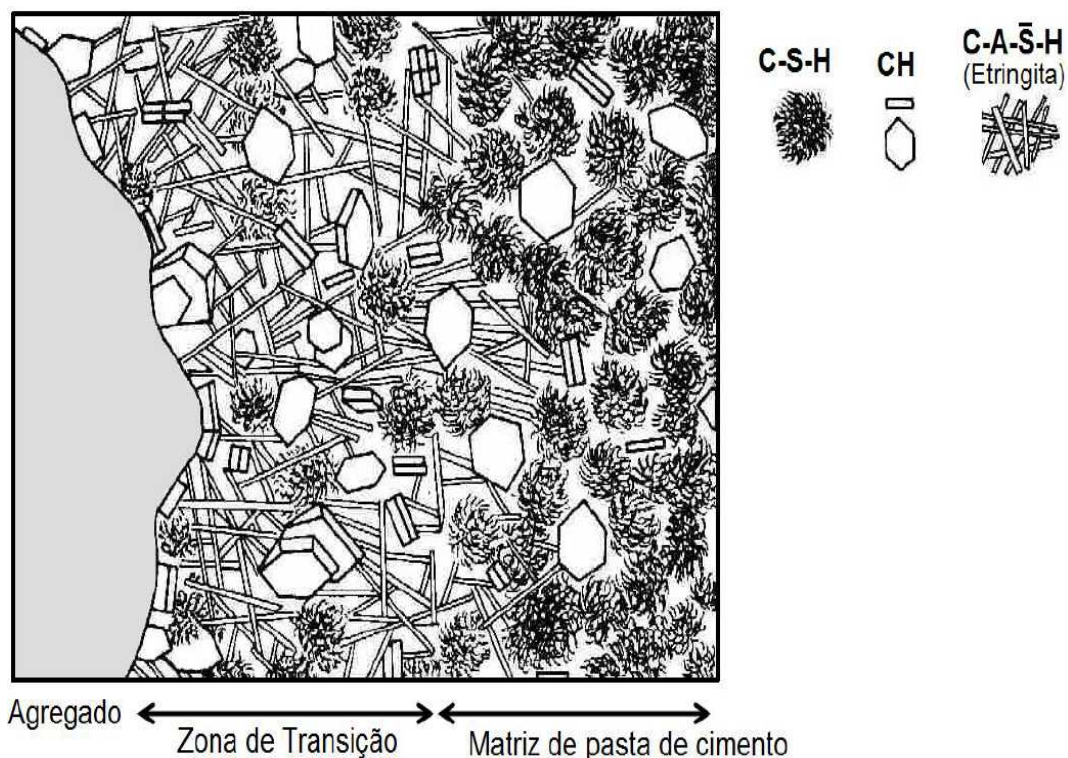


Figura 3.4 – Representação ilustrada da zona de transição do concreto.

Fonte: Metha e Monteiro, 2014.

Mesmo antes da aplicação de carga externa, já existem no concreto microfissuras na zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo. A quantidade e as aberturas destas fissuras em uma peça de concreto dependem, entre outros fatores, das características de exsudação, resistência da zona de transição e do processo de cura do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014; TEIXEIRA, 2020). A figura 3.5 apresenta a imagem obtida através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre o agregado graúdo e a pasta.

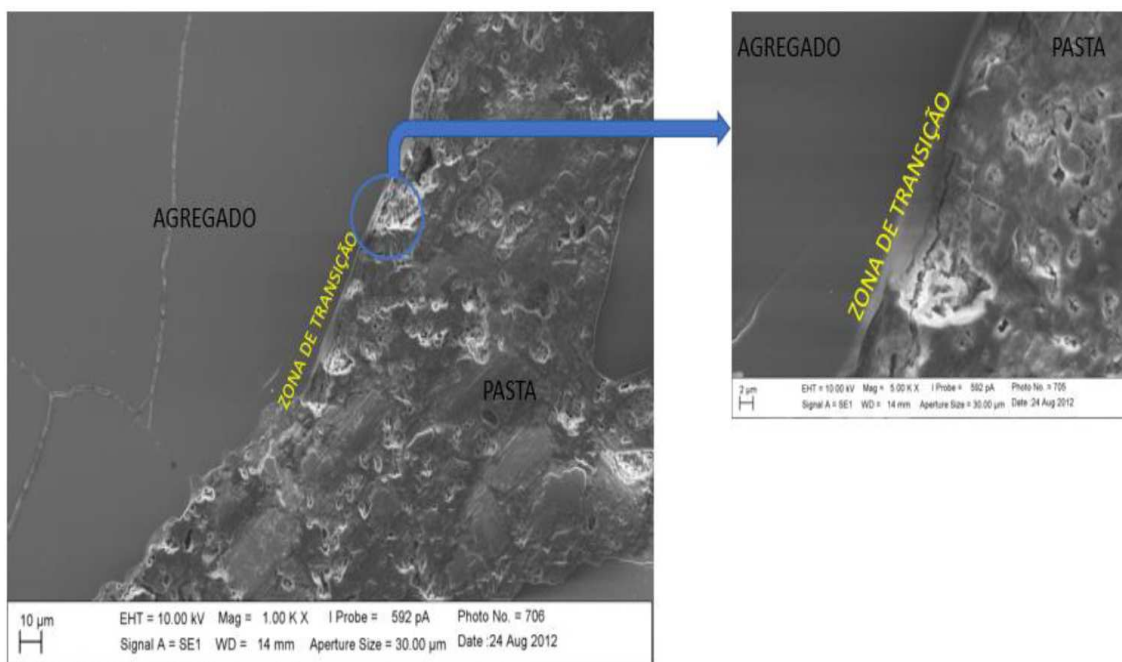


Figura 3.5 – Zona de transição agregado graúdo/pasta – Ampliação de 100X e 500X.

Fonte: TEIXEIRA, 2020.

### 3.2 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto pode ser definida como sendo o processo de selecionar a proporção de mistura dos materiais constituintes; cimento, água, agregados e, eventualmente, aditivos de maneira que o produto final apresente características capazes de atender as condições de serviço e um menor custo possível (NEVILLE, 2016).

O método de dosagem do American Concrete Institute (ACI) é o mais tradicional e se baseia principalmente na relação água/cimento. Outros métodos adotados bastante conhecidos são: o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul (ITERS) e o método do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) (RIBEIRO et al., 2015).

A dosagem experimental pode ser realizada a partir da fixação da relação água/cimento, que depende da resistência de dosagem, das características da obra e da definição de uma trabalhabilidade compatível com os materiais e com a utilização do concreto

(RIBEIRO et al., 2015). O valor da resistência de dosagem, conhecido como  $f_{cj}$ , visa garantir que seja assegurado o valor de  $f_{ck}$  especificado no projeto estrutural (ABNT NBR 12655:2015).

O desvio padrão varia de acordo com o controle de preparo do concreto e está definido na tabela 3.3, que apresenta os valores do desvio padrão para cada controle.

Tabela 3.3 – Desvio padrão para cada tipo de controle.

Controle	Desvio Padrão $S_d$ (MPa)	Condições de Preparo
A	4,0	Aplicável às classes C10 até C100 – o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
B	5,5	Aplicável às classes C10 até C20 – o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e os agregados medidos em volume. O volume de agregados miúdos é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado.
C	7,0	Aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15 - o cimento é medido em massa e os agregados são medidos em volume.

Fonte: ABNT NBR 12655:2015.

Calculada a resistência de dosagem, deve ser adotado um dos métodos de dosagem experimental, para definir as proporções adequadas de cimento, areia, brita e água, que são os materiais constituintes do concreto. Após a definição de um traço, experimentos são realizados para que possam ser feitos ajustes e então, podem ser incorporados outros elementos como fibras ou aditivos químicos.

### 3.3 Durabilidade das estruturas de concreto

Durabilidade e vida útil ganharam grande importância nos projetos de estruturas de concreto armado. O baixo desempenho de estruturas construídas nas últimas décadas demonstram que entre as principais causas de deterioração estão a carbonatação ou a entrada de cloreto (BEUSHAUSEN et al., 2019). A norma americana ACI 201, 2016 descreve tipos de deterioração do concreto convencional que pode também ocorrer em



concretos com adições. A norma brasileira ABNT NBR 15575:2013 define que o sistema estrutural de uma edificação habitacional deve atender a uma vida útil de projeto mínima de 50 anos. O desempenho das estruturas pode ser abordado em diversos momentos da vida útil e para diferentes finalidades, incluindo concepção, especificação, técnicas executivas e por fim, a durabilidade.

Outro fator importante que deve ser considerado é o ambiente em que a estrutura está inserida. A ABNT NBR 6118:2014 destaca que a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto. Nos projetos das estruturas de concreto, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com as classificações da tabela 3.4, podendo ser avaliada segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 3.4 – Classes de agressividade ambiental.

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
<b>I</b>	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
<b>II</b>	Moderada	Urbana <sup>(a,b)</sup>	Pequeno
<b>III</b>	Forte	Marinha <sup>(a)</sup> Industrial <sup>(a,b)</sup>	Grande
<b>IV</b>	Muito Forte	Industrial <sup>(a,c)</sup> Respingo de maré	Elevado

<sup>(a)</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>(b)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>(c)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014; ABNT NBR 12655:2015.

A corrosão de armadura no concreto armado é controlada em função basicamente de aspectos físicos (permeabilidade do concreto e cobertura da armadura) e químicos (alcalinidade do concreto). Os agentes agressivos como sulfatos, ácidos, reação álcali-agregado podem levar a deterioração do revestimento, propiciando as condições necessárias para a despassivação da armadura devido ao ataque de materiais deletérios como  $\text{CO}_2$  e íons cloreto (HELENE, 2002). Parâmetros mínimos de revestimento das armaduras e máximos de relação água/cimento são regulamentados pelos principais códigos e normas brasileiras, americanas e europeias. (ABNT NBR 6118:2014; ACI 318:2011; EN 206:2013). Estudos mostram que em geral quanto maior a resistência à compressão, menor o grau de entrada de agentes agressivos e conseqüentemente, menor a possibilidade e velocidade de corrosão das armaduras das estruturas de concreto armado submetidas a ambientes marinhos (CHEEWAKET et al., 2013; NEVILLE, 2016;). Na tabela 3.5 estão apresentados padrões de classe de agressividade ambiental da normalização brasileira.

Tabela 3.5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq \text{C}20$	$\geq \text{C}25$	$\geq \text{C}30$	$\geq \text{C}40$
	CP	$\geq \text{C}25$	$\geq \text{C}30$	$\geq \text{C}35$	$\geq \text{C}40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	CA	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$
	CP				

CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014; ABNT NBR 12655:2015.

As maiores ressalvas da norma brasileira em relação à durabilidade das estruturas de concreto armado estão relacionadas a ambientes com possível presença de cloretos. Em uma abordagem racional, o concreto deve ser julgado pelo seu desempenho e não por sua composição, o que não limita estudos adicionais com adições que modificam a

composição do concreto, favorecendo métodos que podem sugerir resultados positivos surpreendentes do ponto de vista de durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado (LOPEZ et al., 2019). Uma importante abordagem para aumentar essa durabilidade é o emprego de novos materiais na constituição deste compósito (NEVILLE, 2016).

### **3.4 Mecanismo de ataques ácidos**

#### **3.4.1 Ataque por ácido clorídrico**

A água do mar e as águas freáticas salobras são fontes de cloretos que geralmente causam ataques em estruturas de concreto armado. Os mares ocupam 80% da superfície terrestre, o que significa que muitas estruturas estão expostas direta ou indiretamente aos cloretos. A velocidade dos processos de corrosão em uma estrutura submetida a atmosfera marinha é cerca de 30 a 40 vezes maior do que em ambientes mais secos. Um fator importante que pode ocasionar as patologias no concreto armado nas áreas litorâneas é a presença de cloretos, sendo em formas de cristais ou em gotículas de água arrastadas pelo vento. Íons cloretos podem ainda ser provenientes de ambiente industrial, chuvas ácidas ou mesmo componentes de produtos de limpeza utilizados no cotidiano (HELENE, 2002; KIM e JI, 2017).

A corrosão das armaduras pode ter sua manifestação acelerada por agentes agressivos (íons cloretos, sulfetos, óxidos de enxofre) contidos ou absorvidos pelo concreto. A presença de ácido clorídrico na estrutura interna do concreto gera a despassivação das armaduras. Soluções ácidas em contato com os constituintes da pasta de cimento, formam sais solúveis de cálcio que podem ser removidos pelo processo de lixiviação, levando ao aumento de porosidade e conseqüentemente da permeabilidade do concreto. A ação deletéria direta dos ácidos sobre o concreto se dá por meio da reação com o hidróxido de cálcio, provocando a desagregação da matriz cimentícia. (HELENE, 2002; NEVILLE e BROOKS, 2013; RIBEIRO, 2018).

O processo de corrosão do aço ocasiona a produção de óxido de ferro, que possui volume maior do que o do metal inicial, causando uma expansão da seção. Esse aumento provoca o surgimento de fissuras e o deslocamento da camada de concreto de cobertura das armaduras, conforme demonstrado na figura 3.6 (BOLINA et al., 2019).

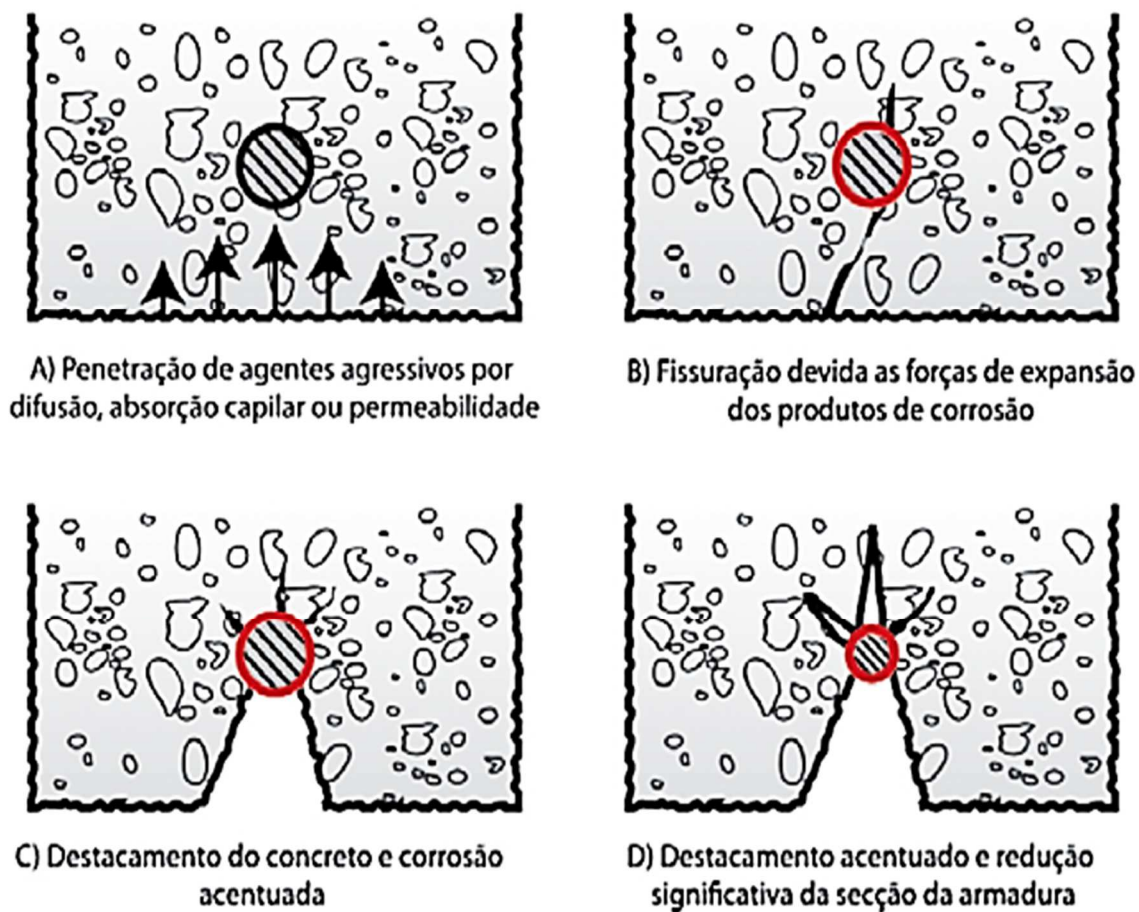


Figura 3.6 – Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto devido a corrosão das armaduras.

Fonte: HELENE, 2002.

É comum observar estruturas de concreto que estão deterioradas devido à exposição a ácidos, sendo os ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e clorídrico (HCl) os mais comuns. Ao ser submetido a um ambiente ácido, o concreto é enfraquecido pela degradação dos constituintes e de suas ligações, levando ao comprometimento de suas propriedades físicas e mecânicas (ABREU et al., 2020b; MEHTA e MONTEIRO, 2014; THOMAS et al., 2016).

A tabela 3.6 elenca possíveis agentes deletérios ao concreto e os efeitos causados por cada um deles.

Tabela 3.6 – Agentes agressivos externos e efeitos no concreto.

Ácido					
Material	Efeitos no concreto	Material	Efeitos no concreto		
Sulfuroso	Desintegração	Bórico	Nenhum		
Sulfúrico		Oxálico			
Carbônico		Esteárico	Desintegração lenta		
Nítrico		Oléico			
Clorídrico		Acético			
Lático		Tânico	Desintegração quando dissolvido em água		
Muriático		Sulfídrico			
Fosfórico	Ataque lento à superfície				
Sais e Alcalis					
Material	Efeitos no concreto	Material	Efeitos concreto		
Carbonato de amônia	Nenhum	Nitrato de amônia	Desintegração		
Carbonato de potássio		Sulfato de amônia			
Carbonato de sódio		Sulfato de potássio			
Hidróxido de sódio		Sulfato de alumínio			
Hidróxido de potássio		Sulfato de magnésio			
Hidróxido de cálcio		Sulfato de zinco			
Nitrato de cálcio		Sulfato de sódio			
Nitrato de potássio		Sulfato de níquel			
Nitrato de sódio		Sulfato de cálcio			
Silicatos		Sulfato de cobre			
Permanganato de potássio		Sulfato de ferro			
Cloreto de cálcio		Nenhum (exceto quando submetido ao efeito molhagem/secagem)		Cloreto de magnésio	Desintegração lenta
Cloreto de potássio				Cloreto férreo	
Cloreto de sódio	Cloreto de mercúrio				
Fluoretos	Nenhum (exceto o fluoreto de amônia)	Cloreto de zinco			
		Cloreto de cobre			
		Cloreto de amônia			
Derivados de petróleo					
Material	Efeitos no concreto	Material	Efeitos no concreto		
Gasolina	Requer concreto impermeável e um tratamento de superfície	Óleos minerais leves	Requer concreto impermeável e um tratamento de superfície		
Querosene		Óleos minerais pesados	Nenhum		
Benzina					

Fonte: ABNT NBR 12655:2015.

Diversos estudos vêm sendo realizados nas últimas décadas sobre a corrosão de armaduras causada por ataques de cloretos nas estruturas de concreto armado. Normas americanas estabelecem requisitos mínimos para estruturas de concreto armado e metodologias para realização de ensaios de durabilidade baseados em ataques por cloretos (ASTM C1152, 2020; ACI 222, 2010; ACI 318, 2011). BASSUONI e NEHDI (2007) estudaram a resistência do concreto autoadensável exposto ao ácido sulfúrico, considerando concretos com adição de fibras de polipropileno e de fibras de aço.

A massa das amostras chegou a uma redução de até 10% e os melhores resultados ocorreram com combinação das fibras com inibidores de corrosão (ALSAIF et al., 2018). Já o concreto envolto externamente por fibras de carbono foi avaliado por KIM e JI (2017), em um ensaio ácido com base no protocolo de teste de durabilidade acelerado e a capacidade de suporte de carga. A camada de fibra de carbono na qual os corpos de prova estavam envoltos externamente promoveu uma diminuição da entrada de ácidos na estrutura do concreto, provocando uma redução na perda de resistência mecânica.

### **3.5 Patologias**

A redução da durabilidade de uma estrutura de concreto armado se manifesta através de uma degradação decorrente de ações mecânicas como impacto, abrasão, erosão, cavitação, ações físicas como temperatura elevada, dilatação térmica e ações químicas como reações álcali-sílica e álcali carbonato, ataque por cloretos/sulfatos. Geralmente, os processos físicos e químicos atuam em conjunto, já que raramente a deterioração do concreto se deve a uma única causa (NEVILLE, 2016).

Concretos que apresentam fissuras e corrosão das armaduras possuem em geral falhas relacionadas ao projeto, especificações inadequadas de matérias, cobrimentos inadequados das armaduras, deficiência no cálculo da estrutura etc. (SOUZA e RIPPER, 2009). A água do mar pode agir de forma direta sobre o concreto, causando simultaneamente, processos químicos e físicos, como por exemplo, o ataque químico por parte dos sais dissolvidos, como cloretos e sulfatos, dilatação causada pela cristalização de sais nos poros, erosão superficial, entre outros (figura 3.7). O conjunto desses processos físicos e químicos pode levar a uma fissuração excessiva da estrutura de concreto, acelerando o processo de corrosão, já que a quantidade de oxigênio na superfície das armaduras e a entrada de agentes agressivos pode ser aumentada. Desta maneira fica estabelecido um ciclo de fissuração associado a corrosão progressivamente crescente o que pode provocar danos estruturais severos (RIBEIRO, 2018).



