

REVISÃO DE LITERATURA - USO DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS PARA O CONTROLE DA EXPANSÃO POR ATAQUE DE SULFATOS

Guilherme Vigarani de Assis (IC) e Ligia Vitória Real (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

Esta pesquisa teve como intuito realizar uma análise sobre os estudos relacionados e desenvolvidos que abordem o uso de concreto reforçado com fibra (CRF) para o controle da expansão por ataque de sulfatos. A prioridade foi a avaliação dos resultados obtidos através de ensaios em laboratório que demonstrassem a eficácia, ou não, da incorporação do uso de fibras no traço de concreto com o objetivo de conter os efeitos de expansão e por consequência os de fissuração. Essas características foram verificadas através de ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência a compressão e resistência a tração. Posto que a presente pesquisa não engloba toda a literatura existente, os artigos estudados permitem fornecer uma análise consistente do fenômeno em pauta. Os dados levantados mostraram resultados promissores, demonstrando que para ataques de sulfato de sódio com concentração de íons sulfato de 33,8 g/L o uso de fibras poliméricas é adequado. Sendo assim, foi possível concluir que a fissuração e a expansão ocasionadas pelo agente agressor foram atenuadas, garantindo uma maior durabilidade a estrutura.

Palavras-chave: Concreto Reforçado com Fibra, Ataque por sulfatos, durabilidade

ABSTRACT

This research aimed to carry out an analysis of related and developed studies that address the use of fiber reinforced concrete (CRF) for the control of expansion by sulphate attack. The priority was to evaluate the results obtained through laboratory tests that demonstrated the effectiveness, or not, of incorporating the use of fibers in the concrete mix in order to contain the effects of expansion and, consequently, those of cracking. These characteristics were verified through tests of dynamic modulus of elasticity, compressive strength and tensile strength. Since the present research does not encompass all the existing literature, the articles studied allow us to provide a consistent analysis of the phenomenon in question. The data collected showed promising results, demonstrating that for sodium sulfate attacks with a sulfate ion concentration of 33.8 g/L, the use of polymeric fibers is adequate. Thus, it was possible to conclude that the cracking and expansion caused by the aggressor agent were attenuated, ensuring greater durability to the structure

Keywords: Fiber Reinforced Concrete, Sulfate Attack, Durability

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da utilização em larga escala das estruturas de concreto, é essencial que ao longo do tempo elas continuem a exercer as funções determinadas em projeto. Para tal, é levado em consideração manter a capacidade de suporte das cargas aplicadas no elemento estrutural quanto as condições de utilização durante o período de vida útil estipulado. Não obstante, é esperado que o concreto utilizado seja capaz de suportar os processos de deterioração ao qual estará exposto, desta maneira admitindo que este elemento estrutural seja durável (NEVILLE, 2016).

A partir do aprofundamento no conceito da durabilidade das estruturas de concreto, estudos começaram a ser desenvolvidos abordando os aspectos dos materiais presentes na estrutura, sejam eles os agregados, cimento ou o aço, além de considerar de forma paralela a influência da metodologia de mistura e dos métodos construtivos empregados. Porém, para apresentar uma escolha assertiva dos materiais que irão compor o elemento estrutural, é necessário compreender o meio em que a estrutura estará inserida, uma vez que através da agressividade caracterizada pelo ambiente, haverá uma redução significativa na vida útil da estrutura de concreto (BAUER, 2019).

Caso os mecanismos utilizados para fornecer maior durabilidade à estrutura sejam inadequados, manifestações patológicas surgem devido a ações internas ou externas ao concreto, as quais podem ser discriminadas em físicas ou químicas (NEVILLE, 2016).

Ao abordar de maneira mais detalhada as manifestações patológicas ocasionadas por ações químicas externas, pode-se mencionar o ataque dos íons sulfato a matriz cimentícia. Segundo Souza (2006), além da água do mar, os sulfatos também estão presentes em águas de rios, lençóis freáticos, decomposição de matéria orgânica e pântanos além de ambientes poluídos por esgotos e indústrias.

De maneira generalizada, é possível encontrar na natureza em maior quantidade os sais Na_2SO_4 (sulfato de sódio) e MgSO_4 (sulfato de magnésio), principalmente quando é abordado a caracterização de solos compostos por gipso e que ao sofrer uma ação associada a água da chuva e de lençóis freáticos, gera-se uma grande fonte de íons sulfatos que irão degradar as estruturas de concreto submetidas a este meio (SOUZA, 2006).

Assim, a forma mais habitual deste tipo de degeneração é quando há um gradiente dos íons de sulfato provenientes do meio externo para o interno da matriz cimentícia, ocasionando expansões e fissurações, oriundas da cristalização de sais como o sulfato de sódio, sulfato de magnésio e carbonato de cálcio. Esse evento é denominado ataque por ação física (SOUZA, 2006).

Para resistir a várias situações em que o concreto pode ser exposto e os diferentes tipos de esforços em que as peças são submetidas, com o passar do tempo e o avanço da tecnologia, foram desenvolvidos os concretos especiais como maneiras alternativas. Dentre estas, o concreto reforçado com fibra (CRF) é definido segundo Figueiredo (2011) como um material composto por uma matriz frágil e um elemento responsável por fornecer um reforço, uma vez que ao adicionar as fibras com resistência, módulo de elasticidade e dosagem adequada para cada situação é possível amenizar o caráter frágil do concreto, já que as tensões serão distribuídas de forma homogênea ao longo da peça, contribuindo para atenuar os efeitos da pós-fissuração e por fim retardar a entrada de outros agentes agressivos, favorecendo com que a estrutura possua uma maior durabilidade.

Não obstante, a utilização de concretos reforçados com fibra (CRF) acarreta segundo Figueiredo (2011) em outros benefícios, como por exemplo a eliminação das atividades que são relacionadas a montagem e instalação dos componentes para concretagem da estrutura, proporcionando uma maior facilidade e agilidade executiva.

Desta forma, considerando que a expansão por ataque de sulfatos é um problema recorrente no cotidiano das estruturas de concreto e que segundo Milititsky (2005) este é o agente patogênico externo com maior potencial agressivo ocasionando tensões com capacidade de fissuração, o presente estudo bibliográfico visando os benefícios do CRF, norteia-se à seguinte questão: As expansões originadas por ataque de sulfatos em estruturas de concreto podem ser reduzidas com o uso de concreto reforçado com fibras?

Portanto, a partir do questionamento apresentado anteriormente, este trabalho apresenta como objetivo analisar através da revisão da literatura, a influência do uso de fibras no concreto para o controle da expansão e da fissuração causada pela reação com sulfatos.

