

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Produção e Gestão do Ambiente Construído**

**Carla Pereira Carvalho**

**ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DOS CONCRETOS  
REFORÇADOS COM FIBRA DE AÇO EM  
CONDIÇÕES DE CORROSÃO POR  
CARBONATAÇÃO E ÍONS CLORETOS**

**Belo Horizonte,  
2019**

**CARLA PEREIRA CARVALHO**

**ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DOS CONCRETOS  
REFORÇADOS COM FIBRA DE AÇO EM  
CONDIÇÕES DE CORROSÃO POR  
CARBONATAÇÃO E ÍONS CLORETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

**Orientador: White José dos Santos**

**Belo Horizonte,  
2019**

C331e Carvalho, Carla Pereira.  
Estudo bibliográfico dos concretos reforçados com fibra de aço em condições de corrosão por carbonatação e íons cloretos [manuscrito] / Carla Pereira Carvalho. – 2019.  
56 f., enc.: il.

Orientador: White José dos Santos.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Apêndices: f.46-55.  
Anexos: f. 56.  
Bibliografia: f. 40-45.

1. Durabilidade (Engenharia). 2. Aço. 3. Concretos Reforçados com Fibras de Aço (CRFA). I. Santos, White José dos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor White José dos Santos pela inspiração, motivação e orientação; à Janice Clair Lemes Pereira por tornar tudo possível sempre; ao Arthur Francisco Jorge Ferreira por acreditar e me incentivar; à Nara Pereira Carvalho, à Amanda Pereira Carvalho e ao Newton Teixeira Carvalho por serem parte do que eu sou. Por fim, aos amigos da pós que contribuíram para um processo de aprendizado muito mais prazeroso.

*“A resistência e durabilidade de uma estrutura, da mesma forma que a de um ser vivo, vão depender indiscutivelmente dos cuidados que se tenham com ela não apenas durante sua gestação ou projeto, mas também durante seu crescimento ou construção e, posteriormente, durante o resto de sua vida ou manutenção.”*

*(Manuel Fernández Cánovas)*

## RESUMO

O crescente interesse na utilização dos Concretos Reforçados com Fibras de Aço (CRFA) chama atenção para o estudo destes compósitos: entender suas propriedades, vantagens e desvantagens diante do concreto convencional e armado permitem compreender as suas peculiaridades e avaliar melhores aplicações. Em adição, para os projetos que utilizam os CRFA, percebe-se a necessidade de entender o comportamento do material diante de condições reais de exposição para que se consiga determinar a vida útil de serviço das construções com maior precisão e, conseqüentemente, se consiga otimizar a utilização do concreto a fim de permitir construções mais sustentáveis e seguras. Assim, este estudo tem como objetivo analisar pesquisas anteriores a fim de avaliar os conhecimentos que já estão consolidados quanto ao comportamento do material em questão, bem como identificar as lacunas que exigem para que, a partir de pesquisas adicionais, se consiga avançar na padronização do comportamento do CRFA permitindo a regulamentação da aplicação do compósito em projetos. Para tanto, esta revisão bibliográfica conta com a análise de 47 estudos anteriores, das principais bases de dados (ICE, ASCE, SCOPUS, Science Direct), além de pesquisas que se mostraram relevantes ao tema devido ao seu número de citações. Por fim, o estudo permite concluir que a investigação das propriedades do CRFA é um tema de grande interesse científico que, embora apresente uma grande variedade e quantidade de trabalhos, ainda apresenta divergências quanto a quantificação do volume de fibra a ser utilizado para se alcançar melhores resistências à compressão, ao cisalhamento, fadiga e flexão. Quanto a resistência à tração, existem divergências se a adição da fibra pode ou não trazer benefícios para o concreto. Quanto a durabilidade e corrosão do CRFA, percebe-se uma diferença significativa no número de trabalhos encontrados o que demonstra que este tema ainda tem muito o que avançar: não se consegue padronizar os mecanismos de deterioração do compósito, principalmente a respeito do processo de auto-recuperação deste material e do seu comportamento diante da presença de fissuras; a exposição à frente de carbonatação apresenta uma lacuna muito maior que quanto a exposição dos íons cloretos uma vez que se encontra muito menos estudos científicos; não se consegue padronizar parâmetros fundamentais para que se avance no processo de regulamentação dos projetos com aplicação do CRFA (espessura das fissuras, camada de cobertura, tipos e quantidade de fibras, fator a/c). Em conclusão, identifica-se que a grande combinação de variáveis é um grande empecilho para a padronização do comportamento do CRFA – além do tipo e quantidade de fibras, tem-se as condições de exposição, a qualidade da matriz de concreto, a presença ou não de fissuras, a espessura destas fissuras, etc. Portanto, é fundamental que os estudos futuros continuem testando os trabalhos existentes para que se consiga confirmar os resultados e padronizar os mecanismos do compósito, inicialmente para variáveis limitadas (podendo servir de premissa) para, posteriormente, se avançar no material como um todo.

**Palavras-chave:** Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Durabilidade. Carbonatação. Íons Cloretos.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 1: Diagrama Tensão x Deformação Elástica da matriz do concreto e fibras</i> .....   | 13 |
| <i>Figura 2: Fibras trefiladas (classe I), Fibras de chapa laminada corta a frio (classe II) com ancoragem nas extremidades (A), corrugada (C) e reta (R) e Fibra trefilada escarificada (classe C) corrugada (C)</i> ..... | 16 |
| <i>Figura 3: Defeitos que as fibras de aço podem apresentar</i> .....   | 17 |
| <i>Figura 4: Comportamento do concreto sob tensões antes e após o surgimento de fissuras</i> .....  | 18 |
| <i>Figura 5: Gráfico Tensão x Deformação</i> .....  | 19 |
| <i>Figura 6: Teste do Abatimento do Cone</i> .....  | 20 |
| <i>Figura 7: Ensaio de abatimento de cone invertido e VeBe</i> .....  | 21 |
| <i>Figura 8: Relação entre impactos na segurança da estrutura</i> .....   | 23 |
| <i>Figura 9: Penetração da Carbonatação em relação ao tempo e ao cobrimento</i> .....   | 24 |
| <i>Figura 10: Esquema do Processo de Carbonatação do CRFA</i> .....   | 28 |
| <i>Figura 11: Reação entre o Ferro e os Produtos do Cimento na Carbonatação</i> .....   | 28 |
| <i>Figura 12: ITZ CRFA x Concreto Convencional</i> .....  | 29 |
| <i>Figura 13: Mecanismos de Deterioração dos CRFA expostos à carbonatação</i> .....   | 31 |
| <i>Figura 14: Esquema do Processo de Entrada de íons Cloretos no CRFA</i> .....   | 32 |
| <i>Figura 15: Reações entre o ferro e os íons cloretos</i> .....  | 32 |
| <i>Figura 16: ITZ CRFA x Concreto Convencional</i> .....  | 33 |
| <i>Figura 17: Mecanismos de Deterioração do CRFA exposto à íons cloretos</i> .....  | 36 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabela 1: Informações dos artigos selecionados para “Steel fibre reinforced concrete”</i> .....                          | 11 |
| <i>Tabela 2: Informações dos artigos selecionados para “Corrosion of Steel fibre reinforced concrete”</i> .....             | 11 |
| <i>Tabela 3: Quadro comparativo entre as principais fibras utilizadas para reforço do concreto</i> .....                    | 14 |
| <i>Tabela 4: Tipos, classes e restrições para as fibras de aço para uso no concreto</i> .....                               | 16 |
| <i>Tabela 5: Plano de amostragem para um lote</i> .....   | 17 |
| <i>Tabela 6: Relação entre pressão de água e espessura da fissura para ocorrência da auto-recuperação do concreto</i> ..... | 26 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CRF: Concreto Reforçado com Fibras

CRFA: Concreto Reforçado com Fibras de Aço

SFRC: *Steel fibre reinforced concrete*

ACI: *American Concrete Institute*

E: Módulo de Elasticidade

$\sigma$ : Tensão

$\varepsilon$ : Deformação

$\lambda = L/D$ : Fator de Forma

$f_u$ : Limite de resistência à tração do aço

MPa: Mega Pascal

GPa: Giga Pascal

de: Diâmetro equivalente

Índice da fibra:  $(L/D).V$

ITZ: Zona de Transição Interfacial

Ca(OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de Cálcio

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: Ácido carbônico

CaCO<sub>3</sub>: Carbonato de Cálcio,

calcita CO<sub>2</sub>: Gás carbônico

O<sub>2</sub>: Oxigênio



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>METODOLOGIA</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>CAPÍTULO 1: CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO</b> .....   | <b>12</b> |
| 1.1 ADIÇÃO DE FIBRAS NO CONCRETO .....  | 12        |
| 1.2 ESPECIFICAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO .....   | 15        |
| 1.3 PROPRIEDADES DO CRFA .....  | 18        |
| <b>CAPÍTULO 2: DURABILIDADE E CORROSÃO</b> .....  | <b>23</b> |
| 2.1 CARBONATAÇÃO .....  | 27        |
| 2.1.1 Mecanismos do CRFA diante da ação da frente de carbonatação .....   | 30        |
| 2.2 ÍONS CLORETOS .....   | 32        |
| 2.2.1 Mecanismos do CRFA diante da ação de íons cloretos .....  | 34        |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....   | <b>38</b> |
| <b>APÊNDICES</b> .....  | <b>46</b> |
| APÊNDICE A – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS:<br>PROPRIEDADES DO CRFA – COMPRESSÃO E TRAÇÃO .....          | 46        |
| APÊNDICE B – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS:<br>PROPRIEDADES DO CRFA – FLEXÃO .....                       | 47        |
| APÊNDICE D – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS:<br>PROPRIEDADES DO CRFA – FADIGA .....                       | 49        |
| APÊNDICE E – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS:<br>PROPRIEDADES DO CRFA – RIGIDEZ .....                      | 50        |
| APÊNDICE F – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS:<br>PROPRIEDADES DO CRFA – ABRASÃO E GEOMETRIA DA FIBRA ..... | 51        |
| APÊNDICE G – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS: CORROSÃO<br>DO CRFA – PARTE I .....                          | 52        |
| APÊNDICE H – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS: CORROSÃO<br>DO CRFA – PARTE II .....                         | 53        |
| APÊNDICE I – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS: CORROSÃO<br>DO CRFA – PARTE III .....                        | 54        |

|  |           |
|--|-----------|
| APÊNDICE J – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS: CORROSÃO DO CRFA – PARTE IV ..... | 55        |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>56</b> |
| ANEXO A – TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE LITERATURAS: VARIÁVEIS DO CRFA .....              | 56        |

## INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais comum e é, atualmente, o material de construção civil mais empregado no mundo (IBRAHIM; CHE, 2011). Contudo, apresenta algumas limitações como a baixa resistência à tração. Apresenta necessidade, portanto, de combinar a utilização do aço ao concreto para absorver estas tensões. Este compósito apresenta características de material frágil, está sujeito à fissuração e à ocorrência de anomalias patológicas - por causas mecânicas, químicas, físicas e por fatores externos como íons cloretos, sulfatos e dióxido de carbono (NEVILLE, 1997). Assim, visando desenvolver novas tecnologias que tragam soluções ou amenizem estas limitações, tem-se buscado cada vez mais estudar os concretos reforçados com adição de fibras (TASCA *et al.*, 2010; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

É possível utilizar diversas formas, tamanhos e tipos de fibras – produzidas em aço, plástico, vidro ou materiais naturais; mas as fibras de aço são as mais utilizadas tanto para peças estruturais como não estruturais (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Alguns dos benefícios obtidos com o reforço do concreto com fibras de aço (CRFA) são: maior tensão residual a partir dos mecanismos de pontes de transferência de tensão na presença de fissuras, melhorias na resistência ao impacto, na resistência à tração, no controle do desenvolvimento de fissuras, na durabilidade e resistência à fadiga.

Buscando usufruir destes benefícios, o CRFA é cada vez mais aplicado na construção civil: vias expressas, revestimento de túneis, estruturas de barragens, elementos estruturais como pilares e vigas, estruturas expostas a impactos ou forças dinâmicas como sismos ou ações cíclicas e, por isso, o estudo da durabilidade dos CRFA torna-se cada vez mais relevante. Assim, é importante ressaltar que a durabilidade é um dos aspectos mais importantes do concreto devido à sua influência fundamental nas condições de trabalho das estruturas (FRAZÃO; *et al.*, 2015), sendo a corrosão do aço um dos principais fatores que podem afetar esta durabilidade (WANG; NIU; DONG, 2014). A corrosão do CRFA pode afetar as pontes de transferência de tensões entre as fissuras e, assim, diminuir a resistência das estruturas e colocar a estabilidade da construção em perigo (BALOUCH; FORTH; GRANJU, 2010). Desta maneira, buscar entender o comportamento do

CRFA diante da sua exposição a agentes agressivos tem sido o foco de pesquisas recentes.

Tais pesquisas apontam algumas falhas no estudo do CRFA que ainda devem ser investigadas: a substituição total das armaduras nos concretos armados ainda traz controvérsias quando se trata sobre a durabilidade à longo prazo do CRFA exposto à ambientes com condições severas de exposição à cloretos e carbonatação; a não existência de normas internacionais referentes ao projeto de estruturas de CRFA; as discrepâncias entre resultados experimentais e mecanismos referentes ao processo de corrosão do CRFA fissurado (MARCOS-MESON *et al.*, 2018) e a necessidade de pesquisas adicionais para estabelecer métodos de teste padrões, confiáveis e rápidos para determinar os coeficientes de difusão dos cloretos no concreto (SHI; *et al.*, 2012).

Este trabalho, por sua vez, desenvolve-se a partir de uma iniciativa de conhecimento com perspectiva científica a fim de reunir e analisar as principais discussões já existentes a respeito dos CRFA, especialmente quando expostos a ambientes agressivos – íons cloretos e carbonatação. Para tanto, serão investigadas as diversas variáveis que podem influenciar na corrosão do concreto: qualidade do concreto, quantidades de fibras, condições de exposição, a espessura das fissuras, as propriedades do CRFA, os danos causados pela corrosão e a interação da fibra com a matriz de concreto. Uma vez compreendido o seu comportamento e o impacto que a corrosão do CRFA pode causar na integridade das estruturas construídas, o compósito pode tornar-se uma solução com maior aplicabilidade na Engenharia Civil, colaborar-se-á para a padronização de métodos e processos a respeito do CRFA, assim como para o desenvolvimento de normatizações (BENCARDINO; *et al.* 2008). Em consequência, contribuir-se-á para a mudança de paradigma da utilização em massa do concreto armado para uma maior utilização das demais possibilidades como o concreto reforçado com fibras de aço.

Desta maneira, este estudo possui como objetivo principal estudar os CRFA em condições de corrosão por carbonatação e íons cloretos. De maneira específica, este objetivo será alcançado a partir da análise das características e propriedades do concreto após a adição da fibra de aço e comparação com o concreto convencional e da avaliação do comportamento do CRFA quando submetido à ambientes agressivos.

## METODOLOGIA

O procedimento metodológico a ser utilizado para esta pesquisa corresponde a uma revisão bibliográfica descrita nas seguintes etapas: levantar os principais trabalhos relativos ao estudo em questão a nível nacional e internacional, reunir os resultados consolidados até o momento, comparar pontos de vistas e resultados e identificar pontos de fragilidades, melhorias e propostas para futuras pesquisas.