Figura 3.7 – Fissuração e deslocamento da camada de cobrimento em estruturas de concreto litorâneas.

Fonte: Revista Mercado, 2021.

Nessa perspectiva, HELENE (2002) afirma que os mecanismos mais relevantes de deterioração das estruturas de concreto são:

- Mecanismos de deterioração referentes ao concreto: lixiviação (águas puras e ácidas), expansão por sulfatos ou magnésio, expansão por reação álcali agregado, reações superficiais deletérias.
- Mecanismos de deterioração relativos à armadura: corrosão ocasionada devido ao elevado teor de íons cloreto, carbonatação.
- Mecanismos de deterioração estrutural propriamente dita: ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, fadiga, fluência, sobrecarga.

BOLINA et al. (2019) citam que as manifestações patológicas degradam o concreto, o que causa influência negativa em propriedades, como:

- Resistência à compressão e à tração;
- Ligação entre a armadura e o concreto que a envolve;
- Seção da armadura;
- Absorção e permeabilidade;
- Integridade da matriz cimentícia.

### 3.6 Concreto com adição de fibras

Considera-se compósito todo material multifásico, artificialmente construído, que apresente uma significativa parcela das propriedades de todos os materiais que integram, de forma que a melhor combinação destas propriedades seja alcançada. Muitos compósitos são formados pela combinação de apenas dois componentes; um denominado matriz, que é contínua e envolve completamente o outro componente, frequentemente chamado componente disperso. As propriedades dos compósitos são em função destes componentes, suas quantidades relativas e principalmente da geometria do componente disperso. De acordo com o tipo de componente disperso, os compósitos podem ser classificados em três grupos: particulares (reforçados com partículas), fibrosos (reforçados com fibras) e compósitos estruturais (CALLISTER., 2012).

Considera-se como fases principais do concreto com fibras a própria matriz de concreto e as fibras, que podem ser produzidas a partir de diferentes materiais como aço, vidro, polipropileno, náilon, carbono, etc. As fibras são elementos, cujo comprimento é bem maior que as dimensões da seção transversal (ISAIA; FIGUEIREDO, 2011, p.1327). Há registros da utilização de compósitos na construção desde o Antigo Egito, utilizando palha para reforçar tijolos de barro. Além disso, existem evidências de que há 5000 anos começaram a ser utilizadas fibras de amianto para reforçar elementos produzidos com argila (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O conceito do concreto reforçado com fibras foi aprimorado a partir de 1900 com a adição de fibras de amianto à pasta de cimento, visando melhorar suas propriedades e mais tarde foi proposta também a utilização de fibras de vidro. Os grupos básicos de fibras aplicadas para concretos podem ser classificadas de acordo com seu material: fibras de carbono; fibras naturais; fibras de aço de diferentes formas e dimensões; fibras de vidro; fibras sintéticas feitas com materiais como polipropileno, polietileno e o álcool polivinílico (PVA) e fibras de poliacrilonitrila (BRANDT e ARDZE, 2008).

Uma ampla escolha de materiais (resinas poliméricas e fibras) está disponível comercialmente: diferentes estruturas/componentes podem ser desenvolvidas a partir dessa combinação, com possível anisotropia e geometria personalizada atendendo aos requisitos de projeto (HUANG et al., 2017; VINCENT e OZBAKKALOGU, 2013). A



incorporação de fibras nas misturas de concreto pode potencializar as propriedades desse material compósito, que é um dos mais utilizados na construção civil em todo o mundo. A influência das fibras no desempenho do concreto depende de fatores como propriedades mecânicas, volume de adição, geometria e orientação na mistura de concreto (BAOGUO et al., 2016; MO et al., 2016).

A utilização de fibras artificiais metálicas ou sintéticas para reforço do concreto foi relatada em diversos estudos como uma solução viável para pavimentos industriais (CHAN et al., 2019; LOPEZ et al., 2019). Entre as vantagens proporcionadas pela adição dessas fibras estão a rigidez, longo prazo de estabilidade dimensional, resistência à abrasão etc. A utilização de fibras na construção tem sido cada vez mais difundida, principalmente pela possibilidade de reciclagem (PAKRAVAN et al., 2017; DIEB et al., 2012). Ensaio voltados para avaliação da durabilidade demonstraram que o concreto reforçado com fibras pode apresentar menores variações de massa, boa aparência e boa resistência mecânica (LOPEZ et al., 2019; PEREIRA et al., 2005; SADRINEJAD, et al., 2018).

As fibras de carbono têm se destacado na nova geração de compósitos cimentícios reforçados (LIMA et al., 2016). De acordo com AFROUGHSABE et al. (2016), esse tipo de fibra possui baixa densidade, baixo coeficiente de expansão, alta resistência à tração, boa estabilidade química e excelente durabilidade. Alguns estudos investigaram as características dinâmicas da fibra híbrida de carbono-aramida no concreto, indicando que o módulo de elasticidade do compósito pode ser reduzido com esta adição através da dissipação de energia promovida pelas fibras dispersas, diminuindo assim a propagação de fissuras causadas por retrações ou movimentações de ordem estrutural (WANG et al., 2019; GRAÇA et al., 2017). Segundo ZHANG et al (2017), a adição de fibras de aramida ao concreto promoveu, em relação ao concreto convencional, um ganho de resistência à compressão, uma tendência à mudança do módulo de elasticidade conferindo maior tenacidade, e aumento da resistência a agentes agressivos.

A trabalhabilidade é uma importante propriedade do concreto no estado fresco. Independentemente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A figura 3.8 ilustra o concreto com fibras sintéticas no estado fresco.



Figura 3.8 – Concreto no estado fresco com fibras sintéticas.

Fonte: MACHADO, 2006.

As fibras que possuem módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido, como as poliméricas, são chamadas de fibras de baixo módulo. Já as fibras que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto são conhecidas como fibras de alto módulo, como é o caso das fibras de aço e de carbono, conforme representado na figura 3.9 (ISAIA, 2011).

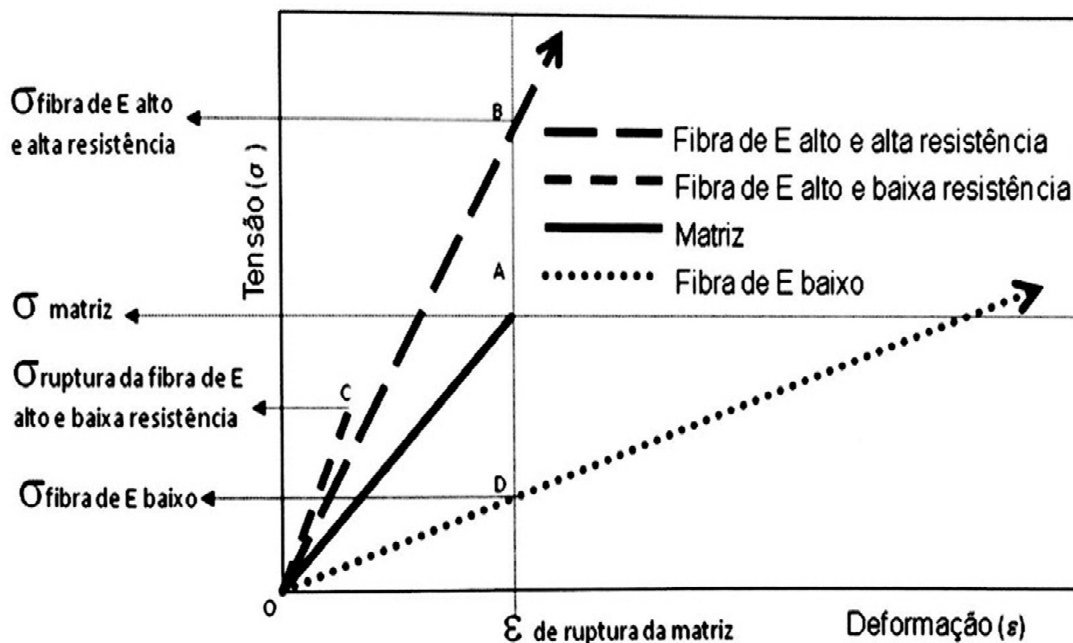


Figura 3.9 – Diagrama de tensão por deformação de matriz e fibras de alto e baixo módulo e elasticidade trabalhando em conjunto.

Fonte: ISAIA e FIGUEREDO, 2011.

Na grande maioria dos casos, a vida útil das estruturas de concreto diminui com a retração plástica, enquanto o concreto ainda está fresco. A redução do volume do concreto por evaporação (retração) é um dos graves problemas das estruturas de concreto armado, pois determina efetivamente a sua durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Independentemente do tipo de retração (plástica, endógena ou secante), esse fenômeno é responsável por causar fissuras devido à diminuição do volume do concreto, o que compromete a vida útil das estruturas de concreto armado, pois favorece a entrada de agentes agressivos (GIROTTI et al., 2014; GUPTA et al., 2016).

Quando se adicionam fibras de resistência e módulo adequado ao concreto num teor apropriado, as fibras servem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, diminuindo a concentração das mesmas na extremidade da fissura, figura 3.10. Com isso, tem-se uma diminuição da velocidade de propagação das fissuras no material que passa a ter um melhor comportamento do ponto de vista estrutural e de durabilidade (ISAIA, 2011; SAFIUDDIN et al, 2018).

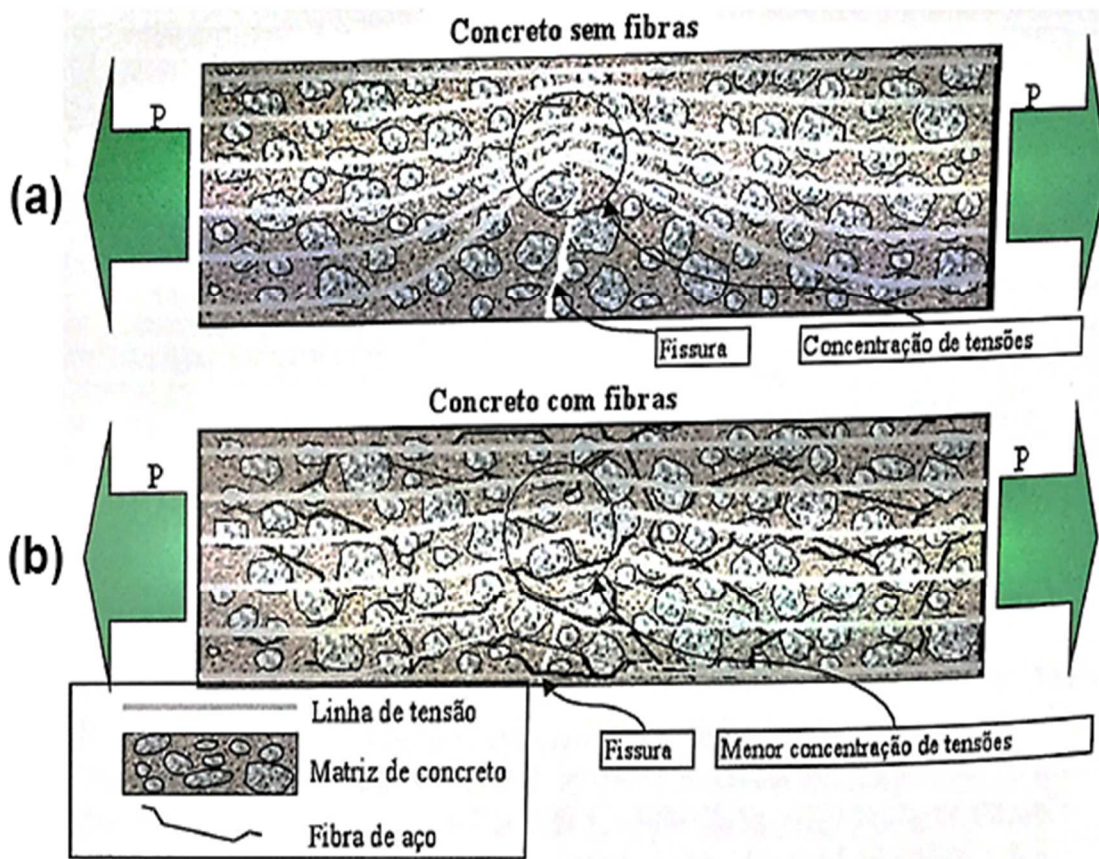


Figura 3.10 – Esquema de concentração de tensões: (a) para um concreto sem fibras e (b) com adição de fibras.

Fonte: ISAIA, 2011.

A adição de fibras de carbono descontínuas e dispersas no concreto promove ganho de resistência mecânica à compressão e à tração, além de controlar as fissuras microscópicas que provocam a ruína do concreto. Taxas de absorção e porosidade do concreto com a adição de fibras foram mantidas em níveis aceitáveis para concretos duráveis, além de promover o controle de fissuras, conforme mostram as figuras 3.11 (a) e (b). Além disso, a utilização de fibras mais longas de até 50 ou 80mm, pode controlar fissuras maiores e contribuir para aumentar a resistência final do concreto, tal como é mostrado na figura 3.11 (c) (ABREU et al., 2020a; ABREU, 2014; HOSSAIN E AWAL, 2011; HALVAEI et al., 2020; NEVILLE, 2016; BRANDT, 2008; BETTERMAN, 1995).

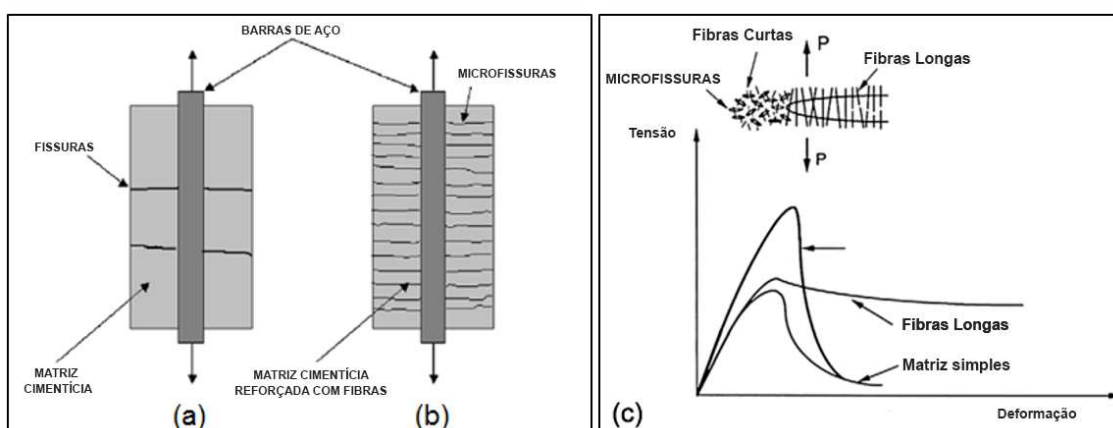


Figura 3.11 – Fissuras em tirantes submetidos à tração: (a) para o concreto convencional, (b) concreto com adição de fibras, (c) controle da propagação de fissuras para fibras longas e curtas.

Fonte: Traduzida de BETTERMAN, 1995; BRANDT, 2008.

A resistência de aderência interfacial, fibra-matriz, é melhorada quando a superfície das fibras é deformada ou rugosa, as extremidades são aumentadas, têm forma de gancho ou são onduladas. O uso das fibras retorcidas também resulta em uma boa aderência interfacial, compensando a má aderência de uma superfície lisa à pasta de cimento (ABREU et al., 2020a; NEVILLE e BROOKS, 2013).

### 3.7 Sustentabilidade do concreto com adição de fibras de carbono

As fibras de carbono são materiais muito finos e alongados, com filamentos, que podem ser contínuos ou cortados conforme necessário. As fibras têm sido amplamente usadas nas indústrias de construção, aeroespacial, automotiva e esportiva devido às suas excelentes propriedades mecânicas, baixo peso específico e estabilidade química. Elementos de metal foram substituídos por elementos de fibra de carbono, devido ao menor peso específico, maior resistência à fadiga, resistência à corrosão e “design” flexível (ALI e QURESHI, 2019). Com isso, a demanda por fibra de carbono vem aumentando desde 2010, quando era de  $51 \times 10^6$  kg. A estimativa é de  $160 \times 10^6$  kg em 2020 e projetada para chegar a  $200 \times 10^6$  kg em 2023 (figura 3.12). Estudos mostram que  $3 \times 10^6$  kg de resíduos de fibra de carbono são gerados atualmente na Europa e nos EUA. Além disso, estima-se que o descarte da indústria automotiva e aeroespacial irá gerar grandes quantidades desse material nos próximos anos (KHALIL, 2018; SAUER, 2019; WANG et al., 2019).

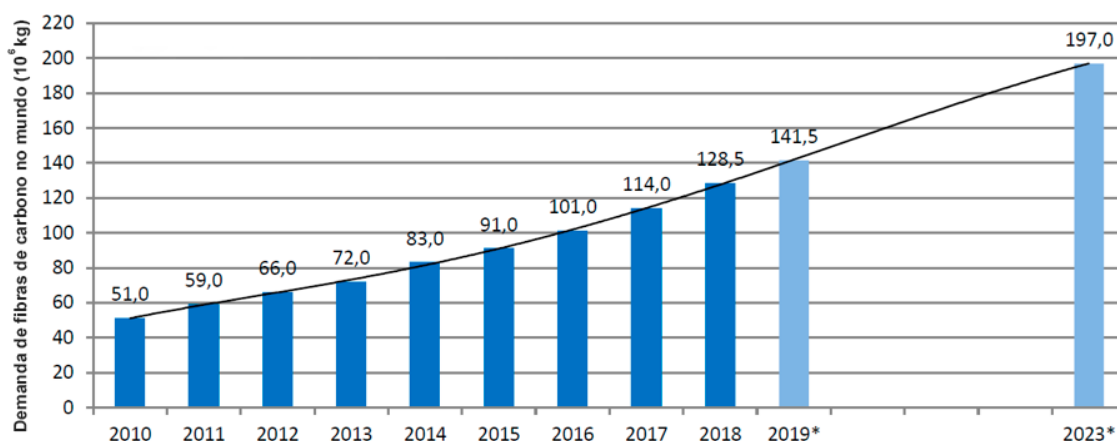


Figura 3.12 – Desenvolvimento da demanda global de fibra de carbono de 2010 a 2023

(\* Estimativas de 09/2019).

Fonte: Traduzida, SAUER, 2019.

As fibras de carbono são resultado de um tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras tais como o poliacrilonitril (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH). O processo de produção consiste na oxidação dessas fibras precursoras seguido do processamento a elevadas temperaturas (1000°C a 1500°C). Neste processo térmico as fibras resultantes apresentam átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, característica que confere extraordinária resistência mecânica ao material (MACHADO, 2006).

Resíduos gerados na fabricação de fibra de carbono, como produtos em fim de vida, ainda têm opções limitadas de reaproveitamento. As alternativas para o descarte de resíduos de fibra de carbono são: aterro, incineração e a reciclagem, processo muitas vezes caro e que resulta em fibras com propriedades inferiores às do produto original. Alguns métodos de reciclagem de fibras, como a solvólise e a termólise, envolvem solventes e demandam alto consumo de energia, o que torna esses métodos caros e prejudiciais ao meio ambiente e ao homem. Na verdade, em diversos países, a legislação não permite o descarte das fibras de carbono em aterros porque não é biodegradável e pode levar milhares de anos para se decompor. Portanto, novas alternativas de reciclagem são necessárias antes que os aumentos de descarte esperados ocorram nos próximos anos (MENG et al., 2017; OZSIN et al., 2020; LI e ENGLUND, 2017; NIE et al., 2015).

A revisão bibliográfica revelou que há uma demanda por novas alternativas de reciclagem de fibra de carbono, e que as opções devem ser seguras para o ser humano, de baixo custo com menores emissões e demanda de energia. Assim, este estudo da influência da adição de resíduos de fibra de carbono descontínuos e dispersos no desempenho do concreto pode dar suporte ao desenvolvimento de um novo método de reciclagem de fibras de carbono.

O entendimento da influência das fibras de carbono na zona de transição do concreto, ajuda a compreender como o controle da propagação de fissuras durante o carregamento mecânico é fundamental para melhorar as propriedades do concreto. A presença das fibras no concreto tem o potencial de reduzir os impactos promovidos pelo ataque ácido por cloretos garantindo melhor desempenho quando comparado ao concreto convencional, mantendo em níveis aceitáveis propriedades que conferem maior resistência a ambientes agressivos. Além disso, o impacto dessa pesquisa pode ser decisivo para a sustentabilidade em todo o mundo, tanto por fornecer uma nova alternativa de reciclagem do resíduo das fibras de carbono, quanto por melhorar e contribuir para a durabilidade das estruturas de concreto armado.



