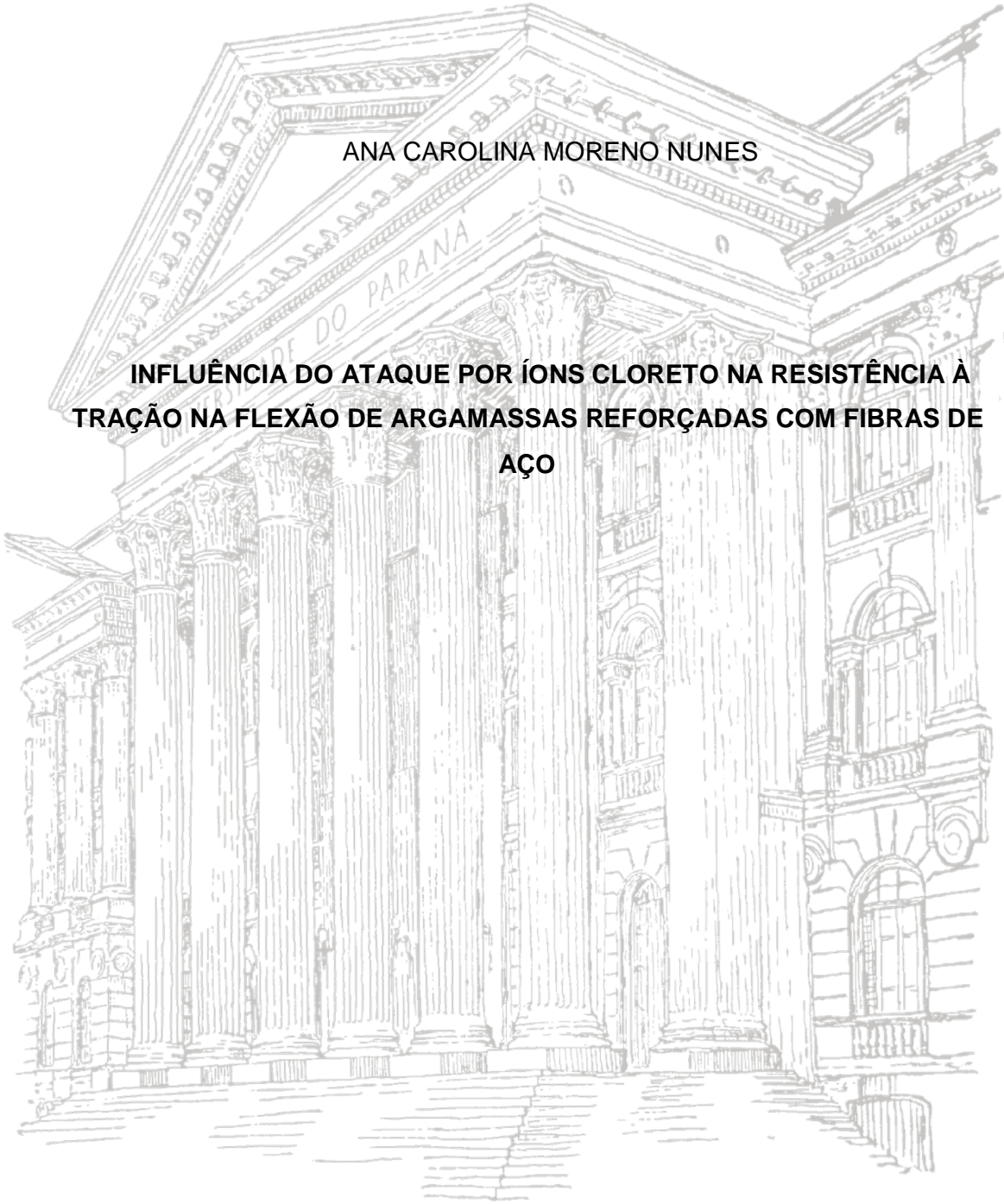


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA CAROLINA MORENO NUNES

**INFLUÊNCIA DO ATAQUE POR ÍONS CLORETO NA RESISTÊNCIA À  
TRAÇÃO NA FLEXÃO DE ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE  
AÇO**



CURITIBA

2018

ANA CAROLINA MORENO NUNES

**INFLUÊNCIA DO ATAQUE POR ÍONS CLORETO NA RESISTÊNCIA À  
TRAÇÃO NA FLEXÃO DE ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE  
AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Pieralisi  
Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Mariana d'Orey  
Gaivão Portella Bragança

CURITIBA

2018

*Aos meus pais Ana Maria e Francisco e aos meus irmãos Anderson, Bruno e Breno pelo empenho e dedicação em me ensinar o caminho certo e, pelo auxílio em todos os momentos até aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, digno de toda a honra, por me iluminar em todos os momentos e me capacitar em cada desafio ao longo do caminho.

À minha família pelo incentivo em nunca desistir dos meus sonhos e me apoiar em todos os desafios enfrentados.

Ao professor Dr. Ricardo Pieralisi por acreditar em meu trabalho e estar sempre à disposição para auxiliar no que fosse preciso. Agradeço pelos conhecimentos transmitidos e paciência demonstrada ao longo do desenvolvimento deste estudo.

À professora Dra. Mariana Bragança pelas contribuições técnico-científicas transmitidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela paciência e incentivo sempre demonstrados.

À professora Dra. Amanda Jarek pela prontidão em ajudar em todos os momentos, independente do problema. Agradeço imensamente por tudo até aqui.

Aos colegas de laboratório Tassiane Apolinário de Oliveira e Igor Miguel Pinkoski por todo auxílio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico de laboratório Ricardo Volert pelo auxílio na realização do ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos de prova.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) do Lactec, pelo auxílio na fabricação dos corpos de prova e no manuseio da câmara de intemperismo artificial.

Ao Lactec e à Universidade Federal do Paraná – UFPR, principalmente ao Departamento de Construção Civil – DCC, pelo auxílio e cessão dos laboratórios.

Às Centrais Elétricas do Pará – CELPA e à Companhia Energética do Maranhão – CEMAR pelo financiamento via projeto P&D 00371-0023/2016, que

viabilizou a publicação de parte deste estudo no 60º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC.

À Cimentos Itambé pelo fornecimento do cimento utilizado nesta pesquisa.

À Arcelor Mittal Brasil pelo fornecimento das fibras de aço utilizadas neste estudo.

*“Pois o Senhor é quem dá sabedoria, de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento.” (Provérbios 2:6).*

## RESUMO

O uso de fibras de aço como reforço em compósitos cimentícios tem sido crescente em diversos países. Nas últimas décadas, a necessidade de agilidade dos processos construtivos aliada às altas resistências de projeto exigidas em grandes obras, fortaleceram e potencializaram a utilização do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA). O uso disseminado do material culmina no seu emprego em variados locais, inclusive em ambientes de elevada agressividade ambiental, como regiões litorâneas. Entretanto, a cinética de corrosão das fibras quando expostas à ação de íons  $\text{Cl}^-$  ainda é altamente discutida no meio científico, uma vez que difere do processo de corrosão já conhecido em barras de aço de reforço convencional. Dessa forma, a avaliação da influência do ataque por cloretos na resistência à tração da flexão de compósitos cimentícios é uma das partes necessárias para o entendimento completo do processo de degradação das fibras de aço. Nesse sentido, esse estudo foi desenvolvido por meio de campanha experimental, na qual foram fabricados corpos de prova prismáticos com dimensões de (40x40x160) mm, moldados com Argamassa Reforçada com Fibras de Aço (ARFA). Para verificação da influência da abertura de fissura na resistência à tração na flexão, foram determinados três pontos de interesse: sem fissura, abertura de primeira fissura e fissura de carga máxima. Posteriormente, foram estabelecidas idades de exposição em câmara de névoa salina para amostras pertencentes a cada um dos pontos de interesse. As idades estipuladas foram: 28, 56, 112 e 224 dias de exposição. A câmara de névoa salina foi utilizada com o intuito de simular a exposição do material em ambientes de severa agressividade ambiental. De modo a relacionar o aparecimento de manchas de corrosão com a abertura de fissuras, foi realizado o acompanhamento fotográfico da evolução do processo de degradação para os três pontos de interesse, nas idades estipuladas. Além disso, a fim de caracterizar o início da formação dos produtos de corrosão, foi feita análise por meio de lupa eletrônica da formação de óxidos nas primeiras idades. Os resultados obtidos indicaram a possível existência de duas etapas que caracterizam o processo de corrosão das fibras de aço. Entretanto, para as idades estipuladas, as análises desse estudo permitiram apenas a verificação da primeira etapa, na qual se observou o incremento da resistência pós-pico até os 56 ciclos de exposição, devido ao aumento da rugosidade proporcionado pela deposição de produtos de corrosão no entorno das fibras. A partir do 112º ciclo, houve a saturação da camada resistente proporcionada pela deposição de óxidos e, conseqüente redução na resistência pós-pico das amostras. Os resultados também demonstraram que a degradação de compósitos reforçados com fibras de aço, quando se tem uma matriz densa, está relacionada à abertura de fissuras e não somente ao período de exposição em ambiente agressivo. Além disso, observou-se que o aparecimento de manchas de corrosão na superfície do compósito está relacionado ao cobrimento das fibras de aço no interior da matriz cimentícia.

**Palavras-chave:** Argamassa reforçada, fibra de aço, ataque por cloretos, resistência à flexão.

## ABSTRACT

The use of steel fibers as reinforcement in cementitious composites has been increasing in several countries. In the last decades, the need for agility of the construction processes coupled with the high design resistance required in large works, have strengthened and potentiated the use of Steel Fibers Reinforced Concrete (CRFA). The widespread use of the material culminates in its use in various locations, including environments with high environmental aggressiveness, such as coastal regions. However, the corrosion kinetics of the fibers when exposed to the action of Cl<sup>-</sup> ions is still highly discussed in the scientific environment, as it differs from the corrosion process already known in conventional reinforcing steel bars. Thus, the evaluation of the influence of chloride attack on the flexural tensile strength of cementitious composites is one of the necessary parts for the complete understanding of the degradation process of the steel fibers. In this sense, this study was carried out by means of an experimental campaign, in which mortar samples with dimensions of (40x40x160) mm, molded with Reinforced Mortar with Steel Fibers (ARFA) were manufactured. To verify the influence of the crack opening on the flexural tensile strength three points of interest were determined: without crack, first crack opening and maximum load crack. Subsequently, exposure ages were established in saline fog chamber for samples belonging to each of the points of interest. The stipulated ages were: 28, 56, 112 and 224 exposure days. The saline mist chamber was used to simulate the exposure of the material in environments of severe environmental aggression. In order to relate the appearance of corrosion spots with the opening of cracks, photographic monitoring of the evolution of the degradation process was carried out for the three points of interest, at the stipulated ages. In addition, in order to characterize the beginning of the formation of the corrosion products, an electronic magnifying glass was analyzed for the formation of oxides in the early ages. The results indicate the possible existence of two stages that characterize the corrosion process of the steel fibers. However, for the stipulated ages, the analyzes of this study allowed only the verification of the first step. For the complete characterization of the fiber corrosion kinetics, more exposure cycles would be required. However, the results allowed to verify the increase of the post-peak resistance up to 56 exposure cycles, due to the increased roughness provided by the deposition of corrosion products around the fibers. From the 112th cycle, there was saturation of the resistant layer provided by the deposition of oxides and, consequently, reduction in the post-peak resistance of the samples. The results also showed that the degradation of composites reinforced with steel fibers, when having a dense matrix, is related to the crack opening and not only to the period of exposure in an aggressive environment. In addition, it has been observed that the appearance of corrosion spots on the surface of the composite is related to the covering of the steel fibers inside the cementitious matrix.

**Keywords:** Reinforced mortar, steel fiber, chloride attack, flexural strength.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- COBERTURA EM CONCRETO ARMADO E REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.....	19
FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO SEGUNDO ABNT NBR 15530 (2007).....	23
FIGURA 3 - FIBRAS DE AÇO COMO PONTE DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES NO CONCRETO FISSURADO.....	24
FIGURA 4 - COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.....	32
FIGURA 5 - CORROSÃO POR PITES EM FIBRA DE AÇO, EM FOTO AMPLIADA COM LUPA ELETRÔNICA.....	43
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	46
FIGURA 7 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	50
FIGURA 8 – (a) FIBRA DE AÇO TIPO DRAMIX 3D 45/30 BL; (b) SEÇÃO TRANSVERSAL DA FIBRA EM ANÁLISE POR MEV.....	51
FIGURA 9 - CP DE ARGAMASSA COM FIBRAS APÓS CICLOS DE EXPOSIÇÃO.....	57
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DAS CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA A DOSAGEM DA CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL.....	58
FIGURA 11 - PONTOS DE INTERESSE DA CURVA DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO COMPÓSITO.....	59
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DA DIVISÃO DOS CORPOS DE PROVA DA CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL EM CÂMARA DE INTEMPERISMO ARTIFICIAL E CÂMARA ÚMIDA.....	62
FIGURA 13 - LAJE ARMADA COM FIBRAS DE AÇO.....	63
FIGURA 14 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA SEM FISSURA.....	66
FIGURA 15 - ANÁLISE UNITÁRIA DA RESISTÊNCIA PÓS-PICO DOS CORPOS DE PROVA DE SEM FISSURA.....	66
FIGURA 16 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À ABERTURA DE 1ª FISSURA.....	67

FIGURA 17 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS PICO PARA OS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À ABERTURA DE 1ª FISSURA. ....	68
FIGURA 18 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA. ....	69
FIGURA 19 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS-PICO PARA OS CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA. ....	69
FIGURA 20 - EXPOSIÇÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS EM CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE 1ª FISSURA. ....	71
FIGURA 21 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS PICO PARA OS CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE 1ª FISSURA EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS. ....	71
FIGURA 22 - EXPOSIÇÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS EM CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA. ....	72
FIGURA 23 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS-PICO PARA OS CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS. ....	72
FIGURA 24 - CURVAS DE EXPOSIÇÃO AOS 28 DIAS PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE. ....	73
FIGURA 25 - GRÁFICO UNITÁRIO DO RAMO PÓS PICO PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE, AOS 28 DIAS DE EXPOSIÇÃO. ....	74
FIGURA 26 - CURVAS DE EXPOSIÇÃO AOS 56 DIAS PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE. ....	74
FIGURA 27 - GRÁFICO UNITÁRIO DO RAMO PÓS PICO PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE, AOS 56 DIAS DE EXPOSIÇÃO. ....	75
FIGURA 28 - CURVAS DE EXPOSIÇÃO AOS 112 DIAS PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE. ....	75
FIGURA 29 - GRÁFICO UNITÁRIO DO RAMO PÓS PICO PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE, AOS 112 DIAS DE EXPOSIÇÃO. ....	76
FIGURA 30 -CORPOS DE PROVA SEM FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 28 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 28 DIAS (d) .....	77
FIGURA 31 - CORPOS DE PROVA SEM FISSURA APÓS 112 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); FACE I APÓS A RUPTURA AOS 112 DIAS (b); FACE II APÓS	

A RUPTURA AOS 112 DIAS (c); FACE III APÓS A RUPTURA AOS 112 DIAS (d).....	77
FIGURA 32 - CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 28 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 28 DIAS (d). .....	78
FIGURA 33 - CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 56 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 56 DIAS (d). .....	79
FIGURA 34 - CP COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS A RUPTURA EM 112 CICLOS DE EXPOSIÇÃO. ....	79
FIGURA 35 - CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 224 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 224 DIAS (d). .....	80
FIGURA 36 - CORPO DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 DIAS (a); 16 DIAS (b) E 224 DIAS (c) DE EXPOSIÇÃO EM CÂMARA ÚMIDA E APÓS A RUPTURA COMPLETA (d).....	81
FIGURA 37 - CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 28 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 28 DIAS (d). ....	81
FIGURA 38 - CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 56 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 56 DIAS (d). ....	82
FIGURA 39 - CORPO DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS A RUPTURA AOS 112 CICLOS DE EXPOSIÇÃO.....	83
FIGURA 40 - CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 224 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 224 DIAS (d). ....	84
FIGURA 41 - CORPO DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 DIAS (a); 16 DIAS (b) E 224 DIAS (c) DE EXPOSIÇÃO EM CÂMARA ÚMIDA. ....	85
FIGURA 42 - (a) SEÇÃO TRANSVERSAL DA FIBRA DE AÇO CORROÍDA; (b) DEPOSIÇÃO DO PRODUTO DE CORROSÃO MATRIZ CIMENTÍCIA; (c) PRODUTO DE CORROSÃO DEPOSITADO NA ÁREA DO GANCHO DA FIBRA DE AÇO; (d) PERDA DE SEÇÃO RESISTENTE DA FIBRA DE AÇO. ....	86
FIGURA 43 - (a) DEPOSIÇÃO DE PRODUTO DE CORROSÃO NO GANCHO DA FIBRA; (b) PERDA DE SEÇÃO RESISTENTE NO GANCHO DA FIBRA; (c)	

PRODUTO DE CORROSÃO NA EXTREMIDADE DA FIBRA; (d) PERDA DE SEÇÃO RESISTENTE NA EXTREMIDADE DA FIBRA. .... 86

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP II F -32. ....	477
TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CP II F-32.....	488
TABELA 3 – RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO.....	499
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DAS FIBRAS DE AÇO DO TIPO DRAMIX® 3D 45/30BL. ....	51
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS NA DOSAGEM PRELIMINAR, DE ACORDO COM A RELAÇÃO A/C E TEOR DE FIBRAS. ....	555
TABELA 6 - RESUMO DAS CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE DOSAGEM DA CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL.....	599
TABELA 7 - DIVISÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ACORDO COM O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO. ....	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.1.1	Objetivos específicos.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA .....	19
1.3	PUBLICAÇÕES RESULTANTES.....	20
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
2.1	CONCRETO COM FIBRAS.....	21
2.1.1	Tipos de fibras de aço .....	252
2.1.2	Aplicações .....	285
2.1.3	Comportamento mecânico do material.....	298
2.1.4	Normas e recomendações para aplicação estrutural do CRFA.....	29
2.2	INTERAÇÃO FIBRAS X MATRIZ CIMENTÍCIA .....	30
2.2.1	Mecanismos de transferência de tensões .....	30
2.2.2	Comportamento pós-fissuração.....	32
2.3	CORROSÃO E USO COMBINADO DE FIBRAS E ARMADURA CONVENCIONAL.....	35
2.4	ATAQUE POR CLORETOS EM CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA).....	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	46
3.1.1.	Cimento .....	47
3.1.2.	Agregado miúdo .....	48
3.1.3.	Fibras de aço.....	50
3.1.4	Água.....	51
3.2	DOSAGEM PRELIMINAR .....	52
3.2.1	Procedimento .....	53
3.2.2	Resultados e Conclusões Preliminares .....	56
3.3	CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL.....	58
3.3.1	Exposição em câmara de intemperismo artificial.....	62
3.3.3	Área superficial de manchas de corrosão em diferentes idades .....	63
3.3.4	Verificação da formação de produtos de corrosão por método visual.....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	65
4.1	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	65
4.2	ÁREA SUPERFICIAL DE MANCHAS DE CORROSÃO.....	76

4.2.1	Corpos de prova sem fissura.....	76
4.2.2	Corpos de prova com abertura de primeira fissura.....	78
4.3.3	Corpos de prova com abertura de fissura de carga máxima .....	81
4.3	VERIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DE PRODUTOS DE CORROSÃO POR MÉTODO VISUAL .....	85
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>88</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE 1</b> .....	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE 2</b> .....	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A exposição do concreto a solicitações de tração evidencia sua baixa capacidade de deformação e o seu comportamento frágil. O reforço desse material com barras ou fibras de aço deu origem a compósitos que apresentam as características adequadas para resistir a tais carregamentos, preservando a vida útil da estrutura submetida a tais esforços (FIGUEIREDO, 2011).

O Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) foi desenvolvido como uma alternativa ao concreto armado, e constitui-se em um material no qual as fibras atuam sobre as tensões de tração, promovendo ductilidade para o elemento estrutural (NBR 15530, 2007). Os primeiros estudos sobre o uso de fibras de aço para a fabricação de CRFA datam da década de 1960. Desde então, pesquisas foram realizadas para entender com maior profundidade o comportamento e as propriedades mecânicas deste material (MANGAT & GURUSAMY, 1987; ABRISHAMI & MITCHELL, 1997 - a).

As fibras podem ser incorporadas à mistura juntamente com as demais partes constituintes do compósito, como agregados e cimento. Essa prática facilita a execução dos elementos estruturais, visto que atividades como montagem, amarração e instalação de barras de reforço são suprimidas pela presença das fibras (FIGUEIREDO, 2011).

Apesar do aumento progressivo na utilização de CRFA no mundo, o mercado brasileiro concentrou cerca de 74% do emprego de fibras em pavimentos industriais no primeiro semestre de 2010, levantamento mais recente realizado em nível nacional. Esse dado significa que a maior porção do uso de CRFA no Brasil é em estruturas com baixo grau de solicitação (FIGUEIREDO, 2011). Porém, existem outras aplicações nas quais o uso de fibras pode ser benéfico, como em concreto projetado para revestimento de túneis e em peças pré-fabricadas. Em regiões de instabilidade devido a ocorrência de abalos sísmicos frequentes, o CRFA torna-se igualmente aplicável, pois reduz a formação de trincas ou fissuras que possam comprometer a estabilidade estrutural da edificação. Isso porque o alto módulo de elasticidade das fibras de aço (210 GPa) incorporadas nas peças de concreto dificulta a propagação de fissuras pela matriz (FIGUEIREDO, 2011).



Entretanto, sabe-se que o aço é suscetível à corrosão quando exposto ao ataque de agentes agressivos, culminando na perda de seção resistente e conseqüentemente na diminuição da vida útil da edificação. No CRFA, por não ser possível garantir o cobrimento das fibras, questionamentos em relação à durabilidade e desempenho do material durante a vida útil da estrutura são levantados. Deste modo, propriedades como a cinética de corrosão das fibras dentro da matriz cimentícia e a perda de resistência do compósito devido ao ataque de agentes agressivos são aspectos importantes e necessitam ser considerados adequadamente.

Diversos estudos foram realizados para avaliar o comportamento da fibra frente à ação de agentes deletérios (GRANJU & BALOUCH, 2005; KAUFMANN, 2014; TRAN et al, 2015). Dentro deste contexto, o desenvolvimento de procedimentos para o dimensionamento de elementos de CRFA, no que tange o aspecto estrutural, que considerem a exposição à ambientes de alta agressividade em paralelo ao surgimento de machas na superfície do material, são campos de forte importância estratégica para ampliar a gama de aplicações do compósito, uma vez que um dos entraves para a disseminação do uso do CRFA consiste na incerteza do comportamento resistente das fibras frente à ação de agentes agressivos.

Nesta pesquisa, porém, o objeto de estudo foi a Argamassa Reforçada com Fibras de Aço (ARFA), com a intenção de isolar variáveis e definir hipóteses simplificadoras. Em um primeiro momento é mais interessante que a matriz cimentícia tenha uma permeabilidade que possa ser considerada constante a qualquer profundidade, de modo a facilitar a análise da penetração de agentes agressivos na matriz cimentícia e seus efeitos corrosivos nas fibras de aço. Para o caso de estudos em matrizes de concreto com um elevado consumo de cimento, a extrapolação dos resultados pode se tornar viável.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência do ataque de íons cloreto na resistência mecânica à tração de argamassa reforçada com fibras de aço, por meio da análise dos resultados de resistência à tração na flexão e, do

acompanhamento fotográfico do aparecimento e aumento de manchas superficiais de corrosão nas faces do compósito cimentício.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- ✓ Monitorar o aparecimento de manchas de corrosão na superfície dos corpos de prova por meio de acompanhamento fotográfico nas idades estipuladas para o estudo;
- ✓ Correlacionar a dimensão da abertura de fissura com os resultados de resistência mecânica à tração após os períodos de exposição em câmara de intemperismo artificial.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O uso de fibras em misturas de concreto é crescente em diversos países. As fibras poliméricas interferem no estado fresco das misturas de concreto, além contribuir para o incremento da resistência ao fogo do compósito. As fibras de aço, por sua vez, atuam nas propriedades estruturais do elemento, em seu estado endurecido, estando sujeitas à processos de degradação, como a corrosão, que ocorre ao longo da vida útil da edificação.