Para o levantamento dos trabalhos existentes, inicialmente, definiu-se as bases de dados a serem utilizadas de maior relevância para a Engenharia Civil. As bases de dados utilizadas foram a *Science Direct*, *American Society of Civil Engineering (ASCE)*, *Institution of Civil Engineers (ICE)* e *Scopus*. Posteriormente, definiu-se as palavras-chaves a serem pesquisadas na base de dados em questão. Utilizou-se dois grupos de palavras-chave, um mais generalista - "*Steel fibre reinforced concrete*" (SFRC) e um segundo mais específico - "*Corrosion of steel fibre reinforced concrete*". A pesquisa foi então restringida a partir de filtros para a busca de artigos publicados no período de 2008 a 2018. Dentre os artigos disponíveis em todas as bases de dados selecionadas foi necessário avaliar a aderência destes artigos ao tema eliminando-se aqueles artigos irrelevantes. Em seguida, avaliou-se o número de citações de cada artigo eliminando da seleção aqueles com menos de 5 citações para cada grupo de pesquisa (palavra-chave generalista e específica). Para a busca generalista - SFRC - foi obtido um total de 16 artigos selecionados que estão descritos na tabela 1. Destes, um artigo foi adicionado, apesar de estar fora dos filtros definidos, por mostrar-se relevante ao tema de pesquisa com 208 citações (destacado em azul). Ainda, a este grupo, foram acrescentados 5 artigos do *American Concrete Institute (ACI)* que se mostrou uma importante referência no assunto (destacados em vermelho). Na tabela 2 estão expressos os artigos selecionados para a busca mais específica - *Corrosion of SFRC*. Foram selecionados 6 artigos de acordo com os critérios já detalhados. A este grupo foi adicionado um artigo extra, destacado em vermelho, que apesar de estar fora dos critérios, foi adicionado por apresentar 139 citações. Assim, este estudo basear-se-á na análise destas fontes para que se consiga entender como o tema Concreto Reforçado com Fibras de Aço é reconhecido no meio científico.

**Tabela 1:** Informações dos artigos selecionados para “*Steel fibre reinforced concrete*”

| BASE           | TÍTULOS  | PUBLICAÇÃO | CITAÇÕES |
|----------------|--|------------|----------|
| SCOPUS         | Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement                                      | 2016       | 18       |
| ASCE           | Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index                                  | 2011       | 64       |
| SCIENCE DIRECT | Effects on Mechanical Properties of Industrialised Steel Fibres Addition to Normal Weight Concrete                     | 2011       | 12       |
| SCIENCE DIRECT | Experimental study on electrical properties of steel-fibre reinforced concrete   | 2016       | 5        |
| SCIENCE DIRECT | Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete                   | 2002       | 208      |
| ASCE           | Modeling the Behavior of Steel-Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs  | 2011       | 8        |
| SCIENCE DIRECT | Permeability of Steel Fibre Reinforced Concrete Influence of Fibre Parameters  | 2011       | 27       |
| SCIENCE DIRECT | Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions | 2015       | 39       |
| ICE            | Mechanical properties of steel fibre concrete  | 2013       | 25       |
| ICE            | Strength and toughness properties of steel fibre reinforced concrete under repetitive impact                           | 2011       | 6        |
| ASCE           | Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression   | 2008       | 161      |
| ACI JOURNAL    | Report on Fiber Reinforced Concrete  | 2002       | -        |
| ACI JOURNAL    | Report on the Physical Properties and durability of fiber-reinforced concrete  | 2010       | -        |
| ACI JOURNAL    | Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete Reported by ACI Committee 544                                | 1999       | -        |
| ACI JOURNAL    | Measurement of properties of fiber reinforced concrete   | 1999       | -        |
| ACI JOURNAL    | Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete                    | 1998       | -        |

**Fonte:** da autora.

**Tabela 2:** Informações dos artigos selecionados para “*Corrosion of Steel fibre reinforced concrete*”

| BASE           | TÍTULOS   | PUBLICAÇÃO | CITAÇÕES |
|----------------|---|------------|----------|
| SCOPUS         | Corrosion Effects on the Strength Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete Containing Slag and Corrosion Inhibitor | 2014       | 5        |
| SCIENCE DIRECT | Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks  | 2005       | 139      |
| SCIENCE DIRECT | Corrosion Resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review   | 2018       | 9        |
| SCIENCE DIRECT | Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview   | 2016       | 7        |
| SCIENCE DIRECT | Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete   | 2015       | 42       |
| SCIENCE DIRECT | Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete  | 2010       | 53       |

**Fonte:** da autora.

# CAPÍTULO 1: CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

## 1.1 Adição de fibras no concreto

Concreto reforçado com fibras (CRF) é um material reconhecido por proporcionar ao concreto convencional uma série de vantagens e melhorias que viabilizam a aplicação destes concretos em pavimentos, rodovias, pontes, túneis e até em elementos estruturais como estacas, vigas, pré-fabricados, paredes ou pisos (ELSAIGH; ROBERTS; KEARSLEY, 2011). Algumas das propriedades benéficas trazidas pela adição de fibras no concreto são:

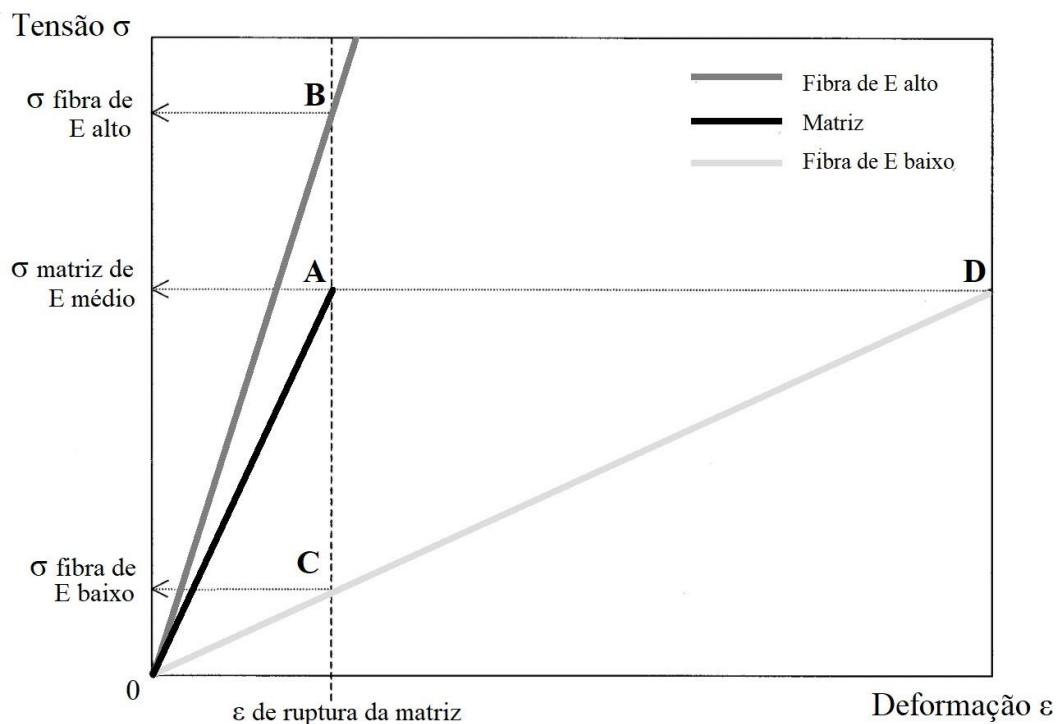
maior resistência à tração residual pós-ruptura conferida pelos mecanismos de pontes de transferência de tensões, aumento considerável da energia absorvida e da força de impacto do concreto, maior resistência ao fogo, ductilidade em compressão que podem ser melhoradas se um volume de fibras entre 5-20% for adicionado ao concreto, aumento do módulo de elasticidade, menor fragilidade, controle da iniciação de fissuras, do seu desenvolvimento e propagação.

Entretanto, é importante ressaltar que as propriedades do concreto reforçado com fibras vão depender de uma série de fatores como o volume, tipo, orientação, geometria, resistência das fibras, das características das ligações superficiais e dos efeitos causados pelo tamanho dos agregados. Além disso, existe disponível uma grande variedade de fibras disponíveis, tanto para uso comercial como experimental, que podem ser classificadas, basicamente, como metal, vidro, sintética e naturais e podem apresentar um alto ou baixo módulo de elasticidade (E).

Na figura 1 é apresentado um gráfico Tensão ( $\sigma$ ) x Deformação ( $\epsilon$ ) que explica o comportamento de um compósito reforçado com fibras. A linha O-A representa a matriz de um concreto convencional. A linha O-B representa o comportamento de fibras com alto E enquanto que a linha O-D representa fibras com baixo E. Percebe-se então, que no momento da ruptura da matriz (ponto A) e de transferência da tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C), esta fibra tem que deformar significativamente para atingir a mesma tensão suportada pela matriz inicialmente (ponto D). Dessa maneira, a fibra de baixo E não oferece uma capacidade de reforço após o rompimento da matriz ou então permitirá uma grande deformação do compósito e, conseqüentemente, um elevado nível de fissuração. Em contraposição, as fibras de alto E apresentam um alto nível de tensão no momento

da ruptura da matriz (ponto A) o que permite que estas fibras atuem como reforço do compósito a partir do ponto B até que sua resistência não seja ultrapassada (FIGUEIREDO, 2000). Assim, as fibras com baixo E são utilizadas no controle de fissuras por retração que surgem no período inicial de hidratação do cimento. Já as fibras com alto E são destinadas para, além do controle da fissuração, ao reforço primário do concreto.

**Figura 1:** Diagrama Tensão x Deformação Elástica da matriz do concreto e fibras



Fonte: Figueiredo, 2000.

Dentre a grande variedade de fibras existentes, os concretos reforçados com fibras de vidros possuem utilização em painéis de fachada no exterior de prédios, em restauração de edifícios para substituir paredes e fachadas de azulejos uma vez que este compósito apresenta menor peso e versatilidade para dar forma (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002). Entretanto, a adição de fibras de vidro no concreto demanda de fibras especiais capazes de resistir a reações álcalis, uma vez que se tem uma deterioração natural da fibra de vidro por parte dos álcalis do cimento.



Os concretos com adição de fibras sintéticas (acrílico, carbono, nylon, poliéster, polietileno, polipropileno) são aplicados em lajes, pavimentos, revestimento de túneis, painéis, telhas e abóbadas pré-fabricadas. As fibras de carbono têm sua utilização limitada devido ao custo, mas têm sido empregadas em membranas para estruturas, cascos de barcos ou em pisos (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002). O polipropileno e nylon, fibras de baixo módulo de elasticidade, são utilizados para o controle da fissuração. Quanto maior o fator de forma da fibra (relação entre o comprimento e o diâmetro), maior controle da fissuração é obtido. Em contraposição, um maior fator de forma também gera uma redução na fluidez do compósito. A fibra de polipropileno proporciona, ainda, uma melhor trabalhabilidade ao concreto já que se tem uma redução considerável na exsudação do concreto (FIGUEIREDO, 2000).

Já os concretos reforçados com fibras naturais (sisal, casca de coco, celulose, etc.) aplicam-se às construções de baixos custos por valorizar o uso de materiais locais e as exigências de desempenho não são elevadas (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002). No concreto, meio alcalino, estas fibras podem apresentar problemas de durabilidade pois podem ser deterioradas pela matriz do compósito. Assim, devem ser utilizadas após tratamentos de impermeabilização. A tabela 3 apresenta uma comparação entre as principais características das fibras mais utilizadas para reforço do concreto e as principais características da matriz de cimento.

**Tabela 3:** Quadro comparativo entre as principais fibras utilizadas para reforço do concreto

| Fibra                               | Diâmetro (µm) | Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> ) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Resistência à tração (GPa) | Deformação na ruptura (%) |
|-------------------------------------|---------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Aço                                 | 5 - 500       | 7,84                                 | 200                          | 0,5 - 2,0                  | 0,5 - 3,5                 |
| Vidro                               | 9 - 15        | 2,6                                  | 70 - 80                      | 2 - 4                      | 2,0 - 3,5                 |
| Amianto Crocidolite                 | 0,02 - 0,4    | 3,4                                  | 196                          | 3,5                        | 2,0 - 3,0                 |
| Amianto Crisólito                   | 0,02 - 0,4    | 2,6                                  | 164                          | 3,1                        | 2,0 - 3,0                 |
| Polipropileno                       | 20 - 400      | 0,9 - 0,05                           | 3,5 - 10                     | 0,45 - 0,76                | 15 - 25                   |
| Aramida (Kevlar)                    | 10 - 12       | 1,44                                 | 63 - 120                     | 2,3 - 3,5                  | 2 - 4,5                   |
| Carbono (alta resistência)          | 8 - 9         | 1,6 - 1,7                            | 230 - 380                    | 2,5 - 4,0                  | 0,1 - 1,5                 |
| Nylon                               | 23 - 400      | 1,14                                 | 4,1 - 5,2                    | 0,75 - 1,0                 | 16,0 - 20,0               |
| Celulose                            | -             | 1,2                                  | 10                           | 0,3 - 0,5                  | -                         |
| Acrílico                            | 18            | 1,18                                 | 14-19,5                      | 0,4 - 1,0                  | 3                         |
| Polietileno                         | 25 - 1000     | 0,92 - 0,96                          | 5                            | 0,08 - 0,60                | 3-100                     |
| Madeira                             | -             | 1,5                                  | 71                           | 0,9                        | -                         |
| Sisal                               | 10 - 50       | 1,5                                  | -                            | 0,8                        | 3,0                       |
| Matriz de Cimento (para comparação) | -             | 1,5 - 2,5                            | 10 - 45                      | 0,003 - 0,007              | 0,02                      |

Fonte: Bunter; Mindess, 1990.

Dentre as opções de fibras disponíveis para adição em concreto, a fibra de aço tem destaque. Estas fibras são classificadas como fibras de alto E e, portanto, podem ser destinadas para o reforço primário do concreto e não apenas ao mero controle de fissuração. Assim, o CRFA possui grande aplicação para estruturas sujeitas a cargas de flexão e cisalhamento acima do estado limite de serviço e estruturas expostas a impactos ou forças dinâmicas como sismos ou ações cíclicas. O compósito apresenta maior resistência à tração, tenacidade, durabilidade, período de fadiga e resistência ao impacto. As fibras de aço também possuem vantagens em relação à substituição do uso de estribos em vigas (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002).

## 1.2 Especificação das fibras de aço

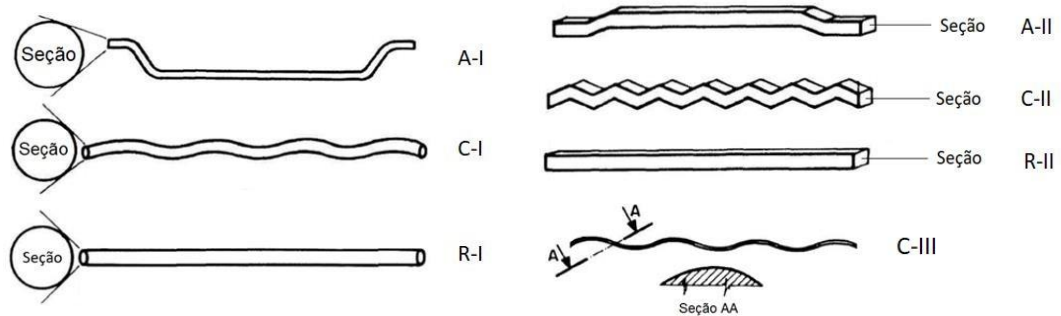
De maneira geral, os comprimentos das fibras de aço variam de 12,7 mm a 63,5 mm, sendo que os diâmetros mais comuns vão de 0,45 mm a 0,04 mm. Quanto aos formatos, as fibras podem ser arredondadas, ovais, retangulares, com seções crescentes de acordo com o processo de produção e dos materiais utilizados. A quantidade usual de fibras está entre 0,25% a 2% em volume ou 20 kg/m<sup>3</sup> a 157 kg/m<sup>3</sup> (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002).