## CAPÍTULO 4: Metodologia

Este trabalho foi realizado utilizando a infraestrutura e materiais disponíveis na UFMG e no mercado. Os ensaios mecânicos foram realizados no DEMC/EE.UFMG e no laboratório de materiais de construção civil da PUC Minas. Os ensaios visuais, foram realizados no DEMET/EE.UFMG e no laboratório de microscopia avançada da PUC Minas. A figura 4.1 apresenta o fluxograma de todo o procedimento experimental do trabalho.

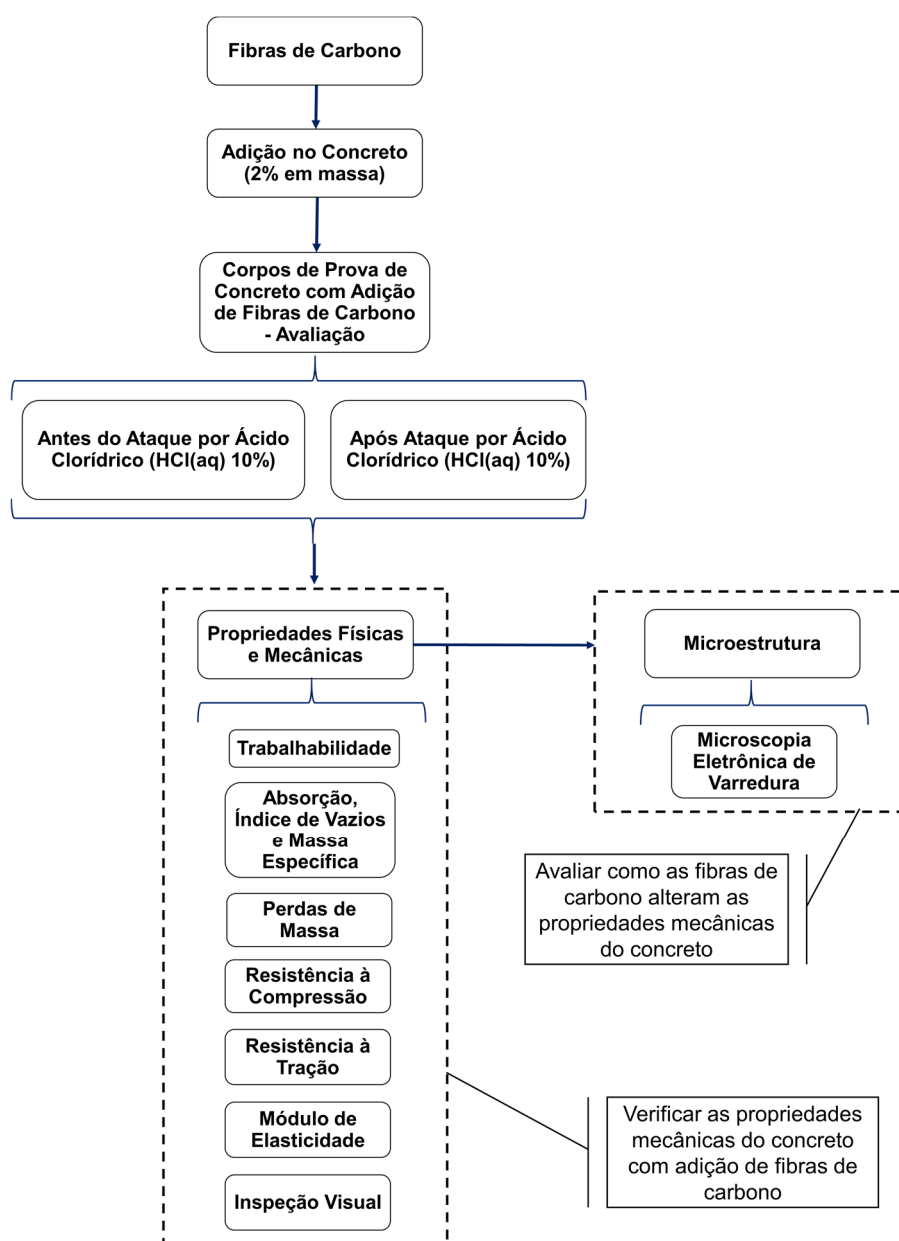


Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental.



## **4.1 Método**

Foram realizados ensaios de dosagem, propriedades físicas, resistência mecânica, ensaios microscópicos e ataque ácido, além da caracterização de todos os materiais constituintes dos traços de concreto.

### ***4.1.1 Dosagem do concreto***

A dosagem do concreto foi realizada com os dados obtidos na caracterização e qualificação dos materiais empregados, cimento e agregados, avaliando a qualidade e a composição granulométrica.

Os concretos foram dosados a partir de resultados obtidos na Escola de Engenharia da UFMG, utilizando os métodos de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e do American Concrete Institute (ACI), com o objetivo de obter um concreto de qualidade e com a resistência proposta. A partir do traço obtido no método de dosagem, experimentos foram feitos e o traço ajustado para obter os parâmetros esperados conforme dados de entrada no método teórico, conforme previsto na normalização e também na literatura (ABNT NBR 12655:2015; RIBEIRO et al, 2015)

Outro fator determinante para o ajuste de traço foi a definição de uma classe de agressividade III (marinha com presença de cloretos), relação a/c máxima de 0,55 e consumo mínimo de cimento de 320kg/m<sup>3</sup> (ABNT NBR 6118:2014; ABNT NBR 12655:2015).

A dosagem do concreto com adição de fibras de carbono foi feita a partir da dosagem experimental em relação a massa de cimento utilizada para a confecção do concreto referência. A mistura foi ensaiada inicialmente para o concreto de referência e somente depois adaptada ao concreto com adição de fibras de carbono descontínuas e dispersas. As fibras de carbono foram adicionadas secas ao concreto e a sua taxa de absorção desconsiderada.

#### **4.1.2 Produção do concreto**

Os concretos foram produzidos a partir dos estudos de dosagem, utilizando os equipamentos disponíveis no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG e no Laboratório de Materiais de Construção da PUC Minas. Esta produção corresponde às etapas de homogeneização dos materiais constituintes, lançamento, adensamento e cura, que são fundamentais para garantir a obtenção de concretos resistentes e duráveis.

O procedimento de mistura utilizado pelo autor consistiu em colocar inicialmente todo o agregado graúdo (brita nº 1); a seguir, 1/4 da quantidade esperada de água, seguido de todo agregado miúdo (areia), acrescentando toda fibra de carbono em pequenas porções com a betoneira em funcionamento; a seguir, todo o cimento foi adicionado e, por fim, o restante da água da mistura com o aditivo plastificante disperso. A mistura foi homogeneizada na betoneira por cinco minutos após a adição de todos os elementos (ABNT NBR 12655:2015).

#### **4.1.3 Características físicas e mecânicas do concreto**

O concreto fresco foi avaliado pelo ensaio de abatimento conforme ABNT NBR 16889:2020. Com este concreto foram moldados corpos de prova cilíndricos medindo 10cm de diâmetro X 20cm de altura, seguindo as orientações da ABNT NBR 5738:2016. Para o estado endurecido, ensaios de resistência à compressão com implemento de carga constante, foram realizados de acordo com a ABNT NBR 5739:2018.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011) de corpos de prova cilíndricos com dimensão 10x20cm foi realizado em prensa hidráulica, assim como o ensaio do módulo de elasticidade que foi realizado seguindo as recomendações da ABNT NBR 8522:2017 para analisar a relação entre a tensão aplicada e a deformação dos corpos de prova, figura 4.2.



Figura 4.2 – Ensaio de módulo de elasticidade de corpo de prova cilíndrico.

Antes e após o ataque ácido, foram realizadas medidas da taxa de absorção de água conforme a norma ABNT NBR 9778:2009, tanto para o concreto convencional quanto para o concreto com adição de fibras de carbono. As perdas de massa dos corpos de prova após o ataque por ácido clorídrico também foram mensuradas. A degradação superficial dos concretos foi avaliada por meio de inspeção visual dos corpos de prova, antes e após o ataque.

#### ***4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)***

Para a análise da microestrutura foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), sendo as imagens de alta resolução obtidas pelo “Field Emission Gun” (FEG). Para estudar a morfologia das fibras de carbono e do concreto com adição de 2% de fibra de carbono, após a ruptura à compressão, foi realizada análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A superfície das amostras de concreto foi revestida com ouro (Au) para melhorar a condutividade elétrica e para proteger as amostras de danos causados por elétrons. O estudo microscópico ajudou a entender os mecanismos que influenciaram nas alterações das características do concreto com a adição de fibras de carbono.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento que produz imagens de uma amostra ao escanear a superfície com um feixe de elétrons (figura 4.3). Os elétrons interagem com os átomos da amostra, produzindo vários sinais que contêm informações sobre a topografia da superfície e a composição do material analisado. O feixe de elétrons é analisado através de um padrão de varredura e a posição do feixe é combinada com a intensidade do sinal detectado pelo equipamento, para então produzir uma imagem da superfície da amostra.



Figura 4.3 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Microscopia Avançada da PUC Minas.

Fonte: Revista PUC Minas. Disponível em: < <http://www.revista.pucminas.br/materia/laboratorios-de-ponta/>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

Em um MEV convencional as amostras são observadas em alto vácuo e o feixe é emitido por um canhão de elétrons equipado com um cátodo de filamento de tungstênio. O tungstênio é normalmente utilizado em canhões de elétrons termiônicos porque tem o ponto de fusão mais alto e a pressão de vapor mais baixa dentre todos os metais, permitindo assim que seja aquecido eletricamente para emissão de elétrons. Elétrons secundários emitidos por átomos excitados pelo feixe de elétrons são detectados

através de um detector específico. O número de elétrons secundários que podem ser detectados e a intensidade do sinal dependem da topografia da amostra. A detecção de elétrons secundários faz com que alguns MEV's possam obter imagens de estruturas menores do que 1 nanômetro.

Cada pixel da memória de vídeo do computador é sincronizado com a posição do feixe na amostra que está no microscópio e a imagem resultante é um mapa de distribuição da intensidade do sinal sendo convertido então na imagem da área digitalizada da superfície da amostra. A ampliação em um MEV pode ser controlada em uma faixa de 6 ordens de magnitude de cerca de 10 a 3.000.000 vezes. Ao contrário dos microscópios ópticos e eletrônicos de transmissão, a ampliação da imagem em um MEV não é função do poder da lente objetiva, mas controlada pela corrente fornecida às bobinas de varredura ou pela tensão fornecida às placas defletoras. Os MEV's podem ter lentes condensadoras e objetivas, mas sua função é focar o feixe de elétrons em um ponto específico, e não, obter a imagem da amostra. A ampliação das imagens é resultado da proporção das dimensões da varredura na amostra e da varredura no dispositivo de exibição.

#### ***4.1.5 Ataque por ácido clorídrico***

Após verificação das características físicas, mecânicas e microscópicas, foi feita a exposição de corpos de prova tanto do concreto convencional quanto do concreto com adição de fibras de carbono a uma solução aquosa ácido clorídrico. Este processo simula a deterioração dos concretos a um ambiente agressivo de maneira acelerada. O ensaio foi baseado na norma ASTM C-1152: 2020, sendo o procedimento adaptado com submersão dos corpos de prova durante todo período do ensaio. Os corpos de prova, foram submersos em uma solução contendo  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  10% pelo período de 7 dias. Para preenchimento dos espaços vazios do recipiente, foi utilizada brita de gnaíse, que não altera o potencial do ataque ácido. Este recurso reduziu a quantidade de ácido necessária para o desenvolvimento do ensaio.

O ataque por ácido clorídrico foi escolhido pelo fato de grande parte das estruturas de concreto no mundo estarem expostas a condições marinhas e este ambiente ser considerado agressivo e acelerar a degradação do concreto armado em até 30 vezes em relação a um ambiente rural menos agressivo (ABNT NBR 6118:2014).

#### **4.1.6 Perdas de massa**

O ensaio de perdas de massa consiste no percentual da massa dos corpos de prova de concreto que foi perdida após o ataque ácido. Para isto, os corpos de prova foram secos em estufa após o período de cura do concreto por 48 horas a uma temperatura de 100°C até constância de peso. Os pesos secos antes do ataque foram registrados e então, os cp's foram submetidos ao ataque ácido por imersão durante 7 dias. Após o ataque os todos os cp's foram secos em estufa nas mesmas condições anteriores e o peso seco registrado. O comparativo percentual entre o peso seco antes e após o ataque são as perdas de massa, resultado importante para avaliar a integridade do concreto quando submetido a ambientes agressivos.

## **CAPÍTULO 5: Resultados e Discussão**

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos em cada um dos ensaios realizados. As análises foram desenvolvidas tanto para os resultados de resistência mecânica quanto para os resultados da microestrutura antes e depois do ataque ácido.

### **5.1 Caracterização dos materiais constituintes**

Os materiais constituintes dos concretos foram caracterizados no laboratório de materiais do departamento de materiais de construção da Universidade Federal de Minas Gerais - DEMC/UFMG.

#### **5.1.1 Aglomerante e agregados**

Cimento, água, aditivos e agregados naturais: Cimento Portland Tipo II com Adição de Escória de Alto Forno (ABNT NBR 16697:2018) com uma massa específica de  $3,2\text{kg/dm}^3$ , e mistura de água tratada da rede urbana da cidade de Belo Horizonte (COPASA-Brasil). Aditivo superplastificante à base de policarboxilato. Agregado miúdo (areia) natural silicioso arredondado, módulo de finura de 2,4, dimensão máxima característica de 2,4mm, classificação normal média com curva ótima. Agregado graúdo (brita nº 1) de gnaiss, módulo de finura de 7,1, dimensão máxima característica 25mm, classificação normal brita 1 (ABNT NBR NM 248:2003).

Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento CII-E-32 utilizado na produção dos corpos de prova são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ensaio de caracterização do cimento Portland CPII-E-32.

Características	Norma	Resultado	Limites Normalizados ABNT NBR 16697
		Cimento Portland CPII-E-32	
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	34,5	≥32,0
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16605	3,2	-
Finura peneira nº 200-75 µm (%)	ABNT NBR 11579	2,6	≤12,0
Expansibilidade a frio (mm)	ABNT NBR 11582	0	≤5

Nas tabelas 5.2 e 5.3 estão apresentadas as características físicas e qualitativas dos agregados utilizado no trabalho.

Tabela 5.2 – Ensaio de caracterização e qualificação do agregado miúdo.

Características	Norma	Resultado	Limites Normalizados NBR 7211
		Agregado Miúdo Areia Média	
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16972	1,3	Normal/Leve/Pesado
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16916	2,5	-
Torrões de Argila – T.A. (%)	ABNT NBR 7218	1,6	≤3%
Materiais Pulverulentos – M.P. (%)	ABNT NBR 16973	1,5	≤3%
Impurezas Orgânicas – I.O.	ABNT NBR NM 49	Solução de ensaio mais clara do que a solução- padrão	Solução obtida no ensaio
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248	D <sub>máx</sub> (mm)	≤4,8mm
		MF	1,55≤MF≤3,50
Curvas granulométricas		Utilizável superior	Zona Ótima Utilizável



Os resultados apresentados na tabela 5.2 comprovam a qualidade do agregado miúdo escolhido para execução dos ensaios. Este agregado possui índices de qualidade dentro de todos os parâmetros estabelecidos por norma (ABNT NBR 7211:2019).

Tabela 5.3 – Ensaio de caracterização e qualificação do agregado graúdo.

Características	Norma	Resultado	Limites Normalizados NBR 7211
			Agregado Graúdo Brita
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16972	1,5	Normal/Leve/Pesado
Massa unitária compactada da brita (kg/dm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16972	1,6	-
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	ABNT NBR NM 16917	2,6	-
Torrões de Argila – T.A. (%)	ABNT NBR 7218	1,5	≤3%
Materiais Pulverulentos – M.P. (%)	ABNT NBR 16973	0,6	≤1%
Desgaste Superficial - A (%)	ABNT NBR 16974	18	≤50%
Composição granulométrica	D <sub>máx</sub> (mm)	25	≥6,3mm
	MF	7,1	-
Curvas granulométricas	ABNT NBR NM 248	B1	B0, B1, B2, B3 ou B4

Da mesma maneira, os resultados e qualificação do agregado graúdo comprovaram que seus parâmetros estão dentro dos padrões estabelecidos por norma (NBR 7211:2019).

A granulometria dos agregados do concreto foi avaliada e tanto o agregado miúdo (areia) quanto o agregado graúdo (brita) atenderam aos requisitos da norma ABNT NBR 7211:2019. A figura 5.1 mostra a curva de granulométrica da areia média natural e a figura 5.2 mostra a curva granulométrica brita de gnaïsse (nº 1).

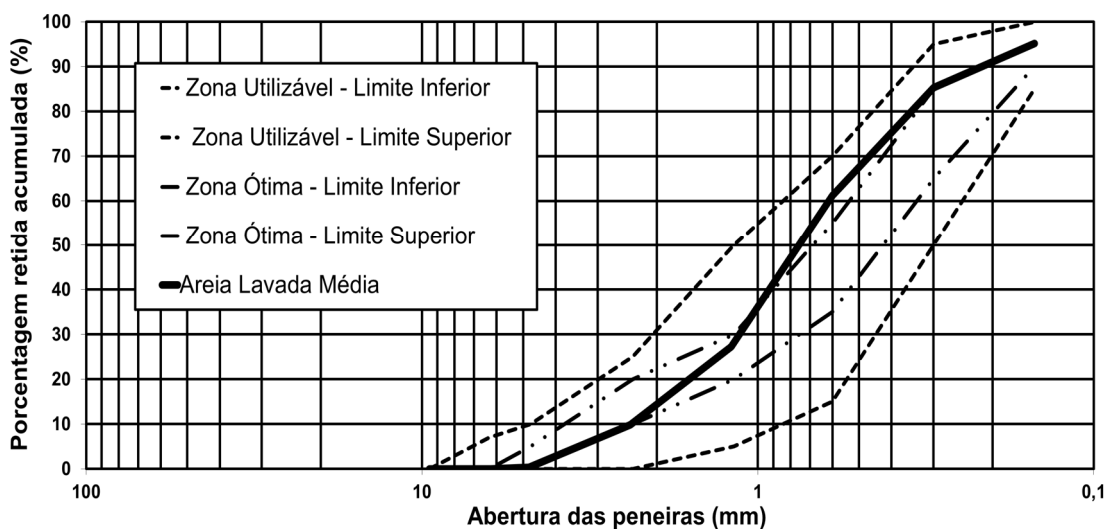


Figura 5.1 – Curva granulométrica da areia lavada média.

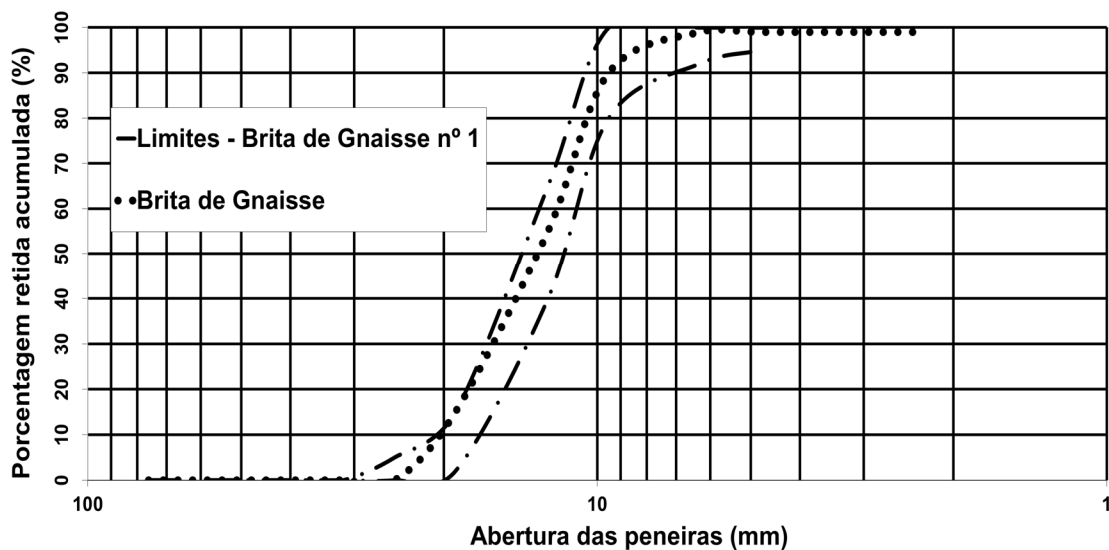


Figura 5.2 – Curva granulométrica da brita de gnaiss (nº 1).

### 5.1.2 Fibras de carbono

As fibras de Carbono utilizadas, figura 5.3, são produzidas e comercializadas pela empresa MC-BAUCHEMIE Brasil, com fábrica em Vargem Paulista, São Paulo e representante de vendas em Belo Horizonte, Minas Gerais.