Dessa forma, dando enfoque às questões de durabilidade, o avanço das pesquisas nas últimas décadas impulsionou a utilização das fibras de aço em variados elementos estruturais e edificações de grande porte, como mostrado na FIGURA 1.

FIGURA 1- COBERTURA EM CONCRETO ARMADO E REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.



FONTE: SERNA et al (2009).

Serna et al. (2009) apresentam exemplos de obras reais onde as fibras de aço foram utilizadas com caráter estrutural como complemento a armadura convencional do concreto. Entre elas destaca-se a cobertura do Museu de Oceanografia de Valencia, na Espanha (Figura 1), onde foi empregado 50 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço associadas às barras de aço usualmente utilizadas.

Diante disso e da crescente demanda por construções duráveis, torna-se fundamental o estudo da durabilidade das fibras de aço em edificações expostas a ambientes agressivos. No meio científico ainda é tratada como incerta a influência de agentes deletérios, como cloretos, na resistência à tração ao longo da vida útil de estruturas com o emprego de fibras de aço. Ou seja, além da existência do processo de corrosão, é necessária a verificação da ocorrência e da magnitude de redução da resistência provocada por essa manifestação patológica, caracterizando um nicho de pesquisa relevante para a ampliação da gama de aplicação de fibras de aço em estruturas civis, juntamente com o desenvolvimento de técnicas de proteção para edificações em CRFA.

### 1.3 PUBLICAÇÕES RESULTANTES

NUNES, A. C. M.; PIERALISI, R.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; CARRERA, G. T. *Influência do ataque por cloretos na resistência à tração na flexão de argamassas reforçadas com fibras de aço*. Artigo completo apresentado no 60º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON. Foz do Iguaçu – Brasil, 17 a 21 de setembro de 2018.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Peças estruturais com alta flexibilidade e capacidade de resistência são comumente requeridas em grandes obras civis. Nesse sentido, a concepção estrutural de edificações que possuam alto desempenho aliado ao uso de novos materiais é crescente em diversos países. Dentro desse contexto, o CRFA apresenta-se como uma alternativa à otimização e incremento das propriedades do concreto convencional em determinadas aplicações, como pisos industriais e elementos pré-fabricados (MEHTA & MONTEIRO, 2008; FIGUEIREDO, 2011).

### 2.1 CONCRETO COM FIBRAS

Por sua capacidade de possibilitar diversas variações de formas em peças estruturais moldadas, além de se ajustar a diferentes condições de produção e execução, o concreto figura entre os materiais mais utilizados no mundo. Contudo, por possuir características notadamente frágeis em relação a deformações por esforços de tração, sua principal aplicação é em conjunto com materiais metálicos como barras de aço, dando origem ao Concreto Armado (CA). Entretanto, ao longo de sua vida útil, a estrutura pode ser exposta a ambientes agressivos e submetida a esforços que podem causar o aparecimento de trincas e fissuras. (FIGUEIREDO, 2011).

Nesse sentido, constatou-se que, a largura de fissuras influencia na durabilidade de estruturas de CA, principalmente no caso de fissuras ou trincas longitudinais, pois nessa condição o processo de corrosão torna-se mais rápido quando comparado à abertura de fissuras por flexão em estruturas expostas a ambientes salinos (BLAGOJEVIC et al, 2014).

Dessa forma, o controle de abertura de fissuras mostra-se como uma importante ferramenta para o aumento da durabilidade e do desempenho de estruturas de concreto. Partindo dessa perspectiva, a utilização de fibras de aço como reforço ao concreto tem se tornado uma prática viável para determinadas aplicações da indústria da construção civil, dando origem ao CRFA. O CRFA pode ser definido simplificarmente como um compósito constituído por uma matriz frágil associada a um tipo de reforço (FIGUEIREDO, 2011).

De modo geral, o concreto reforçado com fibras pode ser entendido como um compósito cimentício de função estrutural, no qual são incorporadas fibras

de aço, visando a melhoria de determinadas propriedades do material, como a resistência à tração e ao impacto (BLASZCZYNSKI & FALEK, 2015).

### 2.1.1 Tipos de fibras de aço

A norma brasileira de especificação para fibras de aço - ABNT NBR 15530 (2007) - contempla os principais tipos de fibras existentes e comercializadas em âmbito nacional. De modo geral, as fibras podem apresentar ganchos em suas extremidades, com o objetivo de incrementar a ancoragem na matriz cimentícia. Além disso, podem ter comprimentos variando de 25 mm (fibras curtas) à 60 mm (fibras longas). A classificação vigente na normativa brasileira define três tipos de fibras em função da sua conformidade geométrica, no que se refere ao seu perfil longitudinal:

- TIPO A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- TIPO C: fibra de aço corrugada (ondulada);
- TIPO R: fibra de aço reta.

O formato da seção transversal, por sua vez, irá depender do tipo de aço utilizado na produção da fibra. Nesse sentido, as classes de fibras definidas em normativa, de acordo com o aço de origem, são:

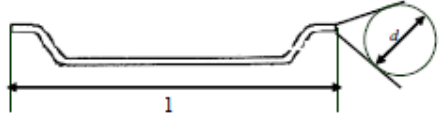
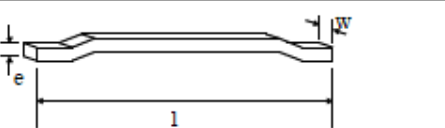
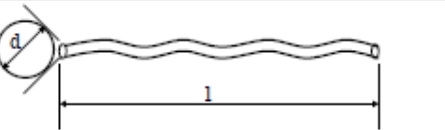
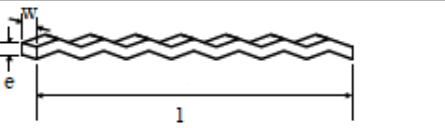
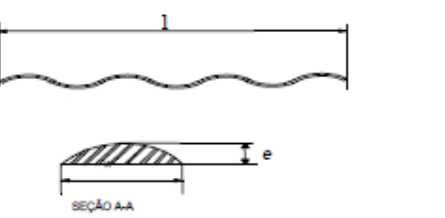
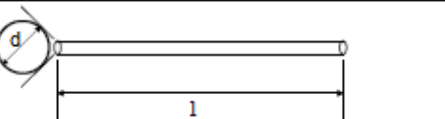
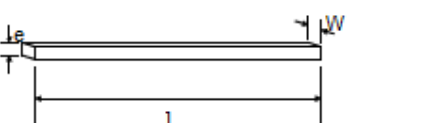
- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio;
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio;
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

Os modelos de fibras existentes de acordo com a norma ABNT NBR 15530 (2007) estão apresentados na FIGURA 2. Entretanto, fibras do tipo A-II deixaram de ser disponibilizadas no Brasil nos últimos anos, devido a dificuldades de mercado. Em contrapartida, as fibras do tipo C-III ainda estão disponíveis, apesar de apresentarem desempenho mecânico inferior aos demais tipos de fibras, uma vez que são fabricadas a partir do resíduo da produção de lã de aço (FIGUEIREDO, 2011).

Ao contemplar grande parte, se não a totalidade das fibras de aço comercializadas no país, a normativa possibilitou o estabelecimento de requisitos mínimos que poderão interferir no desempenho final do CRFA. Nesse

sentido, destacam-se o fator de forma da fibra, seu módulo de elasticidade e resistência mecânica.

FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO SEGUNDO ABNT NBR 15530 (2007).

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

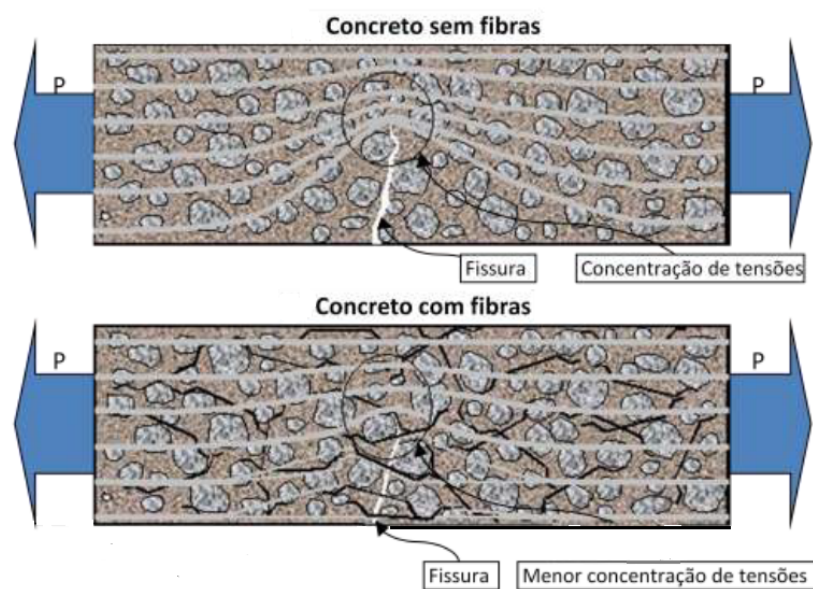
FONTE: Adaptado de Figueiredo (2011).

O fator de forma pode ser entendido como a relação entre o comprimento e o diâmetro da circunferência com área equivalente à seção transversal da fibra de aço e, pode interferir significativamente na trabalhabilidade do compósito cimentício. De modo geral, quanto maior o fator de forma da fibra incorporada na mistura, menor será a trabalhabilidade resultante. Isso porque apesar de incremento de resistência conferido à matriz no estado endurecido, a incorporação de fibras de aço na mistura modificam a consistência do compósito,

uma vez que resulta em uma maior área superficial, que demanda maior quantidade de água para a molhagem. Assim, ao se manter uma relação água/cimento, a água disponível para fluidificar a mistura torna-se menor. Dessa forma, quanto maior o comprimento da fibra ou menor seu diâmetro, menor será a fluidez do compósito para aplicação. Nesse sentido, o fator de forma constitui-se como um redutor da trabalhabilidade da mistura, podendo em determinados casos, comprometer a compactação e, posteriormente, a durabilidade das estruturas em CRFA (BENTUR & MINDESS, 1990; FIGUEIREDO, 2011).

A capacidade de reforço que a fibra de aço irá proporcionar ao CRFA está relacionada à resistência mecânica e ao módulo de elasticidade da fibra. As fibras de aço possuem alto módulo e alta resistência mecânica quando comparadas às fibras poliméricas ou fibras orgânicas. Por esse motivo, atuam como um reforço ao concreto em seu estado endurecido, podendo em alguns casos, substituir completamente a armadura convencional (barras de aço). Isso porque, as fibras irão proporcionar alívio de tensões em pontos onde haja abertura de fissuras, desempenhando o papel de ponte de transferência de tensões na região fissurada, como é mostrado na FIGURA 3. (FIGUEIREDO, 2011).

FIGURA 3 - FIBRAS DE AÇO COMO PONTE DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES NO CONCRETO FISSURADO.



FONTE: Figueiredo (2011).

### 2.1.2 Aplicações

Uma das principais aplicações das fibras metálicas associadas ao concreto na construção civil é a fabricação de tubos de concreto reforçado com fibras. No Brasil, os tubos são utilizados em grande escala em obras de saneamento básico e drenagem urbana, área que ainda requer maiores investimentos para a ampliação da infraestrutura e atendimento adequado da população. (FIGUEIREDO, 2011). Nesse sentido, as pesquisas para o fomento dessa aplicação são desenvolvidas em diversos centros de estudos nacionais e internacionais.

A utilização de fibras de aço substituindo o reforço tradicional na forma de vergalhões em tubos de concreto pré-moldado é uma alternativa viável com relação a aspectos técnicos e econômicos (DE LA FUENTE et al, 2014 - a). Contudo, apesar da grande quantidade de estudos experimentais realizados, seu uso não foi totalmente consagrado, necessitando ainda, de métodos e normativas que direcionem as etapas de projeto e execução dessas peças. Nesse sentido, o estudo realizado por De La Fuente et al. (2014 – a) objetivou a introdução de um Modelo para Análises de Tubulações (MAP), o qual contempla aspectos como tipologia e quantidade de fibras para cada diâmetro interno de tubos, além do nível de resistência exigido. Ao final do estudo, os autores apresentaram um procedimento de projeto voltado especificamente para tubos de concreto pré-moldados reforçados com fibras, além de tabelas de projeto elaboradas para auxiliar engenheiros e profissionais da área.

É importante salientar que, os tubos são peças que podem contribuir para a avaliação e a validação de métodos de controle de qualidade, no que tange aos aspectos estruturais de materiais reforçados com fibras de aço. Isso porque ensaios em escala real utilizando tubos são relativamente simples, contribuindo para o aumento da confiabilidade de modelos de dimensionamento propostos, além de facilitar a correlação entre modelos numéricos de previsão de comportamento da peça, com modelos de controle tanto de propriedades do concreto reforçado quanto de execução dos elementos (DE LA FUENTE et al, 2014 - a).

De modo geral, a aplicação do concreto com fibras em peças e estruturas pré-moldadas tem sido o enfoque de diversas pesquisas recentes. Em estudo



realizado por De La Fuente et al. (2014 - b) demonstrou-se que, naquele período, haviam mais de quarenta aplicações de concreto reforçado com fibras na construção de túneis e poços já finalizados ou em fase de acabamento em diferentes países. Isso se deve, principalmente, às melhorias econômicas e mecânicas que o uso das fibras pode proporcionar quando comparadas ao uso do reforço tradicional.

No que tange aos aspectos econômicos, o uso do concreto com fibras pode diminuir os custos totais da construção, já que em grande parte das aplicações não é necessária a montagem de malhas ou telas metálicas, o que contribui para maior agilidade do serviço, diminui a demanda por mão-de-obra e reduz a probabilidade de ocorrência de erros construtivos (FIGUEIREDO, 2011).

Em relação às melhorias mecânicas, sabe-se que o reforço com fibras de aço pode substituir parte ou a totalidade de barras de reforço tradicional em peças pré-moldadas submetidas a cargas moderadas em condições de serviço, já que nesses elementos os carregamentos mais desfavoráveis tendem a ocorrer nas etapas anteriores ao início do serviço da estrutura, como nas fases de transporte e manipulação das peças (DE LA FUENTE, 2014 - b). Nesse sentido, no estudo realizado por De La Fuente et al (2014 - b), foi proposto um método de pré-projeto, a partir do qual seria possível avaliar a quantidade de fibras necessária para atender aos requisitos de resistência mecânica de um determinado segmento de concreto pré-moldado. A partir desse dado, o projetista poderia avaliar a viabilidade da substituição total ou parcial do reforço tradicional por fibras de aço.

Outra aplicação recorrente do material é em revestimentos projetados de túneis. No Brasil, essa prática já existe, principalmente como reforço primário em túneis recém-escavados. Isso se deve a vantagens mecânicas obtidas com o uso do concreto projetado com fibras, como o fato de ser possível a aplicação do material logo após a escavação, minimizando o risco de acidentes por desprendimento por parte do maciço. Além disso, o uso de fibras contribui para o controle de propagação de fissuras, que comumente surgem no reforço primário devido às grandes deformações iniciais do maciço logo após a escavação (FIGUEIREDO, 2011).

Em alguns casos, como em peças de seção transversal fina, a resistência ao fogo pode se tornar um importante parâmetro de projeto. Diante disso, em

estudo experimental realizado por Colombo et al (2010) caracterizou-se as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras utilizado para a fabricação de peças pré-fabricadas, quando exposto a ciclos térmicos de alta temperatura. Concluiu-se que a queda de resistência pós-fissuração na flexão é menos acentuada no concreto com fibras, quando comparado ao concreto armado comum, uma vez que as fibras ficam dispersas por toda a seção e reduzem a incidência de pontos de concentração de calor, ao contrário do que acontece nas barras de aço, concentradas em determinados pontos do elemento estrutural. Além disso, o mecanismo de extração das fibras não é significativamente influenciado, mesmo quando estas são expostas a altas temperaturas. Em relação à resistência à compressão, houve decaimento linear da resistência do material com o aumento da temperatura, o que demonstra a pouca influência da adição de fibras na resistência a compressão do compósito quando submetido ao fogo (COLOMBO et al, 2010).

O CRFA é, então, um novo material de construção que está sendo desenvolvido em padrões nacionais e internacionais, com enfoque em soluções estruturais. As características mecânicas obtidas a partir da incorporação de fibras na mistura cimentícia podem facilitar as ações de manutenção e, melhorar as condições de serviço da estrutura. Todavia, é necessário levar em consideração aspectos fundamentais para o êxito do projeto, tais como: tipo de aplicação, de concreto e de fibra, além do teor (% , em volume total) de reforço a ser incorporado na mistura (DI PRISCO, 2009).

Apesar do reforço com fibras de aço em estruturas de concreto ainda ser entendido como uma prática inovadora na indústria da construção civil, estudos abordando formas de melhorar os projetos de aplicação e o desempenho do compósito são desenvolvidos há mais de 30 anos. Em uma dessas pesquisas, Li (1992) estudou projetos de desempenho orientado para CRFA. De forma geral, são projetos em que a estrutura do concreto reforçado é “orientada” para atender satisfatoriamente uma aplicação do material. Ou seja, trata-se do alinhamento de propriedades específicas do CRFA a um desempenho estrutural desejado. A proposta é que a adaptação seja feita na estrutura do compósito, ou seja, na matriz cimentícia, na interface da fibra com a matriz ou nas próprias fibras, para que um desempenho idealizado seja atingido (LI, 1992).

A principal vantagem do desempenho orientado é que os materiais

reforçados podem ser desenvolvidos para uma determinada aplicação, já que não é viável projetar CRFA de alta performance para todas as aplicações estruturais. Para a utilização do método é necessário conhecer as propriedades estruturais desejadas, para que sejam relacionadas com as propriedades microestruturais do material a partir de modelos micromecânicos. No caso onde a largura de fissura é um limitante para o desempenho adequado da estrutura, por exemplo, o projeto orientado relaciona essa propriedade do material real com a estrutura da matriz do compósito cimentício, buscando maneiras de adaptá-la para que a largura de fissura seja controlada durante a vida útil da estrutura, aumentando conseqüentemente a sua durabilidade (LI, 1992).

### 2.1.3 Comportamento mecânico do material

Sabe-se que um dos principais parâmetros de projeto para estruturas em concreto é a resistência à compressão que o elemento apresenta frente às solicitações. Nesse sentido, estudos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a influência da incorporação de fibras de aço no comportamento à compressão do CRFA.

A adição de fibras interfere na relação tensão/deformação em concretos submetidos a esforços de compressão. De maneira geral, o carregamento crítico suportado aumenta proporcionalmente à quantidade necessária de fibras de aço incorporadas na mistura. Isso porque o reforço disperso proporcionado pelas fibras dificulta a propagação de fissuras pela matriz e, conseqüentemente, auxilia na redução das tensões em locais fragilizados da estrutura, melhorando determinadas propriedades do elemento reforçado, como ductilidade e tenacidade (BLASZCZYNSKI & FALEK, 2015).

A resistência à tração também se caracteriza como um importante parâmetro a ser analisado no dimensionamento de estruturas civis. Sabe-se que, de modo geral, em estruturas de concreto reforçadas são as barras ou fibras de aço que suportam esse tipo de esforço. Dessa forma, o comportamento à tração do CRFA deve ser considerado nos estudos de dimensionamento.

A resistência a flexão demonstra-se igualmente como um importante parâmetro para dimensionamento com o uso de fibras. Porém, ainda há um intenso debate sobre como apresentar e avaliar a resistência à flexão de

compósitos reforçados com fibras para fins de projeto. Estudos têm sido desenvolvidos nas últimas décadas visando a obtenção de modelos que apontem com precisão o comportamento a flexão do CRFA, utilizando métodos práticos de caracterização da contribuição à resistência a tração fornecida pela inserção de fibras (PRUDENCIO et al, 2006).

Com o objetivo de fomentar as pesquisas sobre o desempenho estrutural do material e a sua utilização nas novas construções, o *Fib Model Code* (2010) especifica a possibilidade da substituição parcial ou total do reforço convencional por fibras de aço, caso certos parâmetros de resistência residual sejam atendidos, além de apresentar fatores de segurança para materiais e um fator de orientação das fibras para projeto. O fato de considerar a influência da orientação das fibras no desempenho da estrutura é uma abordagem inovadora, visto que esse parâmetro não está incluso em normas e diretrizes anteriores, e pode variar de acordo com determinadas condições de compactação e moldagem do concreto. Nesse sentido, o código sugere a realização de testes específicos para a determinação do efeito da orientação das fibras em amostras que sejam representativas do elemento estrutural real (BLANCO et al, 2013).

#### 2.1.4 Normas e recomendações para aplicação estrutural do CRFA

As normas que regem a utilização de fibras de aço como reforço estrutural em misturas de concreto são consideradas recentes, e estão sendo desenvolvidas em maior escala em centros de pesquisa da Europa. Prova disso são o *Fib Model Code* 2010, o RILEM TC 162-TDF 2002 e, outras normas e recomendações como EHE-08 e ACI 544.4R-18, desenvolvidas para servir como ferramentas ao projeto de elementos estruturais em CRFA.

Apesar de haverem regulamentações europeias que consideram as fibras de aço como material de reforço em determinadas peças pré-fabricadas, nenhuma delas sugere métodos de projeto para dimensionamento (DE LA FUENTE, 2014 - b). Blanco et al (2013) conduziram um estudo com objetivo de comparar os principais modelos constitutivos presentes na literatura, de acordo com a capacidade de cada método em prever a resposta estrutural do CRFA. Os resultados mostraram que as divergências entre os métodos de projeto existentes eram referentes a diferenças significativas nos deslocamentos reais

que ocorriam nas peças em relação aos que eram preditos pelos métodos. Contudo, de modo geral, o deslocamento predito era sempre maior que o deslocamento medido na peça real, tornando assim, os modelos conservadores (BLANCO et al, 2013).

No Brasil o CRFA está sendo inserido no mercado da construção civil gradativamente. A dificuldade encontrada para aceitação e incorporação das fibras nas misturas de concreto é gerada, principalmente, pela falta de normativas nacionais e de métodos que conduzam a maiores facilidades de execução do compósito *in loco*, além de regimentos que tornem o processo de controle de qualidade mais preciso e confiável nas etapas de fabricação e aplicação das fibras (FIGUEIREDO, 2011).

## 2.2 INTERAÇÃO ENTRE AS FIBRAS E A MATRIZ CIMENTÍCIA

### 2.2.1 Mecanismos de transferência de tensões

Uma das vantagens do uso do CRFA é a capacidade das fibras em se distribuírem aleatoriamente pela matriz, conferindo resistência à tração em diferentes direções ao longo de todo o comprimento da peça. Enquanto isso, no concreto armado convencional, as barras de aço atuam sobre uma determinada seção crítica da estrutura (FIGUEIREDO, 2011).

Em alguns casos, como em lajes onde as tensões de tração estarão concentradas na parte inferior, o uso de fibras ao invés de barras de aço é uma prática que necessitará da avaliação geral dos custos totais de execução e manutenção da obra e, do tempo disponível para o término da edificação. Isso porque, num primeiro momento, a inserção de fibras nas misturas de concreto gera aumento nos custos do material (preço por m<sup>3</sup> do CRF). Contudo, ao se avaliar a redução no tempo despendido para finalizar a edificação, em razão de não ser requerida a montagem de armaduras e sua posterior verificação, é possível tornar o uso de CRFA viável economicamente. Nesse sentido, em locais onde a carga é variável ao longo da vida útil da estrutura, como pavimentos, o reforço com fibras de aço é uma alternativa viável dos pontos de vista técnico e econômico (FIGUEIREDO, 2011).