A especificação das fibras é feita, usualmente, por sua resistência e pelo teor de fibras. A resistência à flexão é normalmente exigida para aplicações de pavimentação enquanto que a resistência à compressão é exigida para aplicações estruturais. Valores típicos de resistência à flexão em 28 dias são de 4,8 a 6,9 MPa enquanto que resistência à compressão vão de 34,5 a 48,3 MPa. De maneira geral, a adição de fibras não aumenta a capacidade de resistência à compressão do concreto, mas aumenta a sua capacidade de deformação à compressão em cargas últimas (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002).

As fibras de aço a serem adicionadas no concreto devem ter um comprimento discreto, manter uma proporção comprimento por diâmetro (L/D – fator de forma) entre 20 a 100 e ser suficientemente pequenas para garantir uma boa dispersão quando misturadas aos outros componentes do concreto. A resistência da fibra, sua rigidez e sua capacidade de ligar-se ao concreto também são características importantes para serem observadas ao se definir a melhor fibra a ser utilizada (DIXON; PRESTRERA; CROCKER; *et al.*, 2002).

Devido à grande variedade de formas geométricas e modo de produção, as fibras de aço recebem classificações que devem ser observadas na escolha da fibra. Na ABNT NBR 15530:2007 (Fibras de aço para concreto – Especificação) as fibras de aço são classificadas quanto à conformação em tipo A – com ancoragem nas extremidades, tipo C – corrugada e tipo R – reta (sem ancoragem nas extremidades). Já quanto ao processo de produção elas são classificadas em classe I – oriunda de arame trefilado a frio, classe II – oriunda de chapa laminada cortada a frio e classe III – oriunda de arame trefilado e escarificado. Na figura 2 estão exemplos das fibras de aço conforme o tipo e classe. Na tabela 4, adaptada da NBR 15530:2007, relaciona-se a cada tipo e classe de fibras um fator forma (L/D) mínimo, um limite de resistência à tração do aço ( $f_u$ ) e variações permitidas que devem ser respeitadas.

**Figura 2:** Fibras trefiladas (classe I), Fibras de chapa laminada corta a frio (classe II) com ancoragem nas extremidades (A), corrugada (C) e reta (R) e Fibra trefilada escarificada (classe C) corrugada (C)



**Fonte:** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.

**Tabela 4:** Tipos, classes e restrições para as fibras de aço para uso no concreto

| Tipo (geometria) | Classe da fibra | Fator de Forma mínimo $\lambda$ | Limite de resistência à tração do aço – $f_u$ (MPa*) | Variação permitida para o comprimento (L) em relação ao valor especificado |           | Variação permitida para diâmetro equivalente (de) |
|------------------|-----------------|---------------------------------|--|--|-----------|---|
|                  |                 |                                 |  | L > 35 mm  | L ≤ 35 mm |   |
| A                | I               | 40                              | 1000   | ± 5%   | ± 10%     | ± 5%  |
|                  | II              | 30                              | 500  | ± 5%   | ± 10%     | ± 5%  |
| C                | I               | 40                              | 800  | ± 5%   | ± 10%     | ± 5%  |
|                  | II              | 30                              | 500  | ± 5%   | ± 10%     | ± 5%  |
|                  | III             | 30                              | 800  | ± 5%   | ± 5%      | 0,15 mm   |
| R                | I               | 40                              | 1000   | ± 5%   | ± 10%     | ± 5%  |
|                  | II              | 30                              | 500  | ± 5%   | ± 10%     | ± 5%  |

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

**Fonte:** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.

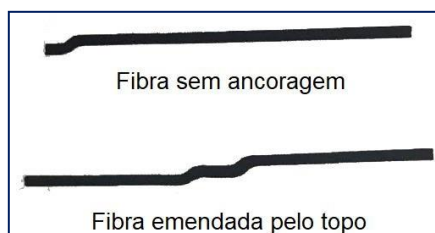
Na NBR 15530:2007 existem ainda, algumas outras verificações que devem ser cumpridas ao se definir a fibra a ser adicionada no concreto. Elas se referem a resistência ao dobramento, a verificação das dimensões e a possíveis defeitos.

A resistência ao dobramento deve ser verificada em uma amostra de 10 fibras retiradas aleatoriamente de cada lote. Verifica-se então, manualmente, o dobramento das fibras sobre um pino de 3,2 mm de diâmetro a uma temperatura superior a 16°C. As fibras devem suportar um dobramento de um ângulo de 90° sem quebra. Se 90% das fibras apresentarem esta resistência, o lote é aprovado.

Já as dimensões das fibras serão validadas a partir de uma verificação em uma amostra de 60 fibras coletadas em no mínimo 10% das embalagens que compõem o lote em questão. Se 90% das fibras atenderem aos requisitos da tabela 4, as fibras estão aprovadas.

Por último, deve ser feita a verificação de defeitos. Ela deve ser feita em uma amostra de 200g de cada lote. O lote será validado quando 95% da massa das fibras não apresentarem defeitos. Os defeitos que devem ser observados são fibras emendadas pelo topo e fibras tipo A que não apresentarem ancoragem, ambos exemplificados na figura 3. Oxidação superficial pode ser aceita desde que seja removível sem necessitar a utilização de material abrasivo.

**Figura 3:** Defeitos que as fibras de aço podem apresentar



**Fonte:** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.

Na tabela 5 estão resumidas estas exigências feitas pela NBR 15530:2007 para avaliação das fibras.

**Tabela 5:** Plano de amostragem para um lote

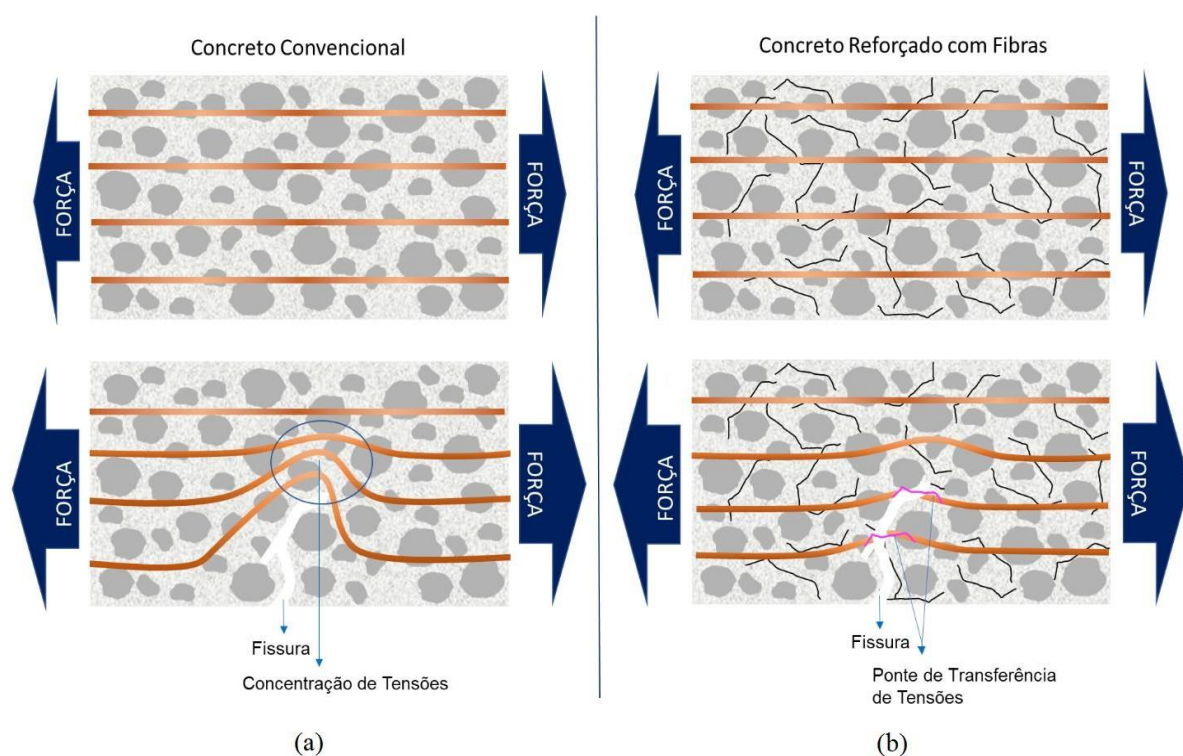
| Ensaio                  | Amostragem mínima | % mínima das fibras |
|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Dobramento              | 10 fibras         | 90                  |
| Verificação dimensional | 60 fibras         | 90                  |
| Verificação de defeitos | 200 g             | 95                  |

**Fonte:** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.

### 1.3 Propriedades do CRFA

O concreto é um material frágil sujeito à concentração de tensões quando fissuras surgem na superfície. As fibras de aço, por sua vez, além de dificultarem a propagação de fissuras, trabalham promovendo uma redistribuição dos esforços ao formarem pontes de transferência de tensões. Assim, a partir do reforço de fibras no concreto, minimiza-se a concentração de tensões nas fissuras e tem-se uma grande redução na velocidade de propagação delas. Em resumo, a adição de fibras confere ao compósito uma capacidade pseudo-dúctil de resistir a carregamentos mesmo após o surgimento de fissuras e, em consequência, se tem uma redução do caráter frágil do concreto.

**Figura 4:** Comportamento do concreto sob tensões antes e após o surgimento de fissuras



(a) Sem adição de fibras

(b) Com adição de fibras

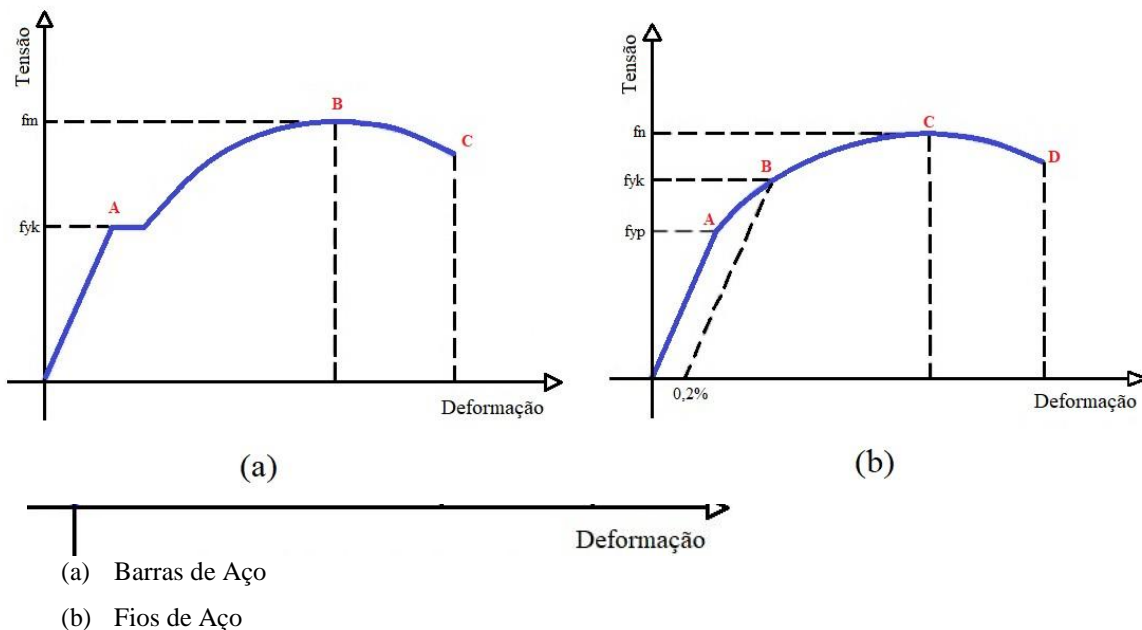
**Fonte:** Figueiredo, 2000 (adaptada).

A figura 4 é uma representação do comportamento do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras diante da aplicação de esforços. No primeiro caso, quando as forças aplicadas atingem um valor suficiente para provocar o

aparecimento de fissuras, as linhas de tensões que, inicialmente, atravessavam o concreto sem dificuldade, passam a concentrar-se na área danificada pelo surgimento da fissura. A fissura comporta-se como um bloqueio à passagem das linhas de tensão. Quando se tem a adição de fibras elas tornam-se responsáveis por transferir a tensão de um ponto a outro na fissura o que minimiza a concentração de tensões. É importante ressaltar que o nível de tensão que a fibra consegue transferir depende de fatores como o seu comprimento e o teor de fibras utilizado (FIGUEIREDO, 2000).

Em consequência, este comportamento dos CRFA proporciona um aumento a resistência à compressão e, de maneira mais significativa, proporciona um aumento no pico de tensão, uma resistência à tração melhorada em até 40% quando 1,5% de volume de fibras é adicionado. A inclinação gradual observada na curva Tensão x Deformação dos CRFA ressaltam o desempenho mecânico do compósito em relação a melhores resistências à tração e cisalhamento, rigidez, ductilidade, durabilidade, fadigas e resistência ao encolhimento (TADEPALLI; MO; HSU, 2013). Na figura 5 é apresentada a curva Tensão x Deformação das barras de aço e de fios de aço, em que é possível perceber diferenças de comportamento.

**Figura 5:** Gráfico Tensão x Deformação

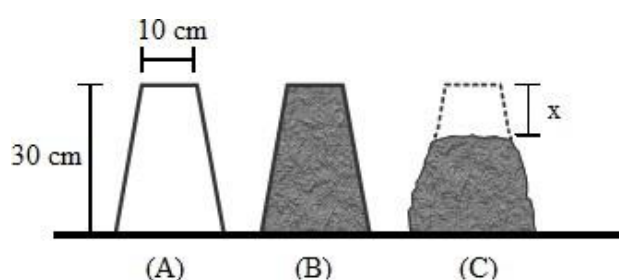


**Fonte:** Padaratz, 2017.

Em contraposição, a quantidade de fibras que podem ser utilizadas sem perdas inaceitáveis de trabalhabilidade do CRFA depende das condições de exposição, do formato da fibra, da razão L/D, do tipo e quantidade de aditivos utilizados para reduzir o fator a/c. A fim de garantir esta propriedade, recomenda-se uma dosagem de fibras de 0,5 a 3% de volume para concretos normais. As adições (cinzas, sílica, escória) podem ser uma alternativa para garantir uma boa trabalhabilidade sendo recomendada a adição de até 15% do peso do cimento (ACI, 1996). Destaca-se também que a adição de fibras no concreto fresco reduz o slump para 65-90 mm (SOULIOTI *et al.*, 2011).