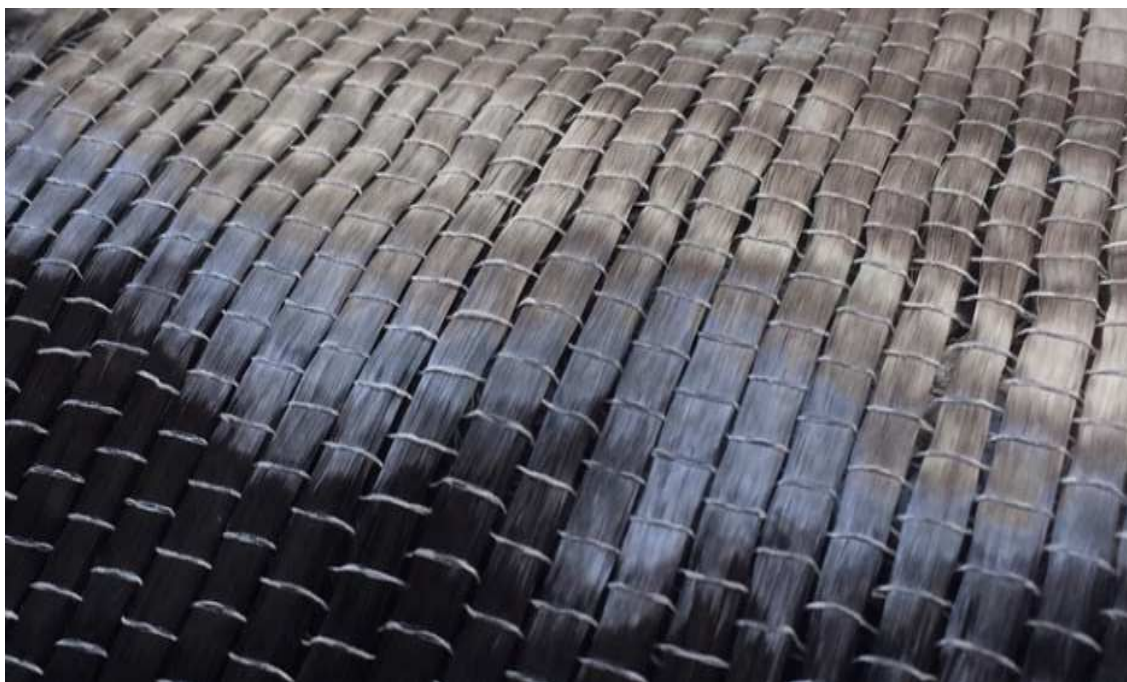


Figura 5.3 – Manta de fibra de carbono.

A fibra foi cortada em pedaços de comprimento entre 40 e 50mm e adicionada seca e em pequenas porções para evitar a aglomeração durante a mistura do concreto.

Na tabela 5.4 são apresentadas as características da fibra de carbono obtidas com o fabricante (MC-BAUCHEMIE, 2008).

Tabela 5.4 – Características mecânicas da fibra de carbono.

<b>Material</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento na ruptura (%)</b>
<b>Fibra de Carbono</b>	4.900	230	2,1

As fibras de carbono foram preparadas para o ensaio através do corte da manta em pedaços entre 40 e 50mm, conforme representado na figura 5.4.



Figura 5.4 – Aglomerado de fibras de carbono cortada sem ampliação.

Através do equipamento de ampliação óptica conhecido como “lupa”, foi realizada verificação das três ampliações originais da fibra de carbono em 8, 20 e 50 vezes (figura 5.5).

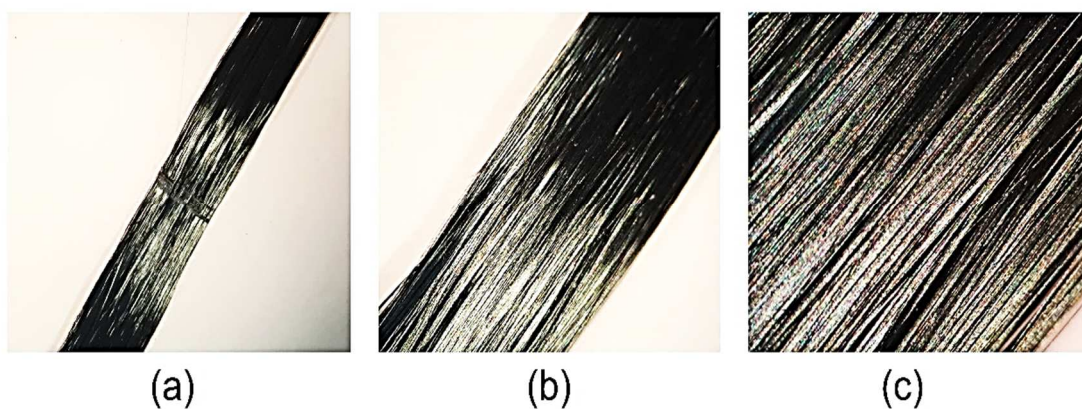


Figura 5.5 – Aspecto da fibra de carbono em lupa. Ampliação original: (a) 8 vezes; (b) 20 vezes; (c) 50 vezes.

As imagens obtidas por MEV expõem um alto nível de organização das fibras de carbono, as quais apresentam superfície lisa, conforme observado na Figura 5.6.

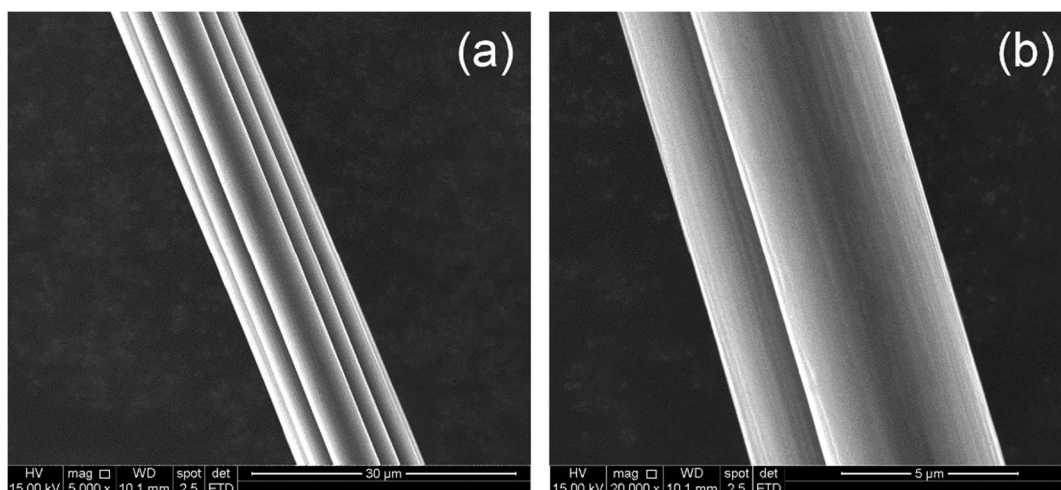


Figura 5.6 – Imagens de elétrons secundários de monofilamentos de fibra de carbono em diferentes ampliações: (a) 5.000X ; e (b) 20.000X.

Conforme mostrado na figura 5.7, o diâmetro médio de cada filamento de fibra de carbono foi de aproximadamente  $10\mu\text{m}$ , ou seja, são fibras extremamente finas em comparação com outros tipos de fibras naturais e artificiais, cujo diâmetro médio é geralmente em torno de 100 a  $200\mu\text{m}$  (BENTUR e MINDESS, 2007).

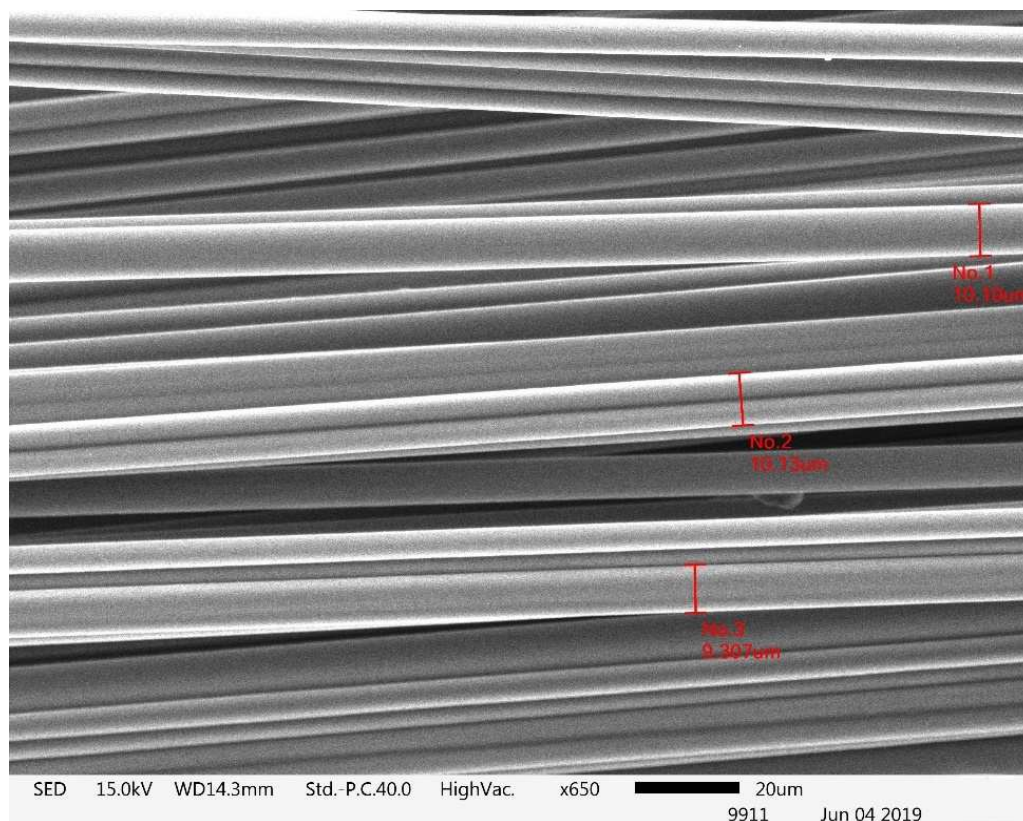


Figura 5.7 – Diâmetros de fibra de carbono obtida em imagens MEV.



## 5.2 Consumo de materiais

Para confecção do traço foi utilizada uma mistura convencional de referência e adicionadas as fibras de carbono dispersas. A relação água/cimento (a/c) não foi corrigida devido a possível absorção das fibras, que foram adicionadas secas. O traço confeccionado utilizou a proporção em massa de 1kg de cimento para 2kg de areia para 3kg de brita e relação água/cimento de 0,50, além da adição de 1,5% de aditivo superplastificante para aumentar a trabalhabilidade. Portanto, para as duas misturas o traço utilizado foi o mesmo, sendo a única variável, a adição de 2% de fibra de carbono em relação a massa de cimento. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2016 e mantidos em cura submersa durante 28 dias.

Uma vez realizada a caracterização dos materiais constituintes, dosagens foram realizadas de modo a selecionar um concreto convencional de referência a ser comparado com adição de fibras de carbono descontínuas e dispersas (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Consumo de materiais para produzir 1m<sup>3</sup> de concreto.

Concreto	Consumo de Cimento (kg)	Consumo de areia (kg)	Consumo de brita (kg)	Fibra de Carbono (%)	Aditivo (%)	Relação água/cimento
<b>Convencional</b>	370,00	740,00	1.100,00	2,00	1,50	0,50

Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20cm foram moldados e rompidos de acordo com as normas ABNT NBR 5738:2016 e a ABNT NBR 5739:2018. Todos os corpos de prova foram desformados após 24 horas e colocados em cura submersa durante 28 dias.

Uma vasta revisão de literatura foi feita para avaliar qual o percentual de adição de fibras de carbono se demonstra mais efetivo para alterar positivamente as características do concreto convencional (AFROUGHSAE e OZBAKKALOGLU, 2016; ALI e QURESHI, 2019; SADRINEJAD et al., 2018; ZHANG et al., 2017) . Dentre as dosagens foi selecionado o concreto que apresenta um consumo de cimento de 370kg que está acima do valor mínimo determinado pela ABNT NBR 12655:2015 para ambientes com agressividade muito forte, uma relação água/cimento de 0,50, 1,5% de aditivo

plastificante e 2% de fibra de carbono em relação ao peso do cimento. Esta foi a proporção que promoveu melhor desempenho para o concreto conforme será apresentado a seguir (ABREU et al., 2020a).

### 5.3 Produção do concreto com adição de fibras de carbono

A produção propriamente dita, que corresponde à mistura dos materiais constituintes, foi feita em betoneira. Inicialmente foi adicionado todo o agregado graúdo (brita nº 1); a seguir, 1/4 da quantidade esperada de água, seguido de todo agregado miúdo (areia), acrescentando toda fibra de carbono em pequenas porções com o misturador em funcionamento; a seguir, todo o cimento e, por fim, o restante da água da mistura com o aditivo plastificante disperso. A mistura foi amassada no misturador por cinco minutos após a adição de todos os elementos para obter a máxima homogeneidade (ABNT NBR 12655:2015).

A figura 5.8 mostra o concreto no estado fresco com adição de fibras de carbono descontínuas e dispersas após amassamento em uma betoneira por um período que garantiu uma boa homogeneização. Verifica-se que as fibras de carbono descontínuas e dispersas adicionadas ao concreto estão uniformemente distribuídas (figura 5.8 (b)).

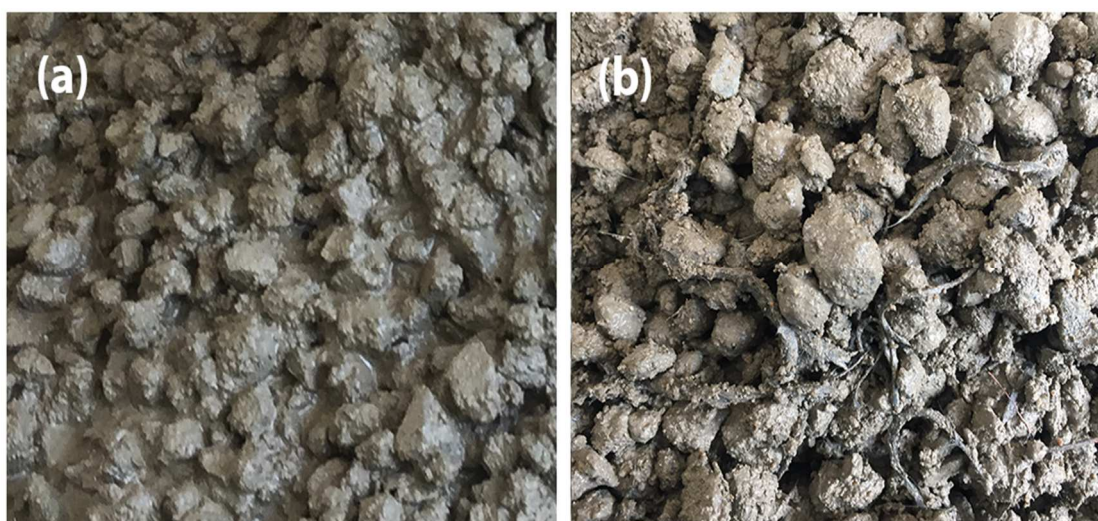


Figura 5.8 – Concreto fresco: (a) convencional de referência; (b) concreto com adição de 2% de fibras de carbono.

A figura 5.9 apresenta o resultado do ensaio de consistência de abatimento realizado em concreto de referência convencional e em concreto contendo a adição das fibras de carbono. Os resultados foram 155mm e 0mm, respectivamente. Como esperado, houve redução da fluidez devido ao efeito do reforço de fibra em relação aos demais componentes (YU et al., 2017).



Figura 5.9– Ensaio de abatimento do tronco de cone: (a) concreto de referência; (b) concreto com fibras de carbono.

Vale ressaltar que existem aditivos superplastificantes que podem compensar a perda de fluidez do concreto com a adição de fibras de carbono, proporcionando a este compósito a mesma trabalhabilidade apresentada pelo concreto convencional de referência (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

#### 5.4 Primeira série de dosagem

A seguir estão apresentados os resultados obtidos durante a seleção das dosagens para o concreto que obteve os melhores resultados (adição de 2% de fibras de carbono em relação a massa de cimento).



#### 5.4.1 Resistência à compressão

Para preparar os corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão foi realizado o nivelamento da superfície através do equipamento conhecido como “retífica”. O resultado é apresentado na figura 5.10, onde pode-se verificar fibras de carbono incrustadas na superfície desbastada.



Figura 5.10 – Conjunto de fibras de carbono aglutinadas e incrustadas na superfície retificada de um corpo de prova cilíndrico.

Os ensaios de compressão foram realizados com aumentos constantes na carga crescente ( $0,45 \pm 0,15$ )MPa/s, conforme ABNT NBR 5739:2018. A tabela 5.6 mostra os valores de resistência à compressão aos 28 dias para o concreto com adição de 2% de fibras de carbono e o concreto de referência. A resistência à compressão dos corpos de prova selecionados foi avaliada de acordo com a ABNT NBR 12655:2015 que determina parâmetros estatísticos para selecionar resultados individuais de corpos de prova de concreto. A resistência média à compressão foi de 37,10MPa para o concreto com adição de fibras de carbono e 32,91MPa para o concreto convencional de referência.

Esses valores indicam que a resistência média à compressão do concreto com adição de fibras de carbono é maior.

Tabela 5.6 – Resistência à compressão de 28 dias para concreto de referência e concreto com adição de 2% de fibras de carbono.

Concreto	Corpos de Prova	Consumo de cimento (kg)	Consumo de fibra de carbono (%)	Relação água/cimento	Resistência à compressão (MPa)	
					28 Dias	Média
Convencional	CP 01	370,00	0,00	0,50	32,49	32,91
	CP 02	370,00	0,00	0,50	31,60	
	CP 03	370,00	0,00	0,50	35,61	
	CP 04	370,00	0,00	0,50	31,93	
Fibra de Carbono 2%	CP 01	370,00	2,00	0,50	35,03	37,10
	CP 02	370,00	2,00	0,50	37,57	
	CP 03	370,00	2,00	0,50	36,39	
	CP 04	370,00	2,00	0,50	39,38	
<b>“p-value” = 0,02032</b>						

A análise estatística confirmou essa tendência, com  $p=0,02032$ , mostrando que os valores médios de resistência à compressão dos dois compósitos foram estatisticamente diferentes a 95% de probabilidade ( $p<0,05$ ). Uma tendência semelhante de aumentar a resistência à compressão usando fibras de carbono em argamassas de cimento foi relatada por WANG et al. (2019).

O ganho de resistência à compressão do concreto com adição de 2% de fibras de carbono pode ser atribuído a dois fatores principais: a melhora na resistência de aderência entre a matriz de cimento e o agregado (BAOGUO et al., 2016), e a diminuição na propagação de fissuras internas na estrutura de concreto (GRZYMSKI et al., 2019).

### 5.4.2 Resistência à tração

A tabela 5.7 mostra os valores de resistência à tração medida por compressão diametral aos 28 dias de concreto com adição de 2% de fibras de carbono e concreto convencional de referência. A resistência média à tração foi de 4,51MPa para o concreto com adição de fibras de carbono e de 3,75MPa para o concreto de referência. Esses valores indicam que a resistência média à tração do concreto adição de fibras de carbono é superior à do concreto de referência.

Tabela 5.7 – Resistência à tração por compressão diametral de 28 dias para concreto de referência e concreto com adição de 2% de fibras de carbono.

Concreto	Corpos de Prova	Consumo de cimento (kg)	Consumo de fibra de carbono (%)	Relação água/cimento	Resistência à tração (MPa)	
					28 Dias	Média
Convencional	CP 01	370,00	0,00	0,50	3,72	3,75
	CP 02	370,00	0,00	0,50	3,54	
	CP 03	370,00	0,00	0,50	4,38	
	CP 04	370,00	0,00	0,50	3,35	
Fibra de Carbono 2%	CP 01	370,00	2,00	0,50	4,15	4,51
	CP 02	370,00	2,00	0,50	4,24	
	CP 03	370,00	2,00	0,50	4,53	
	CP 04	370,00	2,00	0,50	5,12	
<b>“p-value” = 0,03819</b>						

As análises estatísticas confirmaram essa tendência, com  $p = 0,03819$ , mostrando que os valores médios de resistência à tração dos dois compósitos são estatisticamente diferentes a 95% de probabilidade ( $p < 0,05$ ). Tendência semelhante à do aumento da resistência à compressão, o aumento da resistência à tração pode estar relacionado às boas características obtidas pela adição das fibras de carbono à mistura, tornando a ligação entre a matriz de cimento e o agregado mais resistente. (BAOQUO et al., 2016).

A redução das fissuras observadas nas imagens de MEV prova que as fibras de carbono foram eficientes na melhoria da zona de transição, fazendo com que o concreto com

adição de fibras de carbono obtivesse um melhor resultado de resistência à tração (NEVILLE e BROOKS, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014) , proporcionando menos fissuras durante a vida útil da estrutura, reduzindo a entrada de agentes agressivos e, portanto, melhorando a durabilidade das estruturas de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014; GIROTTO et al., 2014; GUPTA et al., 2016).