As fissuras presentes numa peça de concreto provocam o aumento de

tensões em determinados pontos, como na raiz da fissura, podendo em alguns casos, levar à ruptura abrupta da estrutura caso a solicitação supere a resistência. Nesses casos, as fibras de aço incorporadas na mistura serviriam como pontes de transferência de tensões, aliviando o ponto que antes poderia ser sobrecarregado. Dessa forma, a estrutura passa a ter um comportamento menos frágil, e ocorre o controle da abertura de fissuras pela ação das fibras. No entanto, para tal, é necessário o conhecimento dos seus mecanismos de interação com a matriz cimentícia. (FIGUEIREDO, 2011).

No CRFA a aderência física e química, juntamente com o atrito e a ancoragem mecânica, figuram entre os principais mecanismos de transferência de tensões entre a fibra e a matriz cimentícia. De modo geral, a ligação por aderência ou atrito são significativas apenas em compósitos de baixa porosidade e com adição de microfibras. No entanto, em misturas convencionais de concreto com fibras, a ancoragem mecânica faz-se necessária para que haja boa capacidade resistente após a abertura de fissuras (BENTUR; MINDESS, 2007).

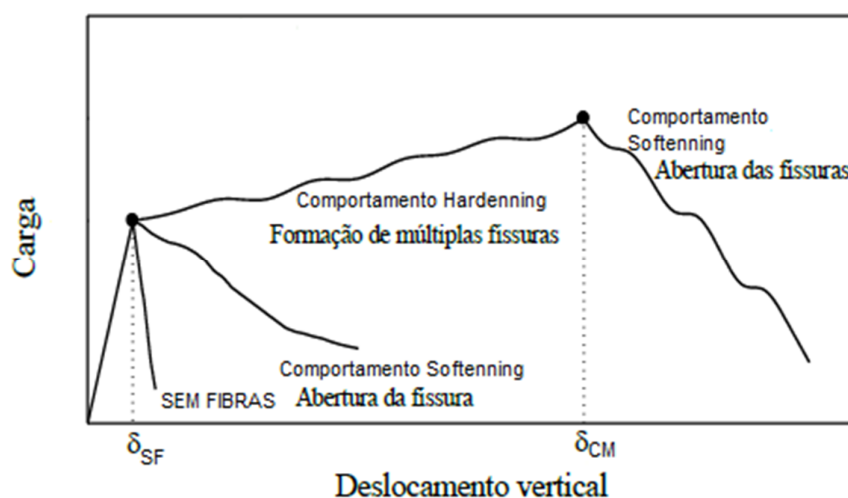
Em compósitos de matrizes frágeis, como é o caso do concreto, a transferência de tensões pode ser caracterizada por processos distintos nos períodos pré e pós-fissuração. Antes da abertura de fissuras, as tensões de cisalhamento entre as fibras e a matriz são transmitidas de forma elástica, e os deslocamentos na interface entre os materiais são considerados compatíveis. Com etapas de carregamento mais avançadas, torna-se possível a ocorrência da ruptura da ligação na interface, e o mecanismo de transferência de tensões passa a ser controlado pelo atrito, caracterizado como a tensão de cisalhamento produzida pelo deslizamento das fibras em relação à matriz cimentícia. (BENTUR & MINDESS, 2007).

Porém, se essa transição entre formas de transferência de tensões faz parte de um processo gradual, ou seja, durante algum tempo, é possível que haja a ocorrência de ambos os mecanismos (aderência e atrito). De modo geral, destaca-se que a principal diferença para a transferência de tensões entre fibras e matriz é que em estágios anteriores à abertura de fissuras a máxima tensão de cisalhamento na interface ocorre nas extremidades das fibras. Em contrapartida, para matrizes fissuradas, essa tensão é máxima no ponto em que as fibras entram na matriz (BENTUR & MINDESS, 2007).

## 2.2.2 Comportamento pós-fissuração

De acordo com normativas vigentes e estudos anteriores (*Fib Model Code*, 2010; NAAMAN, 2000; ZOLLO, 1997), são propostos dois modelos para o comportamento de tração pós-fissuração de CRFA, compreendidos de forma geral como o comportamento de endurecimento (*strain-hardening*) e o comportamento de amolecimento (*strain-softening*), conforme mostrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.



FONTE: Adaptado de Salvador, 2013.

O comportamento *hardening* é caracterizado por um aumento da resistência pós-pico no ensaio de tração na flexão, ou seja, é notado um acréscimo na resistência residual do compósito antes da perda progressiva que leva ao colapso. É típico em estruturas de CRFA onde são incorporados elevados teores de fibras na mistura. De modo geral, é visível a abertura de diversas fissuras, já que a presença das fibras no local de abertura da fissura torna mais difícil a ruptura nessa região, devido à maior capacidade de absorção de energia. Nesses casos, a tensão para abrir outras fissuras em diferentes locais do compósito é menor do que a necessária para romper a peça na fissura já aberta (ZOLLO, 1997).

O comportamento *strain-softening*, por sua vez, é caracterizado pela perda progressiva de resistência no ramo pós-pico durante o ensaio. Nesse

caso, é possível observar a existência de uma fissura mais pronunciada que as demais. Via de regra, esse comportamento é visível em compósitos com baixos teores de fibras. (SALVADOR, 2013; NAAMAN, 2000; ZOLLO, 1997).

Diante disso, tornam-se necessários os conceitos interligados às propriedades físicas das fibras de aço, que garantem o reforço desejado ao compósito cimentício, de modo a viabilizar a dosagem adequada do material, de acordo com teores e dimensões de fibras adequados. Nesse sentido, dentre os aspectos que influenciam no comportamento dos compósitos reforçados com fibras estão a quantidade e a geometria das fibras incorporadas na mistura (FIGUEIREDO, 2011).

Pesquisas anteriores afirmam a existência de um teor de saturação de fibras, a partir do qual o material apresenta comportamento *strain-hardening* e, abaixo do qual é verificado o comportamento *strain-softening*. Esse teor de saturação pode ser entendido como o teor de fibras incorporado na mistura capaz de permitir que o material apresente a mesma resistência que possuía antes da abertura de fissura. Por esse motivo, quando há o emprego de valores abaixo do teor de saturação, ocorre a queda progressiva na resistência, enquanto que para o uso de valores mais altos que este, observa-se o incremento de resistência após o aparecimento da fissura (FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013; NAAMAN, 2000).

Além disso, há a influência da geometria das fibras na interação com a matriz cimentícia, e conseqüentemente, no comportamento pós-fissuração da peça de CRFA. Nesse sentido, torna-se importante o conceito de comprimento crítico, entendido como aquele no qual a tensão sobre a fibra é igual à tensão de cisalhamento existente entre esta e a matriz cimentícia. Abaixo deste comprimento, a ruptura se dá pelo escorregamento da fibra e posterior arrancamento da extremidade menos ancorada na matriz (SALVADOR, 2013; NAAMAN, 2000).

Para comprimentos acima do crítico, a ruptura tende a ocorrer na fibra. Isso porque o aumento do seu comprimento condiciona a maiores comprimentos de ancoragem, tornando mais forte a ligação entre a fibra e a matriz. Dessa forma, as tensões sobre as fibras podem ser maiores que a sua resistência, ocasionando a sua ruptura, já que a resistência na interface com a matriz torna-se bastante elevada. Assim, o compósito pode perder a sua ductilidade,



apresentando comportamento frágil semelhante ao concreto simples, além de dificuldades no manuseio da mistura no estado fresco, devido à baixa trabalhabilidade conferida ao compósito pela grande quantidade de fibras incorporadas (SALVADOR, 2013; BANTHIA, 1998).

Isto posto, é notória a necessidade de estudos de dosagem adequados para misturas de concreto reforçado com fibras de aço. De modo geral, a eficiência das fibras no comportamento pós-fissuração dos compósitos cimentícios é aperfeiçoada quando seu arrancamento ocorre sob tensões próximas de sua resistência à tração, ou seja, quando se tem alta capacidade resistente sem a perda do comportamento dúctil conferido à estrutura pela inserção das fibras (SALVADOR, 2013; BANTHIA, 1998).

Em estudo realizado por Sane e Doiphone (2016) verificou-se que, para diferentes quantidades de incorporação na mistura, fibras de menores dimensões possuem melhor desempenho quando comparadas a fibras maiores. Além disso, mostrou-se também que teores muito elevados de fibras, próximos ao máximo recomendado pelos fabricantes, não melhoram significativamente as propriedades do concreto. Dessa forma, teores em torno de 1,0 a 1,5% em relação ao volume de concreto podem ser considerados como máximos viáveis para aplicação (SANE & DOIPHONE, 2016).

Em estudos que abordaram a análise microscópica da interação entre fibras e matriz cimentícia, além de sua influência na microestrutura do compósito, verificou-se que, por se tratar de um material com diferentes fases (pasta, agregados e vazios), as microfissuras presentes na interface entre argamassa e agregado graúdo podem contribuir para a baixa capacidade resistente à tração do concreto e para o surgimento de novas fissuras (SANE & DOIPHONE, 2016).

Nesse sentido, pesquisas estão sendo desenvolvidas para verificação a da capacidade de autocicatrização de CRF. Em concretos reforçados com fibras de aço, foi observado o aparecimento de produtos de corrosão na superfície e no interior de fissuras, ação que contribuiu para o preenchimento das aberturas e melhora da resistência a tração em compósitos fissurados. Os resultados foram ainda mais significativos em amostras híbridas, confeccionadas com a adição de fibras de aço e de polietileno. Nesse caso, os produtos da autocicatrização (cristais de carbonato de cálcio) foram mais facilmente depositados no interior e na superfície das fissuras, juntamente com os produtos de corrosão, tornando

maior o incremento da resistência à tração e diminuindo a permeabilidade do compósito, contribuindo assim, para o aumento de sua durabilidade (HOMMA et al, 2009).

### 2.3 CORROSÃO E USO COMBINADO DE FIBRAS E ARMADURA CONVENCIONAL

Ainda que a combinação entre concreto e barras de aço dê origem ao compósito mais empregado mundialmente na indústria da construção civil, a deterioração deste material está, invariavelmente, relacionada à ocorrência do processo de corrosão. De modo geral, a armadura embutida nos elementos de concreto tende a estar protegida dos mecanismos de deterioração. Porém, a correta realização das etapas de moldagem e execução dos elementos não garante a total proteção do aço, já que a porosidade, ainda que baixa em alguns casos, é uma característica presente na matriz cimentícia, e que pode favorecer o aumento da permeabilidade do meio, dando origem a caminhos preferenciais para a entrada de agentes deletérios (HELENE, 1986; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Acredita-se que a corrosão das armaduras esteja entre os principais problemas existentes em edificações com danos estruturais. Isso pode favorecer o aumento dos custos de reparo das estruturas, já que as manifestações patológicas causadas pela corrosão se evidenciam por meio da expansão, fissuração e deslocamento do revestimento de concreto. Além disso, em casos mais severos, a perda de seção transversal das barras de aço, devido à corrosão, pode comprometer a resistência de maneira irreversível, levando ao colapso da estrutura (ANDRADE, 1992; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

As peças de ferro comum e aço são normalmente revestidas por uma camada de óxido de ferro, que por sua vez, torna-se impermeável e fortemente aderida ao material em um meio alcalino, como na matriz cimentícia, tornando o aço passivo à corrosão, ou seja, protegido de mecanismos que promovam a formação de produtos da reação deletéria (HELENE, 1986; ANDRADE, 1992; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Sabe-se que, a corrosão do aço é um processo eletroquímico, no qual células de corrosão podem ser formadas quando são incorporados ao concreto dois metais diferentes ou ainda, quando há diferenças significativas nas

características superficiais do aço. Outra maneira de originar células de corrosão é pela formação de células de concentração, decorrentes da diferença de concentração de íons dissolvidos no entorno do metal. A partir disso, um dos metais ou parte do metal presente no concreto torna-se ânodo e outro o cátodo (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

O mecanismo de corrosão requer a liberação de elétrons na parte do ânodo e o seu recebimento no cátodo. Neste último também deve haver disponibilidade de oxigênio e umidade para a formação de produto expansivo, que comumente é acompanhada por um aumento de volume que pode chegar a 600% em relação ao volume do metal original. Essa expansão, de modo geral, caracteriza-se como a responsável pela formação de fissuras e pela ocorrência de deslocamentos em estruturas com graus de corrosão avançados. Para a ocorrência do processo anódico e, posterior formação de produtos de corrosão, é necessária a remoção do filme de óxido passivo pelo processo de carbonatação, ou ainda o fim de sua capacidade impermeável pela ação de íons Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) (CASCUDO, 1999; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Na ausência de íons cloreto em solução, a camada passiva que reveste as barras de aço no interior do concreto se mantém estável em pH superior a 11,5, o que é possível por conta da alta alcalinidade da pasta de cimento. Entretanto, na presença de  $\text{Cl}^-$  a camada passiva torna-se instável e permeável, ocasionando a suscetibilidade da armadura ao processo de corrosão. Esse tipo de ataque é comum em casos onde há a utilização de aditivos aceleradores de pega, agregados contaminados, solução de sais de degelo, ou principalmente, proximidade entre a estrutura e a água do mar (HELENE, 1986; CASCUDO, 1999; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de estabelecer diretrizes executivas e técnicas de proteção que minimizem a probabilidade de ocorrência da corrosão e, em paralelo, têm sido avaliados procedimentos de reparo eficientes que possam viabilizar o cumprimento da vida útil da estrutura danificada para os casos em que o processo deletério já foi detectado. No entanto, as maneiras mais simples e eficazes de impedir o início ou controlar as reações do processo corrosivo estão relacionadas às práticas corretas de dosagem, execução e manutenção das edificações (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1999; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A permeabilidade do concreto é uma característica determinante para o seu desempenho ao longo da vida útil. Consequentemente, fatores como capacidade de empacotamento dos agregados, teor de cimento na mistura e relação água/cimento utilizada tornam-se fundamentais para diminuição da permeabilidade do concreto e aumento de sua durabilidade. Isso porque os processos de degradação do concreto são regidos por mecanismos de transporte, que podem ser divididos de forma geral em transporte pela massa de material e transporte por micro e macro-fissuras. Além da difusão e absorção, os mecanismos de transporte mais importantes, dentre aqueles que dependem das características físicas da matriz cimentícia, incluem a permeabilidade a gás e a líquido. (BERROCAL et al, 2013; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A permeabilidade do concreto, que pode ser definida como a penetração de fluidos através dos poros sob uma diferença de pressão, é considerada como um dos mais importantes mecanismos de transporte e pode ser diretamente relacionada com a durabilidade do concreto (BANTHIA, 2009). Em uma estrutura de concreto, a permeabilidade é atribuída à porosidade capilar da pasta de cimento e diminui à medida que se reduz a relação água/cimento e que as reações de hidratação ocorrem (BERTOLINI et al, 2003).

De igual forma, a presença de fissuras na estrutura pode caracterizar-se como um caminho preferencial para a entrada de agentes agressivos, apesar de ainda ser considerada incerta a relação entre tamanho de fissuras e corrosão das armaduras no interior do compósito cimentício. Dessa forma, estudos tem sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar a relação entre a abertura de fissura superficial e a iniciação do processo corrosivo em concreto armado convencional, quando o compósito é exposto a ambientes com alta concentração de cloretos. Secundariamente, a frequência do surgimento de fissuras, o cobrimento nominal das armaduras e as condições de carregamento também são objeto de estudo como fatores de influência na corrosão de barras de aço (MEHTA & MONTEIRO, 2008; BLAGOJEVIC et al, 2014).

A causa mais importante de iniciação da corrosão em reforços de aço no concreto é a entrada de íons cloreto na matriz cimentícia. Por esse motivo, esse tipo de manifestação patológica é predominante em ambientes como praias e áreas costeiras devido a presença de sais no ar. Aliado a isso e ao uso crescente de fibras metálicas em misturas de concreto, estudos estão sendo desenvolvidos

com o intuito de avaliar o comportamento das fibras frente à penetração de agentes deletérios quando incorporadas em compósitos já reforçados com barras de aço (ARUNKUMAR & SRIDHAR, 2017).

Em estudo realizado por Arunkumar e Sridhar (2017), foram adicionadas fibras híbridas de aço e vidro, juntamente com pó de sílica em misturas de concreto, a fim de reduzir a corrosão nas armaduras. Como resultado foi demonstrada a redução do potencial de corrosão das armaduras que reforçam o compósito. Isso porque houve o preenchimento dos vazios do concreto, devido à formação de produtos de reação da sílica com os hidróxidos solúveis disponíveis nos poros da matriz cimentícia. Contudo, destaca-se principalmente o comportamento das fibras de aço, que funcionaram como ânodos de sacrifício para corrosão no lugar das armaduras convencionais (ARUNKUMAR & SRIDHAR, 2017).

Conclusões semelhantes foram relatadas por Berrocal et al (2013), segundo os quais pesquisas recentes sugerem que algumas fibras podem estar interligadas entre si e em contato com a armadura comum do concreto armado, formando um par galvânico no qual as fibras atuam como ânodo de sacrifício, protegendo a armadura e reduzindo ou mesmo interrompendo o processo corrosivo. Assim, argumenta-se que as fibras de aço poderiam ser utilizadas em estruturas de concreto armado expostas a ambientes com cloretos, para melhorar o seu desempenho e durabilidade de forma geral (BERROCAL et al, 2013).

A verificação dessa hipótese obtém ainda mais importância ao tratar-se especificamente do CRFA, pois não se pode garantir o cobrimento das fibras, uma vez que estarão dispostas em toda seção transversal da peça e não devidamente espaçadas e em seções específicas, como ocorre com as barras de aço no concreto armado convencional (CA).

Em ambientes agressivos, que simulam a inserção de estruturas de concreto em atmosfera marinha, o processo corrosivo é menos ativo no CRFA quando comparado ao CA, tornando possível a hipótese de que compósitos reforçados com fibras possuem maior durabilidade em comparação ao concreto armado com barras de aço (GRANJU & BALOUCH, 2005).

Contudo, a aplicação do concreto reforçado com fibras ainda é limitada em grande parte para pavimentos, pisos industriais e lajes devido à distribuição

e orientação aleatórias das fibras, que resulta em perda de eficiência estrutural quando comparada às armaduras de reforço convencionais. Todavia, fibras próximas umas das outras podem melhorar a tenacidade e as propriedades de tração do concreto, além de contribuir significativamente para controlar e reduzir as larguras das fissuras. (BERROCAL et al, 2013).

Segundo estudos de Abrishami e Mitchell (1997) as fissuras ou trincas em concreto armado são efetivamente controladas pela adição de fibras, e as fissuras transversais são menores e mais próximas, quando comparadas aos compósitos sem fibras. Outros estudos também corroboram com tais conclusões, como o de Otsuka (2003), que concluiu que a adição de fibras altera não somente a largura das fissuras, mas sim todo o padrão de fissuração interna do compósito, dificultando o ingresso de agentes deletérios no interior do compósito e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento da durabilidade da estrutura (ABRISHAMI & MITCHELL, 1997; OTSUKA, 2003; FIGUEIREDO, 2011).

Nesse sentido, Berrocal et al (2015) avaliaram a incorporação de fibras de aço em mistura de concreto armado, a fim de melhorar o desempenho de estruturas expostas à ambientes salinos. Os autores concluíram que, de fato, houve redução na propagação de fissuras em compósitos reforçados com fibras, quando comparados ao concreto armado convencional. Como consequência, foi observada melhora na resistência à corrosão das barras de aço, sendo isso atribuído principalmente à redução da entrada de íons  $Cl^-$  no compósito, devida à diminuição da abertura de fissuras e da colmatação das trincas pela deposição de produtos de corrosão ao redor das fibras expostas e localizadas próximas à superfície (BERROCAL et al, 2015).

Como resultados secundários, verificou-se que a adição de fibras de aço na mistura não possui influência direta na difusão de cloretos para o interior do compósito, porém contribui para a diminuição da permeabilidade da pasta cimentícia. Dessa forma, as fibras envolvidas totalmente na matriz cimentícia não apresentaram sinais de corrosão, enquanto que as localizadas na área superficial apresentaram grande quantidade de produtos de corrosão e contribuíram para o aparecimento de manchas na superfície do concreto (BERROCAL et al, 2015).

Pesquisas anteriores obtiveram resultados semelhantes ao apresentado

por Berrocal et al (2015). Mangat e Gurusamy (1987 - b) estudaram a influência da adição de diferentes tipos de fibras de aço na penetração de cloretos, e concluíram que as fibras não possuem efeito significativo na difusão dos íons para o interior do concreto.

Teruzzi (2004) preparou misturas com e sem fibras e não encontrou efeitos significativos na difusão de cloreto ou na permeabilidade ao oxigênio que fossem atribuíveis à presença de fibras no concreto. Assim, concluiu-se que a zona em torno das fibras não atuou como um caminho preferencial para penetração de agentes agressivos.

Em estudo semelhante realizado por Berrocal et al (2015), no qual objetivou-se avaliar a influência da adição de fibras na resistência mecânica, transporte de cloretos e resistividade do concreto armado, verificou-se diminuição na resistividade elétrica do compósito, enquanto o coeficiente de difusão de íons  $Cl^-$  permaneceu inalterado. Além disso, não houveram ganhos significativos na resistência a tração e a compressão com inserção de teores de fibras menores que 1% em volume de concreto. Em contrapartida, mesmo em dosagens baixas, observou-se aumento da tenacidade do compósito, propriedade que confere à estrutura maior ductilidade, uma vez que a energia necessária para promover a ruptura é aumentada (BERROCAL et al, 2015).

#### 2.4 ATAQUE POR CLORETOS EM CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

O aparecimento de fissuras pode ser considerado inerente ao desempenho de estruturas de concreto armado, uma vez que durante sua vida útil, a edificação estará sujeita a diversos tipos de carregamentos que provocam sua deformação ao longo do tempo. Dessa forma, seja pela ocorrência de carregamentos inadequados, movimentos cíclicos que promovam a fadiga do material, ou por características heterogêneas de sua própria microestrutura, certamente as fissuras estarão presentes nos elementos de concreto durante sua vida útil (BLAGOVEJIC et al, 2014).

Entretanto, ao tratar-se de estruturas expostas a ambientes agressivos, a presença de fissuras pode facilitar o transporte de agentes deletérios para o interior do compósito. Nesse sentido, sabe-se que a corrosão decorrente do

ataque por cloretos em estruturas de concreto reforçadas com elementos de aço é uma das principais ameaças a durabilidade e eficiência do material. Isso porque após o início das reações de corrosão, há a perda gradativa das propriedades resistentes do aço e conseqüentemente, do concreto, culminando, em casos mais severos, na condenação da estrutura e fim de sua vida útil (BLAGOVEJIC et al, 2014).

Visando fomentar o desenvolvimento do CRFA, Mangat e Gurusamy (1987 - b) realizaram o estudo do comportamento de diferentes tipos de fibras metálicas incorporadas ao concreto exposto à ambiente marinho. A pesquisa compreendeu análises laboratoriais e em campo. Nessa última, as amostras estiveram submetidas a ciclos de molhagem e secagem em zona de respingo de maré. Fora empregadas fibras de baixo teor de carbono, fibras resistentes à corrosão, como as fibras galvanizadas, e também fibras de extrato de fundição (fabricadas a partir do resíduo de lã de aço). O intuito geral do estudo foi a verificação de propriedades mecânicas do concreto como resistência à compressão, à flexão e ductilidade a longo prazo, durante um período de 1250 dias. Também foi avaliado o estado visual das fibras e o surgimento de produtos de corrosão ao longo do tempo.

Os resultados obtidos demonstraram que as fibras de baixo teor de carbono e as resistentes à corrosão obtiveram melhores resultados mecânicos. Entretanto, a fibra de extrato de fundição, apesar da menor resposta mecânica fornecida ao longo das idades, não apresentou formação de produtos de corrosão em seu entorno, mesmo quando localizada em zonas superficiais do concreto, caracterizando-se como a fibra mais adequada para aplicações marítimas. Em contrapartida, a inspeção visual após o período de exposição mostrou que as fibras de baixo carbono e as resistentes à corrosão apresentaram produtos de corrosão quando se encontravam na zona superficial do compósito. As fibras localizadas no interior da matriz mantiveram suas características originais mesmo após a exposição ao ambiente de agressividade severa (MANGAT & GURUSAMY, 1987).