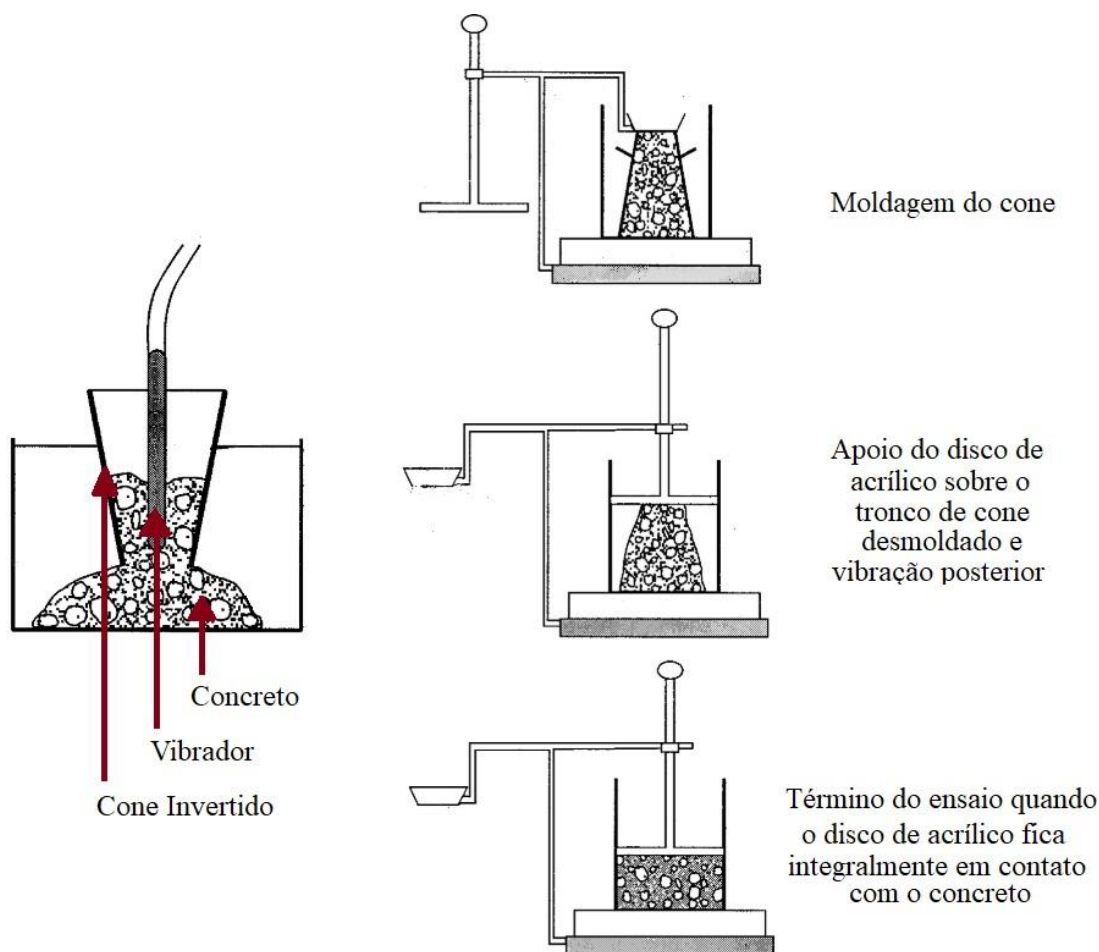
No ACI 544.3R (1993) recomenda-se, como ensaio para avaliação da trabalhabilidade dos CRFA, três métodos. O mais simples deles refere-se ao abatimento de cone tradicional (NBR NM67) como demonstrado na Figura 6, o segundo trata-se do abatimento de cone invertido (ASTM C995-94) em que para se medir a fluidez do compósito, ele é submetido a uma vibração forçada para que o compósito passe pelo cone e o terceiro requer a utilização do equipamento VeBe capaz de determinar os parâmetros da trabalhabilidade do concreto (ACI Standard 211.3). O ensaio de abatimento de cone invertido e o VeBe são apresentados na Figura 7.

**Figura 6:** Teste do Abatimento do Cone



**Fonte:** Cespe, 2015.

**Figura 7:** Ensaio de abatimento de cone invertido e VeBe



Fonte: Figueiredo, 2000.

Quanto as propriedades do concreto endurecido, estas dependerão do produto do volume de fibras utilizado pelo fator de forma (índice da fibra). O índice da fibra é um importante parâmetro: quando menor que 0,25, as fibras não afetarão significativamente as propriedades mecânicas do compósito e, quando maior que 1,2, o compósito apresentará uma baixa trabalhabilidade (TADEPALLI; MO; HSU, 2013).

Nos Apêndices A – F é possível encontrar tabelas comparativas que apresentam conclusões trazidas em importantes estudos a respeito das propriedades do concreto reforçado com fibras de aço. São abordados os tópicos de compressão, tração, flexão, cisalhamento e torção, impacto, fadiga, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, rigidez, abrasão, deformação e geometria da fibra. As principais informações observadas estão resumidas a seguir:



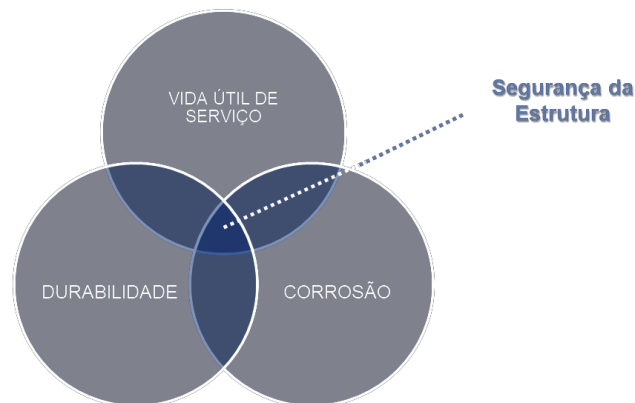
- Compressão: de maneira geral, percebe-se um consenso na defesa da melhoria da resistência à compressão dos CRFA dependendo da quantidade de fibra adicionada, mas existe uma contradição na quantificação do volume de fibras necessário para se alcançar a melhoria.
- Tração: estudos são ainda divergentes - existe estudo que não observa melhorias, outro defende uma melhoria significativa na resistência à tração com resultados de 30 a 40% melhores.
- Flexão: estudos concordam que existe uma melhoria na resistência. Observa-se ainda que o tamanho do agregado graúdo pode influenciar no desempenho.
- Resistência ao cisalhamento, fadiga e o comportamento sob carga de impacto: as pesquisas concordam que existem melhorias quando se adiciona fibras de aço.

As propriedades do CRFA são bem conhecidas a curto-prazo. Em contraposição, a durabilidade do compósito nas estruturas ainda é um vasto campo a ser explorado. O comportamento ao longo-prazo do CRFA aplicado nas estruturas e com ocorrência de fissuras depende da capacidade de esforço da fibra entre as extremidades da fissura. Por sua vez, esta capacidade da fibra depende do efeito de fadiga, da deformação mecânica e, também, da corrosão da fibra (GRANJU; BALOUCH, 2005).

## CAPÍTULO 2: DURABILIDADE E CORROSÃO

Adam Neville (2000) define como durabilidade o contínuo desempenho de todas as funções das estruturas a partir da manutenção da resistência e dos serviços necessários durante a vida útil de projeto especificada para as condições as quais se espera que a estrutura seja exposta. Assim, a durabilidade é um dos mais importantes aspectos do concreto devido a sua influência fundamental nas condições da vida útil de serviço das estruturas do material e, por sua vez, os processos corrosivos são um dos principais fatores responsáveis por afetar a durabilidade das estruturas. A figura 8 ilustra a relação existente entre o processo corrosivo em uma estrutura que afeta diretamente a sua durabilidade e que, como consequência, afeta a vida útil de serviço da estrutura. Todos esses impactos podem agravar as consequências dos demais colocando em risco a segurança da estrutura.

**Figura 8:** Relação entre impactos na segurança da estrutura



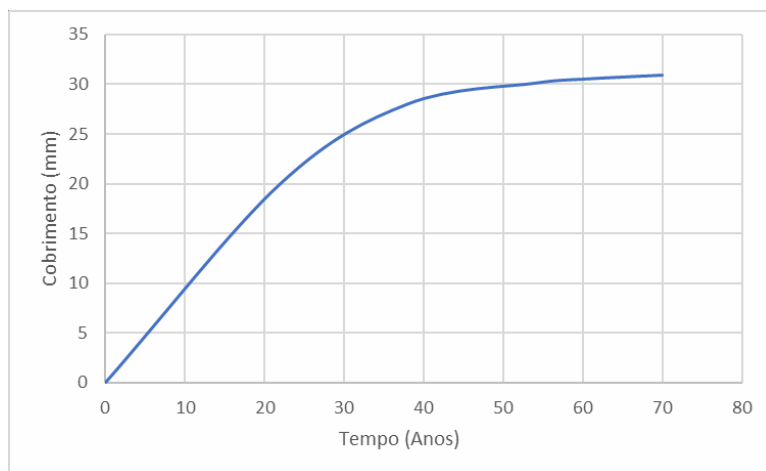
**Fonte:** da autora.

Para os CRFA, é relatado na literatura que a sua corrosão é menos ativa que no concreto armado (GRANJU; BALOUCH, 2010; BALOUCH; FORTH; GRANJU, 2005; MANGAT, 1987; MARCOS-MESON *et al.*, 2018) uma vez que a adição de fibra proporciona um melhor controle da fissuração do concreto e uma melhora nas suas propriedades mecânicas como previamente discutido. Entretanto, entender os mecanismos de deterioração do CRFA é fundamental para que se projete de maneira menos conservadora e cada vez mais sustentável e, também, para que o compósito possa ser utilizado de maneira otimizada.

Quando se discute a respeito da vida útil de serviço de uma estrutura, é importante considerar dois períodos: o de iniciação e de propagação da corrosão. A fase de iniciação compreende o tempo necessário para que agentes externos penetrem no concreto causando a despassivação da fibra de aço. Depois do início do processo corrosivo, a taxa de corrosão dependerá da umidade e quantidade de oxigênio disponível, além da resistividade entre o ânodo (região do aço em condições desfavoráveis e com propensão à oxidação – liberação de elétrons) e o cátodo (região em condições mais favoráveis e com propensão à redução – recebimento de elétron) do concreto (BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997). Já a fase de propagação corresponde o período em que se tem a corrosão ativa podendo chegar a perda da seção da fibra e acumulação dos produtos da corrosão. Em consequência, o concreto sofre um processo de desagregação até ocasionar uma redução na segurança da estrutura (BERROCAL, *et al.*, 2015).

Para o concreto armado, os fenômenos de transporte (períodos de iniciação e de propagação da corrosão) observados nos mecanismos de deterioração apresentam um comportamento bem definido conforme expresso na Figura 9. Entender esse comportamento traz implicações importantes na definição da camada de cobrimento para o concreto armado. Entretanto, para o CRFA, ainda não foi possível definir um comportamento preciso: existem diversas variáveis (qualidade da matriz do concreto, tipo, quantidade e distribuição das fibras, além das diversas condições de exposição ao qual o CRFA está exposto) que dificultam o entendimento e padronização deste comportamento.

**Figura 9:** Penetração da Carbonatação em relação ao tempo e ao cobrimento



**Fonte:** FÉLIX, 2018.

A relação entre corrosão de estruturas reforçadas e fissuras também é um tema frequentemente investigado por diferentes autores (OTIENO; ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2010; BERROCAL; *et al.*, 2015; SCHIESSL, P.; RAUPACH, M., 1997; MARCOS-MESON *et al.*, 2018). Estudos indicam que parâmetros como frequência, orientação, capacidade de auto-recuperação da fissura, o nível de esforços, a condição da interface entre o concreto e as fibras podem ter impactos significativos no processo de corrosão (BERROCAL, *et al.*, 2015).

Quanto a natureza das fibras, a sua descontinuidade em relação às barras de aço no concreto armado apresenta influências positivas: menores diferenças de potenciais e menores relações entre os respectivos ânodos e cátodos. Para as dimensões das fibras, os estudos observam uma corrosão insignificante para fibras com comprimentos até 160 mm (MARCOS-MESON *et al.*, 2018).

Desta maneira, quando se trata da corrosão das fibras, o acúmulo dos produtos do processo é capaz de bloquear os poros ao redor da fibra, limitando a difusão de oxigênio e íons pela interface concreto-aço e, conseqüentemente, o avanço da corrosão. É importante destacar que as tensões geradas pela expansão causada pela corrosão das fibras não serão suficientes para ocasionar novas fissuras na matriz (NORDSTROM, 2005).

Quanto a interface entre o concreto e a fibra, quanto mais densa e uniforme a Zona de Transição Interfacial (ITZ), maior será a proteção contra a corrosão do concreto, assim como quanto mais grossa a camada de hidróxido de cálcio (no CRFA chega a ser de duas a três vezes mais grossa que no concreto armado) mais difícil será a entrada de  $H_2CO_3$ . Em adição, a quantidade limitada de poros e defeitos na ITZ do CRFA devido a natureza descontínua da fibra (além de estarem mergulhada no concreto de maneira equivalente ao agregado) dificulta a formação de áreas mais favoráveis para o início da corrosão (MARCOS-MESON *et al.*, 2018).

Já a respeito do processo de auto-recuperação do concreto, é importante considerar o efeito em fissuras de espessuras limitadas. Em condições de umidade e entrada limitada de água pela fissura com pequena espessura, pode ocorrer um processo de recuperação do concreto: reação que ocorre entre o  $CO_2$  dissolvido na água e os íons de cálcio liberados pelo  $Ca(OH)_2$ . É justamente quando se tem fluxo controlado que a água fica supersaturada de íons de cálcio e bicarbonato. Assim, cristais de calcita ( $CaCO_3$ ) depositam-se ao longo das paredes da fissura e, aos

poucos, a fissura é fechada. Na tabela 6 são apresentadas espessuras de fissuras em relação a pressão oferecida pela água para que propicie a auto-recuperação do concreto.