2. DESENVOLVIMENTO DO ARGUMENTO

Consultou-se para o embasamento desta pesquisa artigos científicos, teses de doutorado, dissertação de mestrado ou monografias, que abordassem estudos experimentais sobre o comportamento do concreto reforçado com fibra (CRF) quando atacado por sulfatos. Foram buscadas referências que apresentassem os seguintes itens:

- Apresentação do traço de concreto utilizado com ao menos um teor de fibra;
- Realização de ensaios para mensurar a efetividade do uso de fibras para a contenção da expansão e consequentemente da fissuração nas peças de concreto;
- Comparação dos resultados com traços que não utilizam fibras e;
- Exposição das peças ao ataque de sulfatos a partir de ciclos de secagem-umedecimento – com o intuito de ocorrer o processo acelerado.

Com base nesses critérios, foi desenvolvido a revisão bibliográfica e argumento apresentados ao longo deste artigo.

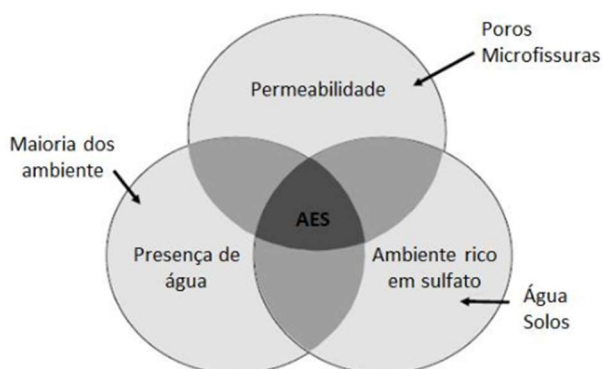
2.1 ATAQUE POR SULFATOS

As estruturas estão submetidas a ambientes agressivos nos quais pode haver a presença de substâncias, como íons de sulfatos, cloretos entre outro, que podem ser nocivas para os materiais empregados nas estruturas de concreto. Entretanto, na literatura quando se refere a reação desses elementos químicos aos materiais expostos ao ambiente, é utilizado o termo “ataque”, sendo que este é definido de acordo com Neville (2004) como uma ação que resulta na deterioração ou na perda de durabilidade da estrutura analisada.

Desta maneira, evidenciando a existência de sulfatos, esses podem ser encontrados facilmente em locais que tenham terras e águas agrícolas, indústrias químicas, e além disto, pode ser resultado da decomposição da matéria orgânica, desta forma demonstrando ser um elemento agressivo presente durante toda a vida útil do elemento construtivo.

Isto posto, a degradação do concreto em relação as reações que ocorrem entre o cimento Portland e os íons de sulfato possui duas formas distintas, AES (ataques externos) – foco desta pesquisa – e AIS (ataques internos) – originados quando há liberação de sulfato por agregados contaminados por pirrotita, gesso, pirita ou pela decomposição de produtos da hidratação do cimento devido a elevação da temperatura –, porém o que irá definir o processo de deterioração serão fatores como: a quantidade e natureza do sulfato presente, o nível de água e a variação sazonal, o fluxo de água subterrânea, a porosidade do solo, a forma de construção e a qualidade do concreto (SIMÃO *et al.*, 2018). As condições para AES podem ser exemplificadas com a Figura 1 a seguir.

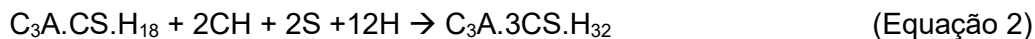
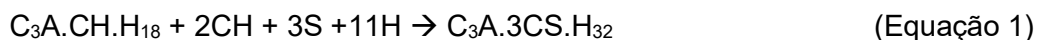
Figura 1- Condições para ataques externos por sulfatos.



Fonte: Simão *et al.* (2018)

A partir da infiltração do sulfato por meio de capilaridade no material cimentício o qual possui em sua constituição hidróxido de cálcio e fases que contém alumina, que por vez são mais suscetíveis ao ataque de íons sulfato, ao reagirem com este transformam-se em uma

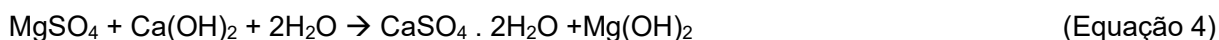
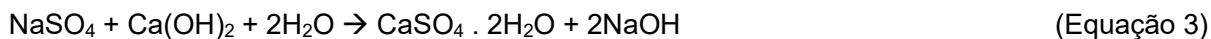
forma altamente sulfatada, a etringita ($C_3A.3CS.H_{32}$). A reação pode ser demonstrada através das equações 1 e 2.



As expansões no concreto causadas pela formação da etringita é devido as pressões exercidas pelos cristais que surgiram e ao mesmo tempo por uma adsorção de água em meio alcalino por uma etringita pouco cristalizada (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002).

Além disso, pode ocorrer expansão pela formação de gipsita como resultado de troca catiônica. Assim observou-se que a degradação da pasta de cimento Portland endurecida ocorre através de um processo em que primeiramente há uma redução do pH da matriz com perda de rigidez e de resistência, em seguida ocorre a expansão e fissuração, por fim tem-se a modificação do concreto em uma pasta não coesiva.

Dependendo do tipo de cátion presente na solução, dentre eles o sódio (Na^+), o potássio (K^+) e o magnésio (Mg^{2+}), ao reagirem com o hidróxido de cálcio e aos cristais de C-S-H presentes na pasta, tem-se a formação da gipsita pelo ataque por sulfato. O comportamento mencionado é exemplificado pelas equações 3, 4 e 5.



Santhanam (2001) *apud* Neville (2004) propôs um modelo para os ataques devido a presença do cátion sódio e de magnésio demonstrando as fases do processo. Para o primeiro elemento químico mencionado, com o modelo esquemático representado pela Figura 2, a Etapa 1 demonstra o estado inicial do processo, com o corpo de prova de argamassa introduzido na solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), a qual possui um pH de 6 a 8, que minutos depois devido ao contato com a argamassa altera-se o pH para 11 a 12. Ainda se ressalta que para os casos de água confinada, ocasionando a estagnação desta, assim como são os casos em testes de laboratório, o pH permanecerá na faixa de 11 a 12, entretanto caso houver um fluxo, como ocorre nas águas subterrâneas o pH pode vir a ser menor que a faixa inicial de 6 a 8.