Com o objetivo de avaliar o comportamento do CRFA quando submetido ao ataque por íons  $Cl^-$ , Granju e Balouch (2005) realizaram estudo com corpos de prova reforçados com fibras de aço, previamente fissurados e expostos às condições salinas durante um ano. As fissuras apresentavam abertura máxima



de 0,5 mm, porém não foram observados severos processos de corrosão capazes de comprometer a seção resistente da fibra e sua interação com a matriz cimentícia. Constatou-se a formação de produtos de corrosão suficientes para aumentar a rugosidade das fibras, o que culminou no aumento da resistência à flexão do compósito. A presença de ferrugem depositada ao redor das fibras promoveu melhoria no travamento entre fibras e matriz cimentícia, dificultando o processo de ruptura das amostras devido ao arrancamento do metal (GRANJU & BALOUCH, 2005).

Além disso, a corrosão encontrada nas fibras não foi capaz de promover reações expansivas que pudessem resultar no deslocamento do concreto, o que poderia contribuir para a exposição do interior da estrutura à ação de agentes deletérios. Por fim, os autores concluíram que, as fibras de aço podem apresentar comportamento menos vulnerável à corrosão do que as barras de aço (vergalhões), mesmo não sendo possível a garantia do cobrimento adequado em seu uso (GRANJU & BALOUCH, 2005).

Em relação às propriedades mecânicas, o impacto da corrosão das fibras na resistência residual à tração de compósitos cimentícios tem sido objeto de estudo nos últimos anos, uma vez que o uso de fibras em revestimentos de túneis e pré-moldados é crescente, devido aos processos de produção simplificados e padrões de qualidade mais elevados (MESON et al, 2016).

As pesquisas convergem para a verificação do melhor desempenho do CRFA não fissurado em comparação ao reforço convencional, em situações de exposição à ambientes salinos. No entanto, há divergências sobre o comportamento do CRFA fissurado quando submetido à ação de íons  $Cl^-$ . Isso porque a cinética da corrosão nas fibras é diferenciada e requer análises detalhadas para verificação de sua influência na resistência à tração e comportamento pós-fissuração do compósito (MESON et al, 2016).

Ao analisar o processo de corrosão das fibras em compósitos fissurados expostos ao ataque por íons cloreto, observaram-se pontos de corrosão localizada, como pites, conforme é mostrado na FIGURA 5. Porém, a corrosão generalizada das fibras também ocorre. Assim, estudos com maior detalhamento, além do acompanhamento minucioso do processo corrosivo são necessários para a sua caracterização precisa.

FIGURA 5 - CORROSÃO POR PITES EM FIBRA DE AÇO, EM FOTO AMPLIADA COM LUPA ELETRÔNICA.



FONTE: A Autora (2018).

Contudo, é possível afirmar a existência de uma largura de fissura crítica, em torno de 0,2 mm, a partir da qual a corrosão nas fibras torna-se mais evidente e prejudicial ao desempenho da estrutura. Fissuras menores não comprometem a integridade estrutural do CRFA e sua durabilidade pode ser assegurada a longo prazo (MESON et al, 2016).

Sabe-se que a presença de fissuras no concreto pode acelerar o processo de degradação da estrutura, contribuindo para o início da corrosão das fibras incorporadas ao compósito. Assim, estudos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a influência da corrosão na resistência mecânica de concretos autoadensáveis reforçados com fibras. O uso desse material tem sido crescente em obras estruturais, devido à facilidade executiva, já que o reforço estrutural em aço é despejado junto com o concreto, sem a necessidade de montagem de armaduras (FRAZÃO et al, 2016).

Frazão et al (2016) desenvolveram um estudo utilizando concreto autoadensável com o objetivo de avaliar o comportamento de arrancamento das fibras em peças fissuradas e expostas ao ataque de íons  $Cl^-$ . Os resultados foram obtidos por meio de ensaios eletroquímicos, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e testes de arrancamento. Concluiu-se que, há alta probabilidade de corrosão das fibras de aço em ambiente clorídrico, e a corrosão existente nas amostras apresenta aspecto uniforme em todo o comprimento das fibras, sendo o principal produto de corrosão o Óxido de Ferro.

Além disso, conforme observado por Granju e Balouch (2005), a formação de produtos de corrosão aumenta quanto maior a abertura de fissura, sendo possível verificar o incremento da resistência ao arrancamento das fibras devido à maior rugosidade superficial proporcionada pela deposição de produtos de corrosão no entorno das fibras, melhorando assim, a ligação na interface fibra/matriz cimentícia (FRAZÃO et al, 2016).

Assim como a capacidade estrutural, outro fator importante principalmente em peças pré-fabricadas é a corrosão superficial, que em alguns casos pode comprometer o Estado Limite de Serviço (ELS) da estrutura, por conta do aparecimento de manchas que prejudicam esteticamente o uso da edificação. Devido a melhora relacionada, principalmente, a resistência à tração e ao desgaste superficial, o reforço com fibras de aço em compósitos cimentícios apresentou uma grande vantagem para o uso em pavimentos industriais, peças pré-fabricadas e concretos projetados. Entretanto, a impossibilidade de controle da disposição das fibras no interior da peça contribui para que elas se encontrem dispersas por toda a seção. Em virtude da impossibilidade de garantir a camada de cobertura em todas as fibras, o aparecimento de manchas de corrosão na superfície de elementos de concreto se constitui como uma desvantagem estética da aplicação do material (BALOUCH et al, 2010).

Nesse sentido, Balouch et al (2010) estudaram o surgimento de manchas de corrosão em peças de CRFA expostas a ciclos de molhagem e secagem em névoa salina, com o objetivo de verificar a relação entre o cobertura das fibras no interior do compósito e o aparecimento de pontos de corrosão na superfície do concreto. Além disso, estudou-se também a influência da relação água/cimento ( $a/c$ ) na cinética de corrosão das fibras e posterior surgimento de manchas superficiais na matriz cimentícia (BALOUCH et al, 2010).

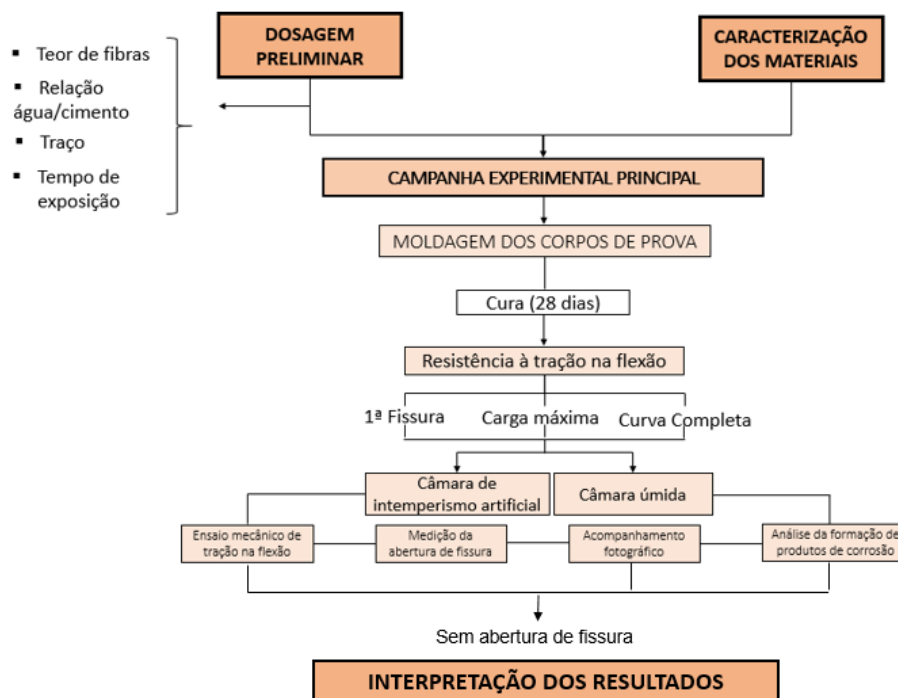
Os resultados obtidos demonstraram que relações  $a/c$  elevadas (0,78) tornam necessários cobrimentos maiores que 1 mm para que não haja surgimento de manchas na superfície do concreto. Em contrapartida, ao diminuir a relação  $a/c$  para valores usuais de até 0,50 constatou-se que fibras com cobertura de 0,1 e 0,2 mm não contribuíam para o surgimento de corrosão superficial no compósito, o que indica que a porosidade do CRFA exerce influência significativa na cinética da corrosão e, conseqüentemente, na durabilidade do concreto, corroborando com resultados de estudos citados

anteriormente (BERTOLINI et al, 2003; MEHTA & MONTEIRO, 2008; BANTHIA, 2009; BALOUCH et al, 2010; BERROCAL et al, 2013).

### 3 METODOLOGIA

Essa pesquisa foi estruturada com o intuito de analisar experimentalmente o comportamento resistente à tração na flexão de argamassas reforçadas com fibras de aço, após determinados períodos de exposição em ambientes com elevado teor de íons cloreto. Em suma, trata-se da verificação da resistência de carga máxima e do comportamento pós-pico dos corpos de prova submetidos à ciclos de exposição em câmara de intemperismo artificial. Para isso, utilizou-se ensaio mecânico de resistência à tração a flexão, e técnicas de acompanhamento fotográfico, que permitissem avaliar a formação, evolução e exsudação dos produtos de corrosão nas amostras. No fluxograma apresentado na Figura 6 estão dispostas resumidamente as etapas de desenvolvimento do trabalho.

FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.



FONTE: A Autora (2018).

Na Figura 6 está mostrada a sequência e o procedimento do trabalho, idealizado em torno da campanha experimental, que foi dividida em duas etapas principais. Primeiramente foi realizada a caracterização dos materiais (cimento, agregado miúdo, e fibra de aço). Em paralelo, desenvolveu-se a primeira etapa

da campanha experimental, denominada Dosagem Preliminar, necessária devido à falta de normativas nacionais que especifiquem a dosagem de fibras em argamassas reforçadas e, a partir da qual foi possível determinar o teor de fibras a ser utilizado, bem como o traço e relação água/cimento (a/c) a serem empregados no estudo. Seu desenvolvimento completo encontra-se descrito no item 3.2.

Com os resultados de caracterização dos materiais e dosagem preliminar, deu-se início à campanha experimental principal, na qual foi realizada a moldagem de 140 corpos de prova, os quais foram posteriormente submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão e ao processo de envelhecimento acelerado em câmara salina, tópicos que serão abordados detalhadamente no item 3.3.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1.1. Cimento

O aglomerante empregado nas dosagens, em todas as etapas da campanha experimental, foi o cimento Portland CII-F 32, passível de ser utilizado em argamassas armadas e, comumente empregado na região, além de não possuir adições que modificam o ganho de resistência do compósito nas primeiras idades. Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentadas, respectivamente, os resultados da caracterização química e física desse material, fornecidos pelo fabricante, respeitando os valores mínimos de resistência à compressão exigidos pela ABNT NBR 11578/1997.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP II F -32.

ENSAIOS QUÍMICOS									
Perda ao Fogo (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO Livre (%)	Equivalente Alcalino (%)	Resíduo Insolúvel (%)
5,01	4,18	18,52	2,97	61,05	3,34	2,73	0,76	0,71	1,35

FONTE: Cimentos Itambé (2018).

TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CP II F-32.

<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>					
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Exp. Quente (mm)	Início de Pega (h:min)	Fim de Pega (h:min)	Cons. Normal (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
3,08	0,50	3:56	4:45	26,7	3,305

<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>					
Retido na #200 (%)	Retido na #325 (%)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
2,28	11,79	14,9	28,6	34,2	41,5

FONTE: Cimentos Itambé (2018).

### 3.1.2. Agregado miúdo

O material utilizado como agregado miúdo neste estudo foi a areia artificial originada da britagem de agregados graúdos, provenientes da pedreira localizada em Mandirituba, região metropolitana de Curitiba. Na Tabela 3 estão apresentados os ensaios realizados para sua caracterização química e física, bem como as normas nas quais foram baseados os procedimentos e, os resultados obtidos. Nota-se que, por meio de ensaios físicos descritos na norma ABNT NBR 15577- 4:2018, verificou-se que o material não possui potencial reativo.

TABELA 3 – RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO.

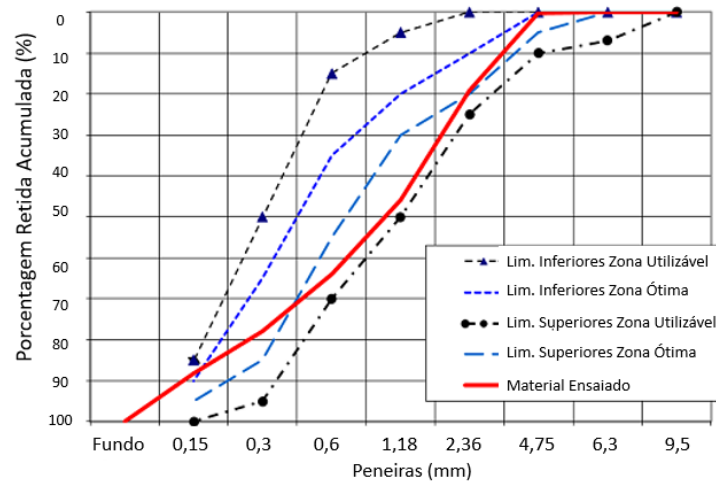
ENSAIO	METODOLOGIA	RESULTADOS
Absorção de água, %	ABNT NBR NM 30: 2001	0,3
Massa específica e massa aparente, g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR NM 52: 2009	2,60
Teor de argila em torrões e materiais friáveis, %	ABNT NBR 7218: 2010	0,40
Granulometria	ABNT NBR NM 248: 2003	-
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) e volume de vazios (%)	ABNT NBR NM 45: 2006	1570 / 39,1
Teor de impurezas orgânicas, ppm	ABNT NBR NM 49: 2001	< 300
Teor de sais, íons cloreto e sulfato solúvel, % em massa	ABNT NBR 9917: 2009	< 0,005
Teor de material pulverulento, %	ABNT NBR NM 46: 2003	7,4
Reatividade álcali-agregado, expansão em 30 dias, %	ABNT NBR 15577-4: 2018	0,1

FONTE: A Autora (2018).

Na FIGURA 7 é apresentada a curva granulométrica da areia, que se encontra dentro dos limites inferiores e superiores de utilização, sendo dessa forma, indicada para uso em misturas cimentícias (NBR NM 248/03).



FIGURA 7 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.



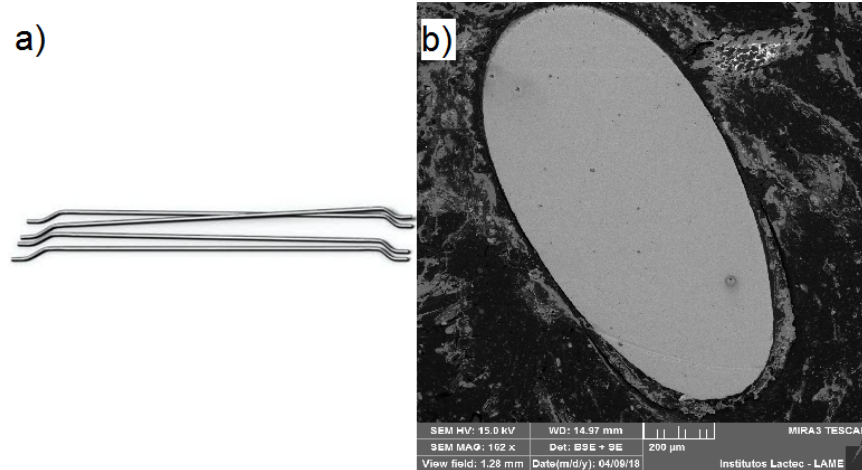
FONTE: A Autora (2018).

### 3.1.3. Fibras de aço

Na Figura 8-a está mostrada a fibra de aço utilizada na pesquisa, modelo DRAMIX 3D 45/30 BL, com ganchos nas extremidades. Na Tabela 4 apresentam-se as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

Para um maior reconhecimento das características do material, realizaram-se microanálises com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, tipo FEG (canhão de emissão de campo), modelo Mira3 LM, marca Tescan. Os resultados confirmaram a ausência de qualquer tratamento superficial na fibra e, não detectaram a presença de metais mais resistentes à corrosão, o que poderia aumentar sua durabilidade durante o processo de envelhecimento acelerado (Figura 8-b). Sendo assim, confirmou-se que a fibra é composta essencialmente por Ferro (Fe) e carbono (0,8%). Além disso, não foram encontrados indícios de realização de tratamento térmico no material, pois seus grãos apresentaram formatos angulosos e aspecto não uniforme.

FIGURA 8 – (a) FIBRA DE AÇO TIPO DRAMIX 3D 45/30 BL; (b) SEÇÃO TRANSVERSAL DA FIBRA EM ANÁLISE POR MEV.



FONTE: (a) Arcelor Mittal (2018); (b) A Autora (2018).

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DAS FIBRAS DE AÇO DO TIPO DRAMIX® 3D 45/30BL.

Característica	Unidade	Valor
Comprimento	[mm]	30
Diâmetro	[mm]	0,62
Fator de Forma	[-]	45
Resistência a Tração	[MPa]	1270
Módulo de Young	[Gpa]	210
Número de fibras por kg	[-]	13331

FONTE: Arcelor Mittal (2018).

### 3.1.4 Água

A água utilizada na fabricação dos corpos de prova foi proveniente da rede de abastecimento de Curitiba, oferecida pela empresa Sanepar e, encontra-se em conformidade com as exigências de qualidade e potabilidade estabelecidas pela Resolução 357/CONAMA e Portaria 2914 do Ministério da Saúde.

### 3.2 DOSAGEM PRELIMINAR

O manuseio de fibras pode se tornar oneroso dependendo das condições de moldagem dos corpos de prova, sendo em alguns casos, necessárias adaptações no preparo do compósito. Por se tratar de um material ainda pouco empregado nas misturas de concreto e argamassa no Brasil, realizou-se uma moldagem preliminar de corpos de prova com fibras de aço, denominada Dosagem Preliminar, na qual posteriormente foi embasada a campanha experimental principal. Os testes basearam-se nas Normas NBR 16541/2016 para o preparo da mistura e, NBR 13279/2005 para determinação da resistência à tração na flexão dos corpos de prova. Porém, adaptações foram realizadas conforme a necessidade.

Os objetivos da campanha preliminar foram:

- Adaptação ao manuseio e comportamento da fibra de aço nos processos de mistura e moldagem dos corpos de prova;
- Definição das porcentagens de fibras de aço para a etapa da campanha experimental principal;
- Definição do traço e relação água cimento (a/c) das misturas a serem fabricadas nas etapas da campanha experimental principal;
- Definição da duração dos ciclos de exposição em ambiente agressivo.

Sabendo-se que os resultados e as conclusões advindos da dosagem preliminar diriam respeito, em sua maior parte, ao manuseio e dosagem com fibras, amostras com traço referência, ou seja, sem fibras, não foram fabricadas nesta etapa. Dessa forma, foram moldadas apenas durante a campanha experimental principal, na qual mostraram-se fundamentais para a interpretação correta dos resultados, contribuindo para a diminuição de variáveis e maior controle do estudo.

Antes de dar início às dosagens, optou-se pela não utilização de aditivo superplastificante. Isso porque o estudo foi desenvolvido para que o compósito fosse fabricado apenas com os materiais essenciais de uma argamassa: cimento, agregado miúdo e água. Assim, os resultados obtidos diriam respeito à uma argamassa comum, sem aditivos que melhorassem seu comportamento no estado fresco ou endurecido. Além disso, o nível de dificuldade imposto pela adição da fibra no preparo da mistura seria totalmente perceptível, e a

quantidade de água adicionada para favorecer a trabalhabilidade seria maior, tornando a mistura mais suscetível à entrada de agentes agressivos no estado endurecido.

A escolha do traço e do teor de fibras do compósito baseou-se em três aspectos principais, que correspondem, de maneira geral, às etapas de desenvolvimento do estudo: fabricação, ensaio de tração da flexão e exposição em câmara salina.

Durante o estágio de fabricação, foi possível observar as dificuldades impostas pela adição das fibras nos processos de mistura e adensamento do material, e assim, descartar os traços mais onerosos que poderiam comprometer os resultados finais da pesquisa por problemas de homogeneização.

Durante o ensaio de tração na flexão, a disposição das fibras na seção transversal dos corpos de prova foi analisada, sendo possível descartar os traços nos quais a quantidade de fibras foi insatisfatória, não contribuindo significativamente no comportamento pós-pico das amostras.

Por fim, a câmara de névoa salina contribuiu para a definição das idades de exposição dos corpos de prova durante a campanha experimental principal, pois tornou possível verificar o tempo necessário para o aparecimento de manchas e produtos de corrosão em amostras fissuradas e completamente fletidas.

### 3.2.1 Procedimento

Com base nos estudos de Pessôa e Nepomuceno (2002) e, na pesquisa realizada por Pereira, Almeida e Monteiro (2012), verificou-se que o traço em massa das misturas poderia variar de 1:1 a aproximadamente 1:3, em cimento e areia. Partindo da premissa de que os caminhos preferenciais para a entrada de agentes agressivos seriam as fissuras provocadas pelo ensaio de tração na flexão dos corpos de prova, optou-se por adotar o traço mais rico, ou seja 1:1, no qual a mistura seria formada por grande quantidade de pasta, suficiente para promover o preenchimento dos vazios do agregado miúdo e assim, tornar o compósito menos permeável.

Foi adotada também, de acordo com a literatura, uma relação a/c inicial para a campanha preliminar. Os mesmos autores citados anteriormente (PEREIRA,

ALMEIDA & MONTEIRO, 2012), utilizaram em seu estudo relações a/c que variaram de 0,40 a 0,70 na produção de argamassa armada para medição de potencial de corrosão. Ferrari e Hanai (2009) adotaram relação a/c de 0,50 em misturas de compósitos cimentícios reforçados com microfibras de aço. Pessoa e Nepomuceno (2002) fabricaram corpos de prova com relação a/c de 0,60 para análise da corrosão de armadura em argamassas sujeitas à carbonatação.

Diante disso, definiu-se uma relação água/cimento de 0,40 para a dosagem preliminar, passível de mudança para mais ou menos de acordo com as condições de mistura no laboratório.

Inicialmente foram adotados teores de fibras de 1%, 1,5% e 2%, correspondentes ao volume total de argamassa, em misturas com traço 1:1 em massa e relação a/c de 0,40. O molde escolhido para a campanha foi o mesmo indicado pela Norma NBR 13279/2005 para fabricação de corpos de prova prismáticos de argamassa, com dimensões de (40x40x160) mm.

Os primeiros prismas fabricados continham 1% de fibra, e durante a mistura foi observada uma boa trabalhabilidade, porém, durante o processo de moldagem houve exsudação em excesso na mistura. Dessa forma, as condições de manuseio do compósito em laboratório fizeram com que mais Corpos de Prova (CPs) com diferentes traços fossem fabricados. Assim, optou-se por diminuir a relação a/c para 0,35, mantendo-se o traço 1:1 em massa e o teor de fibras em 1%. Após verificar que as condições de moldagem foram significativamente mais onerosas, em comparação com os corpos de prova de relação a/c 0,40, decidiu-se diminuir o teor de fibras para os prismas fabricados com relação de 0,35.

Dessa forma, foram fabricados cerca de 20 CPs na dosagem preliminar, separados em dois grupos, sendo 10 amostras com relação a/c de 0,40 e os outros 10 corpos de prova com relação a/c de 0,35, conforme apresentado na Tabela 5.

TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS NA DOSAGEM PRELIMINAR, DE ACORDO COM A RELAÇÃO A/C E TEOR DE FIBRAS.

<b>DOSAGEM PRELIMINAR</b>				
<b>Grupo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>a/c</b>	<b>Teor de fibras (%)</b>	<b>Nº de amostras</b>
<b>1</b>	A.75	0,4	0,75	2
	A.1	0,4	1,00	2
	A.1,5	0,4	1,50	3
	A.2	0,4	2,00	3
<b>2</b>	B.5	0,35	0,50	3
	B.75	0,35	0,75	3
	B.1	0,35	1,00	4

FONTE: A Autora (2018).

A nomenclatura se deu a partir da relação a/c e do teor de fibras que a amostra apresentava. Os corpos de prova com prefixo A foram moldados com relação a/c 0,40, enquanto os CPs de prefixo B com relação a/c de 0,35. Os numerais, por sua vez, correspondem à porcentagem de fibras adicionada em cada mistura.

Conforme explanado anteriormente, o processo de mistura foi baseado na norma NBR 16541/2016, porém, devido a incorporação das fibras de aço, adaptações foram necessárias. Primeiramente misturou-se manualmente o cimento e a areia. Em seguida, foi realizada a homogeneização por mais 10 segundos na argamassadeira em velocidade lenta. Após, a totalidade das fibras foi adicionada de maneira dispersa no recipiente, a fim de evitar o travamento do equipamento, e por mais 10 segundos foi realizada nova mistura. Ainda em velocidade lenta, a quantidade total de água foi adicionada e misturou-se por 30 segundos. A argamassadeira foi então desligada e, com o auxílio da espátula efetuou-se a homogeneização do material. Em seguida, o equipamento foi novamente ligado para o último período de mistura, de 60 segundos, em velocidade alta.

Os corpos de prova foram moldados em duas camadas, adensadas com

15 golpes cada, utilizando-se soquete metálico. Por fim, as amostras foram rasadas com régua metálica e cobertas com filme plástico, a fim de evitar retração por secagem. O desmolde foi realizado após 24 h e os CPs permaneceram em cura úmida durante 28 dias. Após este período foi realizado o ensaio de tração na flexão na prensa EMIC 23-100 linha DL modelo 10.000, com uma célula de carga máxima de 100 kN e 1 % de acurácia, sendo operada no modo de controle de carga, com velocidade de carga igual a  $(50 \pm 10)$  N/s. O ensaio foi parado quando o pistão alcançou um deslocamento igual a 10 mm.

As amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem em câmara de névoa salina modelo BASS USX-6000/2010-CÍCLICO. A exposição foi realizada após os corpos de prova serem totalmente fletidos na prensa. Dessa forma, diversas fibras de aço ficaram totalmente expostas ao ambiente externo, presas à amostra apenas pela sua ancoragem. No interior da câmara os CPs foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 24 h, das quais 8 h eram de molhagem por névoa salina com concentração de 5% de NaCl em temperatura de 40 °C, e 16 h de secagem a 25 °C. Dessa forma, um ciclo completo na câmara equivaleu a um dia de exposição.

### 3.2.2 Resultados e Conclusões Preliminares

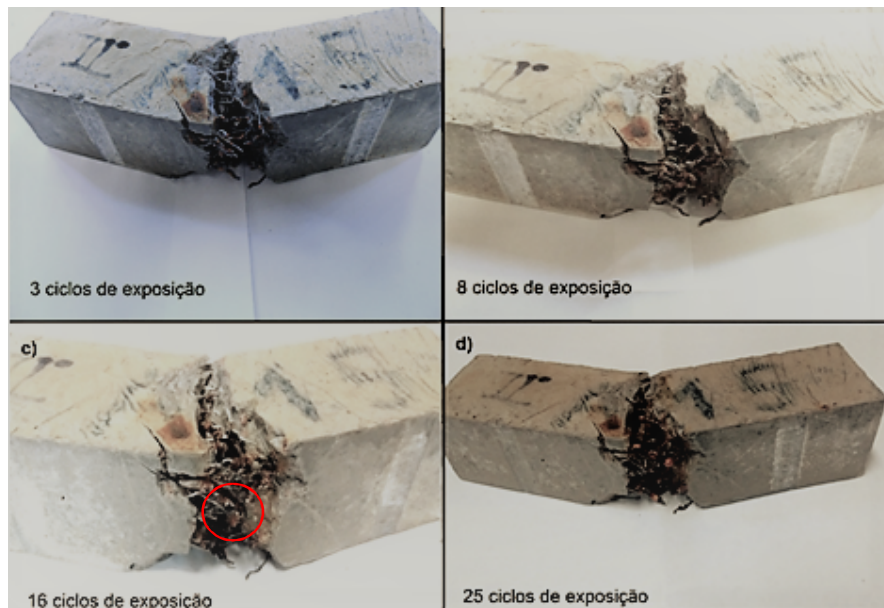
Objetivando a diminuição do número de variáveis no estudo, optou-se por não alterar a relação a/c nos traços para as etapas da campanha principal. Assim, os corpos de prova com relação a/c de 0,35 foram descartados. Isso porque o traço com incorporação de 1% de fibra apresentou grande dificuldade de homogeneização e moldagem, apontando que, misturas trabalháveis seriam fabricadas com pequenas quantidades de fibras, tornando-se alta a probabilidade de haver sua disposição no interior do compósito em direções que não beneficiassem o aumento da resistência à tração. Dessa forma, para a câmara de intemperismo artificial foram levadas apenas as amostras com relação a/c de 0,40.

Durante a mistura e moldagem dos corpos de prova foi possível observar que o traço com 2% de fibras apresentou pouca trabalhabilidade, possivelmente, por se tratar do teor máximo empregado de acordo com a literatura (BERROCAL et al, 2015). Além disso, a mistura na argamassadeira foi travada diversas vezes,

devido à formação de aglomerados de fibras que impediam a rotação da pá, comprometendo o tempo de mistura, fixado em 1 minuto e 50 segundos. Por esse motivo, o teor de 2% foi descartado para as etapas da campanha principal, visto que a mistura onerosa poderia comprometer as condições de moldagem e adensamento, culminando em resultados insatisfatórios ao longo do estudo.

No teste de tração na flexão realizado na prensa, as três amostras com 1,5% de fibras apresentaram curvas semelhantes e com elevadas resistências. Notou-se também que o processo de fabricação foi mais facilitado, em comparação às argamassas com 2% de fibras. Assim, após a ruptura de todas as amostras, o compósito com o teor de 1,5% de fibras e relação a/c de 0,40 foi escolhido como o traço de estudo para as etapas da campanha principal. Esses corpos de prova foram expostos em câmara de névoa salina, e o acompanhamento fotográfico do aparecimento e evolução de manchas e produtos de corrosão foi realizado, como mostrado na Figura 9.

FIGURA 9 - CP DE ARGAMASSA COM FIBRAS APÓS CICLOS DE EXPOSIÇÃO.



FONTE: A Autora (2018).

De acordo com o apresentado na FIGURA 9-a, foi possível verificar o início da formação de manchas de corrosão na argamassa e deposição de produtos de corrosão nas fibras de aço. A evolução do processo corrosivo é notada na

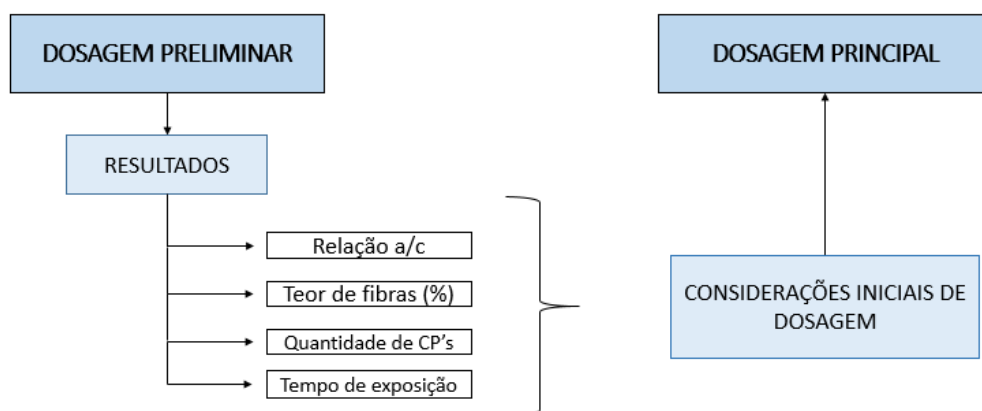


FIGURA 9-b. Com 8 ciclos de exposição as fibras mais expostas já apresentavam perda de seção resistente. Após 16 ciclos de exposição (FIGURA 9-c), foi possível verificar o aumento de manchas na parte interna da argamassa, além de grande quantidade de produto de corrosão nas extremidades das fibras, como circulado em vermelho na imagem. Após avaliar a evolução do processo de corrosão durante 25 ciclos (FIGURA 9-d), período no qual as fibras apresentaram alto nível de degradação, definiu-se a idade mínima de 28 ciclos (672 horas) de exposição para a etapa da campanha experimental principal. As idades posteriores adotadas são múltiplas da primeira, acrescidas de 28 ciclos, sendo elas 56, 112 e 224 ciclos de exposição.

### 3.3 CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL

Após a finalização da dosagem preliminar e análise de seus resultados, foi possível dar início à campanha experimental principal. Na FIGURA 10 está apresentado o fluxograma dos resultados requeridos ao fim da campanha preliminar. Posteriormente, essas informações embasaram a fabricação dos corpos de prova das etapas constituintes da campanha principal, e estão elencadas de forma resumida na Tabela 6.

FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DAS CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA A DOSAGEM DA CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL.



FONTE: A Autora (2018).

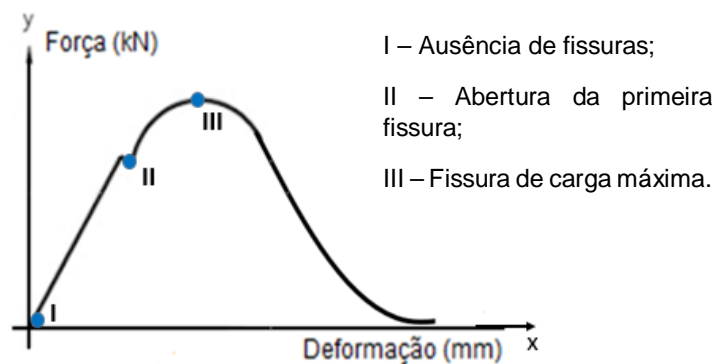
TABELA 6 - RESUMO DAS CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE DOSAGEM DA CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE DOSAGEM	
Relação água/cimento (a/c)	0,40
Traço (cimento:areia)	1:1
Teor de fibras (%)	1,5
Quantidade de CPs	9 por ponto de análise
Tempo de exposição	28, 56, 112 e 224 ciclos

FONTE: A Autora (2018).

A partir do objetivo geral do trabalho, foram definidos três pontos de interesse para a análise da influência dos íons cloreto na resistência à tração do compósito, sendo eles, a ausência de fissuras, a abertura de primeira fissura e a fissura de carga máxima, conforme mostrado na FIGURA 11. Para a caracterização total do processo corrosivo das fibras de aço estipularam-se 4 idades de exposição, múltiplas de 28 ciclos, sendo elas, 28, 56, 112 e 224 ciclos de exposição.

FIGURA 11 - PONTOS DE INTERESSE DA CURVA DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO COMPOSITO.



FONTE: Adaptado de CQ-Marcio Vicente (2015).

Durante a realização da dosagem preliminar optou-se por um número de 3 amostras por teor de fibras, visto que o objetivo era estabelecer as condições iniciais de dosagem. Para a campanha experimental principal, adotou-se uma

quantidade três vezes maior, ou seja, ao invés de 3 CPs foram fabricados 9 corpos de prova por ponto, para cada idade. Isso, devido a impossibilidade de controlar a disposição das fibras no interior do compósito, e a consequente variabilidade da resistência à tração obtida nos ensaios mecânicos. Essa variação na disposição do material dentro da mistura é uma característica intrínseca às fibras de aço, conforme demonstrado em estudos anteriores (CAVALARO & AGUADO, 2015).

A campanha experimental principal objetivou a moldagem e caracterização do processo corrosivo e análise do comportamento mecânico dos compósitos após os períodos de exposição de 28, 56, 112 e 224 ciclos. Visou também a fabricação de argamassas sem fibras, para referenciar o processo de moldagem. Os procedimentos de fabricação, ensaio em prensa e análise dos resultados foram padronizados durante toda a campanha.

Primeiramente os corpos de prova produzidos foram caracterizados quanto a sua resistência à tração na flexão na mesma prensa utilizada na dosagem preliminar, de acordo com a NBR 13279/05, objetivando a avaliação da estabilidade e desempenho pós-fissuração do compósito.

Para isso, as amostras foram divididas em 12 grupos, conforme apresentado na Tabela 7. Os CPs pertencentes ao primeiro grupo foram caracterizados quanto a sua resistência à tração na flexão e seu comportamento pós-pico aos 28 dias sem exposição, sendo desta forma o grupo referência (REF). Em seguida, foi realizado o ensaio dos grupos D, E, F e G para a abertura da primeira fissura. Esse patamar é caracterizado pelo fim da resistência à tração da argamassa e início da atuação da fibra, que impede a ruptura completa do compósito. Após, os grupos H, I, J e K foram submetidos ao mesmo procedimento, porém, para a obtenção de fissuras de carga máxima.

Estudos convergem para a existência de uma abertura de fissura crítica, em torno de 0,2 mm, até onde a corrosão da fibra é limitada e a integridade estrutural do CRFA pode ser assegurada mesmo em exposições prolongadas (NORDSTRÖM, 2005; TREN et al, 2015). Diante disso, nenhuma das fissuras resultantes da flexão das amostras foi menor que 0,2 mm. A dimensão das aberturas variou de 0,2 a 0,5 mm em CPs com abertura de primeira fissura e, de 0,6 a 1,3 mm para fissuras carga máxima. Os valores encontram-se tabelados para consulta no Apêndice 1 deste estudo. As aberturas foram medidas com o

auxílio de lupa com iluminação, escala e ajuste, da marca CELCO, com ampliação de 8x.

TABELA 7 - DIVISÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ACORDO COM O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.

Grupo	Quantidade de CPs	Sequência de ensaios		
		I	II	III
REF	22	Ensaio de tração na flexão completo		
A	9	Sem fissura	28 ciclos de exposição	Ensaio de tração na flexão completo
B	9	Sem fissura	56 ciclos de exposição	Ensaio de tração na flexão completo
C	9	Sem fissura	112 ciclos de exposição	Ensaio de tração na flexão completo
D	9	Ensaio de tração na flexão até a primeira fissura	28 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
E	9	Ensaio de tração na flexão até a primeira fissura	56 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
F	9	Ensaio de tração na flexão até a primeira fissura	112 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
G	8	Ensaio de tração na flexão até a primeira fissura	224 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
H	9	Ensaio de tração na flexão até a carga máxima	28 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
I	9	Ensaio de tração na flexão até a carga máxima	56 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
J	9	Ensaio de tração na flexão até a carga máxima	112 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão
K	8	Ensaio de tração na flexão até a carga máxima	224 ciclos de exposição	Continuação do ensaio de tração na flexão

FONTE: A Autora (2018).

As amostras dos grupos A, B e C foram submetidas primeiramente à

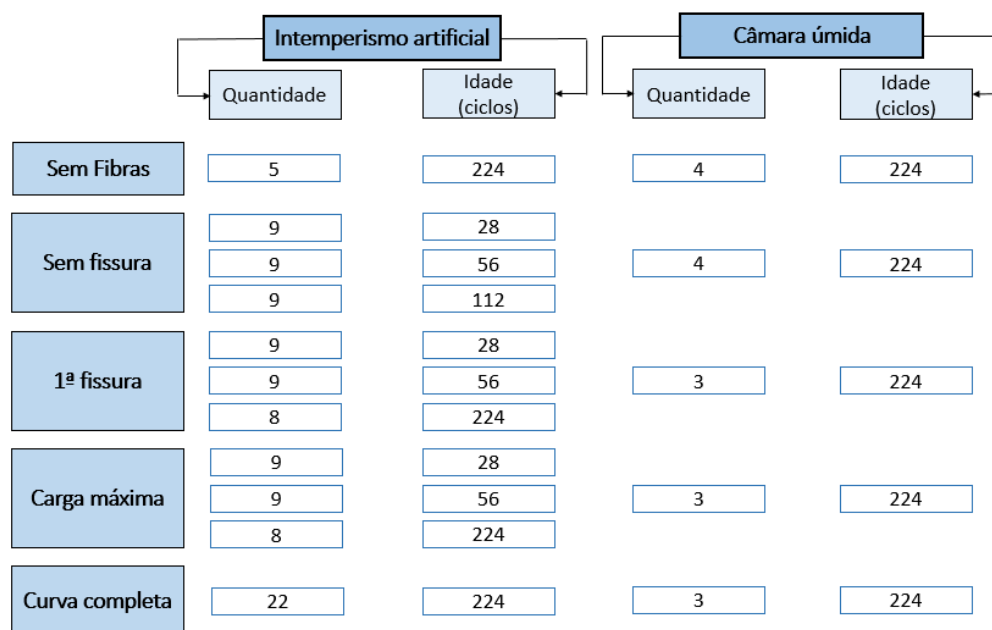
câmara de névoa salina, e somente após o fim das idades de exposição os corpos de prova foram levados à ruptura completa no ensaio de tração na flexão, com o objetivo de analisar a ocorrência de manchas superficiais ou de produtos de corrosão nas fibras em amostras não fissuradas.

### 3.3.1 Exposição em câmara de intemperismo artificial

Posteriormente, os corpos de prova pertencentes à campanha principal foram divididos em dois grupos para exposição em câmara úmida e em câmara de intemperismo artificial, conforme apresentado na FIGURA 12.

Foram escolhidas três amostras de cada abertura de fissura e quatro corpos de prova sem fibras para exposição em câmara úmida, com Umidade Relativa (U.R.) maior que 95% e temperatura de 22 °C (ABNT NBR 9479:2006). O objetivo dessa exposição é a comparação da estabilidade e comportamento pós-pico das amostras expostas nas duas câmaras, ao final das etapas da campanha principal. A câmara de envelhecimento utilizada foi a mesma já citada na campanha preliminar.

FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DA DIVISÃO DOS CORPOS DE PROVA DA CAMPANHA EXPERIMENTAL PRINCIPAL EM CÂMARA DE INTEMPERISMO ARTIFICIAL E CÂMARA ÚMIDA.



FONTE: A Autora (2018).

### 3.3.3 Área superficial de manchas de corrosão em diferentes idades

O aparecimento de manchas de corrosão na superfície de elementos de concreto se constitui como uma desvantagem estética da aplicação do material, conforme ilustrado na FIGURA 13, onde estão circulos pontos de corrosão de fibras. Tais manchas prejudicam o acabamento superficial dos elementos, podendo gerar desconforto aos usuários e, em um caso extremo, conduzir ao Estado Limite de Serviço (ELS).

FIGURA 13 - LAJE ARMADA COM FIBRAS DE AÇO.



FONTE: Acervo fotográfico da autora (2018).

Sendo assim, foi realizado o acompanhamento fotográfico do aparecimento e aumento de manchas de corrosão superficial nos corpos de prova pertencentes à campanha experimental principal, objetivando correlacionar a existência de maiores manchas em amostras com maiores fissuras. O procedimento adotado foi simplificado, e visando a melhor comparação entre as idades de exposição, as amostras foram fotografadas a partir de uma mesma distância e no mesmo ambiente, a fim de minimizar os efeitos da diferença de luminosidade nas fotos. Deve-se ressaltar que o traço de argamassa utilizado neste estudo reduz a probabilidade do surgimento de manchas de corrosão superficial por ser rico e resultar em uma argamassa pouco porosa.

### 3.3.4 Verificação da formação de produtos de corrosão por método visual

Os produtos de corrosão formados e exsudados durante os ciclos de exposição em câmara salina foram analisados qualitativamente por meio de câmera de alta resolução, com lente de vídeo e zoom manual com ampliação de 50-400X da marca Technoorg Linda modelo SEMPRep. A ocorrência da perda de seção das fibras expostas também foi verificada, juntamente com o aparecimento e evolução de manchas de corrosão na argamassa, além do aspecto geral da área exposta e do produto formado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova produzidos durante a campanha experimental foram submetidos ao ensaio de tração na flexão em diferentes idades e, antes ou após determinados períodos de exposição em câmara de névoa salina ou câmara úmida. Em paralelo, desenvolveu-se a análise do aparecimento e crescimento de manchas e corrosão, objetivando avaliar de modos quantitativo e qualitativo a cinética de corrosão das fibras de aço.

### 4.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

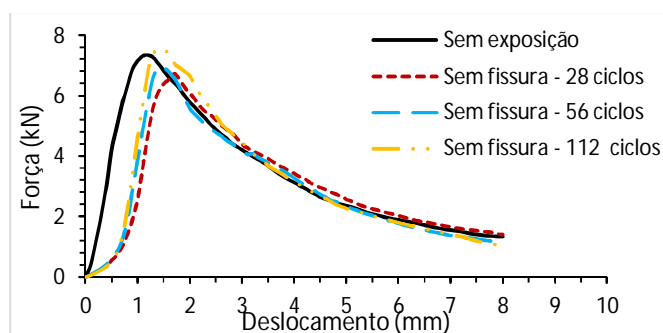
As amostras de argamassa reforçada com fibras foram separadas em três diferentes grupos, conforme já detalhado no item 3.3. Todos eles foram submetidos ao ensaio de tração na flexão após os períodos de exposição, e posteriormente analisaram-se os resultados em comparação às amostras fletidas sem exposição alguma (REF).

Os corpos de prova sem abertura de fissura, separados nos grupos A, B e C de acordo com as idades de exposição (28, 56 e 112 ciclos, respectivamente), foram submetidos ao ensaio de tração na flexão ao fim dos períodos de exposição e, de modo geral, apresentaram comportamento semelhante à curva de referência, como é mostrado na FIGURA 14.

Por conta da dificuldade em assegurar a orientação das fibras numa direção preferencial durante a moldagem, consequência inerente ao uso de fibras, observou-se um alto desvio-padrão na carga de pico em todas as curvas analisadas. Esse fato impossibilitou a análise da influência da corrosão na carga máxima de tração na flexão do compósito, uma vez que todas as curvas analisadas são curvas médias, geradas a partir de nove corpos de prova em cada idade, para cada ponto de interesse. Assim, realizou-se a análise no ramo pós-pico. Para isso, foram unitarizadas as cargas máximas de cada curva, e o deslocamento foi contabilizado a partir da carga de pico. Esse refino possibilitou a análise mais detalhada do ramo pós-pico das curvas de tração na flexão, como mostrado na FIGURA 15, onde foram observadas resistências muito próximas às aquelas apresentadas pelas amostras sem nenhum tipo de exposição.

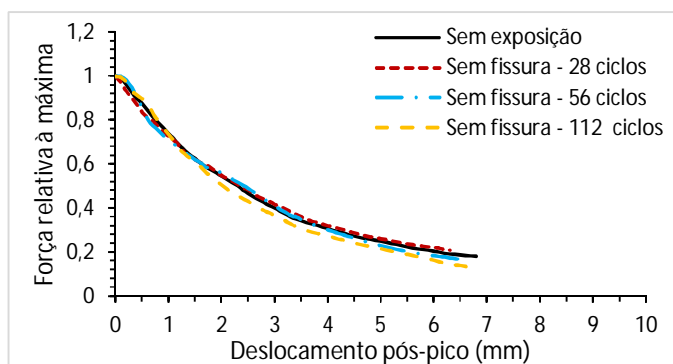


FIGURA 14 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA SEM FISSURA.



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 15 - ANÁLISE UNITÁRIA DA RESISTÊNCIA PÓS-PICO DOS CORPOS DE PROVA DE SEM FISSURA.



FONTE: A Autora (2018).