**Tabela 6:** Relação entre pressão de água e espessura da fissura para ocorrência da auto-recuperação do concreto

| Pressão da água (h/t) | Espessura da fissura |
|-----------------------|----------------------|
| < 2,5                 | < 0,2                |
| < 5                   | < 0,15               |
| < 10                  | < 0,10               |
| < 20                  | < 0,05               |

h: coluna d'água  
t: Espessura da fissura

**Fonte:** LOHMEYER, 1987 (apud NORDSTROM, 2005).

No Anexo A é trazido um quadro comparativo com as principais variáveis que afetam significativamente o estudo do CRFA. Como este quadro trata-se da pesquisa científica de diferentes autores nos últimos 15 anos, é possível ter uma visão geral dos resultados já encontrados e dos pontos de fragilidade a respeito do comportamento do CRFA, sendo eles:

- Nenhum dos estudos reproduz as mesmas variáveis (quantidade de cimento, fator a/c, tipo de fibra, volume de fibra, condições de exposição, condições de ensaio, tempo de exposição, condição das fissuras, espessura crítica da fissura e camada de sacrifício) dificultando a confirmação dos resultados obtidos;
- É significativamente maior o número de estudos que investigam os ensaios do CRFA sem fissuras (poucos estudos avaliam CRFA com fissuras) comprovando a dificuldade em se padronizar o comportamento do compósito exposto a agentes agressivos quando da presença de fissuras;
- Existem grandes variações de espessuras críticas (resultados não convergem);
- A camada de sacrifício do CRFA, na maioria dos casos, está entre 1 a 5 mm;
- Os corpos de prova normalmente são expostos a condições de exposição mais agressivas (zonas de maré e respingos ou condições de ciclos de

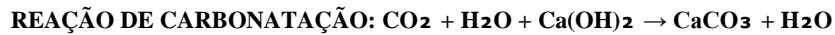
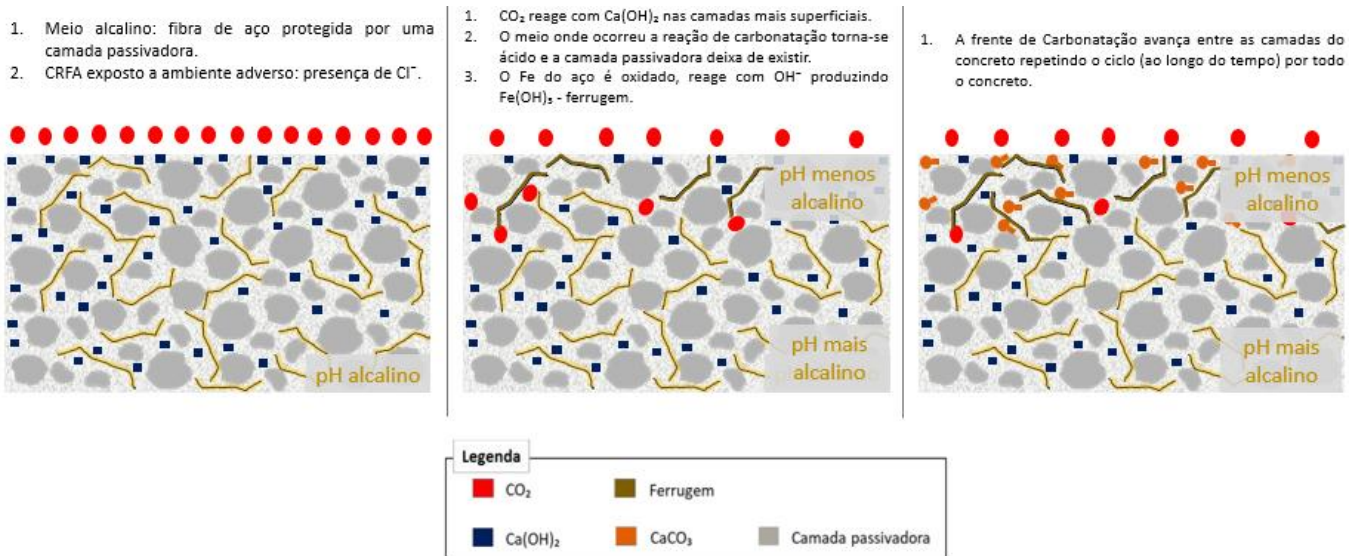
molhagem e secagem). É preciso ensaios que abranjam todas as condições de exposição para que se estabeleça parâmetros otimizados (maior agressividade do meio, maior a proteção que se deve projetar para que o concreto resista) e que permita o desenvolvimento de projetos seguros para todas as regiões.

As principais causas de corrosão, tanto no concreto armado quanto no CRFA, são a penetração de íons cloretos e a redução do pH devido a carbonatação da matriz. Em suma, no CRFA a corrosão afeta as pontes de transferência de tensão nas fissuras e, conseqüentemente, o desempenho das estruturas do concreto é colocado em risco já que a durabilidade do material dependerá do desempenho da capacidade das fibras em realizar tais pontes de transferência. Assim, a corrosão das fibras ocasionará, além da fragmentação do concreto, a redução área da seção da fibra e, conseqüentemente, colocará a durabilidade da estrutura em perigo (GRANJU; BALOUCH, 2005). A seguir, analisa-se o comportamento do CRFA exposto a condições de corrosão por íons cloretos e carbonatação.

## 2.1 Carbonatação

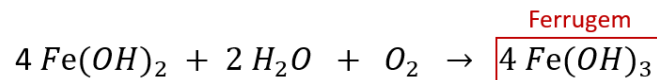
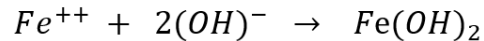
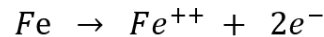
O processo corrosivo no CRFA caracteriza-se, inicialmente, pelo aparecimento de manchas na superfície do concreto exposto a ambientes adversos. As fibras, distribuídas de maneira homogênea no compósito, estão expostas na superfície do concreto (não existe uma camada de cobertura). O concreto da superfície, em contato com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sofrerá carbonatação (reação entre ácido carbônico e hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – principal componente da matriz do concreto – produzindo carbonato de cálcio  $\text{CaCO}_3$ ). A primeira consequência da reação entre o  $\text{CO}_2$  e os componentes do cimento é a diminuição do pH da matriz que chega a diminuir de 12 para 9. Sabe-se que em condições alcalinas o aço é protegido por uma camada passivadora, entretanto, quanto menor a alcalinidade do meio, maior a chance desta camada deixar de existir. Assim, a fibra de aço fica suscetível a corrosão: o ferro (Fe) do aço oxida e, por meio de reações em cadeia, a ferrugem  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  é produzida de maneira localizada no aço. Na figura 10 é apresentado um esquema para explicar o processo de carbonatação no CRFA e na figura 11 são apresentadas as reações entre o ferro e os produtos do cimento até produzir a ferrugem.

**Figura 10:** Esquema do Processo de Carbonatação do CRFA



Fonte: da autora.

**Figura 11:** Reação entre o Ferro e os Produtos do Cimento na Carbonatação

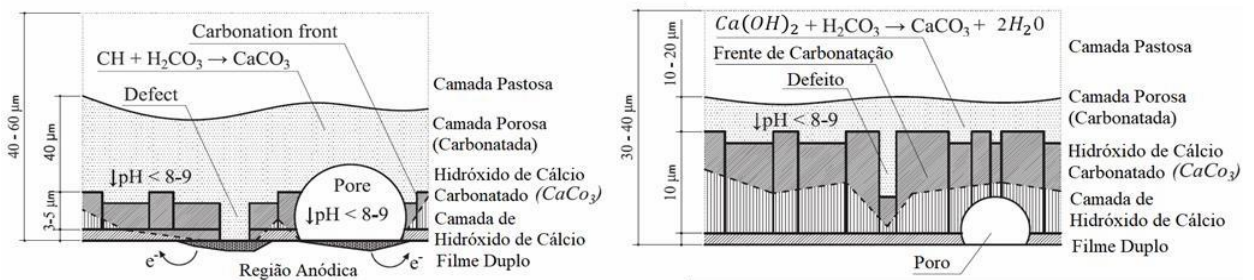


Fonte: Soares; Vasconcelos; Nascimento, 2015.

Comparando a carbonatação do CRFA com o concreto armado, destaca-se que o CRFA demonstra melhor resistência à corrosão. Associa-se a este fenômeno a natureza descontínua das fibras que promovem uma pequena diferença de potencial ao longo da superfície do aço e menores relações entre o cátodo e ânodo. Assim, o pequeno comprimento da fibra colabora para a redução das taxas de propagação da corrosão. Entretanto, Marcos-Meson *et al.* (2018) destacam que o efeito do comprimento da fibra é negligenciável e anodicamente controlado quando estiver entre 0 e 160 mm. Para CRFA fissurado, a adição de fibras também colaborará para menores taxas de desagregação do concreto durante a corrosão das fibras, uma vez que as forças de expansão geradas são insuficientes para fragmentar o concreto. Isso se deve ao diâmetro reduzido da fibra que produz um volume insignificante de substâncias resultantes da oxidação do ferro e este pequeno volume produzido não é capaz de ocasionar a desagregação do compósito (MANGAT, 1987).

Como a ITZ do concreto diz muito sobre o comportamento do compósito, na figura 12 é apresentada a comparação entre a ITZ do concreto convencional e do CRFA em condições de exposição à carbonatação. Nela é possível perceber, em ambos os compósitos, um filme duplo composto por uma camada de cristais de hidróxido de cálcio depositados perpendicularmente sobre a superfície do aço que são cobertos por uma outra camada de gel de silicato de cálcio hidratado. Observa-se ainda, uma camada de hidróxido de cálcio muito maior no CRFA. Esta maior espessura proporciona à fibra um maior isolamento dos agentes externos ( $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ) e, conseqüentemente, maior será a dificuldade para o início da corrosão. Mais superficialmente na ITZ, é possível identificar uma camada porosa mais densa, mais uniforme e com menos defeitos que também colaborará dificultando o início da corrosão. Estas características do CRFA explicam o motivo deste tipo de compósito serem mais resistentes à corrosão.

**Figura 12:** ITZ CRFA x Concreto Convencional expostos à Carbonatação



**Fonte:** MARCOS-MESON *et al.*, 2018.



## 2.1.1 Mecanismos do CRFA diante da ação da frente de carbonatação

Entender os mecanismos do CRFA diante da ação da frente de carbonatação é um passo fundamental para que se avance na padronização dos comportamentos do material exposto a condições de corrosão. De maneira geral, entende-se que o CRFA, quando não fissurado, estará protegido pela ITZ que dificulta a iniciação da corrosão por pite. Uma vez fissurada, a fibra inicia o processo de ponte de transferência causando danos à ITZ e, em sequência, promovendo a corrosão das regiões mais suscetíveis à corrosão. Dentro deste processo, é possível identificar quatro fases que caracterizam o comportamento do concreto diante da ação de íons cloretos.

A primeira delas refere-se ao CRFA submetido à esforços no qual o concreto é capaz de suportar (inferior a resistência do concreto). Assim, a ITZ caracteriza-se por uma camada densa e uniforme que age como uma camada de revestimento protetora impedindo o contato com a água e o oxigênio – elementos necessários para as reações de corrosão do concreto. Quanto mais grossa e uniforme a camada, maior será a proteção uma vez que o avanço da frente de carbonatação é retardado (MARCOS-MESON, 2018).

A segunda fase ocorre quando as tensões ao qual o compósito está submetido são maiores que o concreto é capaz de resistir. Assim, as primeiras fissuras aparecem e as ligações fibra-matriz é ativada: a fibra começa a trabalhar realizando as pontes de transferência. Esta tensão passa a danificar a ITZ facilitando a entrada de oxigênio e o transporte de íons. As fibras que realizam as pontes de transferência entre as fissuras são as áreas mais frágeis do compósito e agem como ânodo (oxidam / perdem elétrons) enquanto as partes das fibras mergulhadas no concreto funcionarão como cátodo (reduzem / recebem elétrons). Tem-se a fase de iniciação da corrosão.

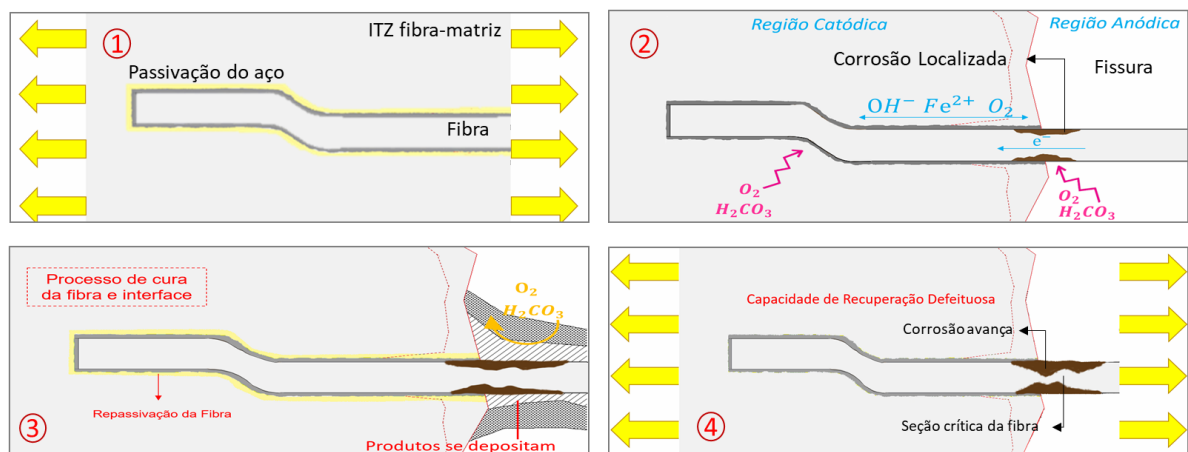
Já a terceira fase ocorre quando os esforços não chegam a caracterizar uma tensão crítica e a ITZ poderá se recuperar em condições até mesmo similares ao estágio um (fenômeno conhecido como auto-recuperação do concreto). A ITZ fibra-matriz, rica em hidróxido de cálcio limita a diminuição do pH e repassiva a superfície do aço nas regiões anódicas. Os produtos da corrosão (fase

2) colaboram para uma melhor interação da fibra e da matriz a partir de ligações

mais fortes (LAMBRECHTS; *et al.*, 2003). Em seguida, a fissura acaba, progressivamente, sendo vedada pelo depósito dos produtos da corrosão que identificam as zonas mais fracas (as fibras que realizam pontes de transferência) como uma superfície preferencial de depósito (HOMMA; MIHASHI; NISHIWAKI, 2009; HUANG; *et al.*, 2009).

Por fim, a quarta fase ocorre quando um esforço excessivo é aplicado na interface fibra-matriz impedindo o processo de auto-recuperação. Como consequência, ter-se-á uma progressiva e localizada redução da seção da fibra devido à corrosão. Quando a seção crítica for atingida (esforços superam a resistência das ligações entre a fibra e a matriz), iniciar-se-á a falha do CRFA e a resistência residual diminuirá (KOSA, 1990; NORDSTROM, 2005). A figura 13 demonstra a caracterização de cada uma das quatro fases que definem o comportamento do CRFA exposto a ação de íons cloretos.

**Figura 13:** Mecanismos de Deterioração dos CRFA expostos à carbonatação

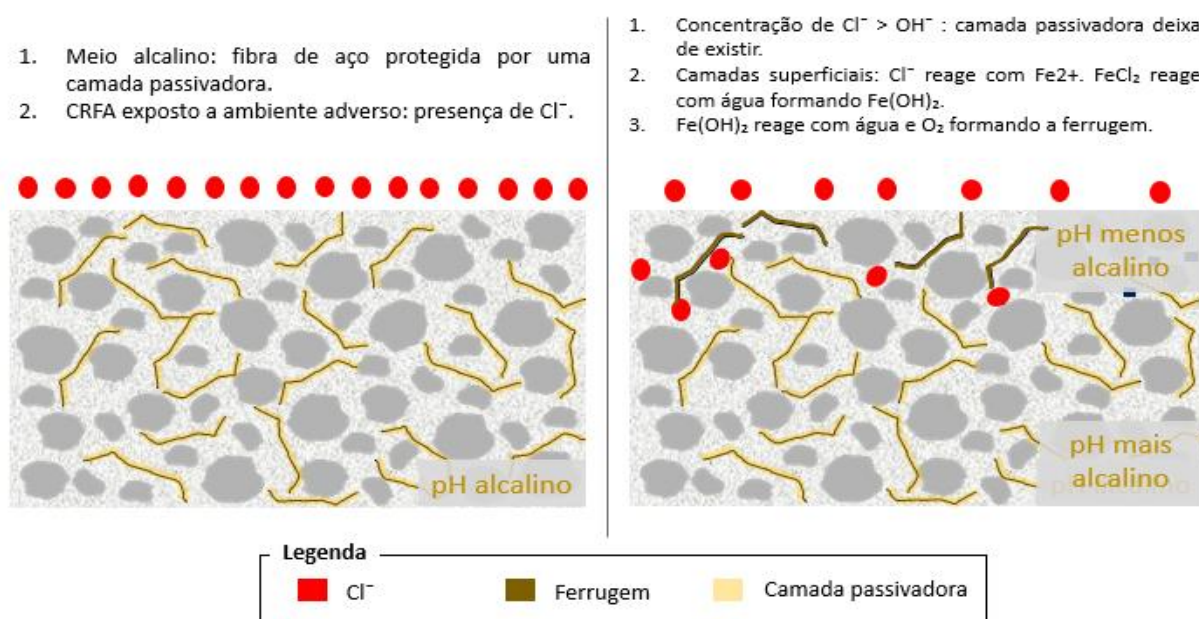


Fonte: MARCOS-MESON *et al.*, 2018.