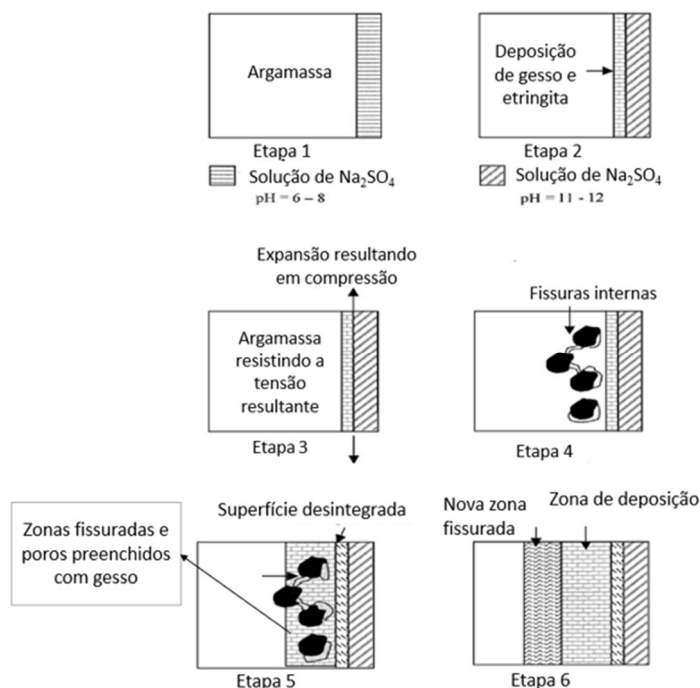
Na Etapa 2, o gesso e a etringita começam a se formar nas regiões próximas à superfície. Na zona superficial da argamassa, onde se formaram o gesso expansivo e a etringita, há uma tendência de expansão. No entanto, a maior parte da argamassa por baixo desta camada, quimicamente inalterada, tenta resistir a esses esforços. Assim, conforme descrito na Etapa 3, uma força compressiva resultante é gerada na região da superfície,

enquanto a maior parte da argamassa é submetida a forças de tração. Isso faz com que fissuras apareçam, conforme mostrado na Etapa 4.

À medida que o tempo passa, a zona da superfície se deteriora devido à penetração contínua da solução. Quando essa consegue atingir as zonas internas fissuradas, ela reage com os produtos da hidratação e leva à deposição de produtos de ataque nas fissuras, bem como na pasta. O gesso deposita-se principalmente nas fissuras e nos vazios, porque fornecem os melhores locais para a nucleação. Portanto, como mostrado na Etapa 5, uma nova região dentro da argamassa torna-se a zona de deposição. Essa região então tenta se expandir, causando forças de tração resultantes no interior da argamassa, com isso, novas fissuras aparecem nas zonas interiores.

Em seguida, na Etapa 6, existem três zonas distintas dentro da argamassa - a superfície desintegrada, a zona de deposição de produtos de ataque e a zona rachada interna que está quimicamente inalterada. A zona de superfície desintegrada também está sujeita à formação de taumasita, porque a solução de sulfato tem um acesso direto ao C-S-H descalcificado e à etringita nesta região. O ataque, portanto, progride em uma taxa constante até que ocorra uma desintegração completa da amostra.

Figura 2- Modelo proposto para o ataque por sulfato de sódio.



Fonte: Adaptado de Santhanam (2001) apud Neville (2004).

Por outro lado, o mecanismo proposto para o ataque do sulfato de magnésio é apresentado de acordo com o modelo esquemático demonstrado pela Figura 3. A Etapa 1 representa o estado inicial do processo, quando o corpo de prova de argamassa é introduzido em uma

solução de sulfato de magnésio que possui pH de 7 a 8, porém alguns minutos após a introdução da amostra, o pH muda para 9 a 10. Sendo assim, uma camada de brucita (hidróxido de magnésio - $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ou MH) se forma rapidamente na superfície da argamassa devido à reação de CH com a solução. A camada de brucita posteriormente é complementada por uma camada de gesso, que se forma como resultado da mesma reação. Este fato é ilustrado na Etapa 2.

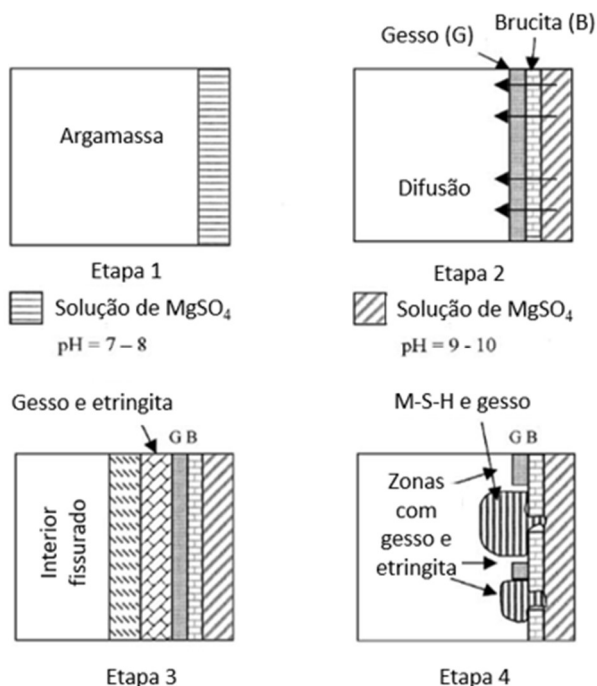
Após a formação dessas camadas superficiais, as soluções de sulfato penetram no interior da argamassa por difusão. Esta é a razão para o aumento constante na taxa de deterioração observada no sulfato de magnésio e ausência de um aumento acentuado na taxa de expansão.

A formação de gesso e etringita (que se decompõe em gesso secundário em um estágio posterior) nas regiões próximas à superfície leva à expansão, que por sua vez origina tensões responsáveis por criar fissuras nas zonas interiores inalteradas da argamassa, conforme ilustrado na Etapa 3.

O nível de deterioração observado durante o ataque do sulfato de magnésio na argamassa, em termos da deterioração física observada visualmente e através da medição da expansão, não é tão alto quanto o do sulfato de sódio, uma vez que a presença da camada superficial relativamente impermeável de brucita é a responsável pela diminuição da penetração da solução de sulfato nas argamassas.

Entretanto, a camada de brucita pode quebrar em vários lugares devido à expansão da argamassa e a difusão da solução continua, já que os canais de fluxo são estabelecidos através da camada superficial de brucita, podendo ocasionar um ataque direto ao C-S-H. Como resultado, ocorre a formação de M-S-H e gesso secundário. Este processo é mostrado na Etapa 4. A ruptura final da argamassa ocorre como resultado da perda de resistência e integridade devido à transformação da pasta em M-S-H.

Figura 3 - Modelo proposto para o ataque por sulfato de magnésio.



Fonte: Adaptado de Santhanam (2001) apud Neville (2004).

Devido aos impactos ocasionados pelo ataque de sulfatos como demonstrado anteriormente e com o intuito de desde a fase de projeto estabelecer parâmetros para que as estruturas alcancem uma maior vida útil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu através da ABNT NBR 12655 os graus de severidade para a exposição à ataque de sulfatos, determinando classes de resistência à compressão mínimas para as peças submetidas a estes ambientes, sendo assim dividindo-os em 3 graus distintos como demonstrado através da Tabela 01.

Tabela 01 – Graus de severidade para ataque de sulfato em peças de concreto.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO_4) presente no solo	Sulfato solúvel (SO_4) presente na água	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado	Mínimo F_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
	%em massa	ppm	normal ^a	MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 2 ¹	Conforme Tabela 2 ¹
Moderada ^b	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,5	35
Severa ^c	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015)

^a Baixa relação água cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

^b A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO_4 seja acima de 1500ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

° Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

¹ Tabela 2 referenciada da ABNT NBR 12655:2015 com o título “Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto”.