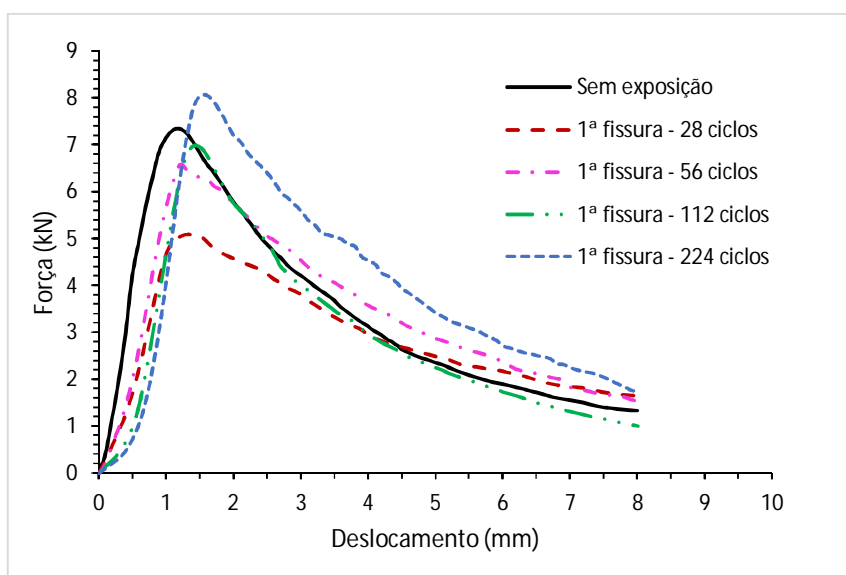
Os resultados apresentados indicam que não há influência do ambiente salino no incremento da resistência pós pico das amostras sem que haja caminhos preferenciais para a entrada dos íons  $\text{Cl}^-$ . Ou seja, é necessária a existência de porosidade elevada ou fissuras na matriz cimentícia, que promovam a entrada dos agentes deletérios e, conseqüentemente, causem a formação de produtos de corrosão nas fibras de aço. Dessa forma, poderia haver maior probabilidade do aumento da rugosidade da fibra e incremento da resistência pós pico das amostras em estudo. Essa hipótese poderá ser verificada nos resultados descritos mais adiante.

Os grupos D, E, F e G correspondentes aos corpos de prova submetidos à abertura de 1ª fissura nas idades de 28, 56, 112 e 224 ciclos, respectivamente, obtiveram, de modo geral, comportamento de melhoramento da resistência, conforme apresentado na FIGURA 16. De acordo com as curvas resultantes no

ensaio para cada idade de exposição, foi possível notar um aumento progressivo da resistência de pico das amostras à medida que se ampliou o tempo de exposição em câmara salina.

Ao analisar o ramo pós-pico, mostrado na FIGURA 17, observou-se igualmente o comportamento de melhora da resistência à tração, em comparação à curva de referência, até a idade de 56 ciclos de exposição. O comportamento de melhora da resistência à tração na flexão foi observado também em estudos anteriores (GRANJU & BALOUCH, 2005; MESON et al, 2016; FRAZÃO et al, 2016).

FIGURA 16 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À ABERTURA DE 1ª FISSURA.

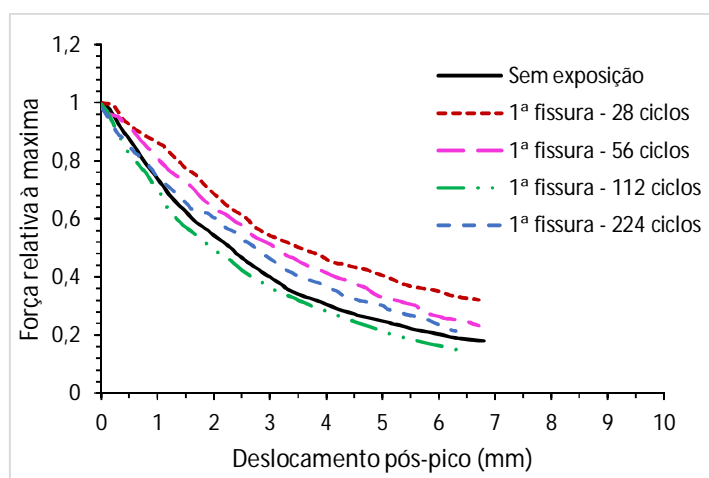


FONTE: A Autora (2018).

De modo geral, o produto de corrosão formado durante os ciclos de exposição e depositado no entorno das fibras, auxiliou no incremento da resistência ao arrancamento das fibras de aço. Com isso, é necessária maior força para a ruptura da interface fibra-matriz e, conseqüentemente, do corpo de prova. No entanto, a tendência é que essa resistência diminua conforme ocorra a perda de seção resistente da fibra, o que pode ser sugerido pelas curvas de 112 e 224 ciclos de exposição na FIGURA 16, na qual já se demonstra, por parte das últimas idades, comportamento menos resistente que as idades de 28 e 56 ciclos.

Na FIGURA 17 esse decaimento foi melhor demonstrado, uma vez que, a partir da idade de 112 ciclos notou-se a tendência de decréscimo da resistência pós-pico e uma leve diminuição em relação às demais, com comportamento semelhante à curva de referência. A diminuição do comportamento resistente em comparação às primeiras idades também foi observada nas amostras com tempo de exposição de 224 ciclos. Dessa forma, é possível que, exista uma idade de saturação da camada resistente fornecida pelos produtos de corrosão e, que esta seja próxima ao período de 112 ciclos. Isso pode indicar o início do processo de perda de resistência das fibras em detrimento do ganho de ancoragem antes fornecido pelos produtos de corrosão.

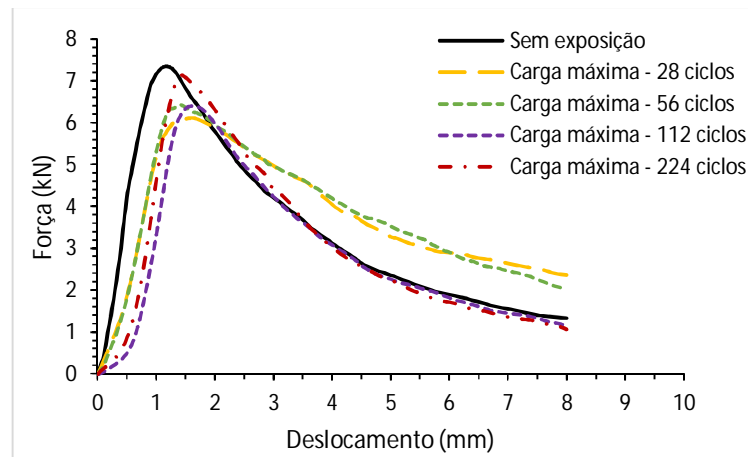
FIGURA 17 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS PICO PARA OS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À ABERTURA DE 1ª FISSURA.



FONTE: A Autora (2018).

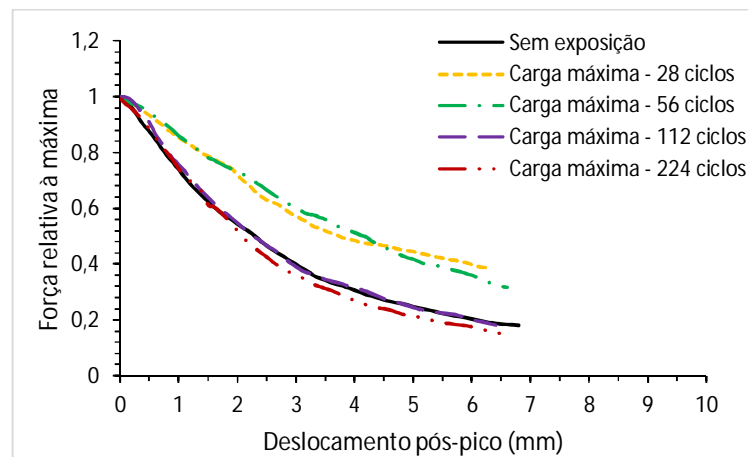
Os grupos H, I, J e K foram compostos pelos corpos de prova submetidos à abertura de fissura de carga máxima e, posteriormente, expostos aos ciclos de névoa salina em câmara de intemperismo artificial. As curvas são mostradas na FIGURA 18 e na FIGURA 19 e, confirmam a hipótese levantada durante a discussão de resultados das amostras de abertura de primeira fissura: há a ocorrência da saturação da camada de resistência a partir da idade de 112 ciclos de exposição.

FIGURA 18 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA.



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 19 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS-PICO PARA OS CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA.



FONTE: A Autora (2018).

O comportamento anteriormente observado nas curvas de tração na flexão para amostras com abertura de primeira fissura é mais evidente nos corpos de prova com fissura de carga máxima. Houve o incremento da resistência pós pico devido à maior rugosidade proporcionada pela adesão dos produtos de corrosão no entorno das fibras de aço. Entretanto, esse comportamento foi observado apenas nas duas primeiras idades.

As curvas das amostras expostas por 112 e 224 ciclos mostraram a redução desse aumento de resistência e obtiveram comportamento semelhante à curva sem exposição. Isso pode indicar, possivelmente que, a quantidade de

produto de corrosão formado nessas idades já é suficiente para provocar a diminuição da seção resistente das fibras de aço, e esse comportamento é mais significativo para a resistência pós-pico do que a maior rugosidade proporcionada pela formação do Óxido de Ferro (FeO).

Ao se comparar os três pontos de interesse (sem fissura, abertura de primeira fissura e carga máxima) é possível notar a interferência da ausência de fissuras no comportamento de melhoramento pós-pico da resistência à tração na flexão. Sem elas, independentemente do tempo de exposição em ambiente agressivo, o comportamento obtido é semelhante ao observado pelas amostras sem exposição.

Além disso, verificou-se a influência do tamanho de fissura na visualização do comportamento pós-pico das amostras. Isso porque, fissuras com menores aberturas, como as de primeira fissura, possuem maior dispersão nos resultados, dificultando a clareza do comportamento de acordo com cada idade de exposição. A existência de uma abertura de fissura mínima e, a relação entre esta e a cinética de corrosão das fibras de aço já foi objeto de estudo em pesquisas anteriores (GRANJU & BALOUCH, 2005; MESON et al, 2016).

Para fissuras com aberturas maiores, como as de carga máxima, o comportamento tornou-se mais claro, deixando evidente a existência de um ponto de saturação da camada resistente. Isso pode ser explicado justamente pelo fato de que com aberturas maiores, há mais área de fibra exposta e conseqüentemente maior deposição de produtos de corrosão em seu entorno.

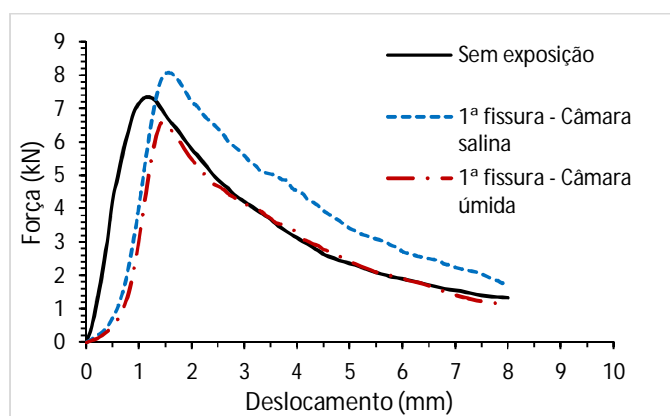
Todavia, notou-se também que, a largura da fissura não influi diretamente no comportamento pós-pico, já que foram observados comportamentos semelhantes para as mesmas idades em relação às amostras com abertura de primeira fissura e fissura de carga máxima. Isso porque nesses dois pontos de interesse, houve melhoria da resistência após o pico nas duas primeiras idades de exposição. O decaimento a partir do 112º ciclo também foi observado nos dois casos, porém, com maior evidência para a fissura de carga máxima.

Em relação à resistência de pico, a análise precisa dos valores foi impossibilitada, devido justamente à variabilidade na disposição das fibras de aço no interior dos corpos de prova. Isso culminou em um desvio-padrão significativo para a curva média de cada grupo de amostras. Contudo, os valores

de carga de pico e desvio-padrão obtidos estão apresentados para consulta no Apêndice 2 deste estudo.

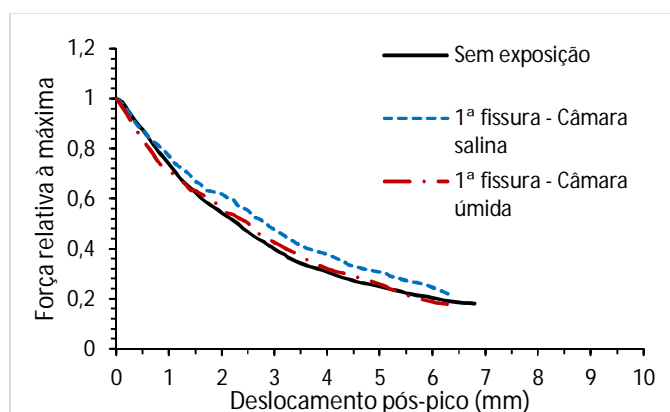
No que se refere aos comportamentos em câmara de névoa salina e em câmara úmida, não foi possível observar diferença significativa no comportamento de resistência à tração na flexão para a idade de 224 ciclos de exposição, conforme apresentado na FIGURA 20 e na FIGURA 21, para abertura de primeira fissura.

FIGURA 20 - EXPOSIÇÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS EM CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE 1ª FISSURA.



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 21 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS PICO PARA OS CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE 1ª FISSURA EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS.



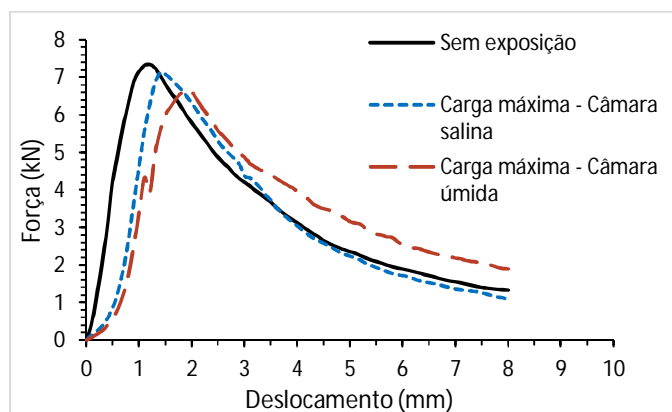
FONTE: A Autora (2018).

É possível notar que o comportamento pós pico foi semelhante àquele apresentado pelos corpos de prova sem exposição. Isso corrobora com os

resultados já apresentados e, com a hipótese de que a partir dos 112 ciclos de exposição não há incremento significativo da resistência pós pico devido ao aumento da rugosidade das fibras de aço, proporcionado pela formação de produtos de corrosão.

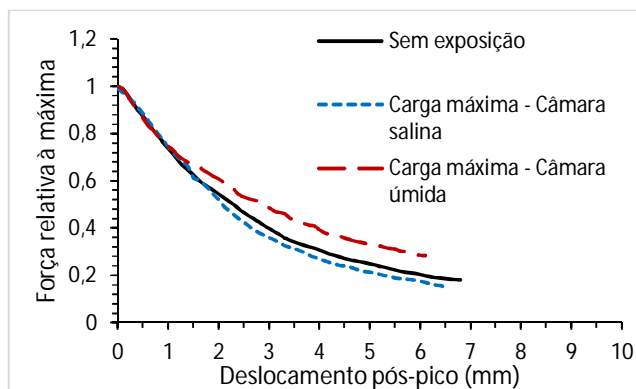
Para os corpos de prova com fissura de carga máxima o comportamento foi semelhante, como é mostrado na FIGURA 22 e na FIGURA 23.

FIGURA 22 - EXPOSIÇÃO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS EM CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA.



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 23 - GRÁFICO UNITÁRIO DA RESISTÊNCIA PÓS-PICO PARA OS CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA E CÂMARA ÚMIDA POR 224 CICLOS.



FONTE: A Autora (2018).

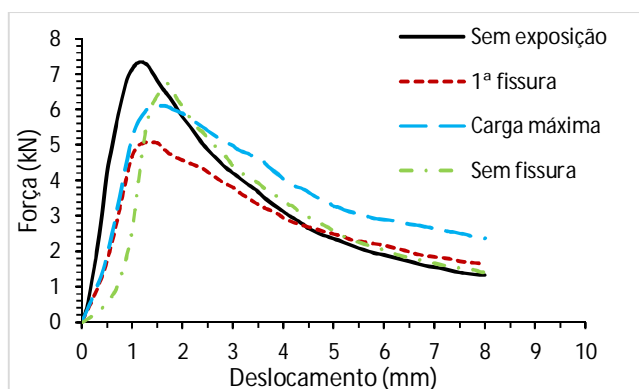
Assim como para as amostras com abertura de primeira fissura, não houveram diferenças significativas no comportamento pós-pico em relação à curva de referência. Isso pode ser explicado novamente pela hipótese de que o período de saturação da camada resistente imposta pelos produtos de corrosão

encontra-se próximo aos 112 ciclos. A partir disso, o comportamento de perda de seção transversal da fibra devido à corrosão é mais significativo do que o aumento da rugosidade entre a fibra e a matriz cimentícia.

Além disso, o incremento de resistência verificado aos 224 ciclos de exposição em câmara úmida sinaliza a ocorrência de corrosão neste ambiente, onde há disponibilidade de oxigênio e umidade. Entretanto, quando compara-se à curva de 224 ciclos em câmara de névoa salina, observa-se que este último é o ambiente onde o processo corrosivo ocorre de maneira mais severa, possivelmente pela presença dos íons cloreto, uma vez que, na câmara salina não há mais incremento de resistência pelo aumento da rugosidade aos 224 ciclos de exposição. Dessa forma, verificou-se que a cinética de corrosão na câmara úmida foi mais lenta, quando comparada à exposição em câmara de névoa salina. Ou seja, para que houvesse prejuízo à resistência pós-pico do compósito exposto em câmara úmida, seria necessário maior tempo de exposição.

A fim de verificar a hipótese de que há a saturação da camada de corrosão após, aproximadamente, 112 ciclos, fez-se a comparação dos comportamentos de cada ponto de interesse para as idades de 28, 56 e 112 ciclos de exposição. Os resultados obtidos para os 28 ciclos estão apresentados na FIGURA 24 e na FIGURA 25 e, corroboram com os demais já apresentados anteriormente.

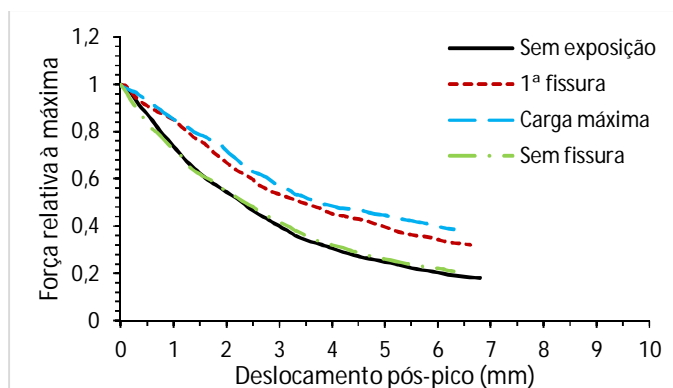
FIGURA 24 - CURVAS DE EXPOSIÇÃO AOS 28 DIAS PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE.



FONTE: A Autora (2018).



FIGURA 25 - GRÁFICO UNITÁRIO DO RAMO PÓS PICO PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE, AOS 28 DIAS DE EXPOSIÇÃO.

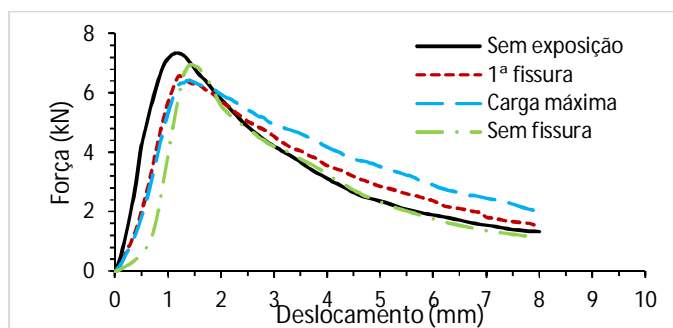


FONTE: A Autora (2018).

A partir da análise das curvas para os 28 dias, observou-se a ocorrência do incremento de resistência em corpos de prova com abertura de primeira fissura e abertura de fissura de carga máxima. Conforme já havia sido evidenciado em análises anteriores, o comportamento das amostras sem fissura foi semelhante àquela observado nos corpos de prova de referência.

As curvas para os 56 dias são mostradas na FIGURA 26 e na FIGURA 27. Nelas, fica evidenciada a diferença de comportamento antes e após o 112º ciclo para os corpos de prova fissurados.

FIGURA 26 - CURVAS DE EXPOSIÇÃO AOS 56 DIAS PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE.

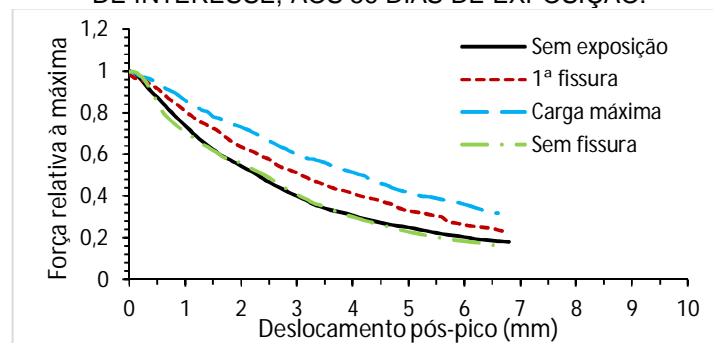


FONTE: A Autora (2018).

De acordo com a FIGURA 26, novamente, notou-se o comportamento de incremento da resistência pós-pico para os corpos de prova com abertura de primeira fissura e fissura de carga máxima, sendo o aumento mais pronunciado nesse último, como mostrado com maior ênfase na FIGURA 27.

Isso pode ser explicado pela maior área de fibra exposta à ação dos íons  $Cl^-$  em larguras de fissuras maiores, o que contribui para deposição de maior quantidade de produto de corrosão e, conseqüentemente para o aumento da rugosidade na interface entre fibra e matriz cimentícia. Além disso, corroborando com os demais resultados já apresentados, não houveram mudanças no comportamento das amostras sem fissura quando se realizou a comparação com àquelas sem exposição.

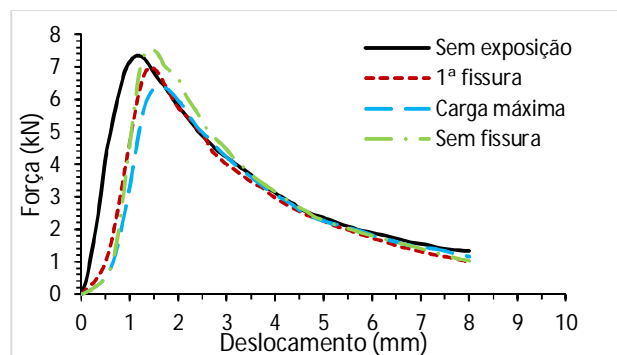
FIGURA 27 - GRÁFICO UNITÁRIO DO RAMO PÓS PICO PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE, AOS 56 DIAS DE EXPOSIÇÃO.



FONTE: A Autora (2018).