## 2.2 Íons Cloretos

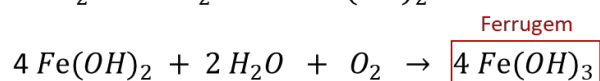
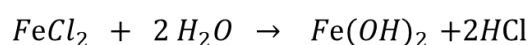
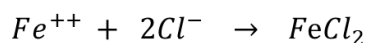
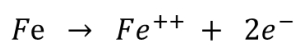
Como discutido anteriormente, a corrosão dos concretos reforçados é um problema significativo atualmente quando se analisa a durabilidade de estruturas de concreto reforçado e a principal causa da corrosão no compósito é o ingresso de íons cloretos seja ela por absorção capilar, impregnação ou difusão. Quando a concentração de cloretos supera a concentração de hidroxilas, a camada passivadora que protege o aço deixa de existir (BERROCAL; *et al.*, 2015). Em seguida, inicia-se uma corrosão por pite (localizada) no aço onde o pH foi reduzido e houve a despassivação. Na figura 14 se tem uma representação do processo de corrosão por cloretos e a figura 15 apresenta as reações que acontecem durante o processo.

**Figura 14:** Esquema do Processo de Entrada de íons Cloretos no CRFA



**Fonte:** da autora.

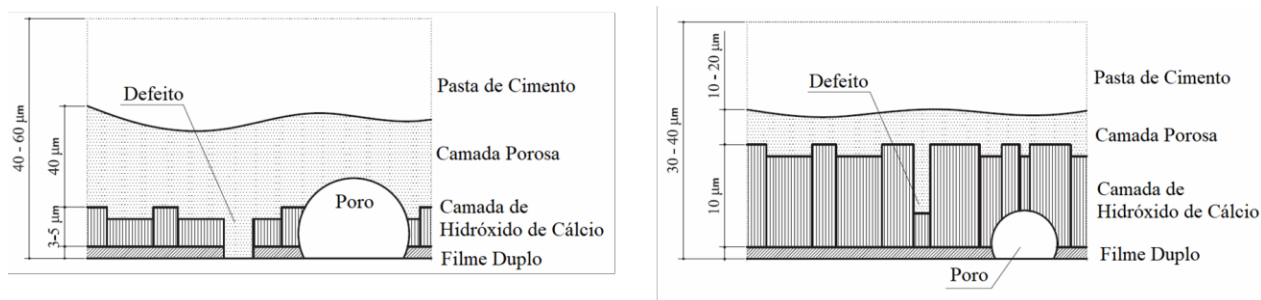
**Figura 15:** Reações entre o ferro e os íons cloretos



**Fonte:** Soares; Vasconcelos; Nascimento, 2015.

Como a ITZ do concreto diz muito sobre o comportamento do compósito, na figura 16 apresenta-se a comparação entre a ITZ do concreto convencional e do CRFA. Nela é possível observar algumas diferenças fundamentais que explicam algumas características do material. Concretos reforçados expostos à íons cloretos apresentam uma interface fibra-matriz mais densa e uniforme, uma camada de hidróxido de cálcio maior ao redor da fibra que proporciona uma proteção maior contra o ingresso de oxigênio e cloretos. Entretanto, embora a camada de hidróxido de cálcio seja maior, a ITZ como um todo apresenta uma espessura menor o que explica os mesmos coeficientes de difusão de cloretos para CRFA e concretos convencionais (BENTUR; DIAMOND; MINDESS, 1985). O filme duplo, observado nas imagens, é composto em ambos os materiais por uma camada de cristais de hidróxido de cálcio depositados perpendicularmente sobre a superfície do aço, adicionados de uma cobertura de gel de silicato de cálcio hidratado. Também é possível observar poros e defeitos limitados no CRFA que, diferentemente do concreto convencional, mitiga o aparecimento de zonas fracas e propícias à corrosão.

**Figura 16:** ITZ CRFA x Concreto Convencional expostos à íons cloretos



**Fonte:** MARCOS-MESON *et al.*, 2018.

Para estruturas de concreto reforçado expostas a ambientes com presença de íons cloretos, a permeabilidade é reconhecida como uma propriedade crítica. Singh e Singhal (2011) demonstram uma redução significativa na permeabilidade do CRFA quando se aumenta o volume de fibras adicionado. Uma maneira cada vez mais recorrente para avaliar a difusão dos íons cloretos e, conseqüentemente, ainda que indiretamente, a permeabilidade do fluido são os ensaios de resistividade elétrica. Estas características podem ser relacionadas com o grau de resistência do concreto

e, conseqüentemente, aos efeitos causados pela exposição à meio ambientes agressivos. Assim, a resistividade elétrica do concreto pode ser uma informação muito útil para avaliar o risco de corrosão do concreto (FRAZÃO; *et al.*, 2015): uma relação linear entre a intensidade de corrosão e a condutividade de barras de aço no concreto armado pode ser percebida e, para o CRFA, essa relação também é esperada mas devido ao caráter mais discreto das fibras, essa relação é menos perceptível (RILEM, 2004; FIALA, 2016). Outro ponto a ser observado é que o CRFA apresenta resistividade elétrica muito baixa devido à alta condutividade elétrica das fibras e ela é afetada negativamente devido a mistura do concreto e a quantidade de fibras adicionadas.

### **2.2.1 Mecanismos do CRFA diante da ação de íons cloretos**

Entender os mecanismos do CRFA diante da ação de íons cloretos é um passo fundamental para que se avance na padronização dos comportamentos do compósito. De maneira geral, entende-se que o CRFA, quando não fissurado, estará protegido pela ITZ que dificulta a iniciação da corrosão por pite. Uma vez fissurada, a fibra inicia o processo de ponte de transferência causando danos à ITZ e, em seqüência, promovendo a corrosão das regiões mais suscetíveis à corrosão. Dentro deste processo, é possível identificar quatros fases que caracterizam o comportamento do concreto diante da ação de íons cloretos.

A primeira delas refere-se ao CRFA submetido à esforços no qual o próprio concreto é capaz de suportar. Assim, a ITZ caracteriza-se por uma camada densa e uniforme que protege o aço e dificulta a ingressão dos íons cloretos, da água e do oxigênio – elementos necessários para as reações de corrosão do concreto. Quanto a esta etapa, existem poucos dados disponíveis a respeito das propriedades e estrutura da interface fibra-matriz: existem estudos que defendem a hipótese de uma interface mais densa e com defeitos limitados (NORDSTROM, 2005; BENTUR; DIAMOND; MINDESS, 1985; PINCHIN; TABOR, 1978), entretanto, alguns outros estudos apontam para uma porosidade significativa em torno das fibras (HWANG, 2015).

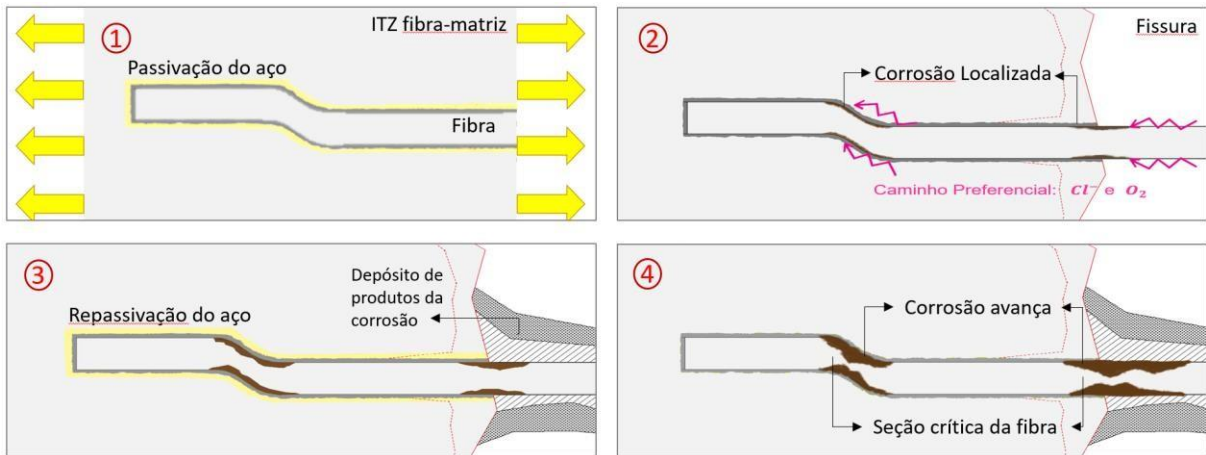
A segunda fase ocorre quando as tensões ao qual o compósito está submetido são maiores que o concreto é capaz de resistir. Assim, as primeiras

fissuras aparecem e a fibra começa a trabalhar realizando as pontes de transferência. A tensão ao qual o CRFA está submetido passa a danificar a ITZ e é possível identificar vestígios de corrosão localizada nas partes mais frágeis – nas regiões das fibras onde há ancoragem e nas fibras que estão expostas nas fissuras. Esta ITZ danificada formará um caminho preferencial para a passagem dos agentes externos (cloretos e oxigênio) promovendo corrosão nas áreas suscetíveis.

Já a terceira fase é caracterizada pelo processo de auto-recuperação do concreto. Esta etapa pode ocorrer quando os esforços não chegam a caracterizar uma tensão crítica e a ITZ poderá se recuperar em condições até mesmo similares ao estágio um. Isso ocorre porque o hidróxido de cálcio será capaz de assistir a ligação entre os íons cloretos, permitindo que o pH aumente e o aço seja repassivado. Devido a corrosão e expansão dos seus produtos, associado ao processo de auto-recuperação na interface e à acumulação de produtos da reação de ligação entre íons cloretos, a fibra passa a ter uma ligação mais forte entre a matriz e a fibra (FRAZÃO; *et al.*, 2015). Por último, a combinação do cimento hidratado, carbonato de cálcio, produtos da corrosão e cristais de sais fecham a fissura limitando a entrada de cloretos e oxigênio e as fibras responsáveis pela transferência de tensões serão as superfícies preferenciais para o depósito destes componentes.

Por fim, a quarta fase ocorre quando um esforço excessivo é aplicado na interface fibra-matriz impedindo o processo de auto-recuperação. Como consequência, ter-se-á uma progressiva e localizada redução da seção da fibra devido à corrosão. Quando a seção crítica for atingida (esforços superam a resistência das ligações entre a fibra e a matriz), iniciar-se-á a falha do CRFA e a resistência residual diminuirá (KOSA, 1990; NORDSTROM, 2005). A figura 17 demonstra a caracterização de cada uma das quatro fases que se entende que definem o comportamento do CRFA exposto a ação de íons cloretos.

**Figura 17:** Mecanismos de Deterioração do CRFA exposto à íons cloretos



Fonte: MARCOS-MESON *et al.*, 2018.

Nos Apêndices G-J são trazidas tabelas comparativas entre pesquisas relevantes para o estudo da corrosão dos CRFA. Analisando as referências em questão é possível identificar os seguintes um ponto claro de consenso: a espessura da fissura influencia expressivamente no aumento do processo corrosivo.

Em contraposição, fragilidades entre as pesquisas foram encontradas e são destacadas a seguir:

- Apenas um trabalho aborda a utilização das técnicas de resistividade elétrica para o estudo do CRFA;
- Enquanto que Frazão, *et al.* (2015) afirma que forças expansivas durante a corrosão não são capazes de desagregar o concreto, Granju e Balouch (2005) apontam para a ocorrência da desagregação do concreto bem como a redução da seção crítica da fibra;
- Amostras apresentaram maior velocidade de corrosão após 28 dias de cura. Já Berrocal *et al.* (2015) afirmam que uma alteração insignificante foi observada no atraso da iniciação do processo corrosivo quando se adiciona fibras (ANANDAN, MANOHARAN, SENGOTIAN; 2014);
- Para Frazão, *et al.* (2015), uma pequena redução foi observada na penetrabilidade do concreto com adição de fibras, enquanto que para Berrocal, *et al.* (2015) demonstrou que o coeficiente de difusão dos íons cloretos não são afetados com a adição de fibras.

Ainda, para o estudo da carbonatação do CRFA, foram encontrados resultados interessantes, mas que não apresentaram confirmação dos dados obtidos:

- Corrosão superficial do CRFA pode ser prevenida por um fator  $a/c < 0,5$  (FRAZÃO; *et al.*, 2015);
- Para adição entre fibras de 0 a 1,5%: quanto maior o volume de fibras, menor a carbonatação das amostras (WANG; NIU; DONG, 2014);



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desta revisão bibliográfica, foi possível concluir que o tema Concreto reforçado por fibras de aço, embora já seja foco de pesquisas antigas (neste estudo, referencia-se uma pesquisa de 1978), ainda possui muito a se avançar para que se entenda seu comportamento. É assim que será possível a criação de parâmetros que regulamentem, de modo confiável, a aplicação do compósito de maneira a otimizar o seu uso (performance), a assegurar construções duráveis e a permitir maior inovação e flexibilidade na seleção de materiais.

Este estudo aponta que as propriedades do CRFA, importantes para que se projete um concreto de qualidade e que previna possíveis corrosões, são focos recorrente de pesquisas. Entretanto, ainda existe discordâncias entre as investigações avaliadas neste trabalho. A principal discussão refere-se à incapacidade de padronizar os efeitos trazidos para o compósito em relação a variação de fibras adicionadas. Assim, desprezando as variáveis volume de fibra adicionado e qualidade do concreto, assume-se que as propriedades do CRFA são melhoradas quando se trata de resistência à compressão, flexão, cisalhamento, fadiga e carga de impacto. Em contraposição, a resistência à tração demonstra um ponto de discordância e que ainda merece ser investigado. Segundo a ACI 544 1R- 96 (2002) a resistência à tração é significativamente melhorada (cerca de 30 a 40% quando se adiciona 1,5% de volume de fibras). Em adição, Lee e Barr (2004) defendem o beneficiamento da performance à fadiga do concreto submetido a cargas de tração. Já a ACI 544 4R-88 (1988) afirma que a resistência à tração é, geralmente, da mesma ordem do concreto convencional. Abdallah *et al.* (2016), por sua vez, defendem que a adição de fibras tem muito pouco efeito na trabalhabilidade e resistência a compressão do CRFA, mas que a resistência a um carregamento último de tração, o comportamento pós-fissura e resistência residual estão fortemente relacionados com o tipo e quantidade de fibras, contradizendo as demais pesquisas analisadas neste trabalho.