Além de utilizar os parâmetros demonstrados na tabela anterior para a determinação da classe de resistência de projeto da estrutura de concreto, de acordo com Neville (2004), outros parâmetros devem ser considerados na elaboração e concepção do traço para mitigar os efeitos do ataque de sulfatos. Dentre eles, é mencionado a utilização de cimentos resistentes à sulfatos e que apresentem uma baixa quantidade de aluminato em sua composição, conciliado a uma baixa relação água cimento (a/c) e ainda acrescenta a relevância de realizar a cura da melhor forma possível para garantir a máxima reação de hidratação do cimento empregado. Entretanto possuindo como característica mais relevante, é necessário realizar o empacotamento das partículas com o intuito de diminuir a porosidade e por consequência atingir baixos valores de permeabilidade, fazendo com que diminua a entrada do agente patogênico na peça de concreto.

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA (CRF)

Por definição, os concretos reforçados com fibra (CRF), segundo Serafini, Rambo e Figueiredo (2018), são compósitos produzidos a partir de um cimento hidráulico, agregados de variadas dimensões e um reforço fibroso, o qual pode ser contínuo ou descontínuo. Desta maneira, a aplicação desse material para estruturas, categorizado segundo a *dib Model Code 2010*, pode ser feita para várias finalidades dentre as quais: vigas, aduelas de túneis, concreto projetado, concreto pré-moldado, estacas, entre outras.

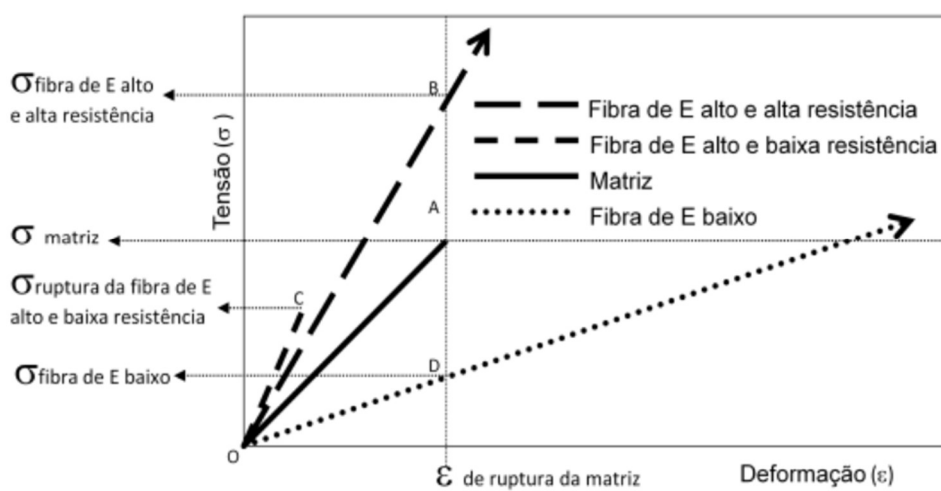
Além disto, Serafini, Rambo e Figueiredo (2018) mencionam que as macrofibras poliméricas são compostas na maioria dos casos por fases amorfas acrescidas a um grau de cristalinidade conferido pelo processo de extrusão e alongamento. Muitas destas fibras poliméricas, atualmente são utilizadas para realizar um reforço estrutural no estado endurecido e para diminuir a ocorrências de fissuras.

Para Figueiredo (2011) o possível papel que a fibra pode desempenhar no concreto dependerá das características dela, assim as mais importantes são: módulo de elasticidade e resistência mecânica, já que ambas as propriedades irão definir a capacidade de reforço da fibra quando combinada com a matriz cimentícia.

Sendo assim, salienta-se que o módulo de elasticidade da fibra é classificado em relação ao módulo de elasticidade do concreto, desta forma, quando este apresenta-se ser menor que aquele pode-se afirmar que a fibra em análise apresenta um alto módulo de elasticidade. Caso aconteça o cenário inverso do mencionado, então a fibra exibe baixo módulo de elasticidade.

Ambas as características apresentam relevância ao abordar o comportamento de pós-fissuração acometido pelo uso de fibras no concreto. Desta forma para elucidar tal importância, Figueiredo (2011) através da Figura 4 exemplifica uma matriz hipotética reforçada com 3 tipos de fibras, uma com baixo módulo de elasticidade e duas com alto módulo, sendo uma com alta resistência e outra com baixa. Para o estudo, ele considerou um comportamento elástico perfeito para todas as fases.

Figura 4 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.



Onde:

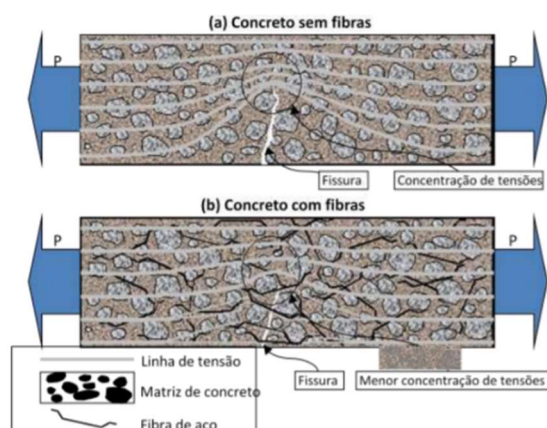
O-A: Curva de tensão por deformação da matriz;

O-B: e O-C: Trabalho elástico das fibras de alto módulo com alta e baixa resistência respectivamente;

O-D: Comportamento da fibra de baixo módulo de elasticidade.

Assim, ele conclui que para as fibras possuírem uma alta capacidade de reforço em matrizes cimentícias, elas necessitam ter uma maior capacidade de deformação, ou seja, apresentar baixo módulo de elasticidade e ao mesmo tempo possuir maior resistência a tração que a matriz de concreto. Desta forma esse papel torna-se importante, uma vez que as fibras irão funcionar como “pontes” de transferência de tensão pelas fissuras que surgem no momento de ruptura da matriz, fazendo com que haja um aumento de energia que pode ser associada a um ganho de resistência a tração, caracterizando a base do desempenho dos concretos reforçados com fibra. Este fenômeno pode ser melhor compreendido com o auxílio da Figura 5 abaixo.

Figura 5- Esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibra (a) e com reforço de fibras (b).



Fonte: Figueiredo (2011)

Possuindo em vista os benefícios do uso de concreto reforçado com fibra (CRF), estudos foram desenvolvidos para demonstrar que este compósito apresenta desempenho satisfatório para conter expansões que podem ocorrer na peça. Sendo assim, Wang (2016) em um dos seus trabalhos, realizou uma análise da propagação das fissuras em concretos reforçados com fibra em situação de alta concentração de sulfatos, concluindo que a propagação das fissuras é significativamente menor em comparação aos concretos convencionais.