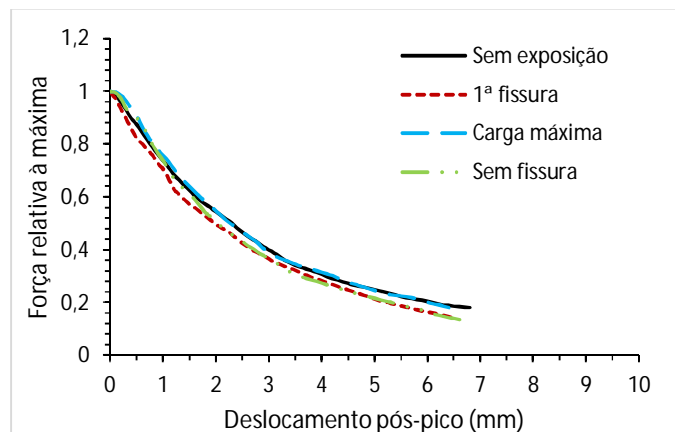
Na FIGURA 28 e na FIGURA 29 são mostradas as curvas para a idade de 112 ciclos de exposição. Verificou-se que houve decréscimo na resistência pós pico para amostras de primeira fissura e de carga máxima, que por sua vez, em menores idades haviam demonstrado aumento da resistência à tração na flexão em comparação à curva de referência. O comportamento das amostras sem fissuração não se alterou em relação ao já observado em resultados anteriores.

FIGURA 28 - CURVAS DE EXPOSIÇÃO AOS 112 DIAS PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE.



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 29 - GRÁFICO UNITÁRIO DO RAMO PÓS PICO PARA OS TRÊS PONTOS DE INTERESSE, AOS 112 DIAS DE EXPOSIÇÃO.



FONTE: A Autora (2018).

De acordo com a FIGURA 29, observou-se que, para os corpos de prova fissurados, independentemente do tamanho de abertura de fissura, ocorreu a saturação da camada resistente, essa por sua vez proporcionada pelo aumento da rugosidade na interface entre as fibras de aço e a matriz cimentícia.

Esse resultado corrobora com os demais e reafirma a hipótese de que, a partir de uma idade próxima ao 112º ciclo, a perda de resistência ocasionada pela corrosão é mais significativa para o comportamento pós pico do compósito do que a maior resistência de aderência promovida pelo aumento da rugosidade.

## 4.2 ÁREA SUPERFICIAL DE MANCHAS DE CORROSÃO

Em paralelo ao ensaio de resistência à tração na flexão, foi realizado o acompanhamento fotográfico do aparecimento e crescimento de manchas de corrosão nas faces nos corpos de prova, devido à presença de fibras de aço na superfície das amostras ou em regiões próximas à abertura de fissura.

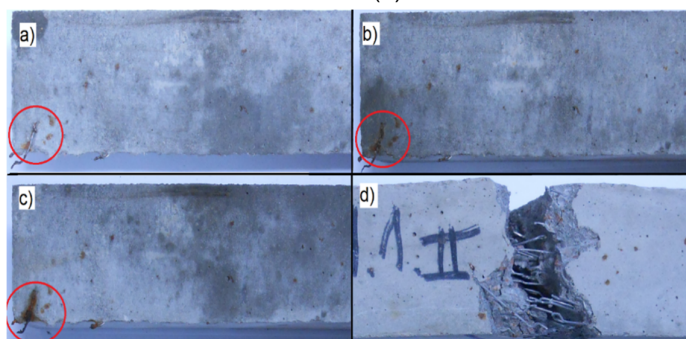
### 4.2.1 Corpos de prova sem fissura

Nos corpos de prova que não foram submetidos à fissuração antes dos períodos de exposição observou-se que, até a idade de 28 ciclos de exposição haviam apenas pequenas manchas decorrentes da presença de fibras de aço na

superfície da extremidade da amostra, como mostrado na FIGURA 30. Isso pode ser explicado pela ausência de fissuras que permitam maior contato dos agentes deletérios com as fibras, o que poderia aumentar o aparecimento de manchas.

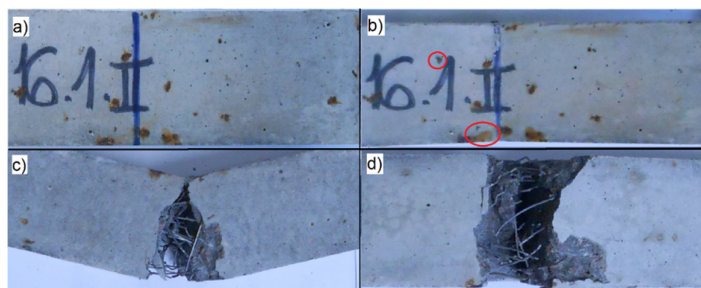
Diante disso, o acompanhamento fotográfico foi realizado posteriormente somente para a idade de 112 ciclos de exposição, conforme mostrado na FIGURA 30.

FIGURA 30 -CORPOS DE PROVA SEM FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 28 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 28 DIAS (d)



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 31 - CORPOS DE PROVA SEM FISSURA APÓS 112 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); FACE I APÓS A RUPTURA AOS 112 DIAS (b); FACE II APÓS A RUPTURA AOS 112 DIAS (c); FACE III APÓS A RUPTURA AOS 112 DIAS (d).



FONTE: A Autora (2018).

Ao analisar a FIGURA 30, verificou-se que para as idades de 8, 16 e 28 ciclos de exposição não houveram indícios do aparecimento de manchas de corrosão nos corpos de prova. O óxido se formou apenas na área circulada em vermelho na imagem, onde é possível se observar um aumento progressivo da deposição do produto de corrosão ao longo das idades.

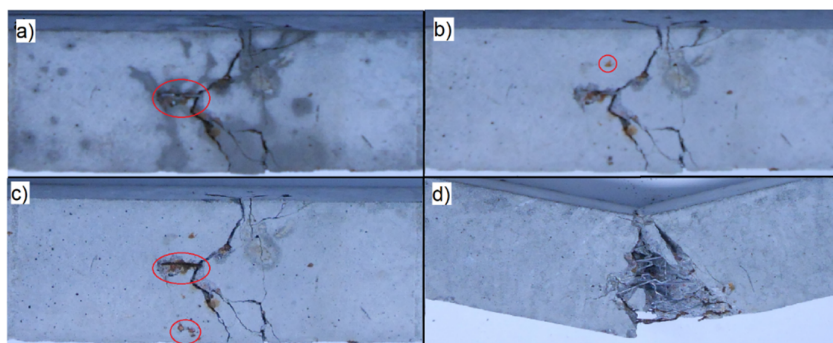
De acordo com a FIGURA 31, após 112 ciclos de exposição, o comportamento é semelhante, havendo sinais de corrosão apenas em pontos

onde há extremidades de fibras de aço. Além disso, de acordo com a FIGURA 30(d) e a FIGURA 31(d), as fibras que se encontravam no interior das amostras e totalmente envoltas pela matriz cimentícia encontravam-se em perfeito estado após a ruptura, sem nenhum sinal de degradação aparente.

#### 4.2.2 Corpos de prova com abertura de primeira fissura

Nas amostras com abertura de primeira fissura expostas ao ataque por cloretos, observou-se o aparecimento de poucas manchas de corrosão, conforme mostrado na FIGURA 32.

FIGURA 32 - CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 28 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 28 DIAS (d).

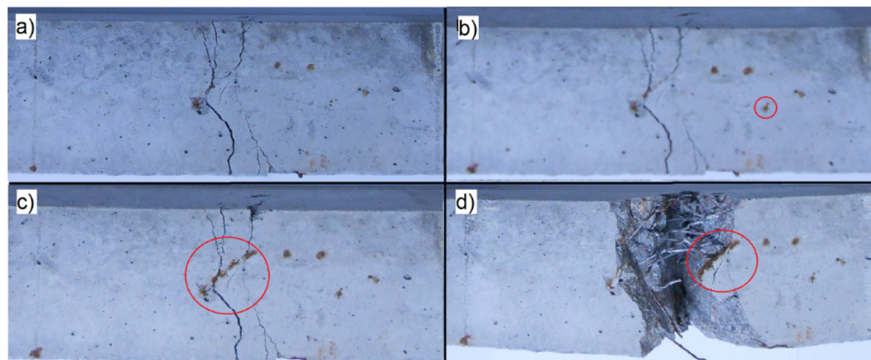


FONTE: A Autora (2018).

É possível observar que, houve o aumento gradativo, ao longo das idades, da deposição de produtos de corrosão em locais onde há fibras expostas. Contudo, as fibras no interior do corpo de prova permanecem intactas, sendo corroídas somente aquelas que se encontram na zona superficial do corpo de prova. Ao se aumentar o tempo de exposição para 56 ciclos o comportamento é semelhante ao já observado e está apresentado na Figura 33.

Novamente verificou-se que as primeiras idades de exposição (8 e 16 ciclos), são caracterizadas pela baixa presença de produtos de corrosão na superfície do corpo de prova. Aos 56 ciclos foi possível notar um processo mais avançado de corrosão em uma das fibras localizada na face do compósito. Após a ruptura confirmou-se a degradação avançada nas fibras mais expostas e, as boas condições daquelas totalmente imersas na matriz cimentícia.

FIGURA 33 - CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 56 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 56 DIAS (d).

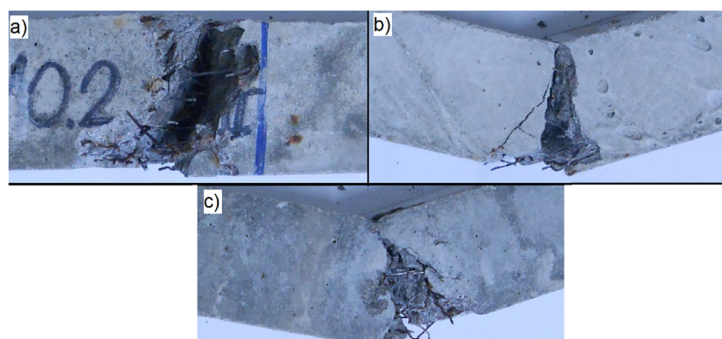


FONTE: A Autora (2018).

Aos 112 ciclos de exposição não houveram variações no comportamento de aparecimento de manchas. A matriz cimentícia apresentava boa aparência, sem manchas superficiais aparentes na maior parte das faces da amostra, como pode ser visto na FIGURA 34.

Após 112 ciclos de exposição verificou-se que, a degradação das fibras mais expostas se tornou mais evidente. Ao fim da ruptura completa notou-se também que a quantidade de fibras em processo de corrosão era maior do que aquela observada para as idades de 28 e 56 ciclos de exposição. Contudo, o bom aspecto e a conservação das fibras no interior do corpo de prova foram verificadas conforme ocorrido nas idades anteriormente discutidas.

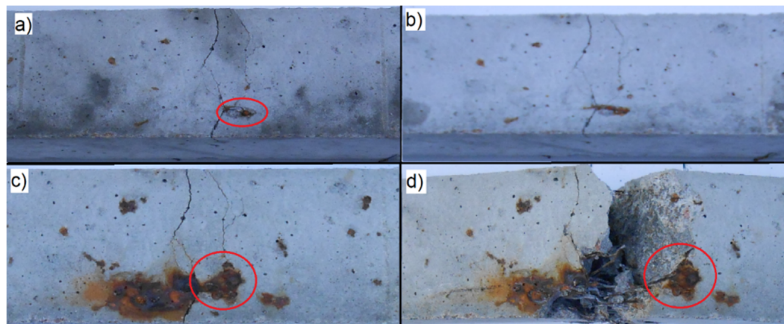
FIGURA 34 - CP COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS A RUPTURA EM 112 CICLOS DE EXPOSIÇÃO.



FONTE: A Autora (2018).

Os corpos de prova expostos durante 224 ciclos apresentaram manchas de corrosão bem mais severas, conforme mostrado na FIGURA 35.

FIGURA 35 - CORPOS DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 224 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 224 DIAS (d).



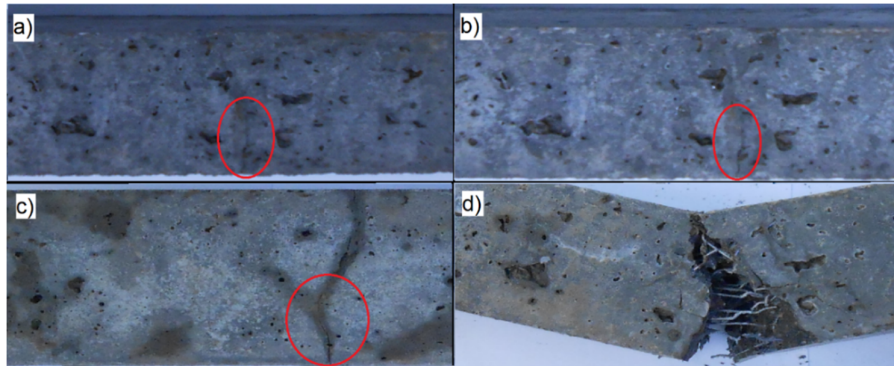
FONTE: A Autora (2018).

Assim como nas demais idades, os primeiros ciclos de exposição (8 e 16) apresentaram poucas manchas, apenas em locais onde havia exposição de fibras de aço. No entanto, ao analisar as partes c-d da FIGURA 35, verificou-se que há o aumento progressivo das manchas de corrosão à medida que se aumenta o período de exposição. As fibras localizadas na face da amostra encontravam-se totalmente corroídas após os 224 ciclos. Além disso, houve deposição de óxido na matriz cimentícia, em regiões próximas à fibra em processo de corrosão.

Contudo, percebeu-se, assim como já mostrado em idades anteriores, que houve a conservação do bom aspecto das fibras contidas no interior do corpo de prova. Uma hipótese para a explicação de tal fato é que, a deposição de produtos de corrosão no entorno das fibras funciona como uma barreira física para a entrada de agentes deletérios, uma vez que diminuem o espaço existente na abertura da fissura, dificultando assim, o transporte dos íons  $Cl^-$  para o interior do compósito.

Nos corpos de prova expostos em câmara úmida não houve o aparecimento de manchas de corrosão após os 224 ciclos de exposição, conforme é mostrado na FIGURA 36.

FIGURA 36 - CORPO DE PROVA COM ABERTURA DE PRIMEIRA FISSURA APÓS 8 DIAS (a); 16 DIAS (b) E 224 DIAS (c) DE EXPOSIÇÃO EM CÂMARA ÚMIDA E APÓS A RUPTURA COMPLETA (d).



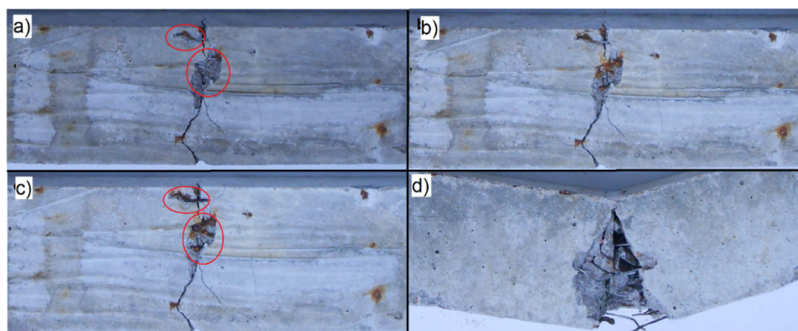
FONTE: A Autora (2018).

A fissura aberta durante o ensaio de tração na flexão foi circulada na imagem. Verificou-se que não houveram sinais do aparecimento de manchas de corrosão em nenhuma das faces do corpo de prova e, após a ruptura completa observou-se que todas as fibras se encontravam intactas.

#### 4.3.3 Corpos de prova com abertura de fissura de carga máxima

Os corpos de prova com abertura de fissura de carga máxima apresentaram comportamento semelhante àqueles com abertura de primeira fissura, no que diz respeito ao aparecimento de manchas de corrosão. Na FIGURA 37 é mostrada a evolução da formação de produtos de corrosão até a ruptura após exposição à 28 ciclos em câmara de névoa salina.

FIGURA 37 - CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 28 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 28 DIAS (d).



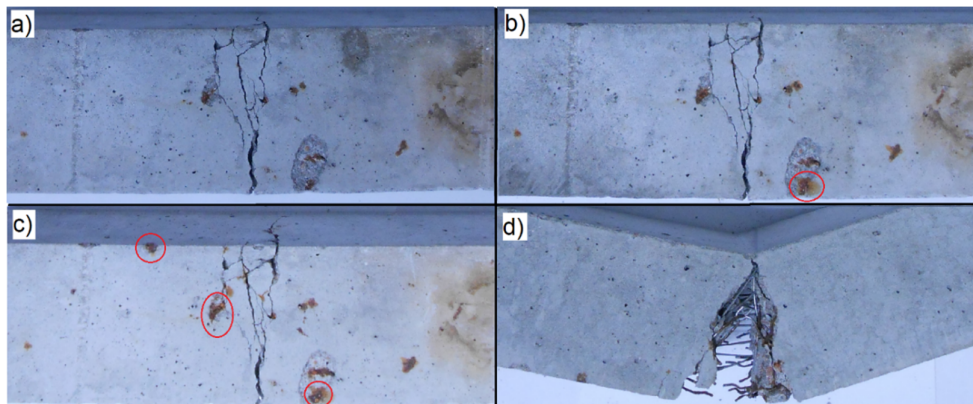
FONTE: A Autora (2018).



Conforme já discutido para as amostras com abertura de primeira fissura, a formação dos produtos de corrosão ocorre em pequenas áreas, onde há a exposição de fibras de aço. Também não se verificou a deposição de quantidades significativas de produto de corrosão na matriz cimentícia durante os 28 ciclos de exposição. Por fim, as fibras que se encontravam no interior da amostra não sofreram nenhum dano superficial aparente.

Comportamento semelhante também foi observado aos 56 ciclos de exposição, como mostrado na FIGURA 38, onde notou-se que a ocorrência de manchas se dá por conta da presença de fibras de aço na face do compósito, assim como nos outros casos já relatados anteriormente. Isso pode estar relacionado à facilidade encontrada pelo íon cloro para chegar até a superfície da fibra, quando esta encontra-se em regiões muito próximas à superfície. Desse modo, a camada cimentícia de recobrimento é mínima e insuficiente para evitar a degradação da fibra de aço.

FIGURA 38 - CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 56 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 56 DIAS (d).

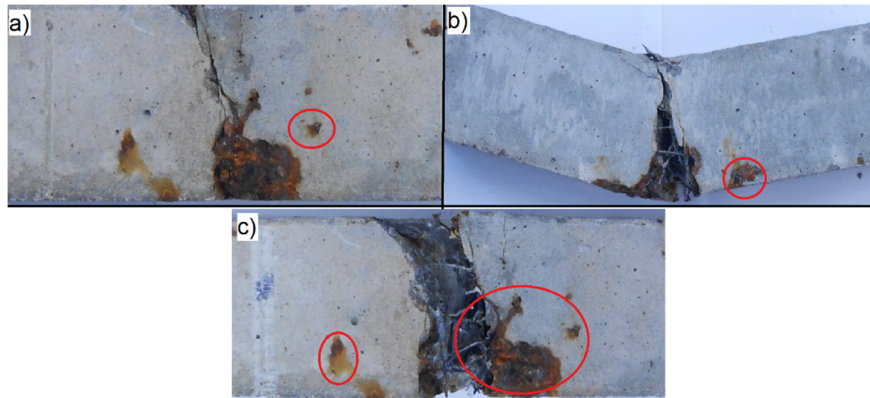


FONTE: A Autora (2018).

Outros estudos também verificaram a influência da localização da fibra dentro da amostra na cinética de corrosão, e indicaram que fibras de baixo carbono expostas à ambientes agressivos tendem a manifestar corrosão quando se encontram em áreas superficiais do compósito cimentício (MANGAT & GURUSAMY, 1987). Após os 112 ciclos de exposição observou-se maior

deposição dos produtos de corrosão no entorno das fibras e na matriz cimentícia, conforme é mostrado na FIGURA 39.

FIGURA 39 - CORPO DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS A RUPTURA AOS 112 CICLOS DE EXPOSIÇÃO.



FONTE: A Autora (2018).

De acordo com a FIGURA 39 verificou-se a alta quantidade de produto de corrosão depositado na região da fissura de carga máxima. Em comparação às amostras com abertura de primeira fissura, nas quais o aparecimento de manchas foi mais discreto para a mesma idade de exposição, os corpos de prova com fissura de carga máxima mostraram-se de significativo grau de deterioração das fibras de aço em uma das faces do compósito. Isso pode ser explicado devido à maior largura de fissura encontrada nos corpos de prova com fissura de carga máxima. Consequentemente, a área de fibra exposta foi maior, facilitando a deposição de maior quantidade de produtos de corrosão.

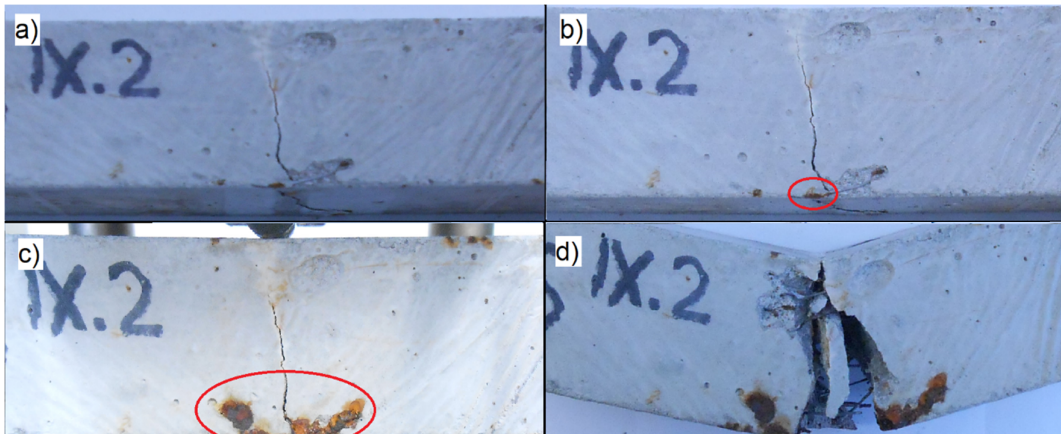
Esse resultado corroborou com os resultados de resistência à tração na flexão já abordados, no quais a partir do 112º ciclo de exposição havia redução da resistência pós-pico, pois de acordo com a FIGURA 35, foi possível notar a perda de seção transversal e, conseqüentemente de resistência por parte das fibras mais expostas.

Todavia, a deposição de óxido na região da fissura pode atuar como uma barreira física para a penetração de agentes agressivos, o que pode explicar as boas condições em que se encontravam as fibras contidas no interior do compósito cimentício.

Comportamento semelhante foi verificado para o período de 224 ciclos de

exposição, onde se obteve degradação severa das fibras localizadas na superfície, como é mostrado na FIGURA 40.

FIGURA 40 - CORPOS DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (a); 16 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (b); 224 CICLOS DE EXPOSIÇÃO (c); APÓS A RUPTURA AOS 224 DIAS (d).

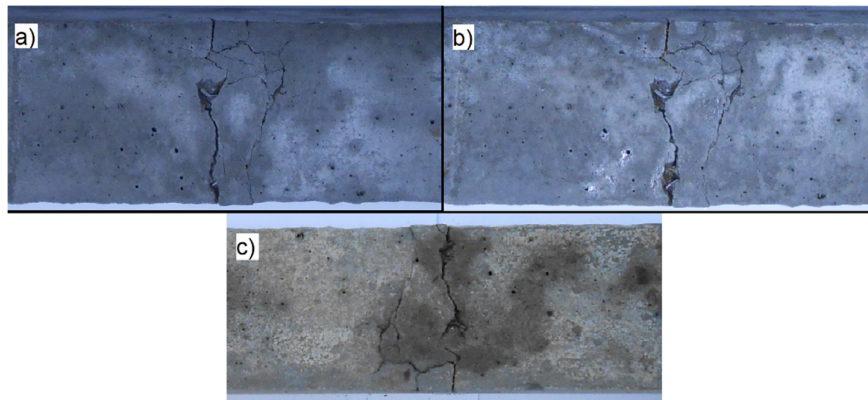


FONTE: A Autora (2018).