#### 5.4.3 Módulo de elasticidade

A tabela 5.8 apresenta os valores do módulo de elasticidade aos 28 dias para concretos com adição de 2% de fibras de carbono e concreto de referência convencional. A média do módulo de elasticidade foi de 31,08GPa para o concreto adição de fibras de carbono e de 33,01GPa para o concreto de referência. Esses valores indicam que o módulo de elasticidade médio do concreto de referência é superior ao do concreto com fibras de carbono. No entanto, não houve diferença estatisticamente significativa entre esses valores médios confirmados com  $p=0,4370$ , mostrando que os valores médios do módulo de elasticidade das duas resinas não são estatisticamente diferentes a 95% de probabilidade ( $p>0,05$ ).

Tabela 5.8 – Módulo de elasticidade de 28 dias para concreto de referência e concreto com adição de 2% de fibras de carbono.

Concreto	Corpos de Prova	Consumo de cimento (kg)	Consumo de fibra de carbono (%)	Relação água/cimento	Módulo de Elasticidade (GPa)	
					28 Dias	Média
Convencional	CP 01	370,00	0,00	0,50	37,23	33,01
	CP 02	370,00	0,00	0,50	34,62	
	CP 03	370,00	0,00	0,50	28,02	
	CP 04	370,00	0,00	0,50	32,17	
Fibra de Carbono 2%	CP 01	370,00	2,00	0,50	31,11	31,08
	CP 02	370,00	2,00	0,50	28,32	
	CP 03	370,00	2,00	0,50	34,00	
	CP 04	370,00	2,00	0,50	30,89	

**“p-value” = 0,4370**

Este resultado pode ser interpretado como uma característica positiva, indicando que concreto com adição de 2% de fibras de carbono pode ser utilizado em estruturas sem apresentar mudanças comportamentais significativas em relação ao módulo de elasticidade, facilitando até mesmo o cálculo estrutural em uma possível substituição do concreto convencional (TORRENTI et al., 2010). De fato, a tendência observada de maior rigidez para o concreto convencional vai de encontro às expectativas teóricas de CHAN et al. (2019).

#### **5.4.4 Absorção e índice de vazios**

Os resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica para concreto com e sem adição de 2% de fibras de carbono estão compilados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto convencional e do concreto com adição de 2% fibras de carbono.

<b>Concreto</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Convencional</b>	6,13	12,34	2297,00
<b>Fibra de carbono 2%</b>	6,62	12,92	2284,00

A absorção de água foi de 6,13% para o concreto de referência e 6,62% para o concreto com adição de fibras de carbono. A partir dos parâmetros obtidos no ensaio de absorção de água, foi possível calcular o índice de vazios do concreto e a relação entre os volumes dos poros permeáveis e o volume total, proporcionando a quantificação dos poros presentes no material (ABNT NBR 9778:2009). O concreto de referência convencional teve índice de vazios de 12,34% e o concreto com fibras de carbono de 12,92%. As massas específicas foram 2.297kg/m<sup>3</sup> para o concreto de referência e 2.284kg/m<sup>3</sup> para o concreto com fibras de carbono. Os resultados demonstram que a adição de fibras de carbono na mistura de concreto não alterou a classificação desses parâmetros, que são importantes indicadores da durabilidade do concreto estrutural (NEVILLE, 2016; FRIGIONE, 2018).

## 5.5 Segunda série de dosagem

Vistos os resultados positivos obtidos na primeira série de dosagem, o traço e os materiais constituintes foram mantidos os mesmos para a segunda série de dosagem, porém na busca pela melhoria de trabalhabilidade do concreto com fibras de carbono, foi alterado o fornecedor do aditivo plastificante. Nesta nova série os concretos foram expostos a um ataque ácido por ácido clorídrico. A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios realizados na segunda série de dosagem do concreto com adição de 2% de fibras de carbono.

A figura 5.11 apresenta o resultado do ensaio de consistência de abatimento realizado em concreto de referência convencional e em concreto contendo a adição das fibras de carbono na segunda série de dosagem. Os resultados foram 125mm e 25mm, respectivamente. Com a troca do fabricante do aditivo plastificante havia a expectativa de uma maior trabalhabilidade do concreto com fibras, portanto ainda são necessários novos testes para ampliar a plasticidade do novo composto.

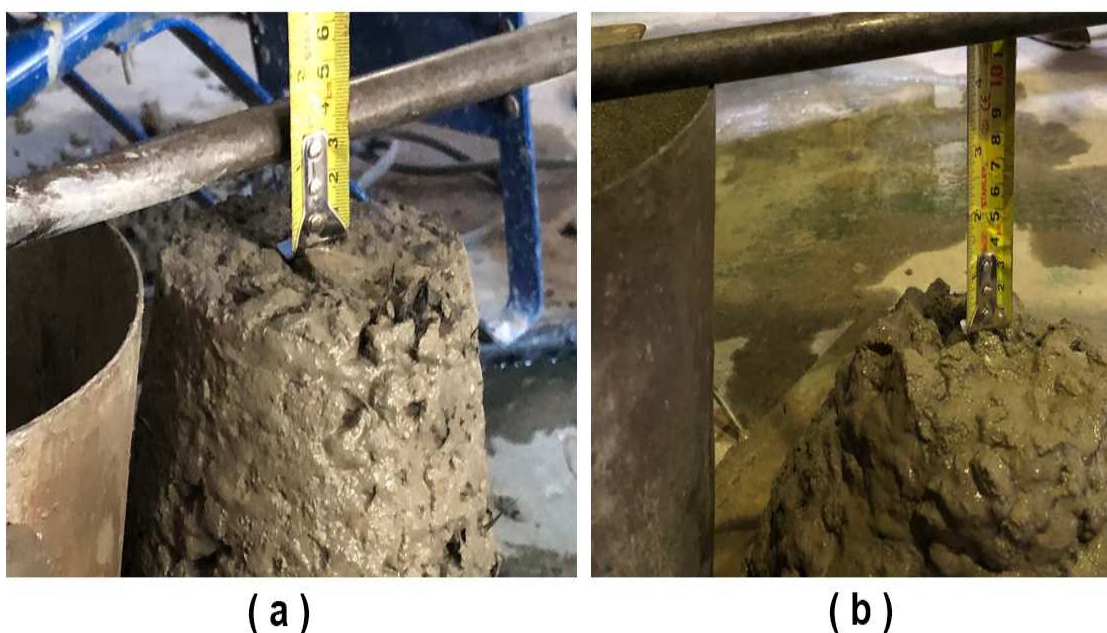


Figura 5.11– Ensaio de abatimento do tronco de cone: (a) concreto de referência; (b) concreto com fibras de carbono.

### 5.5.1 Ataque por ácido clorídrico

Tanto os corpos de prova cilíndricos de concreto convencional quanto os corpos de prova cilíndricos de concreto com adição de fibras de carbono, foram submetidos a uma solução aquosa ácido clorídrico. Este processo simula a exposição dos concretos a um ambiente agressivo de maneira acelerada. O ensaio foi baseado na norma ASTM C-1152:2020, sendo o procedimento adaptado com submersão dos corpos de prova durante o período de 7 dias em uma solução contendo  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  10%, conforme pode ser observado na figura 5.12. Para preencher os espaços vazios do recipiente, foi utilizada brita de gnaiss, material que não altera o potencial do ataque ácido. Este recurso reduziu a quantidade de ácido necessária para o desenvolvimento do ensaio.

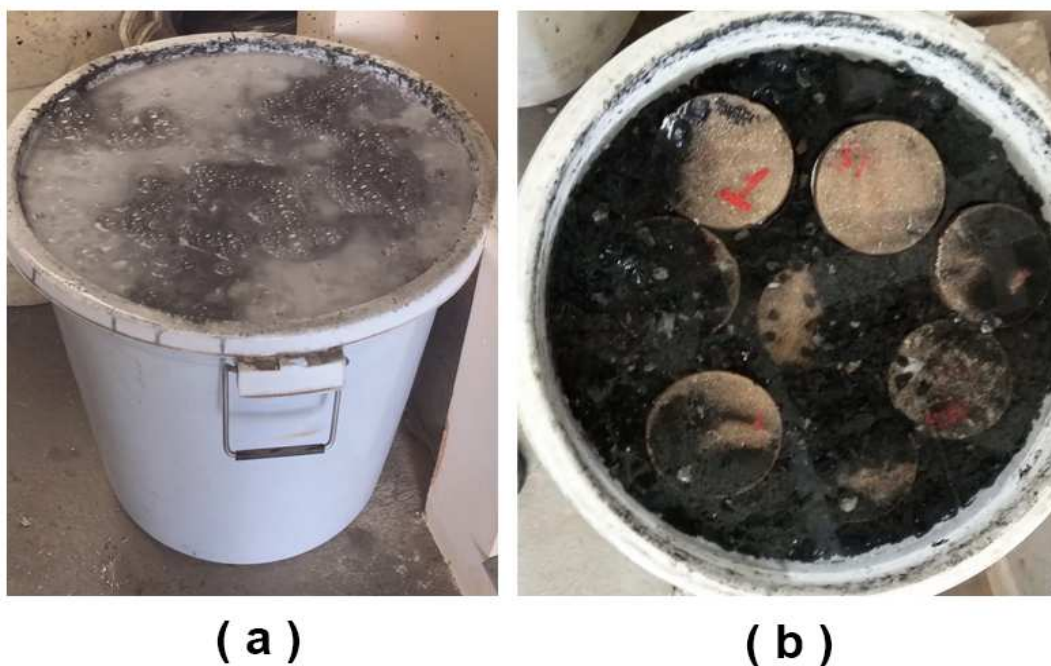


Figura 5.12 – Ataque submerso com solução ácida de  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  a 10%. (a) Momento em que o ácido entrou em contato com as amostras (b) Amostras após 7 dias de ataque com ácido.

Após a realização do ataque ácido, os corpos de prova foram retirados do recipiente e secos em estufa com temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas até constância de peso. Após secagem, foram realizados os demais ensaios com resultados apresentados a seguir.

### 5.5.2 Resistência à compressão

Antes do ataque ácido, a resistência à compressão média do concreto com adição de fibra de carbono foi de 31,49MPa, enquanto a do concreto convencional foi de 25,28MPa, conforme mostrado na tabela 5.10. O ganho de resistência com a adição de fibra de carbono, de aproximadamente 25% é superior aos ganhos relatados em outros estudos e não é comum para concretos com adição de fibras (PEREIRA et al., 2005). Conforme observado anteriormente, as fibras de carbono promovem a formação de sistemas densos de microfissuras, impedindo a formação de grandes fissuras na zona de transição, melhorando, assim, a resistência mecânica do concreto. O ganho de resistência é importante para a durabilidade do concreto quando este é submetido a classes de agressividade mais severas (YU et al., 2017; ZHANG et al., 2017).

Tabela 5.10 – Resistência à compressão dos concretos antes e depois do ataque.

Tipo de Concreto	Antes do Ataque Ácido		Após o Ataque Ácido	
	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à compressão (MPa)	
	CP's	Média	CP's	Média
Convencional	28,54	25,28	20,75	17,44
	23,4		19,19	
	24,85		17,01	
	25,06		17,59	
	28,11		11,78	
	22,47		16,17	
	24,75		16,05	
	25,05		20,98	
<b>Desvio Padrão</b>	2,09		2,98	
Fibra de Carbono 2%	33,48	31,49	16,69	20,61
	28,55		20,97	
	33,23		14,75	
	32,45		23,27	
	33,45		22,77	
	30,17		22,04	
	28,93		21,6	
	31,65		22,8	
<b>Desvio Padrão</b>	2,03		3,15	



Após exposição à solução ácida, a resistência à compressão média do concreto com adição de fibra de carbono foi de 20,61MPa e a do concreto convencional de 17,44MPa. A perda de resistência à compressão foi um pouco mais acentuada para o concreto com adição de fibras de carbono, 34,50%, do que para o concreto convencional, 31,00%, conforme mostrado na figura 5.13. Os sistemas densos de microfissuras contribuem para a redução do nível de entrada de agentes agressivos no concreto com adição de fibras de carbono, apesar de citado em outros trabalhos que as fibras podem facilitar a condução do agente agressivo até o interior do concreto. Assim, a adição de fibras de carbono ao concreto, mesmo diante da deterioração um pouco mais severa, proporcionou um ganho considerável de resistência à compressão sem nenhuma alteração na quantidade de cimento do traço.

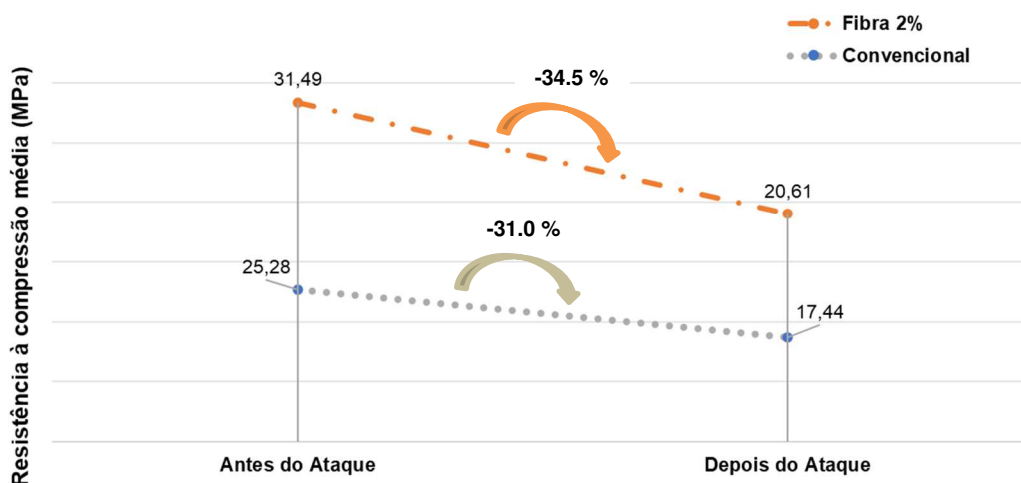


Figura 5.13 – Resistência à compressão do concreto antes e depois do ataque por ácido clorídrico.

Apesar da redução de resistência causada pelo ataque ácido estar no mesmo patamar dos concretos convencionais, em torno de 30,00%, pode-se observar que o concreto com adição das fibras de carbono promove maior vida útil as estruturas produzidas com este tipo de concreto, uma vez que após o ataque ácido, seus parâmetros médios ainda estão acima do valor obtido para o concreto convencional, mantendo assim a estrutura

de concreto armado com integridade suficiente para resistir aos esforços mecânicos solicitantes por um maior período de tempo.

### 5.5.3 Resistência à tração

A tabela 5.11 apresenta os resultados de resistência à tração indireta que foram obtidos através do ensaio de compressão diametral dos corpos de prova (ABNT NBR 7222:2011). O valor médio obtido para o concreto com adição de fibras de carbono foi de 3,73MPa e o do concreto convencional foi de 3,71MPa. Esta diferença é pouco sensível e mostra que a adição de fibras de carbono não alterou a resistência à tração do concreto. Isso pode ser explicado pelo fato de a fibra agir com maior efetividade nas microfissuras responsáveis pela ruptura do concreto, o que é comprovado pelo ganho de resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Tabela 5.11 – Resistência à tração dos concretos antes e depois do ataque.

Tipo de Concreto	Antes do Ataque Ácido		Após o Ataque Ácido	
	Resistência à tração (MPa)		Resistência à tração (MPa)	
	CP'S	Média	CP'S	Média
Convencional	2,92	3,71	2,99	2,58
	4,20		2,51	
	3,62		2,64	
	4,20		1,91	
	3,64		2,86	
<b>Desvio Padrão</b>	0,53		0,42	
Fibra de Carbono 2%	4,01	3,73	2,83	2,72
	3,32		2,23	
	4,02		2,48	
	3,28		3,37	
	4,04		2,67	
<b>Desvio Padrão</b>	0,40		0,43	

Após sofrerem ataque ácido de  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  10%, ambos os concretos apresentaram resultados com redução da resistência à tração observada inicialmente, conforme mostrado na figura 5.14. Apesar disso, fica evidente que o concreto com adição de fibras de carbono apresentou menor perda percentual de resistência à tração, acompanhando os resultados de resistência à compressão e comprovando que as fibras cumprem papel de minimizar a perda de propriedades mecânicas em relação ao concreto convencional comprovado pelo ganho de resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

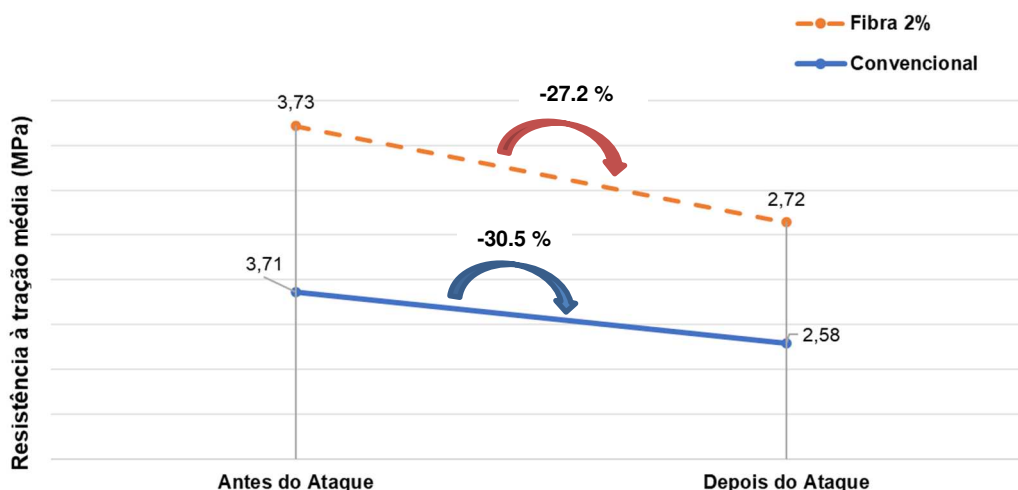


Figura 5.14 – Resistência à tração dos concretos antes e depois do ataque por ácido clorídrico.

Então, pode-se dizer que a adição das fibras de carbono ao concreto não altera significativamente a resistência à tração indireta, mas proporciona melhor comportamento em relação a fissuração e controle dos esforços de tração interna entre a matriz cimentícia e seus componentes. Este comportamento explica a menor redução na resistência à tração do concreto com fibras de carbono após o ataque ácido, indicando que a adição das fibras de carbono minimizou a propagação de fissuras internas que podem colaborar para a passagem de agentes agressivos.

### 5.5.4 Módulo de elasticidade

Os valores medidos do módulo de elasticidade do concreto com adição de 2% de fibras de carbono e do concreto convencional são mostrados na tabela 5.12. Para o concreto com fibra o módulo de elasticidade médio antes do ataque foi de 31,83GPa e para o concreto de referência o módulo de elasticidade médio foi de 31,78GPa. A variação do módulo de elasticidade após o ataque ácido foi de 19,20% para o concreto com adição de fibras de carbono e de 18,00% para o concreto convencional. Observa-se que o comportamento de ambos os concretos foi alterado negativamente pelo ácido clorídrico, que reduziu a rigidez do material. Entretanto, vale ressaltar que é relevante o fato de o concreto com adição de fibras de carbono ter apresentado resultados muito próximos do concreto convencional.

Tabela 5.12 – Módulo de elasticidade dos concretos antes e depois do ataque.

Tipo de Concreto	Antes do Ataque Ácido		Após o Ataque Ácido		Variação média do Módulo de Elasticidade (%)
	Módulo de elasticidade (GPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		
	CP'S	Média	CP'S	Média	
Convencional	31,96	31,78	26,63	26,06	18,00
	30,03		26,16		
	31,35		25,78		
	33,62		23,09		
	31,93		28,67		
<b>Desvio Padrão</b>	1,29		2,00		
Fibra de Carbono 2%	32,06	31,83	24,46	25,73	19,20
	33,75		25,45		
	29,94		28,57		
	33,88		24,35		
	29,51		25,80		
<b>Desvio Padrão</b>	2,06		1,71		

Os resultados de módulo de elasticidade podem ser interpretados como uma característica positiva, comprovando que deste ponto de vista o concreto com adição de

2% de fibras de carbono pode ser utilizado em estruturas sem apresentar alterações de comportamento significativas com relação ao concreto convencional, facilitando assim uma possível substituição do concreto convencional em estruturas de concreto armado (CHAN et al., 2019).

Considerando os resultados das avaliações mecânicas, observa-se um comportamento durável do concreto reforçado com fibra de carbono contra intemperismo natural sob condições agressivas. Esses resultados satisfatórios refletiram o bom desempenho das fibras de carbono dentro da matriz cimentícia do concreto, fazendo com que a utilização do concreto com adição de 2% de fibras de carbono seja vista como benéfica para as estruturas de concreto armado, ampliando a vida útil e a durabilidade. Desta maneira, as estruturas podem cumprir funções estruturais por prazos maiores, uma vez que as propriedades estudadas nesta seção são determinantes para a proteção das armaduras e também para as propriedades mecânicas do concreto.