Em complemento, You (2016) comprovou que a utilização de concretos reforçados com fibras descontínuas sob o ataque de sulfatos aumenta o nível de compactação do concreto, diminuindo a porosidade e por consequência reduz a capacidade de penetração dos íons na matriz, limitando as reações de expansões na matriz.

Por fim, para comprovar o ganho no aumento da resistência à tração, Kwan (2014), utilizando fibras de vidro e polipropileno em concretos para avaliação do ataque de sulfatos, demonstrou que houve um aumento da resistência a flexão e a impactos na ordem de 38% ao comparar com concretos sem fibras.

2.3 ESTRUTURAS DE CRF SUSCETÍVEIS AO ATAQUE POR SULFATOS

A durabilidade das estruturas de concreto é colocada em prova ao entrar em contato com ambientes corrosivos, como os presentes em cais de rio ou litoral, barragens, pavimento em terra salino-alkalina e estruturas subterrâneas, uma vez que é estabelecido os ataques por ácidos e sais. Sendo assim, Meng *et al.* (2020) enfatiza que a melhoria da resistência do concreto aos agentes agressivos tem um significado importante, algo que pode ser alcançado com o aumento da compactação e a adição de reforços com fibra em concreto.

Como mencionado no tópico 2.1 “Ataque por sulfatos”, as estruturas de concreto submetidas ao meio ambiente podem estar submetidas ao ataque por sulfatos. Perante os

tipos de ataques que existem, sejam eles internos quanto externos, há peças de concreto reforçado com fibra (CRF) que estão suscetíveis a degradação deste íon, principalmente aquelas que estão ligadas ao solo, já que através da movimentação da água, seja ela oriunda de lençóis ou até mesmo absorvida após a chuva, pode ser a responsável pela diluição de sulfatos. Desta forma, analisando os tipos de estruturas que podem ser utilizadas nos ambientes mencionados anteriormente que contemplem CRF em sua composição, podem-se destacar: estruturas de fundações, estruturas de túneis, com concreto projetado ou aduelas pré-moldadas (anéis segmentados).

2.4 EXEMPLOS DE PESQUISAS

Partindo do objetivo declarado neste estudo, pesquisas tentam entender como que funcionam os mecanismos do ataque de sulfatos no concreto e como a inserção de fibras descontínuas podem influenciar no aumento da durabilidade da estrutura. Sendo assim, foram lidos e analisados os artigos apresentados a seguir. Serão avaliados os ensaios realizados, os traços utilizados e o método de exposição da peça à sulfatos quanto a solução utilizada a fim de identificar se há um padrão nos métodos de pesquisa empregados.

2.4.1 Geng *et al.* (2017)

Geng *et al.* (2017) utilizaram em sua pesquisa dois tipos de cimento, os quais são denominados por 52.5 R(II) cimento Portland e PO 42.5 cimentos Portland, sendo que aquele apresenta resistência a compressão final de 52,5 MPa aos 28 dias e este 51,4MPa aos 28 dias. Ambos os tipos apresentam características semelhantes aos Cimento Portland CP-V-ARI. Além disso, no traço utilizou-se cinzas volantes, escória granulada de alto forno, areia de rio com módulo de finura de 2,7 a 2,8 e agregado britado com diâmetro máximo de 20mm. Para garantir o abatimento de tronco de cone do concreto no intervalo de 180 a 200mm, empregou-se aditivo super plastificante. Por outro lado, as fibras utilizadas estão discriminadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização das fibras empregadas na pesquisa.

Característica	Fibra de polipropileno modificado	Fibra fina de polipropileno
Comprimento (mm)	50	10
Diâmetro (mm)	1	0,025
Resistência a tração (MPa)	410	350
Módulo de elasticidade (GPa)	4,2	3,5

Fonte: Geng *et al.* (2017)

Para a elaboração do traço utilizou-se os consumos descritos na Tabela 3, originando corpos moldados nos tamanhos de 100x100x400mm para realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 3 – Consumo dos materiais utilizados nos traços estudados.

Traço	Cimento (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Escória de alto forno (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Fibra (kg/m ³)
OPC	197	132	0	682	1267	170	0
FPC1	197	132	0	682	1267	170	4
FPC2	197	132	0	682	1267	170	8
HPC	250	75	145	730	1095	155	0,8

Fonte Geng *et al.* (2017)

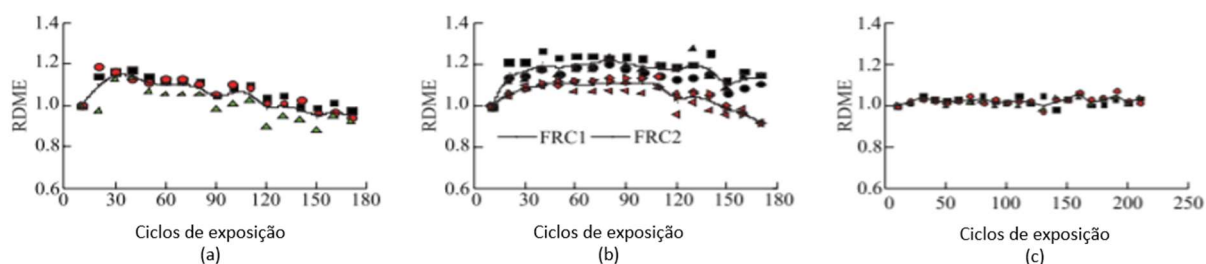
Importante ressaltar que, para os traços denominados por OPC, FPC1 e FPC2 utilizou-se o cimento PO 45,2 e fibra de polipropileno modificada, já para o traço de HPC (Concreto de alta resistência) aplicou-se o uso do cimento 52.5 R(II) e fibra fina de polipropileno.

O que tange a exposição das amostras ao ataque de sulfatos, executou-se a imersão dos corpos de prova após de 60 dias de cura em uma solução de Na₂SO₄ com concentração de 33,8 g/L SO₄²⁻ porém antes de cada exposição aos sulfatos, as peças de concretos eram secas em estufas a temperatura de 65°C durante 9h, em seguida resfriadas durante 1h para que fosse realizado o processo de imersão por 14h em temperatura ambiente. Foram realizados ao total 170 ciclos, dos quais a cada 10 era feito o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Desta forma, o módulo de elasticidade dinâmico dos traços de concreto (denominado na Figura 6 por RDME) imerso na solução exibiu três estágios distintos. No primeiro estágio, contido entre o início da corrosão até cerca de 40 ciclos, o RDME aumentou linearmente com o período de exposição. No segundo estágio, o RDME foi mantido de forma estável, caracterizando estabilidade nas amostras. Por último, no terceiro estágio, o RDME diminuiu de acordo com os ciclos de exposição. Portanto após de 170 ciclos, os valores de RDME das amostras FRC1 foi 1,137, que foi 1,24 e 1,2 vezes maior do que apresentadas nos traços FRC2 e OPC.