De igual modo às idades já abordadas anteriormente, a formação de produtos de corrosão nos primeiros dias de exposição é muito discreta. Conforme já visto, para o caso da abertura de fissura de carga máxima, a formação e deposição de óxido tornam-se significativas a partir do 112º ciclo de exposição. Dessa forma, aos 224 ciclos notou-se que a degradação das fibras mais superficiais foi severa. Entretanto, assim como na exposição à 112 ciclos, a deposição de maior quantidade de produto de corrosão inibe fisicamente a entrada de íons  $Cl^-$  no interior do corpo de prova, dificultando assim, o início do processo de corrosão nas fibras que se encontravam no interior da amostra.

Em relação à exposição em câmara úmida, o comportamento no que se refere ao aparecimento e desenvolvimento de manchas de corrosão foi semelhante ao observado para os corpos de prova com abertura de primeira fissura, conforme mostrado na FIGURA 41. Notou-se que não houveram manchas de corrosão na matriz cimentícia e nem em regiões próximas à abertura de fissura, corroborando com os resultados mostrados anteriormente e, indicando a severidade da exposição em câmara de névoa salina, uma vez que aos 8 dias de exposição já é possível verificar o início do processo corrosivo nas fibras mais expostas.

FIGURA 41 - CORPO DE PROVA COM FISSURA DE CARGA MÁXIMA APÓS 8 DIAS (a); 16 DIAS (b) E 224 DIAS (c) DE EXPOSIÇÃO EM CÂMARA ÚMIDA.



FONTE: A Autora (2018).

Por fim, ao comparar as imagens de abertura de primeira fissura e de carga máxima, notou-se também que os ciclos de exposição escolhidos para este estudo não foram suficientes para provocar a corrosão das fibras contidas no interior dos corpos de prova.

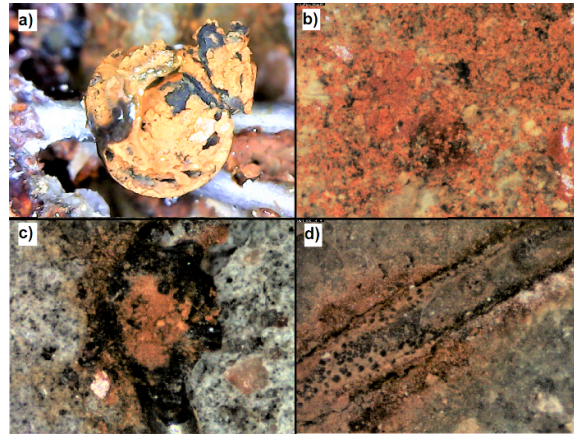
Outro ponto a se destacar é que foi verificado que, o aparecimento e desenvolvimento de manchas de corrosão no entorno das fibras de aço e na matriz cimentícia está diretamente relacionada à facilidade dos íons  $Cl^-$  chegar até a superfície da fibra. Quanto mais próximas da superfície as fibras estiverem, maior a probabilidade do aparecimento de manchas de corrosão nas faces do corpo de prova em situações de exposição a ambientes com alto grau de severidade.

#### 4.3 VERIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DE PRODUTOS DE CORROSÃO POR MÉTODO VISUAL

Conforme discutido anteriormente, a formação dos produtos de corrosão torna-se visível a partir dos 8 ciclos de exposição em amostras submetidas à abertura de primeira fissura ou à fissura de carga máxima, quando expostas ao ataque por cloretos. Dessa forma, objetivando caracterizar visualmente o início da formação dos produtos da reação deletéria, foram realizadas análises por lupa eletrônica em corpos de prova fissurados, após as primeiras idades de exposição. Na FIGURA 42 estão mostradas imagens após o 8º ciclo de

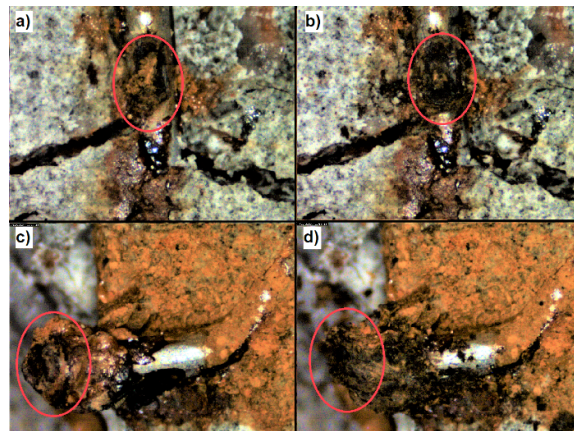
exposição, e a FIGURA 43, por sua vez, é composta por imagens feitas após o 16º ciclo de exposição.

FIGURA 42 - (a) SEÇÃO TRANSVERSAL DA FIBRA DE AÇO CORROÍDA; (b) DEPOSIÇÃO DO PRODUTO DE CORROSÃO MATRIZ CIMENTÍCIA; (c) PRODUTO DE CORROSÃO DEPOSITADO NA ÁREA DO GANCHO DA FIBRA DE AÇO; (d) PERDA DE SEÇÃO RESISTENTE DA FIBRA DE AÇO.



FONTE: A Autora (2018).

FIGURA 43 - (a) DEPOSIÇÃO DE PRODUTO DE CORROSÃO NO GANCHO DA FIBRA; (b) PERDA DE SEÇÃO RESISTENTE NO GANCHO DA FIBRA; (c) PRODUTO DE CORROSÃO NA EXTREMIDADE DA FIBRA; (d) PERDA DE SEÇÃO RESISTENTE NA EXTREMIDADE DA FIBRA.



FONTE: A Autora (2018).

De acordo com o exposto na FIGURA 42 e FIGURA 43, notou-se que a partir do 8º ciclo de exposição já havia corrosão na seção transversal da fibra, conforme mostrado na FIGURA 42-a, além de deposição de produto de corrosão na região do gancho das fibras, mostrado na FIGURA 42-c. Essa região é especialmente fragilizada por conta da tensão aplicada no ensaio de tração na

flexão, que gera tensões essa área e a torna mais suscetível ao processo corrosivo, fato já observado em estudos anteriores (GRANJU & BALOUCH, 2005).

A deposição de produtos de corrosão na matriz cimentícia e a perda de seção resistente podem ser observadas nos 8º e 16º ciclos de exposição (FIGURAS 42 -b, d; 43 - b, d), com tendência de aparecimento de mais manchas nas faces da matriz e, maior perda de seção resistente da fibra à medida que se aumentam os períodos de exposição em ambiente salino.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado o monitoramento do aparecimento e desenvolvimento de manchas de corrosão na superfície dos corpos de prova e, correlacionou-se a largura de abertura de fissura com os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão.

Além disso, foi possível avaliar a influência do ataque por íons  $\text{Cl}^-$  na resistência à tração na flexão. Todavia, devido ao tempo disponível para desenvolvimento do estudo, não foi possível caracterizar o processo de degradação completo da fibra de reforço.

A hipótese defendida é a de que a cinética de corrosão das fibras de aço é caracterizada por duas fases. A primeira se refere ao incremento da resistência pós-pico, ocasionada pelo aumento da rugosidade na interface entre a fibra e a matriz cimentícia, devido à adesão dos produtos de corrosão no entorno das fibras de aço. Ao longo das idades, é possível que ocorra a segunda fase, na qual a perda de resistência devido à redução da seção resistente das fibras seja mais significativa do que o incremento de aderência fornecido pela deposição dos óxidos. Dessa forma, haveria ruptura da fibra e o compósito não absorveria qualquer solicitação à tração.

Neste estudo foi possível verificar a ocorrência total da primeira fase e início da segunda fase, uma vez que a partir do 112º ciclo de exposição notou-se redução do incremento da resistência pós-pico, ou seja, saturação da camada resistente proporcionada pela adesão de óxidos no entorno das fibras. Além disso, os 224 ciclos de exposição também não foram suficientes para caracterizar completamente o processo de corrosão. Assim, conclui-se que é necessário maior tempo de exposição sob as mesmas condições para a obtenção de dados que viabilizem a caracterização completa da cinética de corrosão causada por cloretos em fibras de aço.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão levantaram a hipótese de que a exposição em ambiente agressivo não foi o fator determinante para a ocorrência da degradação de compósitos cimentícios reforçados com fibras de aço. Isso porque amostras sem fissuras submetidas a 112 ciclos de exposição não apresentaram danos em sua matriz ou, manchas de corrosão e deposição de produtos da reação no entorno das fibras de aço,

até a idade analisada. A abertura de fissura condiciona o início do processo corrosivo. Dessa forma, o uso de matrizes com baixa permeabilidade, além da busca por mecanismos de execução e manutenção que inibam a formação e o crescimento de fissuras, são práticas que podem viabilizar o uso de CRFA em ambientes de alta agressividade ambiental.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a continuidade do estudo em questão com pesquisas mais aprofundadas, buscando maneiras de minimizar o efeito do desvio padrão na análise dos resultados. Para isso, é possível utilizar métodos de indução que, viabilizem a obtenção da correlação entre o aparecimento de manchas de corrosão e a quantidade de fibras presentes nos corpos de prova, além da correlação desta com a resistência à tração obtida.

Durante o estudo verificou-se que, para a completa caracterização da cinética de corrosão das fibras, seriam necessários mais ciclos de exposição. Assim, propõe-se que, sejam formuladas pesquisas nas quais atendam-se maiores tempos de exposição do compósito à ambiente agressivo, em paralelo à análise da influência da porosidade da matriz cimentícia na propagação do processo de corrosão das fibras de aço.

Por fim, sugere-se replicar este estudo para concretos, a fim de avaliar a cinética da corrosão das fibras em matrizes com maior heterogeneidade e, a possível influência da presença da zona de transição entre agregados graúdos e a matriz cimentícia na velocidade das reações de corrosão.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2005). **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_ABNT. (2007). **NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_ABNT. (2016). **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_ABNT. (2014). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_ABNT. (1997). **NBR 11578: Cimento Portland Composto - Especificação.** Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_ABNT. (2018). **NBR 15577-4: Agregados – Reatividade Álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_ABNT. (2001). **NBR NM 30: Agregado miúdo – determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_ABNT. (2009). **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_ABNT. (2010). **NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_ABNT. (2003). **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_ABNT. (2006). **NBR NM 45: Agregados- Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_ABNT. (2001). **NBR NM 49: Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. ABNT. (2009). **NBR 9917: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. ABNT. (2003). **NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. ABNT. (2006). **NBR NBR 9479: Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para curas de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2006.

ABRISHAMI, H. H; MITCHELL, D. Influence of steel fibers on tension stiffening. **American Concrete Institute (ACI) – Structural Journal**. v. 94, p. 769-776, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI (2018). **ACI 544.4R – Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete**. Michigan, 2018.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armadura**. São Paulo, 105 p. PINI, 1992.

ARUNKUMAR P.; SATHYANARAYAN SRIDHAR R. Corrosion studies on high-performance hybrid fibre reinforced concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**. v. 4, p. 3194-3195, 2017.

ARCELOR MITTAL. Catálogo Dramix. Disponível em: <http://longos.arcelormittal.com.br/pdf/produtos/construcao-civil/dramix/catalogo-dramix.pdf> Acesso em: 26 de Abril de 2018.

BALOUCH, S. U.; FORTH, J.P.; GRANJU, J. L. Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**. p. 410-414, 2010.

BANTHIA, N. Fiber reinforced concrete. **The Canadian Society for Civil Engineers**. 1998.

BANTHIA, N. Fiber reinforced concrete for sustainable and intelligent infrastructure. SBEIDCO, p. 337-350, 2009.

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

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Elsevier, 2007.

BERROCAL, C. G.; LUNDGREN, K.; LOFGREN, I. Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: a review. **Fibre Concrete 2013**. 10 f. Praga, República Tcheca, 2013.

BERROCAL, C. G.; LOFGREN, I.; LUNDGREN, K.; TANG, L. Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions. **Corrosion Science**. p. 128-139, 2015.

BERROCAL, C. G.; LUNDGREN, K.; LOFGREN, I. Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art. **Cement and Concrete Research**. p. 69-85, 2016.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. B. Corrosion of Steel in Concrete, 2003.

BLAGOJEVIC, A; KOLEVA, D. A; WALRAVEN, J. C. The influence of cracks on chloride-induced corrosion of reinforced concrete structures - development of the experimental set-up. **Young Researchers' Forum II: Construction Materials**. Departamento de Engenharia Civil e Geociências, p. 159-164, Londres, Reino Unido, 2014.

BLANCO, A.; PUJADAS, P.; DE LA FUENTE, A.; CAVALARO, S.; AGUADO, A. Application of constitutive models in European codes to RC-FRC. **Construction and Building Materials**. p. 246-259, 2013.

BLASZCZYNSKI, T; FALEK, M. P. Steel fibre reinforced concrete as a structural material. **ScienceDirect, Procedia Engineering**. Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering, v. 122, p. 282-289, 2015.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 237 p. PINI, 1999.

CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. **Intrinsic scatter of FRC: an alternative philosophy to estimate characteristic value.** *Materials and Structures*. v 48 (11), p. 3537-3555, 2015.

CIMENTO ITAMBÉ. Relatórios de ensaio. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/> Acesso em: 03 de Abril de 2018.

COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; FELICETTI, R. Mechanical properties of steel fibre reinforced concrete exposed at high temperatures. **Materials and Structures**. p. 475-491, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357.** 17 de Março de 2005. Disponível em: [http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO\\_CONAMA\\_n\\_357.pdf](http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf) Acesso em: 15 de Maio de 2018.

CONTROLE DE QUALIDADE E INSPEÇÕES – MARCIO VICENTE. **Ensaio mecânico de tração – Ensaio de tração: propriedades mecânicas.** Disponível em: < <http://cqmarciovicente.blogspot.com/2015/04/ensaio-mecanico-de-tracao.html>> Acesso em: 05 de Agosto de 2018.

DE LA FUENTE, A.; DE FIGUEIREDO, A.D.; AGUADO, A. Substituting the traditional reinforcement in concrete pipes by using structural fibres. **Concrete Plant International**. v. 5, p. 146-150, 2014 - a.

DE LA FUENTE, A; CAVALARO, S. H. P.; LIAO, L.; AGUADO, A. Fibre reinforced precast concrete segments: design and applications. A: ITA-AITES World Tunnel Congress. "Proceedings of the World Tunnel Congress, Iguassu Falls, Brazil, May 9th-15th 2014". Iguassu Falls, p. 1-7, 2014 - b.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Material and Structures**, v. 42, p. 1261-1281, 2009.

DI PRISCO, M. FRC: structural applications and standards. **Materials and Structures**. p. 1169-1171, 2009.

EHE – 08 - **Instrucción de Hormigón Estructural Com Comentarios De Los Miembros De La Comisión Permanente Del Hormigón.** España, 2008.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios híbridos de alto desempenho. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 2 (3); p. 254-270, 2009.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB (2010). **Model Code 2010**. Lausanne, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. Tese (Livre Docência), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FRAZÃO, C.; BARROS, J.; CAMÕES, A.; ALVES, A. C.; ROCHA, L. Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**. p. 112-122, 2016.

GRANJU, J.-L.; BALOUCH, S. L. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. **Cement and Concrete Research**, v. 35(3), p. 55-62, 2005.

HELENE, P. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 46 p. PINI, 1986.

HOMMA, D.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**. v. 7 p. 217-228, 2009.

KAUFMANN, J.P. Durability performance of fiber reinforce shotcrete in aggressive environment. **Proceedings of the World Tunnel Congress 2014**. Foz do Iguaçu, Brasil, p. 1-7, 2014.

LI, V. C. Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites. In: SWAMY, R. N. Fourth Rilem International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete. RILEM Symposium FRC 92. **Proceedings**. p. 12-30, 1992.

MANGAT, P. S.; GURUSAMY, K. Chloride diffusion in steel fibre reinforced concrete containing PFA. **Cement and Concrete Research**. v. 17 (4), p. 640-650, 1987 - a.

MANGAT, P. S.; GURUSAMY, K.; Long-term properties of steel fibre reinforced marine concrete. **Materials and structures**. p. 273-282, 1987 - b.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, A. H. V.; SOUZA, D. A.; SILVA, G. D.; OLIVERA, K. C. S.; AGRA, R. R.; BARBOZA, A. S. R. Análise da distribuição e orientação das fibras em corpos de prova cúbicos e prismáticos de CRFA utilizando o método indutivo. **59º Congresso Brasileiro do Concreto**, 16f. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil, 2017.

MESON, M. V.; MICHEL, A.; SOLGAARD, A.; FISCHER, G.; EDVARDSEN, C.; SKOVHUS, T. L. Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review. **Cement and Concrete Research**. v. 103, p. 1-20, 2016.

Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914/2011. **Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**.

NAAMAN, A. E. Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead. In: **RILEM Proceedings, PRO 15**, RILEM Publications SARL, p. 65-86, 2000.

OTSUKA, K.; MIHASHI, H.; KIYOTA, M.; MORI, S.; KAWAMATA, A. Observation of Multiple Cracking in Hybrid FRCC at Micro and Meso Levels. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, nº 3, p. 291-298, 2003.

PEREIRA, V. C. O; ALMEIDA, K; MONTEIRO, E. C. B. Avaliação da corrosão em argamassas de cimento Portland utilizando a técnica de potencial de corrosão. **Construindo**. v. 4, p. 6-22, 2012.

PESSÔA, P. O. A; NEPOMUCENO, A. A. Influência do consumo de cimento na corrosão de armaduras em argamassas de cimento sujeitas à carbonatação. **XXII CONBRASCORR – Congresso Brasileiro de Corrosão**. 11 p. Salvador, BA, Brasil 2002.

PRUDÊNCIO JR., L.R.; AUSTIN S.; JONES, P.; ARMELIN, H.;ROBINS, P. Prediction of steel fibre reinforced concrete under flexure from an inferred fibre pull-out response. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 2006.

RILEM TC 162-TDF: **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete**. *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*, 2002.

SALVADOR, R. P. *Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras*. 2013. 201 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANE, P. C.; DOIPHONE, G. S. An Experimental Study on Compressive Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete using Fibres of different Aspect Ratio. **International Research Journal of Engineering and Technology**. v. 2, p. 249-251, 2016.

SERNA, P.; ARANGO, S.; RIBEIRO, T.; NÚÑEZ, A. M.; GARCIA-TAENGUA, E. Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain. **Materials and Structures**. v. 42, p. 1233–1246, 2009.

TERUZZI, T.; CADONI, E.; FRIGERI, G.; CANGIANO, S.; PLIZZARI, G. A. Durability aspects of steel fibre reinforced concrete, in 6<sup>th</sup> *RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes*, p. 625-634, 2004.

TRAN, N. T.; PYO, S.; KIM, D. J. Corrosion resistance of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**. v. 63, p. 17-29, 2015.

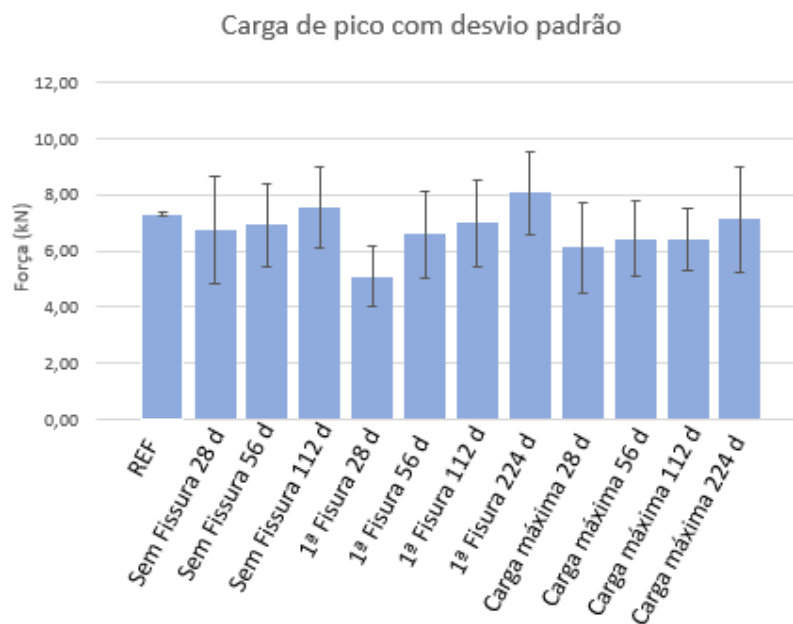
ZOLLO, F. R. Fiber-reinforced Concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, p. 107-122, 1997.

**APÊNDICE 1 – TABELA DE ABERTURA DE FISSURAS MEDIDAS NA  
CAMPANHA EXPERIMENTAL**

Abertura de 1ª Fissura			Carga Máxima		
Identificação dos CP's rompidos	Tamanho de Fissura (mm)	Idade (dias)	Identificação dos CP's rompidos	Tamanho de Fissura (mm)	Idade (dias)
1,5.34.2	0,4	28	1,5.6.3	0,7	28
1,5.17.2	0,6	28	1,5.11.3	0,5	28
1,5.27.3	0,4	28	1,5.1.2	0,7	28
1,5.29.3	0,3	28	1,5.2.3	0,9	28
1,5.18.3	0,3	28	1,5.33.3	0,9	28
1,5.III.1	0,4	28	1,5.30.2	1,3	28
1,5.32.3	0,4	28	1,5.24.3	0,8	28
1,5.2.2.II	0,3	28	1,5.34.3	1,2	28
1,5.34.2	0,4	28	1,5.7.2.II	1,0	28
1,5.16.3	0,5	56	1,5.V.1	1,0	56
1,5.11.2	0,4	56	1,5.6.2	0,8	56
1,5.22.2	0,5	56	1,5.5.2	0,9	56
1,5.14.2	0,2	56	1,5.16.2	0,9	56
1,5.4.2	0,2	56	1,5.II.1	1,3	56
1,5.10.2	0,4	56	1,5.VIII.1	0,9	56
1,5.20.2	0,2	56	1,5.1.3	0,5	56
1,5.9.1.II	0,5	56	1,5.17.3	1,2	56
1,5.21.1.II	0,4	56	1,5.24.1.II	0,8	56
1,5.5.2.II	0,4	112	1,5.11.1.II	0,6	112
1,5.13.1.II	0,5	112	1,5.3.1.II	1,1	112
1,5.8.2.II	0,5	112	1,5.14.2.II	0,9	112
1,5.13.2.II	0,4	112	1,5.23.2.II	1,0	112
1,5.1.1.II	0,4	112	1,5.26.1.II	0,9	112
1,5.16.2.II	0,4	112	1,5.22.2.II	0,8	112
1,5.10.2.II	0,5	112	1,5.17.1.II	0,7	112
1,5.15.1.II	0,5	112	1,5.6.1.II	0,6	112
1,5.19.2.II	0,2	112	1,5.25.2.II	1,1	112
1,5.29.2	0,4	224	1,5.18.2	0,8	224
1,5.21.3	0,5	224	1,5.19.2	0,6	224
1,5.IX.1	0,2	224	1,5.35.3	1,3	224
1,5.15.2	0,4	224	1,5.31.2	0,8	224
1,5.20.3	0,2	224	1,5.23.2	0,9	224
1,5.8.3	0,2	224	1,5.26.3	0,7	224
1,5.21.2	0,3	224	1,5.9.2	0,6	224
1,5.33.2	0,3	224	1,5.26.2	1,0	224
1,5.19.3	0,4	224	1,5.9.3	0,9	224
1,5.3.3	0,5	224	1,5.28.2	0,8	224



## APÊNDICE 2 – GRÁFICO COM DESVIO PADRÃO DA CARGA DE PICO



Grupo	Carga de Pico (kN)	Desvio Padrão
REF	7,34	0,071
Sem Fissura 28 d	6,74	1,930
Sem Fissura 56 d	6,93	1,488
Sem Fissura 112 d	7,57	1,444
1ª Fissura 28 d	5,09	1,066
1ª Fissura 56 d	6,59	1,565
1ª Fissura 112 d	6,98	1,521
1ª Fissura 224 d	8,06	1,483
Carga Máxima 28 d	6,12	1,603
Carga Máxima 56 d	6,43	1,356
Carga Máxima 112 d	6,40	1,104
Carga Máxima 224 d	7,13	1,888