### 5.5.5 Absorção e índice de vazios

Os valores obtidos nas medidas de absorção de água e índice de vazios antes e depois do ataque ácido são mostrados individualmente na figura 5.15.

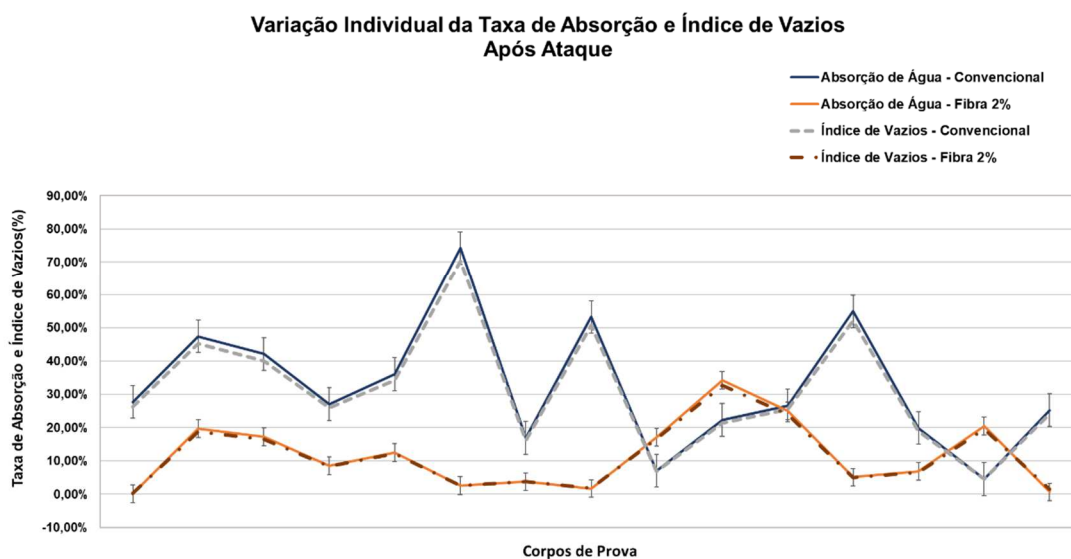


Figura 5.15 – Resultados individuais da taxa de absorção e índice de vazios antes e depois do ataque ácido.

Os resultados apresentados nas tabelas 5.13 e 5.14 são as médias de 15 corpos de prova testados individualmente tanto para o concreto com fibras quanto para o concreto convencional conforme mostrado na figura 5.16. Conforme esperado, após o ataque ácido, ocorreu para ambos os concretos um aumento da taxa de absorção e também do índice de vazios. O concreto convencional apresentou resultado de variação média após ataque de 32,30% para a taxa de absorção e água e de 30,80% para o índice de vazios. Já o concreto com adição de fibras de carbono apresentou variação média após ataque de 11,71% taxa de absorção e de 11,36% para o índice de vazios.

Tabela 5.13 – Absorção média de água no concreto antes e depois do ataque de ácido clorídrico.

Tipo de Concreto	Absorção de água após imersão - Média (%)		Variação média absorção (%)
	Antes do ataque	Após ataque	
<b>Convencional</b>	4,10%	5,40%	32,30%
<b>Desvio Padrão</b>	0,50	0,45	
<b>Fibra de Carbono 2%</b>	4,90%	5,50%	11,71%
<b>Desvio Padrão</b>	0,60	0,32	

Estes resultados evidenciam como os agentes agressivos provocam a degradação da estrutura interna do concreto, aumentando a porosidade e conseqüentemente a taxa de absorção, o que facilita cada vez mais a entrada de agentes agressivos aumentando o grau de ataque e reduzindo rapidamente a capacidade passivadora do concreto em relação as armaduras (BEUSHAUSEN et al., 2019; RIBEIRO, 2018).

A tabela 5.15 apresenta os valores obtidos para o índice de vazios antes e depois do ataque ácido. Vale ressaltar que ambos possuem índices de taxa de absorção e índices de vazios considerados excelentes estabelecidos pelas bibliografias do ponto de vista de durabilidade (NEVILLE, 2016).

Tabela 5.14 – Absorção média de água no concreto antes e depois do ataque de ácido clorídrico.

Tipo de Concreto	Índice de Vazios - Média (%)		Variação Média índice de vazios (%)
	Antes do ataque	Após ataque	
<b>Convencional</b>	9,50%	12,30%	30,80%
<b>Desvio Padrão</b>	1,09	0,94	
<b>Fibra de Carbono 2%</b>	11,10%	12,40%	11,36%
<b>Desvio Padrão</b>	1,29	0,68	

O fato de as fibras de carbono reduzirem os índices de variação da taxa de absorção e índices de vazios após o ataque ácido está ligado ao controle de fissuração interna promovido por estas fibras e que pode ser comprovado pelas imagens das amostras obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### **5.5.6 Perdas de massa**

Os resultados de perda de massa são coerentes com os resultados obtidos para taxa de absorção, índice de vazios e propriedades mecânicas. Para este ensaio os corpos de prova de concreto foram pesados secos tanto antes do ataque quanto após o ataque por ácido clorídrico, assim como descrito no procedimento detalhado na metodologia. Os resultados da análise mostrados na figura 5.16 revelaram valores de perdas de massa baixos, na faixa de até 1,50%, valor abaixo de outros obtidos estudos semelhantes realizados com concretos submetidos a ataque por ácido clorídrico (ABREU et al., 2020b). A figura a seguir apresenta os resultados individuais das perdas de massa obtidas para os corpos de prova apresentado pelas colunas. As perdas de massa média dos corpos de prova estão apresentadas pelas linhas horizontais. Para o concreto com adição de fibra de carbono a média das perdas de massa de 0,65%, cerca de 50% menor do que as perdas de massa encontradas para o concreto convencional que foram da ordem de 1,20%.

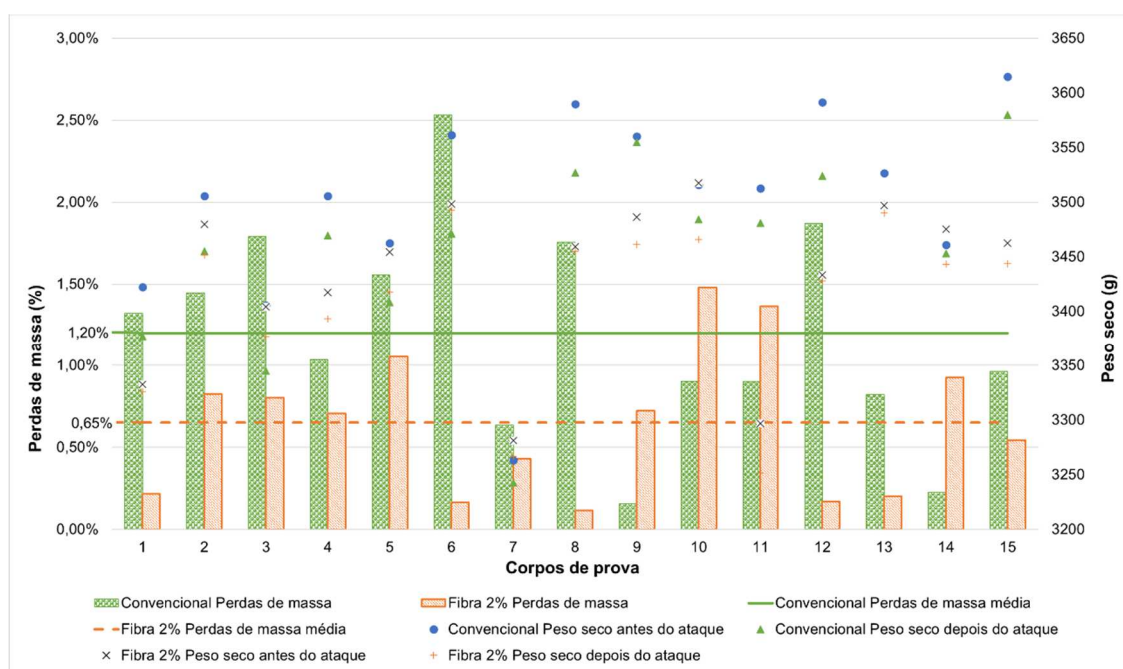


Figura 5.16 – Peso seco individual e perdas de massa dos corpos de prova de concreto após ataque por ácido clorídrico.

Os resultados obtidos evidenciam o potencial dos agentes agressivos em desagregar os concretos, mas em vista dos resultados encontrados nas seções anteriores pode-se dizer que as propriedades mecânicas, a taxa de absorção/índice de vazios, foram afetados de maneira significativa pelo ataque. Portanto o grande potencial do ataque por ácido clorídrico está na deterioração das propriedades e principalmente das armaduras contidas na estrutura de concreto armado. Mais uma vez a adição e a interação das fibras de carbono com a matriz cimentícia se mostrou efetiva em minimizar a desagregação causada no concreto por ataques ácidos externos.

### 5.5.7 Inspeção Visual

A degradação superficial dos concretos foi avaliada inicialmente por meio de inspeção visual dos corpos de prova, antes e após o ataque por imersão em ácido clorídrico 10%, durante 7 dias. Tanto o concreto convencional quanto o concreto com adição de 2% de fibras de carbono apresentaram desgaste e esfarelamento superficial e exposição parcial dos agregados graúdos, conforme mostram as figuras 5.17 e 5.18. Vale ressaltar que nenhum dos corpos de prova apresentou fissuração, tendo o ataque ácido afetado principalmente a camada de acabamento (em profundidade inferior a 2mm).





Figura 5.17 – Concreto convencional: (a) antes do ataque; (b) depois do ataque.

A degradação ocasionada pelo ataque provocou a exposição dos agregados por expansão ou fissuração, resultando em efeitos danosos; como o aumento da porosidade do concreto, comprovada pelos ensaios de absorção de água e de perda de massa (ABREU et al., 2020b; ABREU, 2014; LOPEZ et al., 2019; SADRINEJAD, et al., 2018). Para os corpos de prova do concreto com adição de fibras, figura 5.18, é visível a exposição das fibras de carbono na superfície após o ataque ácido, deixando evidente a distribuição uniforme das fibras dentro da mistura. Assim, apesar dos efeitos mencionados da exposição na solução ácida, os ensaios abordados nas seções anteriores comprovam que este é apenas um efeito visual, pois o desempenho do concreto com adição de fibras foi superior ao concreto convencional. Vale lembrar também que as fibras de carbono são quimicamente estáveis, por este motivo suas propriedades físicas não foram alteradas pela exposição ao ataque ácido.



Figura 5.18 – Concreto com 2% de fibras de carbono: (a) antes do ataque; (b) depois do ataque.

A figura 5.19 mostra a seção dos corpos de prova rompidos no ensaio de tração indireta (ABNT NBR 7222:2011). Verifica-se que tanto o concreto com adição de fibras de carbono quanto o concreto convencional apresentam homogeneidade e boa distribuição dos agregados graúdos. Observa-se também que, tanto no concreto convencional quanto no concreto com adição de fibras de carbono, a maioria dos agregados graúdos oriundos de rocha gnáissica que estão expostos estão fraturados. Esta observação comprova que, em ambos os casos, a resistência máxima dos agregados foi aproveitada e a zona de transição permaneceu íntegra mesmo após o ataque ácido.



Figura 5.19 – Inspeção visual da seção do concreto: (a) 2% de fibras de carbono; (b) convencional.

Em geral todas as amostras apresentaram maior rugosidade e desagregação superficial do que antes do ataque ácido. Os ensaios comprovam que o concreto com fibras de carbono foi menos suscetível à deterioração do que o concreto convencional. Desta maneira, a presença de fibras na massa de concreto se mostra mais uma vez um fator favorável para a durabilidade do concreto.

#### ***5.5.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)***

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para visualizar como as fibras de carbono contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas do concreto. Após a ruptura dos corpos de prova à compressão, foram retirados os ensaios de resistência à



compressão do concreto de referência e do concreto com adição de 2% de fibras de carbono antes e depois do ataque por ácido clorídrico. Imagens de MEV do concreto convencional foram usadas como referência para avaliar melhorias no concreto com a adição de fibras de carbono e também para avaliar como o ataque ácido degradou a estrutura destes compósitos.

A figura 5.20 e a figura 5.21 mostram imagens MEV de amostras de concreto de referência (sem adição de fibras de carbono) antes do ataque por ácido clorídrico.

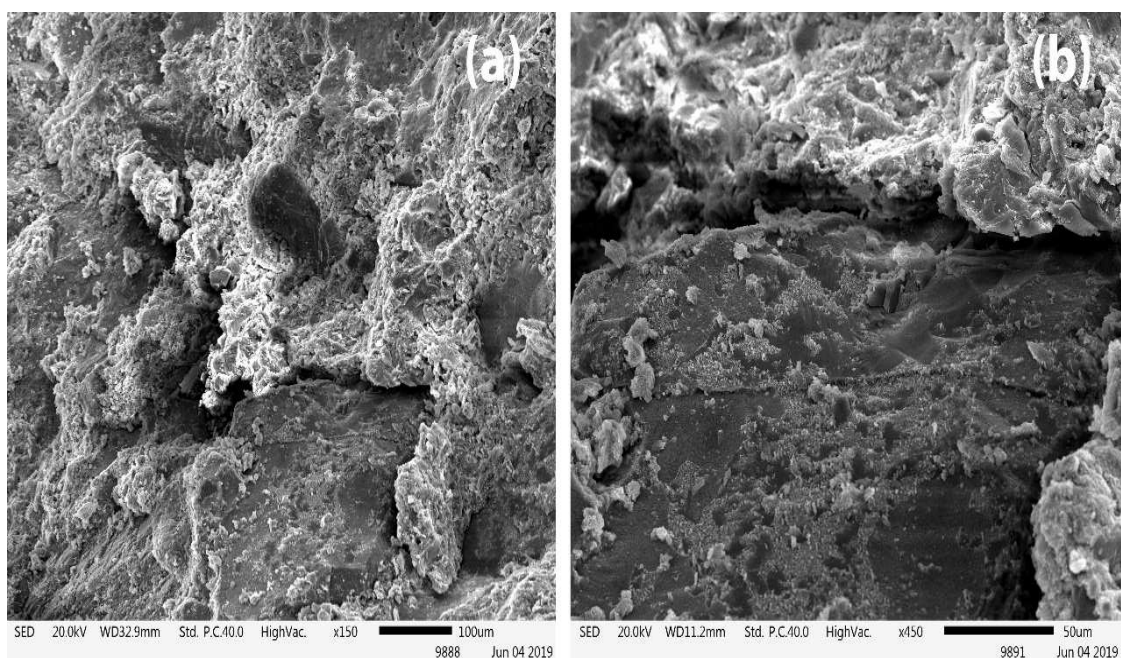


Figura 5.20 – Amostra da microestrutura do concreto de referência após ruptura por compressão, antes do ataque: (a) Amostra 01 – ampliação de 150X; (b) Amostra 01 – ampliação de 450X.

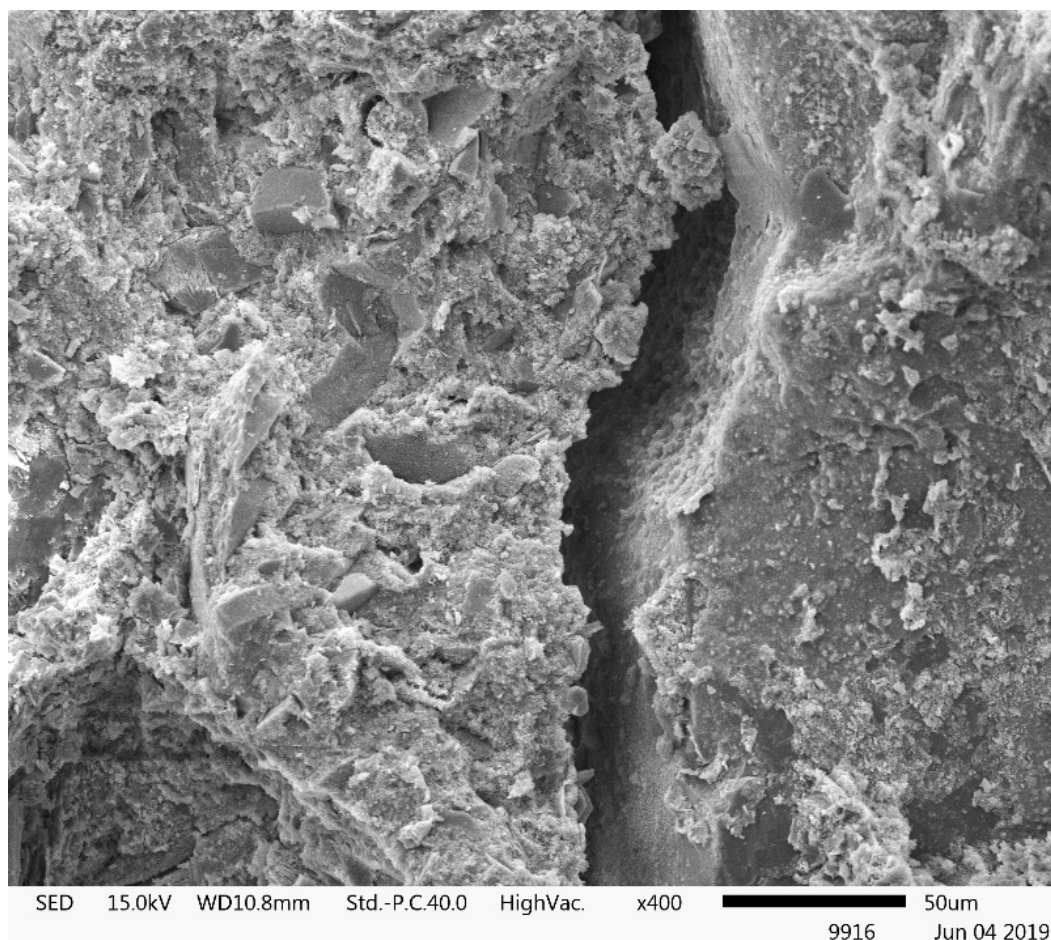


Figura 5.21 – Zona de transição da microestrutura da amostra do concreto de referência após a ruptura por compressão, antes do ataque: Amostra 02 - ampliação de 400X.

Como esperado, ambas as imagens da figura 5.21 mostram fissuras entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo tanto na amostra 1 quanto na amostra 2. Durante o carregamento (compressão), essas fissuras aumentam gradualmente até a ruptura, onde ocorre a interconexão e o concreto não resiste mais. Assim, a zona de transição é considerada um ponto fraco devido à dificuldade de adesão da pasta de cimento à superfície plana do agregado graúdo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A figura 5.22 mostra a zona de transição entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo após o ataque por ácido clorídrico 10%. Comparando a imagem com a figura 5.20, é nítida a maior rugosidade da matriz cimentícia e a presença de partículas soltas na superfície, além de uma maior quantidade de poros. Assim, fica confirmada a motivação para o aumento da taxa de absorção dos concretos depois do ataque ácido e a redução da resistência à compressão.

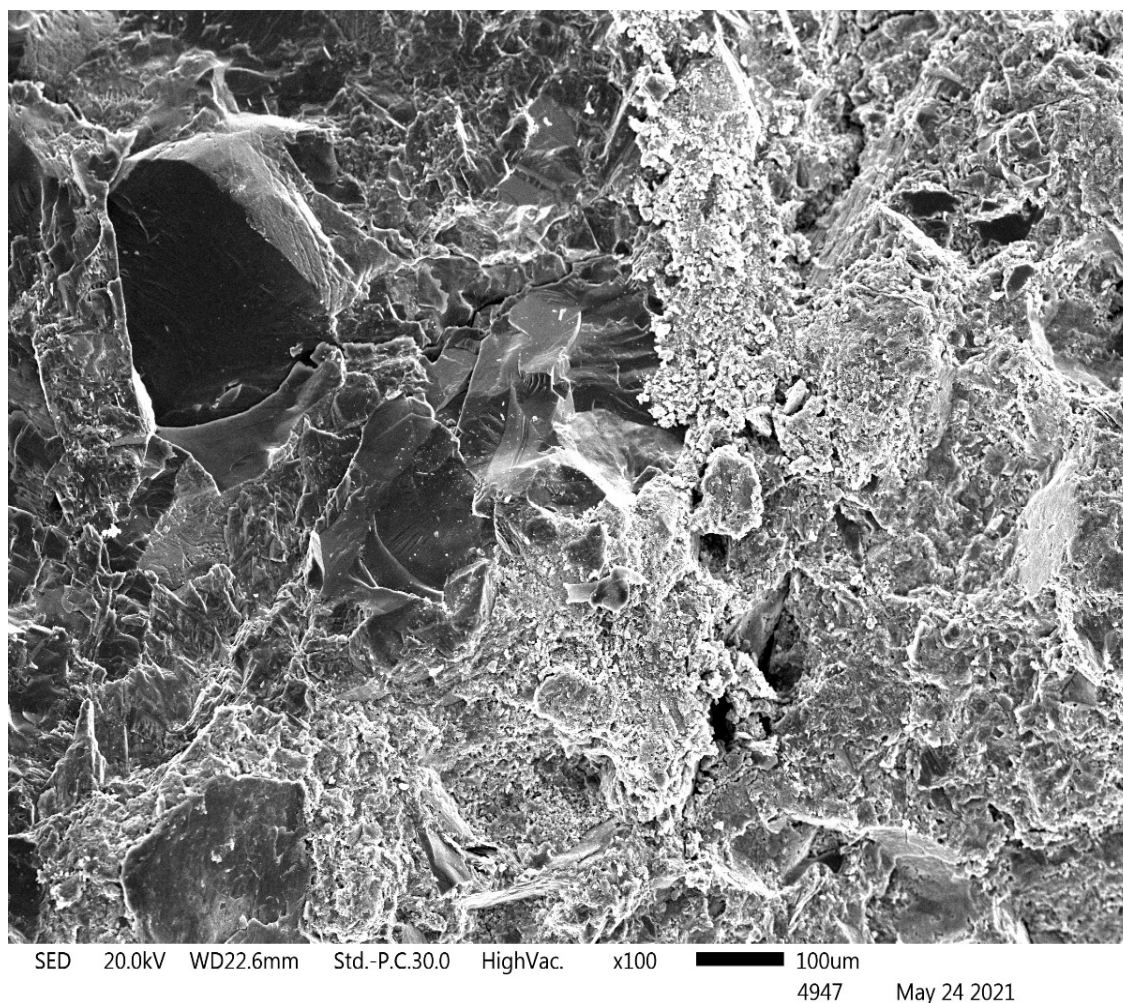


Figura 5.22 – Zona de transição da microestrutura da amostra do concreto de referência após a ruptura por compressão, depois do ataque: Amostra 03 – ampliação de 100X.