Assim, concluiu que concreto simples com 4 kg/m³ de fibra polipropileno modificado pode melhorar sua capacidade de resistência a danos induzidos por sulfato, no entanto, com a adição de mais fibra esta durabilidade pode ser facilmente danificada. Em comparação, ao traço de concreto de alta resistência (HPC) exibiu boa capacidade de resistência a danos induzidos por sulfato, já que ao ser exposto ao ambiente de sulfato após 210 ciclos, apenas o primeiro e segundo estágio ocorreram.

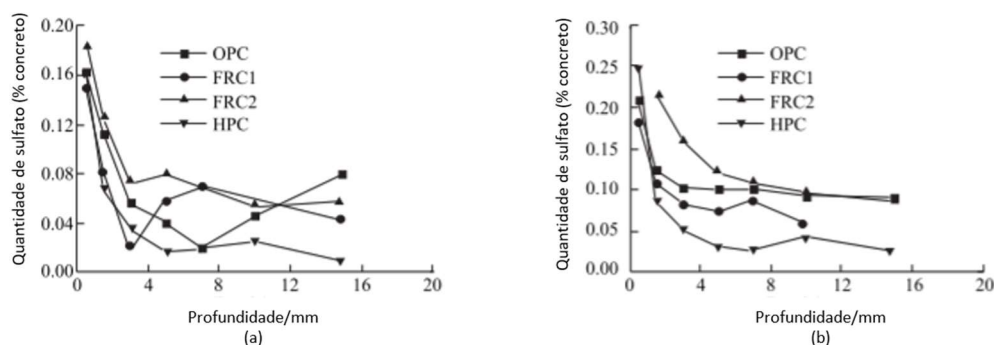
Figura 6 - Módulo de elasticidade do concreto exposto a solução de sulfato durante os ciclos de secagem e imersão. (a) OPC, (b) FRC1 e FRC2, (c) HPC.



Fonte: Adaptado de Geng *et al.* (2017)

Além disto, é apontado que coeficiente de difusão de sulfato efetivo aumentou com o tempo de corrosão, entretanto ocorre o contrário nas amostras com os traços FRC1 e HPC, demonstrando que 4 kg/m³ de fibra de polipropileno modificado pode melhorar a resistência à penetração do íon sulfato no concreto. A Figura 7 exemplifica o ponto levantado neste parágrafo.

Figura 7 - Penetração de íons de sulfato para 60 ciclos (a) e para 170 ciclos (b)



Fonte: Adaptado de Geng *et al.* (2017)

2.4.2 Meng *et al.* (2020)

Meng *et al.* (2020) utilizaram em sua pesquisa o cimento Portland PO 42.5, o qual possui características semelhantes aos Cimento Portland CP-V-ARI. Além disso, no traço utilizou-se areia natural de rio com granulometria contínua e módulo de finura de 2,73, também se fez o uso de cascalho de calcário com diâmetro máximo de 40mm como agregado graúdo. Além disso, a relação água/cimento foi de 0,45. A fibra utilizada é denominada de fibra sintética de alta performance, adicionada aos traços nos consumos de 0kg/m³, 0,8 kg/m³, 1,0kg/m³, 1,2kg/m³, 1,4kg/m³ e respectivamente denominados por P, X08, X10, X12 e X14. As características técnicas da fibra estão apontadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização das fibras empregadas na pesquisa.

Item	Comprimento (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Absorção de água (%)	Ponto de fusão (°C)
Valor	5 a 20	0,9 a 1,31	760	6,1	3,1	0,7	257

Fonte: Meng *et al.* (2020)

Para a elaboração do traço utilizou-se os consumos dos materiais descritos na Tabela 5, originando corpos moldados nos tamanhos de 100x100x400mm para realização do ensaio de resistência a tração e corpos de prova cúbicos na dimensão de 100mm para ensaio de resistência a compressão de acordo com as normas chinesas GB/T50081-2002 “*Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete*” e GB/T50082-2009 “*Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete*”.

Tabela 5 – Consumo dos materiais utilizados nos traços estudados.

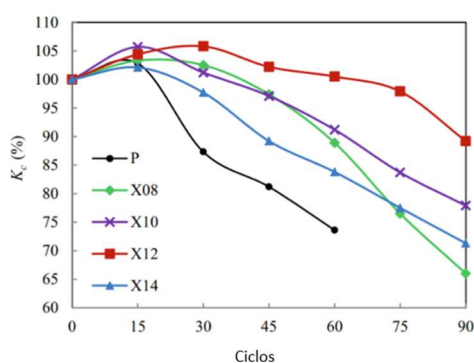
Traço	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Agregado gráúdo (kg/m ³)	Fibra (kg/m ³)
P	330	149	595	1390	0,0
X08					0,8
X10					1,0
X12					1,2
X14					1,4

Fonte: Meng *et al.* (2020)

O que tange a exposição das amostras ao ataque de sulfatos, executou-se a imersão dos corpos de prova em solução de Na₂SO₄ com concentração de 33,8 g/L SO₄²⁻. Um ciclo corresponde na imersão por 15h, seguida por secagem a temperatura ambiente por 1h para posteriormente realizar a secagem em estufa por 6h e refrigeração em temperatura ambiente por 1h.

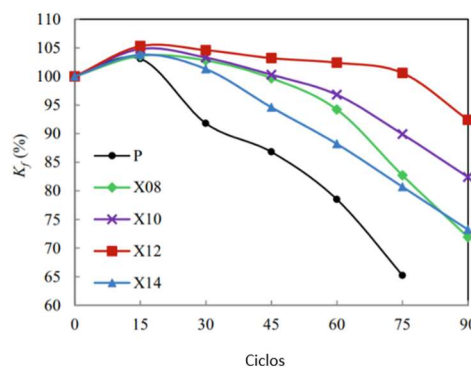
Como parâmetro de desempenho do concreto em estudo, utilizou-se o coeficiente de resistência a ataque de sulfato sob compressão (K_c) o qual é uma relação entre a resistência de compressão do corpo de prova após a realização dos ciclos de imersão e secagem na solução, sobre a resistência obtida sem que o corpo de prova tivesse sido exposto. Em conjunto para os corpos de prova prismáticos, utilizou-se o coeficiente de resistência a ataque de sulfatos sob tração (K_f), o qual segue a mesma linha de raciocínio apontada no parágrafo anterior, porém com as resistências de tração. Os resultados estão apresentados nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Coeficiente de resistência sob ataque de sulfatos em estado de compressão



Fonte: Adaptado de Meng *et al.* (2020)

Figura 9 - Coeficiente de resistência sob ataque de sulfatos sob estado de flexão



Fonte: Adaptado de Meng *et al.* (2020)

Analizados os resultados apresentados, os autores apontam que adicionar a fibra ao concreto pode melhorar sua resistência ao ataque de sulfato, especialmente para muitos ciclos de secagem-umedecimento.