Avaliando os resultados encontrados nas referências bibliográficas a respeito do processo de corrosão no CRFA, foi possível identificar um consenso no que se diz respeito ao seu comportamento quando o material não está fissurado: a corrosão é pouco significativa e tende a restringir-se a manchas ao redor das fibras que estão expostas na superfície. Entretanto, a interação entre a fibra-matriz e a ITZ do

compósito ainda apresenta dúvidas: existem estudos que defendem a hipótese de uma interface mais densa e com defeitos limitados (MARCOS-MESON; et al., 2018; NORDSTROM, 2005; BENTUR; DIAMOND; MINDESS, 1985; PINCHIN; TABOR, 1978), porém, Hwang (2015) defende uma porosidade significativa em torno das fibras. Quanto os mecanismos de deterioração do concreto, incluindo a evolução do processo corrosivo e a determinação das fases, percebe-se uma abordagem pouco significativa nas referências analisadas. Além disso, o processo de auto-recuperação do concreto não é bem estabelecido: Kosa (1990), Balouch e Granju (2005) observaram nos seus estudos que fissuras maiores que 0,5 mm não passaram pela fase de auto-recuperação, Abbas (2014) e Mangat (1987) afirmam que para fissuras menores que 0,20 mm, o processo ocorre e pode-se identificar o fechamento da fissura dentro de um tempo curto e Nordstrom (2005) encontrou resultados que demonstram que para fissuras com espessuras menores que 0,20 mm o CRFA passa pelo processo auto-recuperação levando ao fechamento da fissura.

Assim sendo, ressalta-se a necessidade de evolução nos estudos do CRFA. O compósito demonstra-se uma alternativa interessante para a substituição do concreto armado, inclusive já sendo utilizado em elementos estruturais, mas que sem uma consolidação quanto a suas propriedades, padronização de parâmetros essenciais para a determinação do concreto (camada de cobertura/sacrifício, espessura crítica das fissuras, fator  $a/c$ , volume de fibras adicionadas) e mecanismos de deterioração, dificulta a aplicação e otimização do uso do material. É fundamental que, para viabilizar a substituição do concreto armado pelo CRFA, os estudos futuros continuem testando os trabalhos existentes para que se consiga confirmar os resultados e padronizar os mecanismos do compósito, inicialmente para variáveis limitadas (podendo servir de premissa) para, posteriormente, se avançar no material com um todo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S.; SOLIMAN, M.L; NEHDI, M. L. Chloride ion penetration in reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete precast tunnel lining segments. **Materials Journal**, v. 111, p.613–622, 2014.

ABDALLAH, S.; *et al.* Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 325–335, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.3R-02**: Guide for selecting proportions for No-Slump Concrete. ACI Committee 211. Detroit, USA, 1993.

\_\_\_\_\_. **ACI 544.1R**: State-of- the-art report on fiber reinforced concrete. ACI Committee 544. Detroit, USA, 1996.

\_\_\_\_\_. **ACI 544.3R-93**: Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544. Detroit, USA, 1993.

\_\_\_\_\_. **ACI 544 4R-88**: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544, v. 88, Reapproved, 1988.

\_\_\_\_\_. **ACI 544 1R-96**: Report on Reinforced Concrete. ACI Committee, v. 96, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C995-94**: Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone. ASTM International. West Conshohocken, USA, 2001.

ANANDAN, S.; VALLARASU, M. S.; SENGOTTIAN, T. Corrosion effects on the strength properties of steel fibre reinforced concrete containing slag and corrosion inhibitor. **International Journal of Corrosion**, v. 2014, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: 1998**. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 15530:2007** fibras de aço para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2007.

BALENDRAN, R. V.; *et al.* Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. **Building and Environment**, v. 37, p. 1361–1367, 2002.

BALOUC, S. U.; FORTH, J. P.; GRANJU, J. L. Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 410–414, 2010.

BENCARDINO, Francesco *et al.* Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 3, p. 255–263, mar. 2008.

BENTUR, S.; DIAMOND, S.; BERKE, N. S. Introduction. In: **Steel Corrosion in Concrete: Fundamental and Civil Engineering Practice**. E & FN Spon, Londres, p. 1-6, 1997.

BENTUR, A.; DIAMOND, S.; MINDESS, S. The microstructure of the steel fibre-cement interface. **Journal of Materials Science**, v. 20, p.3610–3620, 1985.

BERROCAL, C. G.; *et al.* Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions. **Corrosion Science**, v. 98, p. 128–139, 2015.

BRASIL. CENTRO DE SELEÇÃO E DE PROMOÇÃO DE EVENTOS. Prova CESPE-2015, TER-MT, Analista Judiciário, Engenharia. Brasília, 2015. Disponível em: <<https://www.qconcursos.com/questoes-de-concursos/provas/cespe-2015-tre-mt-analista-judiciario-engenharia>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

DIXON, D. E; *et al.* Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). **ACI Committee 211**, p. 1–38, 2002.

ELSAIGH, W. A.; ROBBERTS, J. M.; KEARSLEY, E. P. Modeling the Behavior of Steel-Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs. **Journal of transportation Engineering**, v. 137, n. 12, p. 882–888, dez. 2011.

FIALA, L.; *et al.* Experimental Study on Electrical Properties of Steel-fibre Reinforced Concrete. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 241–248, 2016.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras de Aço. **Departamento De Engenharia De Construção Civil**, v. Engenheiro, p. 70, 2000.

FRAZÃO, C.; *et al.* Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v.79, p.112-122, 2015.

FRAZÃO, C.; *et al.* Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 155–166, 2015.

GRANJU, J. L.; BALOUCH, S. U. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 572–577, 2005.

HOMMA, D.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Japão, v.7, p.217-228, 2009.

HUANG, G.; YE, G.; QUIAN, C.; SCHLANGEN, E. Self-healing in cementitious materials: materials, methods and service conditions. **Materials & Design**, v. 92, p. 499-511, 2015.

HWANG, J.P.; *et al.* Corrosion risk of steel fibre in concrete. **Concrete and Building Materials**, v.101, p.239–245, 2015.

IBRAHIM, I. S.; CHE, M. B. B. Effects on mechanical properties of industrialised steel fibres addition to normal weight concrete. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 2616–2626, 2011.

KOSA, K.; NAAMAN, A. E. Corrosion of steel fiber reinforced concrete. **ACI Journal**, v. 87, p.27-37, 1990.

LAMBRECHTS, A.; *et al.* Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete. **American Concrete Institute**, v. 212, p.667-684, 2003.

LEE, M. K.; BARR, B. I. G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 4, p. 299–305, 2004.

MANGAT, P.; GURUSAMY, K. Chloride diffusion in steel fiber-reinforced marine concrete. **Cement Concrete**, p. 385–396, 1987.

MARCOS-MESON, V.; *et al.* Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, n. October 2016, p. 1–20, 2018.

METHA, P.; MONTEIRO, P. J. M. Resistência. In: **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo, p. 44-79, 1994.

NEVILLE, A. M. Durabilidade do Concreto. In: **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo, p. 481-530, 1997.

\_\_\_\_\_. The Question of Concrete Durability: We Can Make Good Concrete Today. **Concrete International**, p. 21-26, 2000.

NORDSTROM, E. **Durability of Sprayed Concrete – Steel fibre corrosion in cracks**. 171f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2005.

OTIENO, M.B.; ALEXANDER, M.G.; BEUSHAUSEN, H. Corrosion in cracked and uncracked concrete – influence of crack width, concrete quality and crack reopening. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 6, p. 393–404, 2010.

OU, Y.; *et al.* Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 2, p. 207– 215, 2012.

PADARATZ, I. J. Estruturas de Concreto Armado I. 66 f. Curso de Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

PINCHIN, D. J.; TABOR, D. Interfacial phenomena in steel fibre reinforced cement I: structure and strength of interfacial region. **Cement Concrete Research**, v.8, p.15–24, 1978.

RILEM TC 154-EMC. Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. **Materials and Structures**, p. 623–643, 2004.

SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete. **Materials Journal**, v. 94, p.56-61, 1997.

SHI, X.; *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 125–138, 2012.

SINGH, A. P.; SINGHAL, Dharendra. Permeability of steel fibre reinforced concrete influence of fibre parameters. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 2823–2829, 2011.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L. T.; NASCIMENTO, F. B. C. Corrosão em armaduras de Concreto. **Cadernos de Graduação – Ciência exatas e tecnológicas**, v.3, n.1, p. 177-188, 2015.

SOULIOTI, D. V. *et al.* Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete. **Strain**, v. 47, p. 535–541, 2011.

PADARATZ, I. J. **Estruturas de Concreto Armado I**. 2017. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/Timteorochoa/concreto-armado-1-72745690>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

TADEPALLI, P. R.; MO, Y. L.; HSU, T. T. C. Mechanical properties of steel fibre concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 65, p. 462-474, 2013.

TASCA, M.; *et al.* Estudo da viabilidade de adição de fibras de aço no concreto exposto ao ambiente marítimo: Análise da melhoria das propriedades de resistência. **4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG**. Rio Grande, RS, p. 1–13, 2010.

WANG, Y.; NIU, D; DONG, Z. Experimental Study on Carbonation of Steel Fiber Reinforced Concrete. **4th International Conference on the Durability of Concrete Structures**, p. 55–59, 2014.



## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Tabela de Comparação entre literaturas: Propriedades do CRFA – Compressão e Tração

| Título            | Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete   | Report on Fiber Reinforced Concrete   | Compressive Behavior of Steel-fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index      | An Overview of the Fatigue Behaviour of plain and fibre reinforced Concrete  | Influence of Steel Fibres on Strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete  |
|-------------------|---|---|--|--|---|
| Autor             | ACI 544 4R-88   | ACI 544 1R-96   | Yu-Chen Ou; <i>et al.</i>  | M. K. Lee; B. I. G. Barr   | R.V. Baledran; <i>et al.</i>  |
| <b>Compressão</b> | Melhorias documentadas variam de insignificantes (na maioria dos casos) a 23% para concreto contendo 2% em volume de fibra. | A resistência máxima é levemente afetada. Melhorias são observadas em uma variação de 0 a 15% até 1,5% por volume de fibras.  | Pouca relação entre o comportamento do CRFA sob compressão e o índice de reforço da fibra. | Não mencionado.  | Se um volume alto de fibra for incorporado no concreto (5 a 20%), resistência e ductilidade na compressão podem ser melhoradas. Pequeno volume de fibras tem efeito insignificante na resistência à compressão. |
| <b>Tração</b>     | A resistência à tração é, geralmente, da mesma ordem do concreto convencional.  | A resistência é significativamente melhorada. Melhorias são observadas em uma variação de 30 a 40% para a adição de 1,5% de volume de fibras em argamassas ou concreto. | Não mencionado.  | Adição de fibras beneficia a performance à fadiga do concreto submetido a cargas de tração. Uma possível explicação é que sob esforços de tração as fibras estão disponíveis para realizar as pontes de transferência de tensões nas fissuras e assim prolongar a resistência à fadiga sob flexão. | Não mencionado.   |

## APÊNDICE B – Tabela de Comparação entre literaturas: Propriedades do CRFA – Flexão

| Título        | Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete  | Report on Fiber Reinforced Concrete  | Compressive Behavior of Steel-fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index | An Overview of the Fatigue Behaviour of plain and fibre reinforced Concrete | Influence of Steel Fibres on Strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete |
|---------------|--|--|---|---|--|
| Autor         | ACI Committee 544  | DANIEL, James; et al.  | Yu-Chen Ou; et al.  | M. K. Lee; B. I. G. Barr  | R.V. Baledran; et al.  |
| <b>Flexão</b> | <p>Resistência máxima de flexão geralmente aumenta em relação ao produto do volume de fibra e o fator de forma L/d.</p> <p>Concentrações menores que 0,5% de volume de fibra com fator de forma menor que 50 tem efeitos desprezíveis nas propriedades de resistência estática.</p> <p>Resistências diminuem com o aumento do tamanho do agregado graúdo.</p> <p>A resistência máxima à flexão para CRFA com 28d, volume de fibra entre 0,5 e 1,5% com agregados entre 8 e 19mm é de 5,5 a 7,5 MPa.</p> <p>As fibras lisas apresentam menor resistência quando comparadas ao mesmo volume dos outros tipos de fibra.</p> <p>O uso de superplastificantes pode colaborar para uma maior resistência quando comparado a mistura sem superplastificante e com fator a/c reduzido.</p> | <p>Melhorias são mais significativas que em tensões de Compressão ou Tração: comportamento dúctil.</p> <p>Chega a ser de 50 a 70% maior que o concreto convencional.</p> | Não mencionado.   | Não mencionado.   | Não mencionado.  |

**APÊNDICE C – Tabela de Comparação entre literaturas: Propriedades do CRFA – Cisalhamento, Torção e Impacto**

| <b>Título</b>                | <b>Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete</b>   | <b>Report on Fiber Reinforced Concrete</b>   | <b>Compressive Behavior of Steel-fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index</b> | <b>An Overview of the Fatigue Behaviour of plain and fibre reinforced Concrete</b> | <b>Influence of Steel Fibres on Strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete</b> |
|------------------------------|--|--|--|--|---|
| Autor                        | ACI  | ACI  | Y. Ghobarah et al.   | M. K. L. D. G. P.  | P. V. Prasad et al.   |
| <b>Cisalhamento e Torção</b> | Existem dados consideráveis indicando que as fibras aumentam substancialmente a capacidade de cisalhamento em vigas. | Depende do grau de alinhamento das fibras na zona de ruptura ao cisalhamento. Para 1% de volume de fibras pode-se observar melhorias no cisalhamento de até 30%.       | Não mencionado.  | Não mencionado.  | Pequeno volume de fibras aumenta a resistência ao cisalhamento.   |
| <b>Impacto</b>               | Não mencionado.  | Para carga de impacto de flexão: cerca de 40% maior que concretos convencionais. Para energia de ruptura sob impacto: cerca de 2,5x maior que concretos convencionais. | Não mencionado.  | Não mencionado.  | Reforço de fibras com aumentar a resistência ao impacto do concreto.  |

## APÊNDICE D – Tabela de Comparação entre literaturas: Propriedades do CRFA – Fadiga

| Título        | Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete | Report on Fiber Reinforced Concrete  | Compressive Behavior of Steel-fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index | An Overview of the Fatigue Behaviour of plain and fibre reinforced Concrete  | Influence of Steel Fibres on Strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete |
|---------------|---|--|---|--|--|
| Autor         | ACI Committee 544   | DANIEL, James; et al.  | Yu-Chen Ou; et al.  | M. K. Lee; B. I. G. Barr   | R.V. Baledran; et al.  |
| <b>Fadiga</b> | Não mencionado.   | <p>Aumento significativo da resistência à fadiga por flexão quando se aumenta a porcentagem de fibras.</p> <p>Adição das fibras em vigas reforçadas convencionalmente aumenta o seu período de fadiga e diminui a largura das fissuras sob carregamento de fadiga.</p> | Não mencionado.   | <p>Mesmo quando se considera parâmetros de fibras isolados, existem inúmeras combinações que podem influenciar o comportamento à fadiga do concreto reforçado com fibras. Ainda existem variadas combinações de frequência de carregamento, sequência de carregamento, composição da matriz, configuração dos ensaios.</p> <p>No entanto, a maioria das pesquisas concordam que as fibras podem melhorar a resistência à fadiga do concreto, mas é difícil conseguir determinar padrões a respeito da quantidade de fibra.</p> <p>Este estudo afirma que se existir um limite de resistência, ele não será menor que <math>10^6</math> ciclos.</p> | Reforço de fibras pode aumentar significativamente absorção de energia.                              |