A figura 5.23 mostra imagens de MEV de amostras de concreto com adição de 2% de fibras de carbono, antes do ataque por ácido clorídrico. Pode-se observar que as fibras de carbono estão distribuídas aleatoriamente na matriz de cimento e estão bem aderidas mesmo após a ruptura do corpo de prova. Observa-se também após a ruptura que o agregado graúdo permanece aderido à matriz de cimento. É notória a melhora do desempenho da zona de transição dos agregados, que, segundo a literatura, a melhora na zona de transição proporcionada pelas fibras de carbono aumenta a resistência do concreto e as falhas ocorrem com a ruptura dos agregados graúdos quando comparado ao concreto convencional antes do ataque ácido (NEVILLE E BROOKS, 2013; SAFIUDDIN et al., 2018).

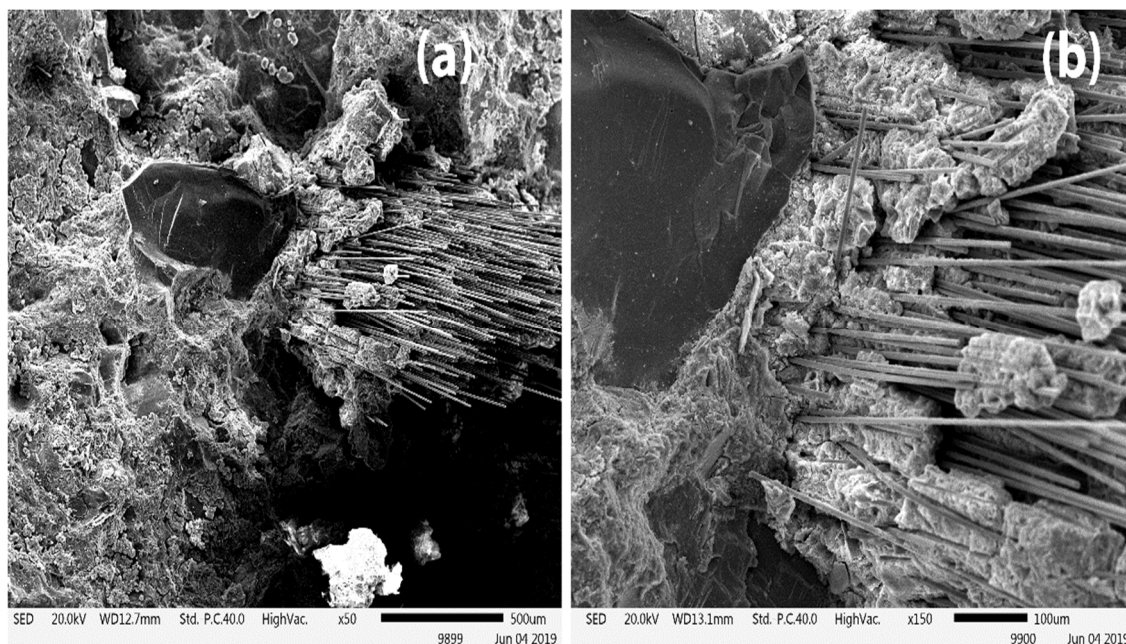


Figura 5.23 – Amostra da microestrutura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, antes do ataque: Amostra 04 – (a) ampliação de 50X; (b) ampliação de 150X.

Após sofrer o ataque ácido o concreto com adição de 2% de fibras de carbono apresentou após a ruptura por compressão fissuras na região da zona de transição e o desprendimento do agregado graúdo da matriz cimentícia, como mostrado na figura 5.24 (amostra 5). Este comportamento não havia sido observado na figura 5.23, comprovando que o ataque degradou a estrutura interna, o que justifica a perda de resistência à compressão depois do ataque por ácido clorídrico.

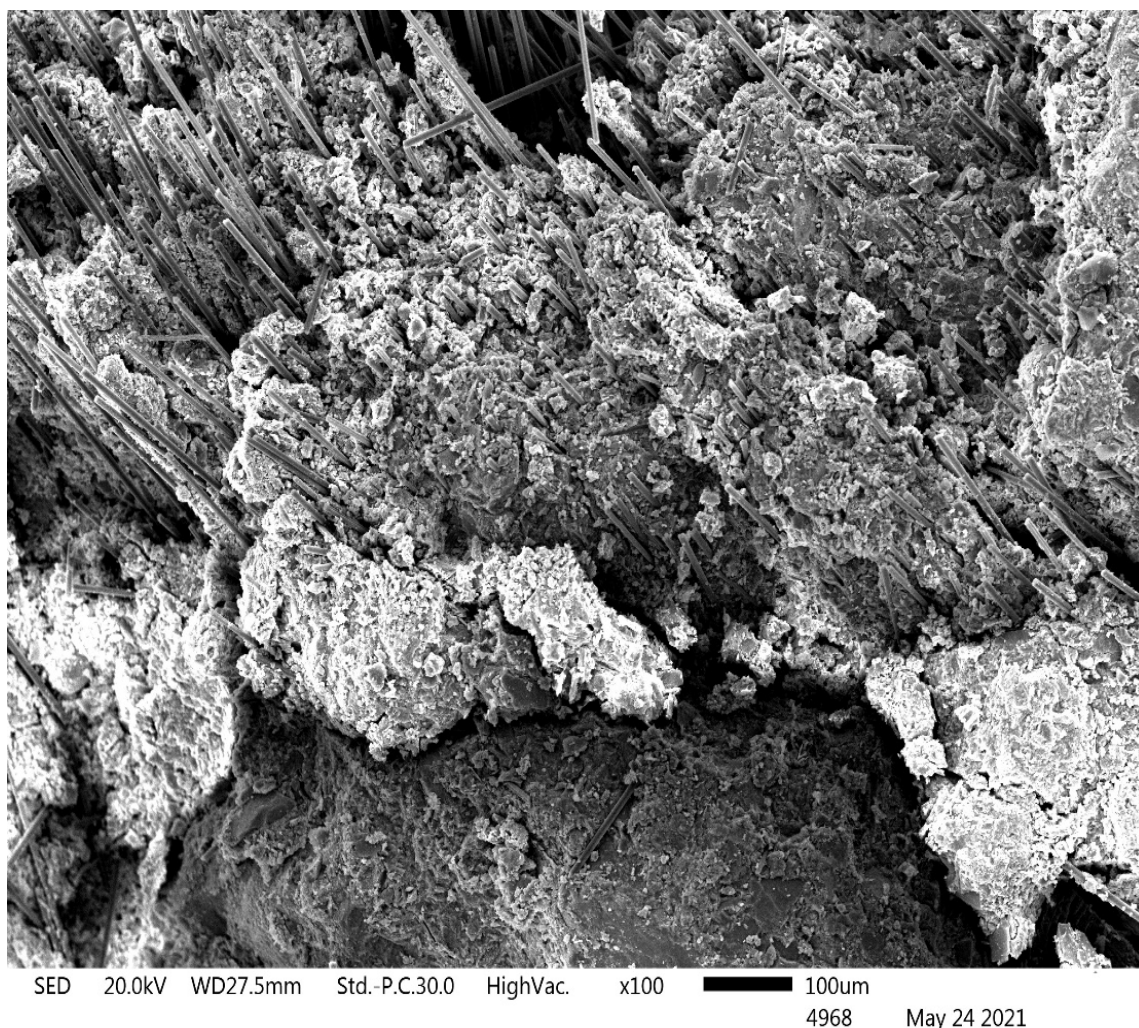


Figura 5.24 – Amostra da microestrutura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, após ataque ácido: Amostra 05 – ampliação de 100X.

A amostra 06 apresentada na figura 5.25 evidencia a degradação da matriz cimentícia, assim como foi observado para o concreto de referência anteriormente. É notória a formação de fissuras em torno das fibras, o que pode acelerar a entrada de agentes agressivos, degradando ainda mais rapidamente o concreto após sofrer ação de esforços mecânicos. Apesar disto, as fibras se romperam próximo a superfície da matriz cimentícia comprovando que continuam desempenhando função e garantem a resistência estrutural ao concreto com adição, conforme observado nos ensaios de resistência à compressão após o ataque ácido.



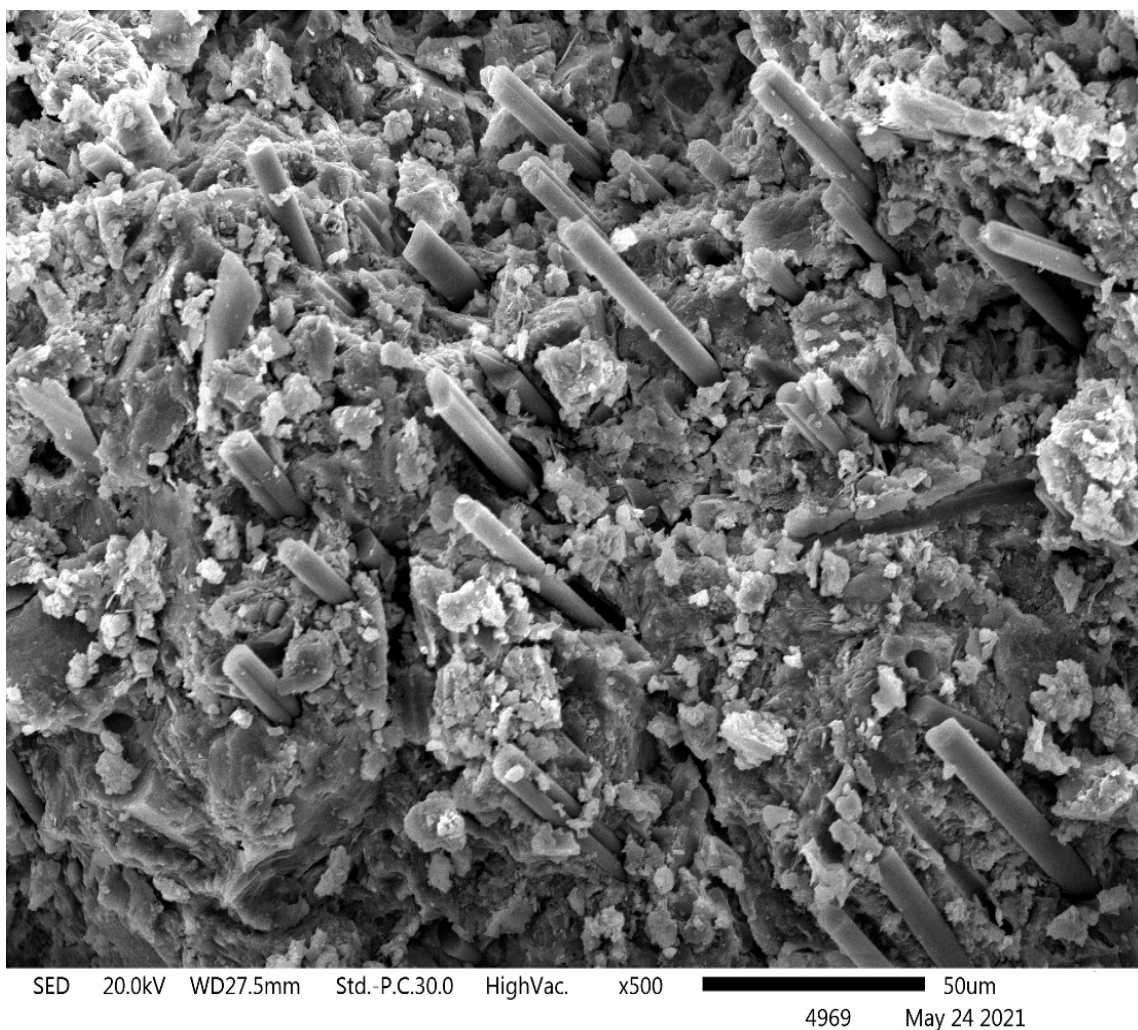


Figura 5.25 – Amostra da microestrutura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, após ataque ácido: Amostra 06 – ampliação de 500X.

As imagens de MEV mostradas na figura 5.26, obtidas de uma amostra de concreto com adição de 2% de fibra de carbono antes do ataque, indicam que as fibras de carbono formaram sistemas densos de microfissuras que se ramificaram em redes, dissipando energia e evitando a formação de grandes fissuras na zona de transição (figura 5.20 e figura 5.21) observadas no concreto de referência convencional após ruptura por compressão e antes do ataque ácido. Pode ser visto na amostra 7 que a zona de transição permanece intacta e a ligação matriz-agregado está intacta.

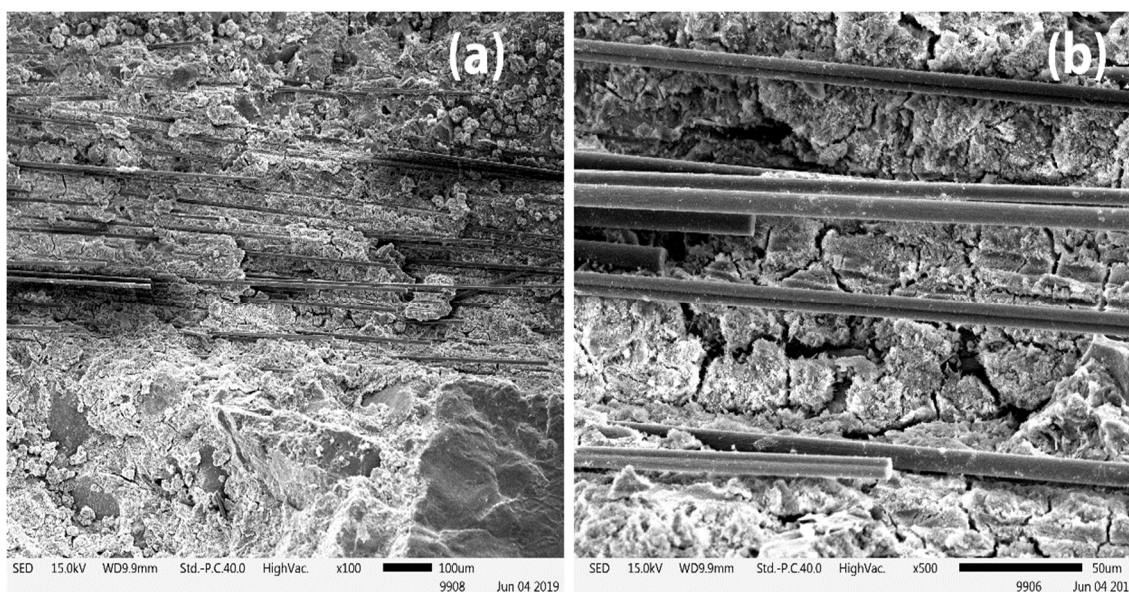


Figura 5.26 – Microfissuração do concreto com adição de 2% de fibras de carbono após a ruptura por compressão, antes do ataque ácido: Amostra 07 – (a) ampliação de 100X; (b) ampliação de 500X.

É possível observar que a zona de transição permanece sem trincas e a ligação matriz-agregado está intacta. As fibras de carbono suportam os esforços promovidos pelas fissuras e reduzem sua propagação, o que melhora a resistência mecânica tanto à compressão quanto à tração, além disso, a fibra também contribui para a redução da exsudação na zona de transição. Essa transferência de tensões dentro da microestrutura do concreto leva a uma diminuição na velocidade de propagação de fissuras, promovendo a formação de microfissuras (BETTERMAN et al., 1995; FIGUEIREDO, 2011). Os sistemas de microfissuras densas previnem várias patologias causadas por agentes agressivos externos. Portanto, são importantes porque as grandes fissuras podem danificar uma estrutura de concreto e diminuir a resistência mecânica, reduzindo drasticamente a durabilidade e a vida útil das estruturas. Esse comportamento é diferente de outros tipos de fibras que, em geral, não melhoram a resistência mecânica do concreto (HUANG et al., 2017; NEVILLE E BROOKS, 2013).

A figura 5.27 apresenta uma imagem de MEV da interação entre a matriz de cimento e as fibras de carbono após a ruptura do concreto com adição de 2% de fibras de carbono antes do ataque ácido, na qual se verifica que a fibra está bem aderida. Além disso, mesmo após a mistura do concreto e ruptura por compressão dos corpos de prova, as de fibras de carbono adicionadas à mistura permanecem com sua estrutura física

inalterada, conforme observado por RANGELOV e NASSIRI (2016). Outro dado importante é que as fibras permaneceram intactas após a ruptura do concreto, indicando que resistiram e não romperam, embora na verdade tenham perdido parcialmente a adesão com a matriz de cimento, o que comprova que as fibras auxiliam no comportamento estrutural até o exato momento do rompimento da estrutura. Essas descobertas revelam uma provável melhora perceptível no desempenho das estruturas de concreto até mesmo em relação ao fenômeno de fluência.

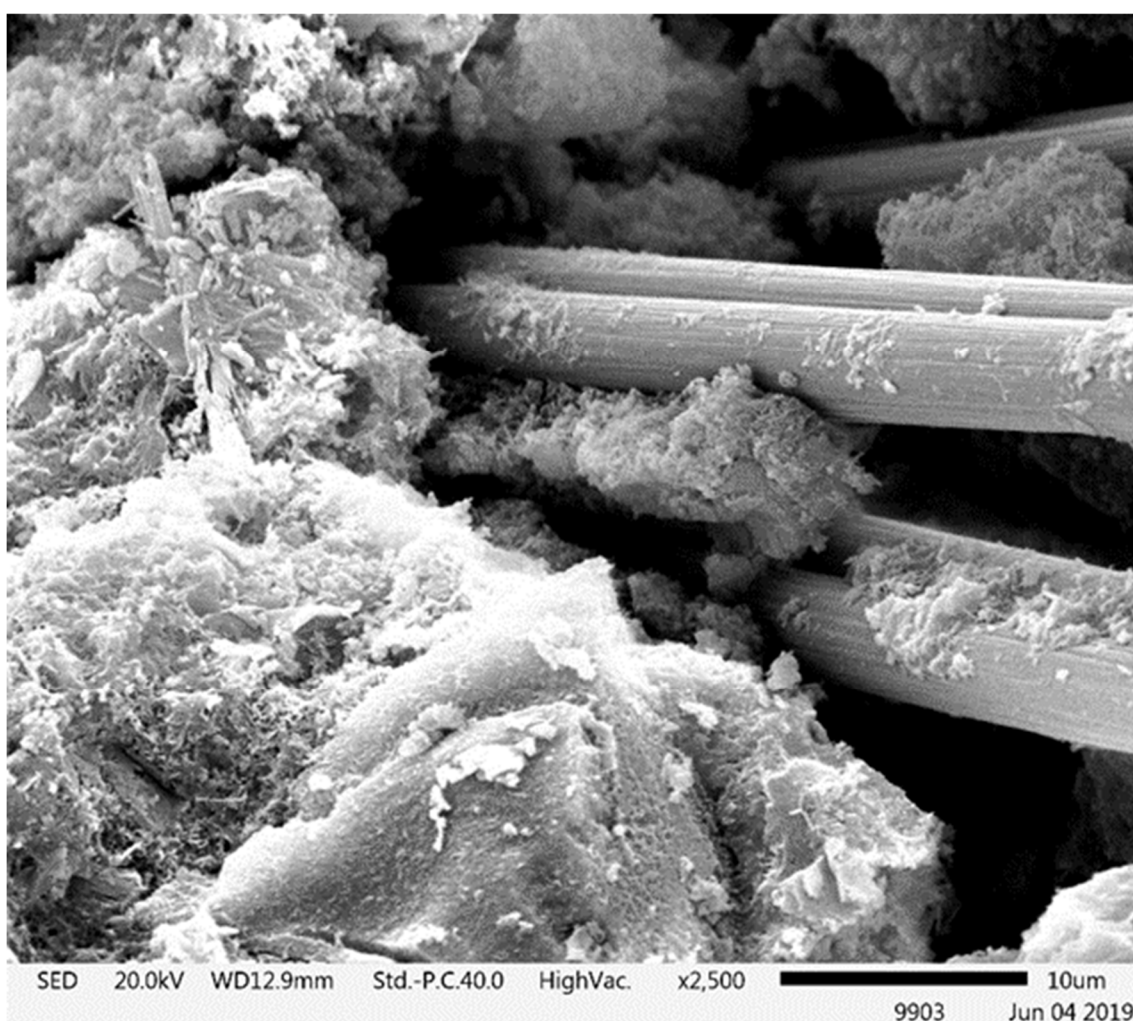


Figura 5.27 – Interação entre matriz cimentícia e as fibras de carbono no concreto com adição de 2% de fibras de carbono após a ruptura por compressão, antes do ataque ácido: Amostra 08 – ampliação de 2500X.