A resistência à compressão das amostras, imersas na solução melhorou em 2% -5% quando o número de ciclos de secagem-umedecimento é 15. A melhoria na resistência à compressão para um grupo de X12 atinge 6% quando o número de ciclos de secagem-umedecimento é 20. A razão é que a pequena cristalização de sulfato de sódio preenche espaço intermediário do concreto, melhorando a compactação para pequenos ciclos de secagem-umedecimento. Além disso, a fibra irá restringir a expansão do concreto.

Portanto, a resistência à compressão é aumentada após pequenos ciclos de umedecimento-secagem. Contudo, essa característica física diminui quando o número de ciclos é maior que 15, exceto para o traço denominado de X12. O quanto maior for o número de ciclos de secagem-umedecimento, menor será a resistência à compressão. A razão é que a quantidade de cristalização de sulfato de sódio aumenta gradativamente com o aumento de o número de exposições, gerando uma tensão de tração interna a qual é produzida pela expansão dos cristais, acelerando a quebra do concreto. No entanto, o uso da fibra pode acarretar na contenção da expansão da cristalização de sulfato de sódio e suportar tensões de tração parcialmente, o que diminui a tensão de tração e restringe o desenvolvimento de pequenas fissuras. Assim, o traço que apresenta 1,2 kg/m³ de fibra demonstrou os melhores resultados para a resistência de ataque de sulfatos sob compressão.

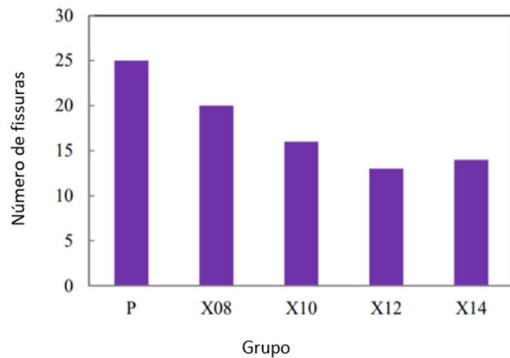
No entanto, avaliando a influência da fibra em relação ao estado de flexão, a mesma torna-se mais significativa em relação a compressão. O coeficiente de resistência ao ataque de sulfato sob flexão ainda apresenta desempenho superior a 100% quando o conteúdo de fibra é de 1,2 kg/m³ mesmo quando o número de ciclos de secagem-umedecimento atinge o valor de 75 chegando a valores de 155% em relação com o concreto comum.

Contudo, o mecanismo de resistência de ataque aos sulfatos em estado de tração é semelhante ao de compressão, com um aumento de 3% a 5% no 15º ciclo e diminui gradualmente a medida que aumenta os números de ciclos, apresentando uma pequena deterioração no intervalo de 15º ao 30º ciclo. Portanto, o teor de fibra de 1,2 kg/m³ apresenta bom rendimento ao ataque de sulfatos uma vez que a utilização da fibra traz melhorias na resistência à flexão e ductilidade.

Além disso, foi analisada após 90 ciclos, a fissuração das peças cúbicas. É mostrado que a capacidade anti-fissuração é significativamente melhorada adicionando a fibra ao concreto. O número de trincas diminuiu em 20% e a área total de trincas diminuiu 57% em comparação com o concreto simples.

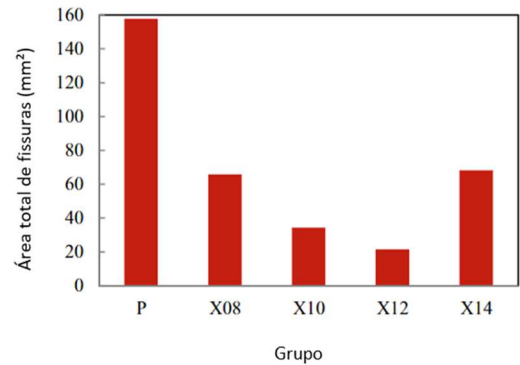
O autor ainda acrescenta que tanto o número de rachaduras quanto a área total rachada alcançaram seus valores mínimos no concreto com dosagem de 1,2 kg/m³ de fibras. As Figuras 10 e 11 demonstram esses resultados.

Figura 10 - Quantidade de fissuras por traço



Fonte: Adaptado de Meng *et al.* (2020)

Figura 11 - Quantidade total de área de fissura por traço



Fonte: Adaptado de Meng *et al.* (2020)

4.2.3 Guo *et al.* (2021)

Guo *et al.* (2021) utilizaram em sua pesquisa o cimento Portland PO 42.5, o qual possui características semelhantes aos Cimento Portland CP-V ARI. Além disso, no traço utilizou-se areia natural de rio com módulo de finura de 2,87, também se fez o uso de brita de calcário com diâmetro máximo de 20mm como agregado graúdo. Além do mais, utilizou-se cinza volante, sílica, escória de alto forno e fibra de poliéster na dosagem de 0,9 kg/m³. Na Tabela 6, encontra-se as características técnicas da fibra empregada no concreto.

Tabela 6 – Caracterização das fibras empregadas na pesquisa.

Item	Comprimento (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Diâmetro (μm)	Ponto de fusão (°C)
Valor	6	1,36	560	5,3	19	20	263

Fonte: Guo *et al.* (2021)

Para a elaboração do traço utilizou-se os consumos dos materiais descritos na Tabela 7, originando corpos moldados nos tamanhos de 100x100x400mm para realização do ensaio de flexão em três pontos e corpos de prova para ensaio de resistência a tração de acordo com a norma chinesa GB50081-2002 “*Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete*”.

Tabela 7 – Consumo dos materiais utilizados nos traços estudados.

Traço	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Agregado gráudo (kg/m ³)	Cinzas volantes (kg/m ³)	Escória de alto forno (kg/m ³)	Silica (kg/m ³)	Fibra (kg/m ³)
OC	355	195	722	1178	-	-	-	-
FC15	302				53	-	-	-
FC20	284				71	-	-	-
FC25	266				89	-	-	-
MC30	248				-	107	-	-
SC10	320				-	-	35	-
PC0.9	355				-	-	-	0,9

Fonte: Guo *et al.* (2021)

O que tange a exposição das amostras ao ataque de sulfatos, executou-se a imersão dos corpos de prova em solução de Na₂SO₄ com concentração de 33,8 g/L SO₄²⁻. Para tal, o corpo de prova após moldado, foi colocado na sala de cura em condições padrões durante 28 dias para depois entrar em contato com a solução sulfatada. O ciclo é composto por 5 dias imerso em ambiente agressivo, depois é removido e secado naturalmente ao ar livre por 5 dias, compondo um tempo total de 10 dias para um ciclo completo, com a troca da solução a cada duas semanas até o final dos experimentos.