## APÊNDICE E – Tabela de Comparação entre literaturas: Propriedades do CRFA – Rigidez

| Título         | Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete   | Report on Fiber Reinforced Concrete                              | Compressive Behavior of Steel-fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index  | An Overview of the Fatigue Behaviour of plain and fibre reinforced Concrete | Influence of Steel Fibres on Strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete   |
|----------------|---|--|--|---|--|
| Autor          | ACI Committee 544   | DANIEL, James; et al.  | Yu-Chen Ou; et al.   | M. K. Lee; B. I. G. Barr  | R.V. Baledran; et al.  |
| <b>Rigidez</b> | A rigidez depende principalmente do fator a/c. Fibras com deformações (ancoragens) tem melhores resultados que fibras lisas (comparando-se O mesmo volume). | Característica que mais diferencia CRFA e Concreto convencional. | Aumenta de acordo com o índice de reforço da fibra. Quando o índice de reforço da fibra aumenta, o índice de tenacidade também aumenta. Encontrou-se um limite de tenacidade com uma fração de volume de fibras em torno de 2% para todas as fibras utilizadas (submetidos à Compressão). Fibras longas com menor fator de forma apresentaram melhores resultados. | Não mencionado.   | Índices de rigidez de concretos leves reforçados com fibras de aço não mostraram alteração quando se tem diferentes tamanhos de amostras. Para o concreto convencional, quanto maior as dimensões do corpo de prova, menores são os índices de rigidez. O efeito na rigidez deve ser considerado no estudo da ductilidade dos concretos reforçados com fibras de aço para projetos de estruturas. Mais pesquisas são necessárias para examinar o efeito das dimensões na rigidez do compósito. |

## APÊNDICE F – Tabela de Comparação entre literaturas: Propriedades do CRFA – Abrasão e Geometria da fibra

| Título                    | Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete  | Report on Fiber Reinforced Concrete | Compressive Behavior of Steel-fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index  | An Overview of the Fatigue Behaviour of plain and fibre reinforced Concrete | Influence of Steel Fibres on Strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete  |
|---------------------------|--|-------------------------------------|--|---|---|
| Autor                     | ACI Committee 544  | DANIEL, James; et al.               | Yu-Chen Ou; et al.   | M. K. Lee; B. I. G. Barr  | R.V. Baledran; et al.   |
| <b>Abrasão</b>            | Testes de laboratório e em campo demonstram que o CRFA tem alta resistência a cavitação com origem de fluxo de água em alta velocidade. CRFA foi usado para reparar danos causados por severa erosão por cavitação ocorrida em concreto convencional de boa qualidade. | Sem efeitos.                        | Não mencionado.  | Não mencionado.   | Não mencionado.   |
| <b>Geometria da fibra</b> | Não mencionado.  | Não mencionado.                     | Fibras longas com menor fator de forma apresentaram melhores resultados. Para um mesmo comprimento, mas diferentes fatores de forma: menores fatores de forma apresentaram melhores resultados. A principal limitação de se usar um alto fator de fibra é que a trabalhabilidade pode reduzir consideravelmente. Alto fator de forma (l/dia) causa grumos de fibras. | Não mencionado.   | A efetividade do reforço com fibras depende das propriedades da matriz do concreto: para o mesmo tipo e volume de fibra, a melhoria na tensão de cisalhamento é muito mais significativa em concreto leve que no concreto convencional. |

## APÊNDICE G – Tabela de Comparação entre literaturas: Corrosão do CRFA – Parte I

| Título<br>Autor        | Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks<br>GRANJU; BALOUCH   | Corrosion in cracked and uncracked concrete - influence of crack width, concrete quality and crack reopening<br>OTIENO; <i>et al.</i>   |
|------------------------|---|---|
| <b>Cloretos</b>        | <p>O principal fator facilitador da corrosão é o rompimento da ligação fibra-cimento da matriz.</p> <p>O rompimento desta ligação é responsável pelo escorregamento da fibra acompanhada da abertura da fissura.</p>  | <p>No teste de resistividade elétrica percebe-se que o tipo de cimento tem grande influência nos resultados para o concreto.</p> <p>Para estruturas corroídas ativas, pode-se assumir que o recarregamento pode acelerar o processo de corrosão devido ao possível alargamento das fissuras.</p> <p>Esperava-se que as fissuras de espessura menores que 0,4 mm não afetariam significativamente a corrosão nas estruturas de concreto reforçado. Entretanto o estudo demonstra que para espessuras abaixo de 0,4 mm, as estruturas reforçadas são sim afetadas significativamente. Indiferentemente da qualidade do concreto, a presença de fissuras aumenta a taxa de corrosão.</p> |
| <b>Carbonatação</b>    | Não mencionado.   | Não mencionado.   |
| <b>Aspectos Gerais</b> | <p>Corrosão é menos agressiva que em Concretos Armados.</p> <p>Na fissura, a durabilidade do material depende do desempenho das pontes de transferências das fibras mergulhadas no concreto.</p> <p>A corrosão da fibra pode, não só ocasionar a desagregação do concreto, como também reduzir a seção da fibra levando a estrutura ao perigo.</p> <p>A durabilidade do CRFA ainda tem muito a ser explorado.</p> | <p>A presença de fissuras ou não influencia na sua durabilidade e na determinação da vida útil de serviço da estrutura. É um parâmetro que deve ser considerado no projeto das estruturas.</p> <p>Os dois principais motivos no qual as fissuras não são consideradas no cálculo da vida útil de serviço são o desconhecimento dos efeitos das fissuras e a introdução de fissuras nos modelos dificulta a análise dos comportamentos.</p> <p>Orientação das fissuras, frequência e auto recuperação do concreto são importantes características no que se diz respeito a corrosão de concretos reforçados com fibras de aço.</p>   |

## APÊNDICE H – Tabela de Comparação entre literaturas: Corrosão do CRFA – Parte II

| Título<br>Autor        | Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete<br>FRAZÃO; <i>et al.</i>  | Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete:<br>Influence of crack width, fibre type and loading conditions<br>BERROCAL; <i>et al.</i>   |
|------------------------|---|--|
| <b>Cloretos</b>        | <p>Determinar o coeficiente de difusão de íons cloretos pelo teste de migração não é uma boa alternativa uma vez que o teste pode causar uma corrosão significativa da fibra.</p> <p>Utilizar o método de imersão do concreto em solução de sal para determinar o coeficiente de difusão dos íons cloretos é uma melhor opção.</p>  | <p>Resultados da pesquisa demonstram uma tendência de uma iniciação prematura da corrosão do concreto quanto maior for a espessura da fissura.</p> <p>Uma alteração insignificante foi observada no atraso da iniciação da corrosão quando se adiciona fibras.</p> <p>Sem variação significativa para o coeficiente de difusão dos íons cloretos em diferentes misturas.</p> <p>Todos os concretos fissurados expostos à cloretos sofreram corrosão enquanto nenhuma das amostras sem fissuras iniciou o processo de corrosão.</p> |
| <b>Carbonatação</b>    | <p>Fibras expostas na superfície do concreto mostram sinais de corrosão devido a carbonatação do concreto, mas não tem evidência de fragmentação do concreto devido à frente de carbonatação.</p> <p>A corrosão superficial pode ser prevenida por um fator <math>a/c \leq 0,5</math>.</p> <p>As forças expansivas durante a corrosão das fibras são insuficientes para desagregar o concreto porque, devido ao diâmetro reduzido, o aumento do volume devido a oxidação do ferro pelo processo corrosivo não é suficiente para fragmentar o concreto.</p>  | <p>Não mencionado.</p>   |
| <b>Aspectos Gerais</b> | <p>Processos como carbonatação, penetração de íons cloretos e ataque de sulfatos estão relacionados a permeabilidade da matriz do cimento.</p> <p>Adição de fibras de aço não apresentou mudanças significativas na absorção de água por capilaridade do Concreto auto adensável o que indica que o tamanho do poro não teve mudanças substanciais.</p> <p>Uma pequena redução foi observada na penetrabilidade do concreto com adição de fibras.</p> <p>Adição de fibras diminuiu a condutividade elétrica do concreto em 63%.</p> <p>Condições extremas de agressividade a corrosão das fibras podem induzir o aparecimento de fissuras no concreto e, em consequência, diminuição da resistência à tração.</p> | <p>Resistividade elétrica do concreto diminui com a adição de fibras.</p> <p>Coeficiente de difusão dos íons cloretos não são afetados com a adição de fibras.</p>   |



## APÊNDICE I – Tabela de Comparação entre literaturas: Corrosão do CRFA – Parte III

| Título<br>Autor        | Corrosion Effects on the Strength Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete Containing Slag and Corrosion Inhibitor<br>ANANDAN; MANOHARAN; SENGOTTIAN   | Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview<br>SHI; XIE; FORTUNE   |
|------------------------|---|--|
| <b>Cloretos</b>        | <p>Aumento da resistência à compressão em 28d de 49,8 N/mm<sup>2</sup> (13,96% maior que o concreto de comparação). Entende-se que este comportamento se deve a uma melhor interação entre a fibra corroída e a matriz.</p> <p>Amostras submetidas à diferentes ciclos de secagem e molhagem do CRFA demonstraram maior velocidade de corrosão após 28 dias de cura.</p> <p>A influência de carregamento inicial nas amostras de CRFA demonstra um processo de corrosão mais rápida.</p> <p>Amostras cuja a cura foi feita em água com presença de íons cloretos demonstram uma deterioração mais rápida tanto quanto na corrosão da fibra como na corrosão superficial das amostras.</p> <p>Quando se diminuiu o diâmetro da fibra foi possível medir a intensidade da corrosão e foi possível prever o grau de corrosão medido em termos de porcentagem do potencial de corrosão.</p> | <p>Tecnicamente desafiadora: matriz do concreto é heterogênea (parâmetros de projeto, compactação, cura, relação a/c, presença de fissuras), quantidade considerável de variáveis para determinar os coeficientes de difusão do cloreto.</p> <p>Modelagem é uma ferramenta que pode prever e entender quantitativamente o comportamento do concreto e os seus principais processos e interações que definem a vida de serviço dos concretos reforçados expostos a ambientes com íons cloretos.</p> <p>Necessidade de mais pesquisas para se estabelecer normas confiáveis, metodologias de testes rápidas para determinar a quantidade de cloretos penetrados no concreto.</p>   |
| <b>Carbonatação</b>    | Não mencionado.   | Não mencionado.  |
| <b>Aspectos Gerais</b> | Uma seleção correta de dos componentes do concreto e uma proporção cuidadosa pode proporcionar um concreto altamente integrado que pode, significativamente, controlar o processo de corrosão.  | <p>Necessidade crescente de um melhor entendimento do comportamento dos CRFA para medidas mais sustentáveis.</p> <p>Conhecimentos insuficientes a respeito dos mecanismos deterioração causados pela corrosão das fibras contribuem para uma filosofia de projetos mais conservadores e limitação do potencial do CRFA.</p> <p>Existem três consequências principais da corrosão dos CRFA: diminuição da capacidade de carregamento e de absorção de energia; devido a formação de ferrugem, a fricção entre a matriz e a fibra pode aumentar e, se a espessura da fissura é suficientemente pequena para que o processo de auto-recuperação ocorra, a corrosão da fibra é praticamente insignificante para a durabilidade da estrutura.</p> |

## APÊNDICE J – Tabela de Comparação entre literaturas: Corrosão do CRFA – Parte IV

| <b>Título</b>          | <b>Experimental Study on Carbonation of Steel Fiber Reinforced Concrete</b>   |
|------------------------|---|
| <b>Autor</b>           | <b>WANG; NIU; DONG</b>  |
| <b>Cloretos</b>        | Não mencionado.   |
| <b>Carbonatação</b>    | Quando se tem entre 0 e 1,5% de fibras: quanto maior a quantidade de fibras, menor a carbonatação das amostras.<br>Ente 1,5 e 2% de fibras: profundidade carbonatada aumenta.<br>A adição das fibras pode melhorar a estrutura microscópica da matriz: mais compacta dificultando a entrada de CO <sub>2</sub> .<br>Quando a quantidade de fibras excede um certo limite, o contato entre a fibra e a matriz do concreto forma interfaces de ligação mais fracas facilitando a entrada de CO <sub>2</sub> o que aumenta a profundidade de CO <sub>2</sub> . |
| <b>Aspectos Gerais</b> | Não mencionado.   |

## ANEXOS

### ANEXO A – Tabela de Comparação entre literaturas: Variáveis do CRFA

| Autor     | Ano  | Qtd. de cimento (kg/m³) | a/c  | Tipo de fibra  | Vol de fibra (kg/m³) | Condições de exposição               | Condições de ensaio | Tempo (meses) | Condições das fissuras (mm) | Espessura crítica da fissura (mm) | Camada de sacrifício (mm) |
|-----------|------|-------------------------|------|--|----------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| BALOUCH   | 2010 | 470                     | 0,78 | Fabricada a frio                                     | 40                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 12            | 0,5                         | 0,1                               | 1 a 3                     |
| NORDSTROM | 2005 | 510                     | 0,30 | Aço de baixo carbono e fabricadas com disco de corte | 65                   | Ciclos de molhagem e secagem         | Em campo            | 60            | 0,10 a 1                    | 0,1 a 0,2                         | 1 a 5                     |
| SERNA     | 2008 | 350                     | 0,5  | Aço de baixo carbono e revestidas com zinco          | 60                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 12            | Sem fissuras                | < 0,5                             | 1 a 5                     |
| ROQUE     | 2009 | 362                     | 0,37 | Aço de baixo carbono                                 | 71                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 27            | Sem fissuras                | 0,1 a 0,2                         | 1 a 5                     |
| GRAEFF    | 2010 | 300                     | 0,35 | Aço de baixo carbono                                 | 47                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 10            | Sem fissuras                | -                                 | 1 a 5                     |
| SANCHEZ   | 2009 | 426                     | 0,45 | Aço de baixo carbono e revestidas com zinco          | 40                   | Ar marítimo (sem contato com a água) | Em campo            | 18            | Sem fissuras                | -                                 | 1 a 5                     |
| SUN       | 2011 | 494                     | 0,47 | Aço de baixo carbono e revestidas com zinco          | 77                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 1             | Sem fissuras                | -                                 | 1                         |
| BURATTI   | 2011 | 350                     | 0,50 | Aço de baixo carbono                                 | 25                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 8             | 0,5                         | 0,5                               | -                         |
| ABBAS     | 2014 | 647                     | 0,29 | Aço de baixo carbono                                 | 60                   | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 16            | Sem fissuras                | 0,2                               | 3 a 5                     |
| ANANDAN   | 2014 | 449                     | 0,30 | Aço de baixo carbono                                 | 115                  | Zonas de Maré e Respingos            | Laboratório         | 6             | Sem fissuras                | -                                 | 1 a 5                     |
| BERNARD   | 2015 | 586                     | 0,29 | Aço de baixo carbono                                 | 40                   | Ar marítimo (sem contato com a água) | Em campo            | 37            | 0,10 a 0,30                 | 0 a 0,1                           | 1 a 5                     |

Fonte: Marcos-Meson, 2018 (adaptado).