Analisando a imagem 5.28 de uma amostra de concreto com adição de 2% de fibras de carbono após ruptura por compressão, depois de sofrer ataques ácido, pode-se concluir que assim como esperado, as fibras de carbono permanecem aderidas com a matriz cimentícia e a sua superfície permanece intacta mesmo após sofrer um processo químico de ataque ácido e um processo mecânico de ruptura. Esta discussão justifica o fato de as fibras melhorarem as propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição quando comparado ao concreto convencional de referência, tanto antes quanto depois do ataque por ácido clorídrico.

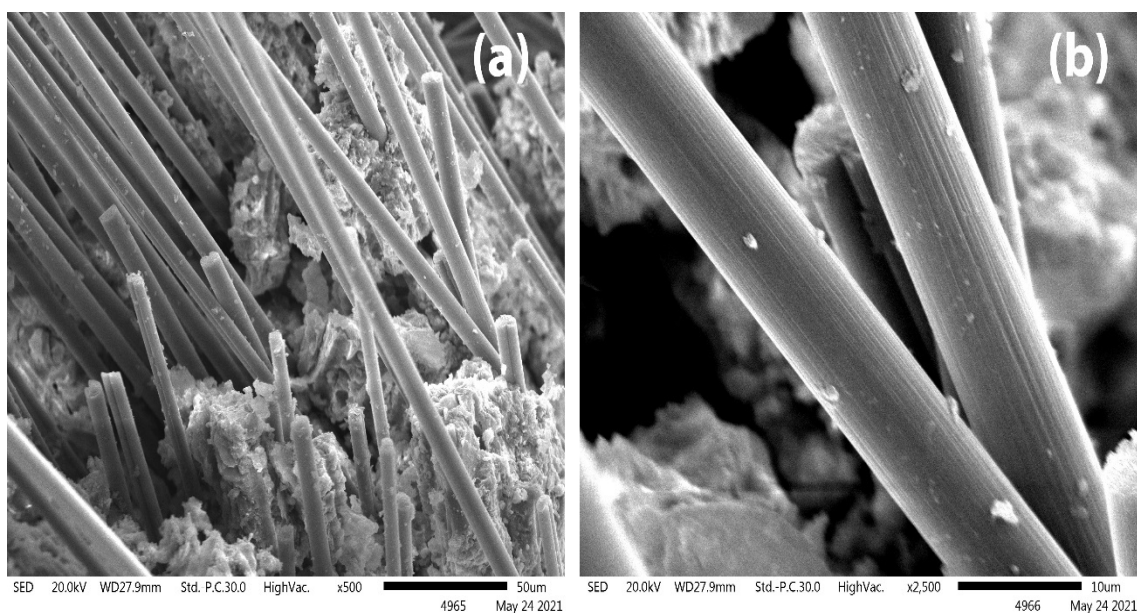


Figura 5.28 – Interação entre matriz cimentícia e as fibras de carbono no concreto com adição 2% de fibras de carbono após a ruptura por compressão, depois do ataque ácido:  
Amostra 09 – (a) ampliação de 500X; (b) ampliação de 2500X.

## **CAPÍTULO 6: Conclusões**

### **6.1 Conclusões gerais**

Esta pesquisa indica que a adição de 2% de fibras de carbono é benéfica para as propriedades mecânicas e para a durabilidade do concreto.

O ensaio de consistência apresentou diminuição da trabalhabilidade do concreto com adição de fibras de carbono. Portanto, é necessário o uso de aditivo com propriedades plastificantes mais acentuadas para compensar essa redução da trabalhabilidade causada pelas fibras de carbono e garantindo assim a durabilidade das estruturas de concreto moldadas com este compósito.

Os resultados de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade mostraram que a adição de 2% fibra de carbono tem efeito significativo na melhoria do desempenho mecânico do concreto, o que proporcionou resultados que garantem maior vida útil das estruturas produzidas com este compósito quando submetidas a ambientes potencialmente agressivos, dificultando a entrada de agentes agressivos externos.

A análise microestrutural das seções superficiais do concreto após ruptura por compressão, antes do ataque ácido mostra que as fibras de carbono têm influência significativa no mecanismo de fissuração do concreto, restringindo a formação de grandes fissuras a partir das microfissuras e mantendo a zona de transição do agregado graúdo aderido à matriz.

A análise dos resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios revelou que o concreto com adição de fibras de carbono tem, em geral, boas propriedades que conferem maior resistência a ambientes agressivos. O concreto convencional apresentou resultados inferiores, o que proporciona uma resistência menor a agentes agressivos externos.

A incorporação de fibras de carbono promoveu menores perdas de massa, mantendo uma boa aparência dos corpos de prova, observada através do ensaio de inspeção visual. O intertravamento das fibras e o controle de fissuração interna, podem justificar o melhor desempenho em relação ao concreto convencional.

Em geral, os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade foram melhores nos concretos com adição de 2% de fibra de carbono do que no concreto convencional que comprovadamente apresentou menor durabilidade em praticamente todos os ensaios realizados.

Vale ressaltar que esta pesquisa também promove uma possível maneira de reciclagem das fibras de carbono, que têm maior demanda e geram mais resíduos a cada dia. A adição destes resíduos no concreto é um processo de baixo custo e este compósito poderia absorver grandes quantidades de resíduos de fibra de carbono em todo o mundo.

O trabalho permitiu concluir que a adição de fibras de carbono no concreto é positiva, proporcionando aumento evidente na resistência à compressão do concreto, controle e redução da fissuração na matriz cimentícia da zona de transição e melhorando o desempenho do concreto em relação a ataques ácidos externos. Além disso, este compósito proporciona às estruturas de concreto uma vida útil mais longa, reduzindo a manutenção e aumentando a durabilidade das estruturas de edificações submetidas a ambientes agressivos, promovendo assim a sustentabilidade no setor da construção através do desenvolvimento de novos materiais mais duráveis.

## 6.2 Contribuições originais

A adição de 2% fibras de carbono descontínuas e dispersas no concreto em relação a massa de cimento do traço promoveu ganho de propriedades físicas e mecânicas. A partir dos resultados foi possível realizar uma análise microestrutural através de imagens de MEV, comprovando que as fibras de carbono têm influência significativa no mecanismo de fissuração do concreto, restringindo a formação de grandes fissuras a partir das microfissuras, e mantendo a zona de transição do agregado graúdo aderido à matriz.

A presença das fibras no concreto reduziu o potencial do ataque ácido por cloretos garantindo melhor desempenho quando comparado ao concreto convencional. O concreto com adição de fibras de carbono apresentou melhores resultados no ensaio de absorção de água e índice de vazios, em geral, propriedades que conferem maior resistência a ambientes agressivos.

A incorporação de fibras de carbono aumentou a durabilidade do concreto quando submetido a ataques ácidos, obtendo variações menores de perdas de massa, mantendo uma boa aparência dos corpos de prova, observada através do ensaio de inspeção visual.

O estudo pode ser visto como uma proposta viável para reciclagem dos resíduos das fibras de carbono através da adição deste material no concreto. Promovendo a sustentabilidade pela destinação correta dos resíduos e também por aumentar a vida útil das estruturas de concreto.

### 6.3 Sugestões de trabalhos futuros

Os resultados obtidos através desta Tese podem ser consideravelmente ampliados através da abordagem de outros aspectos e a realização de novos estudos. Ampliando assim, o conhecimento sobre o concreto com adição de fibras de carbono.

A seguir estão sugestões de trabalhos futuros:

- Avaliar a influência de aditivos hiperplastificantes nas propriedades mecânicas e da durabilidade para o traço do concreto proposto neste trabalho;
- Avaliar a durabilidade do concreto proposto utilizando proteções superficiais;
- Propor novas dosagens para avaliar a influência das fibras de carbono nas propriedades do concreto;
- Analisar o efeito da adição de fibras de carbono descontínuas com variação do comprimento;
- Estudar o desempenho do concreto com adição de fibras de carbono, submetido a outros tipos de ataque ácido;
- Analisar a resistência do compósito ao fogo, através de ensaios previstos na norma de desempenho.



## Referências Bibliográficas

ABREU F. S. Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 71p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

ABREU F. S., RIBEIRO C. C., PINTO J. D. S., NSUMBU, T. M., BUONO V. T. L., Influence of adding discontinuous and dispersed carbon fiber waste on concrete performance. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.273, n.122920, 10p. Jul. 2020a.

ABREU F. S., RIBEIRO C., C., PINTO J., D., S., OLIVEIRA D., M., RIBEIRO S., E., C., FIGUEIREDO E., J., P., Análise da eficiência da tinta de base epóxídica na proteção do concreto leve com argila expandida contra o ataque por ácido sulfúrico, *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, 11p. fev. 2020b.

AFROUGHSABE V., BIOLZI L., OZBAKKALOGLU T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*, New York, v.25, n.1 p. 6517- 6551, mar., 2016.

ALI B., QURESHI L. A., Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, Washington, v.228, n.1, n. 116783, dez. 2019.

ALSAIF A., BERNAL S. A., GUADAGNINI M., PILAKOUTAS K., Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, Washington, v.188, n.1, p. 130-142, nov. 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Farmington Hills. ACI- 222R-01: Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, Farmington Hills, 2010, 41p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Farmington Hills. ACI-201.2R: Guide to Durable Concrete, Farmington Hills, 2016, 84p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Farmington Hills. ACI-318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete, Farmington Hills, 2011, 503p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken. ASTM C1152 / C1152M-20: Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, West Conshohocken, 2020, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 11579: Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº 200) - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2013, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier, Rio de Janeiro, 2016, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 12655; Concreto – Preparo, controle e recebimento*. Rio de Janeiro, 2015, 23p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 15575; Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais, Rio de Janeiro, 2013, 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 16697; Cimento Portland – requisitos*. Rio de Janeiro, 2018, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 16889; Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 2020, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021, 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 16972: *Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro, 2021, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 16973: *Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 $\mu$ m por lavagem*. Rio de Janeiro, 2021, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 16974: *Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, 2021, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 5738; Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto*. Rio de Janeiro, 2016, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 5739; Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto, Rio de Janeiro, 2014, 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2019, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 7218; Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 7222; Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 8522; Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro, 2017, 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 8953; Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro, 2015, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR NM 49: *Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro, 2021, 3p.

BALBO J. T. Relação entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concreto secos e plásticos. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v.6, n.6, p. 854-874, dez. 2013.

BAO GUO H., LI QING Z., CHEN YU Z., YUN YANG W, XUN Y., Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, Washington, v.125, n.1, p. 479-489, out. 2016.

BASSUONI, M. T., AND NEHDI, M. L., Resistance of Self-Consolidating Concrete to Sulfuric Acid Attack with Consecutive pH Reduction. *Cement and Concrete Research*, Amsterdam, v.37, n. 7, p. 1070-1084, jul, 2007.

BATTAGIN, I. L. S. Módulo de Elasticidade do Concreto - Normalização, fatores de influência e interface com o pré-moldado. Concrete Show, 2008, São Paulo.

BENETTI, J. K. Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto. São Leopoldo: Universidade Vale do Rio dos Sinos, 2012. 85p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

BENTUR A., MINDESS S. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2 ed. New York: Taylor & Francis, 2007. 624p.

BETTERMAN L.R., OUYANG C, SHAH S.P. Fiber-matrix interaction in microfiber reinforced matrix. *Advanced Cement Based Materials*, Minneapolis, v.2, n.2, p. 52–61, jul. 1995.

BEUSHAUSEN H., TORRENT R., ALEXANDER M. G., Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. *Cement and Concrete Research*, Amsterdam, v.119, n. 1, p. 11-20, mai, 2019.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN B. F., HELENE, P. R. L., Patologia de estruturas. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 309p.

BRANDT M. ADRZEJ. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, Amsterdam, v.86, n.1-3, p. 3-9, mar. 2008.

CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G.; SOARES, S.S. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817p.

CHAN R., SANTANA M. A, ODA A. M., PANIGUEL R. C., VIEIRA L. B., FIGUEIREDO A. D., GALOBARDES L., Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.218, p. 183-191, mai, 2019.

CHEEWAKET T., JATURAPITAKKUL C., CHALEE W., Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine site. *Materials and Structures*, New York, v.47, n. 1, p. 1501-1511, jun, 2013.

DIEB A.S., TAHA M. M. REDA, Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Construction and Building Materials*, Washington, v.27, n.1, p. 585-596, fev. 2012.

EUROPEAN STANDARDS, Pilsen. EN-206: Concrete: Specification, Performance, Production and Conformity, Pilsen, 2013, 108p.

FIGUEIREDO A.D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G.C. *Concreto: ciência e tecnologia*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2 v., Cap.37, p.1327-1365.

FRIGIONE M., LETTIERI M., Durability Issues and Challenges for Material Advancements in FRP Employed in the Construction Industry. *Polymers*, Basel, v.247, n.1, p. 1-15, fev. 2018.

GAMBHIR, M. L. *Concrete Technology*. 3 ed., Nova Délhi: Tata McGraw-Hill Education, 2006. 658p.

GIROTTO L. S., BARBOSA G.F., MACIEL G. F., Rheological behavior study of plastic shrinkage and cracking of self-compacting concrete mortars. *IBRACON Structure na Materials*, São Paulo, v.7, n.1, p. 24-52, fev, 2014.

GRAÇA, R.J.R, RODRIGUES, J.A, LOJA, M.A.R. JORGE, P.M., Multiscale stress analysis in CFRC using microscope image data of carbon fibres. *Composite Structures*, Washington, v.176, n.1, p. 471-480, set. 2017.

GRZYMSKI F., MUSIAL M., TRAPKO T., Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibres. *Construction and Building Materials*, Washington, v.198, n.1, p. 323331, fev. 2019.

GUPTA T., CHAUDHARY S., SHARMA R. K., Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.112, p. 702-711, jan, 2016.

HALVAEI M., JAMSHIDI M., LATIFI M., EJTEMAEI M., Effects of volume fraction and length of carbon short fibers on flexural properties of carbon textile reinforced engineered cementitious composites (ECCs); an experimental and computational study. *Construction and Building Materials*, Washington, v.245, n.118394, jun. 2020.

HELENE, P. R. L., Manual para Reparo Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto. 2 ed. São Paulo: Pini, 2002. 213p.

HOSSAIN M. Z., AWAL A.S.M.A., Flexural response of hybrid carbon fiber thin cement composites. *Construction and Building Materials*, Washington, v.25, n.1, p. 670-677, fev. 2011.

HUANG, L., CHEN, L., YAN, L., KASAL, B., JIANG, Y., LIU, C., Behavior of polyester FRP tube encased recycled aggregate concrete with recycled clay brick aggregate: Size and slenderness ratio effects. *Construction and Building Materials*, Washington, v.154, n.1, p. 123-136, nov. 2017.

ISAIA, G.C. *Concreto: ciência e tecnologia*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1902p.

KHALIL Y. F., Comparative environmental and human health evaluations of thermolysis and solvolysis recycling technologies of carbon fiber reinforced polymer waste. *Journal of Waste Management*, Washington, v.76, n.1, p. 767-778, jun. 2018.

KIM Y. J., JI Y., Axial Load-Bearing Concrete Confined with Carbon Fiber- Reinforced Polymer Sheets in Acidic Environment. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v.114, n. 3, p. 775-786, mai, 2017.

LI H., ENGLUND K., Recycling of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite wastes from the aerospace industry. *Journal of Composite Materials*, Los Angeles, v.51, p. 1265-1273, set, 2017.

LIMA M.M., DOH J.H., HADI M. N. S., MILERD. The effects of CFRP orientation on the strengthening of reinforced. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, New Jersey, v.25, n.1 p. 759-784, abr. 2016.

LOPEZ V.O., ALONSO F. A. F., SANTAMARÍA, A., SAN-JOSÉ, J. T., ARAGÓN, A., Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Construction and Building Materials*, Washington, v.163, n.1, p. 471-481, fev. 2019.

MACHADO, A. P., *Fibras de carbono – manual prático de dimensionamento*. 1 ed., Belo Horizonte: Editora BASF, 2006. 412p.

MC-BAUCHEMIE, Linha de produtos. Manual técnico. 1ª edição, 188p., 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, 2 ed. São Paulo: Editora IBRACON, 2014. 782p.

MENG F., MCKECHNIE J., TURNER T. A., PICKERING S. J., Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Amsterdam, v.100, p. 206-214, set, 2017.

MO K. H., CHIN T. S., ALENGARAM U. J., JUMAAT M. Z., Material and structural properties of waste-oil palm shell concrete incorporating ground granulated blast-furnace slag reinforced with low-volume steel fibres. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.133, p. 414-426, out, 2016.

NEVILLE, A.M. *Propriedades do concreto*. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. *Tecnologia do concreto*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

NIE W., LIU J., LIU W., WANG J., TANG T., Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*, Amsterdam, v.111, n. 1, p. 247-256, jan, 2015.

OZSIN G., PUTIN A. E., NAKABAYASHI K., MIYAWAKI J., Environmental-friendly production of carbon fiber from isotropic hybrid pitches synthesized from waste biomass and polystyrene with ethylene bottom oil. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.239, n. 118394, dez, 2020.

PAKRAVAN H. R., LATIFI M., JAMSHIDI, M., Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Washington, v.142, n.1, p. 280-294, jul. 2017.

PEREIRA C., H., A., F., FIGUEIREDO E., J., P., BAUER E., Avaliação da influência da adição de fibras sintéticas ao concreto quanto ao ingresso de íons cloreto. *VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, Santa Vitória do Palmar, v.15, n.2, p. 7-17, dez. 2005.

PETRUCCI; E. G. R; Concreto de Cimento Portland. 7 ed. GLOBO,1980. 1 v. 307 p.

RANGELOV M., NASSIRI S., HASELBACH L., ENGLUND K., Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Construction and Building Materials*, Washington, v.126, n.1, p. 875-885, out. 2016.

RIBEIRO V., D. (Coord), Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 370p.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. S., STARLING, T. *Materiais de Construção Civil*. 4 ed. rev., Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015. 112p.

SADRINEJAD I., MADANDOUST R., RANJBAR M. M., The mechanical and durability properties of concrete containing hybrid synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, Washington, v.178, n.1, p. 72-82, jul. 2018.

SAFIUDDIN M., YAKHLAF M., SOUDKI K. A., Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, Washington, v.164, n.1, p. 477-488, mar. 2018.

SAUER, M., Composites Market Report 2019- Market developments, Trends, outlook and challenges. 1 ed. Berlin: Carbon Composites, 2019. 11p.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T., Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. 1 ed. São Paulo: Pini, 2009. 255p.

TEIXEIRA, E. C. Estudo da zona de transição de concretos preparados com metacaulim através de análise nanomecânica. João Pessoa: Centro de Tecnologia da UFPB, 2020. 154p. (Tese, Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais).

THOMAS B. S., GUPTA R. C., PANICKER, V. J., Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 112, p. 504-513, jan, 2016.

TORRENTI, J., M., CABOT, G., P., REYNOUARD, J., M., Mechanic Behavior Concrete 1 ed. Hoboken: Wiley, 2010. 419p.

VINCENT T., OZBAKKALOGLU T., Influence of fibre orientation and specimen end condition on axial compressive behavior of FRP confined concrete. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.47, p. 814-826, out, 2013.

WANG Y., ZHANG, S., LI, G., SHI, X., Effects of alkali-treated recycled carbon fiber on the strength and free drying shrinkage of cementitious mortar. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.228, p. 1187-1195, ago, 2019.

YU R., SONG Q., WANG X., ZHANG Z., SHUI Z., BROUWERS H.J.H., Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.162, p. 220-233, set, 2017.

ZHANG J., CHENG J., DOU Y., XIN., Q., Mechanical Properties and Durability of Fiber-reinforced Concrete. *Engineering Science and Technology Review*, Kavala, v.10, n.1, p. 68-75, out. 2017.