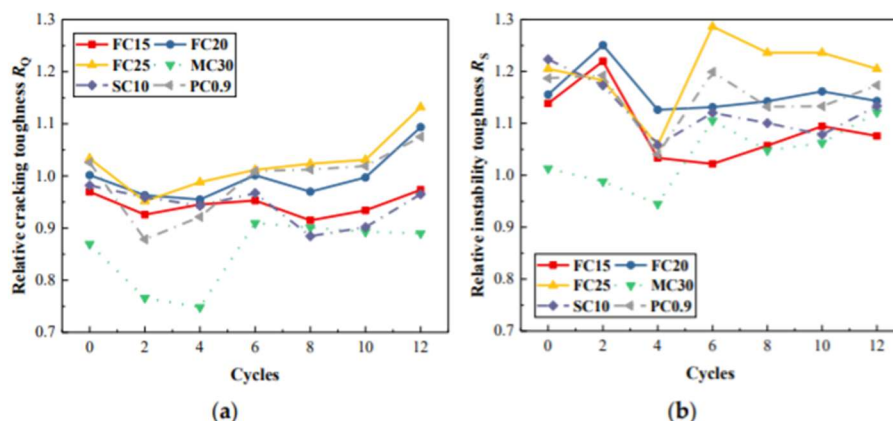
Após os corpos de prova serem submetidos a 0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12 ciclos de secagem-umedecimento, foram realizados ensaios mecânicos e de fratura por flexão em três pontos, para cada ciclo mencionado.

De acordo com os resultados do teste de flexão em três pontos obteve-se a resistência à fratura relativa RQ(n) e RS(n) que corresponde respectivamente a tenacidade de início e a tenacidade de instabilidade do concreto. O ensaio realizado para as peças submetidas a 6 ciclos e a 12 ciclos demonstra que a carga geral de fissuração e a carga de instabilidade aumentam primeiro e depois diminuem à medida que a peça é exposta mais vezes a solução.

No estágio inicial de corrosão, parte dos radicais de sulfato entra no concreto para formar produtos expansivos, como gesso e etringita, que preenche as fendas do concreto, aumenta a densidade, melhora a resistência à fissuração e o desempenho do concreto. A medida que aumenta a quantidade de ciclos completos, o volume de produtos de cristalização aumenta e ao expandir, excedendo a capacidade de suporte dos poros, resulta em um grande número de microfissuras, e estas microfissuras formam novos canais, que aceleram a taxa de corrosão do sulfato. Os resultados estão expressos na Figura 12.

Sendo assim, o autor conclui que ao adicionar fibra de poliéster e cinzas volante, estes elementos irão melhorar a tenacidade relativa à instabilidade do concreto, formando melhores efeitos de limitação à fissuração.

Figura 12 - Evolução da tenacidade relativa às fraturas. (a) Tenacidade relativa à fissuração (b) Tenacidade relativa à instabilidade



Fonte: Guo *et al.* (2021)

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como mencionado anteriormente por Figueiredo (2011), o concreto reforçado com fibras (CRF) apresenta grande capacidade de reforço da matriz cimentícia, já que as fibras funcionam como distribuidoras de tensões internas.

Nas pesquisas analisadas neste artigo, foi avaliado a eficácia das fibras sintéticas poliméricas, as quais demonstraram-se eficazes em quantidades de $0,9\text{kg/m}^3$, $1,2\text{ kg/m}^3$ e 4 kg/m^3 já que contribuíram efetivamente para o controle da expansão e fissuração ocasionados por peças imersas em solução de sulfato de sódio com concentração de $33,8\text{ g/L}$ de SO_4^{2-} . Este ocorrido pode ser explicado, uma vez que essas amenizam as tensões presentes dentro dos poros à medida que há estabilização dos compostos expansivos, como etringita (produto do ataque de sulfatos a matriz cimentícia).

Uma vez que suportadas as tensões acometidas pela expansão destes elementos, há uma diminuição da penetração dos íons de sulfato na peça de concreto, fazendo com que a degradação da estrutura ocorra de forma mais lenta, garantindo uma maior durabilidade, além de auxiliar a manter as características de resistências à compressão e à tração.

4. REFERÊNCIAS

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2019. 1 v.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 247 f. Tese (Livre docência) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GENG, Yongjuan; JIN, Zuquan; HOU, Baorong; ZHAO, Tiejun; GAO, Song. Long-term behavior of fiber reinforced concrete exposed to sulfate solution cycling in drying-immersion. **Journal Of Wuhan University Of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 875-881,

28 jul. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-017-1683-x>.

GUO, Jin-Jun; WANG, Kun; QI, Cui-Ge. Determining the Mineral Admixture and Fiber on Mechanics and Fracture Properties of Concrete under Sulfate Attack. **Journal Of Marine Science And Engineering**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 251, 27 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030251>.

KWAN, W. H; RAMLI, M. CHEAH, C. B. Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment. **Construction and Building Materials**. Vol. 63, 62-71, 2014

MENG, Chaomei; LI, Wenzhe; CAI, Liangcai; SHI, Xingang; JIANG, Chunlin. Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: resistance to sulfate attack and freezing-thawing. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 262, p. 120055, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120055>.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações**. Editora: oficina de Textos, São Paulo, 2005, 207 p
NEVILLE, Adam M.. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, Adam. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 34, n. 8, p. 1275-1296, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004>.

SERAFINI, Ramoel; RAMBO, Dimas Alan Strauss; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 89, n. 0, p. 58-61, mar. 2018. Trimestral.

SHUANG YOU, HONGGUANG JI, JUANHONG LIU, CHENGLIN SONG, WENDI TANG. Fracture performance of macro synthetic steel fiber concrete exposed to a sulfate environment. **Anti-Corrosion Methods and Materials**. Vol. 63 Issue: 3, pp. 236-244, 2016

SIMÃO, Luana Carvalho Ribeiro; REAL, Lígia Vitória; NOGUEIRA, André Baltazar; SALVADOR, Renan Pícolo; FIGUEIREDO, Antonio Domingues. ATAQUE SULFÁTICO EXTERNO EM CONCRETO PROJETADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO. **Anais 60º Congresso Brasileiro do Concreto**, Foz do Iguaçu, v. 1, n. 1, p. 1-12, set. 2018. Anual.

SKALNY, Jan; MARCHAND, Jacques; ODLER, Ivan. Sulfate Attack. In: SKALNY, Jan; MARCHAND, Jacques; ODLER, Ivan. **Sulfate Attack on Concrete**. London: Taylor & Francis Group, 2002. p. 1-46.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos - Método de ensaio acelerado**. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

WANG, J; NIU. D; SONG. Z. Damage layer thickness and formation mechanism of shotcrete with and without steel fiber under sulfate corrosion of dry-wet cycles by ultrasound plane testing method. **Construction and Building Materials**. Vol. 123, 346-356, 2016

Contatos: guilherme.vigarani@hotmail.com e ligia.real@mackenzie.br