

Durabilidade do CRF: Por que avaliar o potencial **de degradação das fibras é essencial?**

IGOR FERRAZ TORRES - GER. TÉC., DIR. TÉC. - <https://orcid.org/0000-0003-3187-9575> (igorferraz86@gmail.com) – **TM Concrete, Sika Brasil S/A, IFRC**

RESUMO

NESTE ARTIGO É ABORDADA A IMPORTÂNCIA DA DURABILIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF), DESTACANDO A NECESSIDADE DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO DAS FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS ALCALINAS. EM GERAL, AS FIBRAS METÁLICAS OFERECEM INÚMERAS VANTAGENS, COMO ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA E CONTROLE DE FISSURAÇÃO, MAS PODEM SOFRER CORROSÃO EM AMBIENTES EXTREMAMENTE AGRESSIVOS, O QUE EXIGE REVESTIMENTOS PROTETORES. AS FIBRAS POLIMÉRICAS, ESPECIALMENTE AS DE PET, DEMONSTRAM ALTA SENSIBILIDADE AO ATAQUE ALCALINO, ENQUANTO AS DE POLIPROPILENO APRESENTAM MELHOR ESTABILIDADE. JÁ, AS FIBRAS DE VIDRO POSSUEM BOAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, MAS SOFREM DEGRADAÇÃO RÁPIDA EM MEIO ALCALINO, SENDO NECESSÁRIO UM TEOR MÍNIMO DE ZIRCÔNIO PARA AUMENTAR SUA DURABILIDADE. O TEXTO REFORÇA A IMPORTÂNCIA DAS NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS PARA GARANTIR A QUALIDADE DAS FIBRAS E CRF, SUGERINDO-SE MÉTODOS AVANÇADOS, COMO FTIR E DSC, PARA ANÁLISES COMPLEMENTARES. A ESCOLHA ADEQUADA DAS FIBRAS DEVE EQUILIBRAR BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES, GARANTINDO UM CRF DURÁVEL E EFICIENTE PARA DIFERENTES APLICAÇÕES.

PALAVRAS-CHAVE: FIBRAS, CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF), DEGRADAÇÃO, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os benefícios provocados pela incorporação de fibras no concreto são amplamente reconhecidos e aceitos (BERNARD, 2002) (BENTUR & MINDESS, 2006), (CARMONA & MOLLINS, 2019). Dentre estes benefícios,

podemos destacar: aumento de ductilidade pelo reforço tridimensional pós-fissuração (resistência residual à tração ou absorção de energia); redução ou controle da fissuração; melhor comportamento à flexão; maior resistência a impacto, abrasão e fadiga; aumento de durabilidade devido ao maior controle de fissuração; maior resistência aos ciclos de gelo-degelo; aplicação mais fácil, segura e econômica, menor pegada de carbono etc.

Como consequência, é previsto que o mercado global de concreto reforçado com fibras (CRF) atinja um crescimento orgânico considerável de 8,2% no período de 2022 a 2031, atingindo o patamar de 4,8 bilhões de dólares, destacando-se especialmente as fibras poliméricas que apresentam a maior previsão de crescimento de aproximadamente 32,7% no período analisado. Tal crescimento da aplicação das fibras é impulsionado pelo crescimento populacional e a rápida urbanização que requerem melhorias de infraestrutura, construção residencial e comercial, mineração e construção subterrânea, industrial e outros (ALLIED MARKET RESEARCH, 2023).

Uma ampla variedade de fibras pode ser listada de acordo com os seus materiais constituintes: metálicas (aço trefilado a frio, refilado, usinado ou por fusão), poliméricas (polipropileno, polietileno, PVA, poliacrílico, aramidas ou combinações destes), vidro e naturais (celulose, sisal, cânhamo) etc. Tais fibras variam consideravelmente em termos de propriedades físico-químicas, mecâ-

nicas, desempenho e custo dos pontos de vista de material constituinte, bem como de desempenho quando aplicadas em CRF. Esses materiais são amplamente utilizados como matéria prima das fibras, pois geralmente apresentam comportamento mecânico adequado e durabilidade quando aplicados em CRF (BENTUR & MINDESS, 2006).

Contudo, é importante salientar que cuidados especiais devem ser tomados para garantia da durabilidade do CRF a partir da avaliação do potencial de degradação das fibras quando inseridas em matrizes cimentícias. Assim como outros materiais componentes do concreto, as fibras independentemente da origem devem apresentar sanidade quando inseridas em meio alcalino, já que a solução de poros de matrizes cimentícias apresentam convencionalmente um pH em torno de 13 (KURDOWSKI, 2014).

É neste sentido que o corrente artigo revisita algumas indicações técnicas já preconizadas por normas brasileiras - NBR 15530 (ABNT, 2019), NBR 16941 (ABNT, 2021) e NBR 16942 (ABNT, 2021), além de sugestões e recomendações adicionais por meio de técnicas microanalíticas que surgem para complementar e garantir o controle de qualidade do CRF na esfera de materiais e de desempenho ao longo de toda sua vida útil. O texto abrangerá aquelas fibras de maior representatividade no mercado, ou seja, aquelas cobertas atualmente pela norma brasileira de controle de qualidade - NBR 16938 (ABNT 2021): metálicas, poliméricas e vidro.

2. FIBRAS METÁLICAS

As fibras metálicas, assim como o reforço em aço convencional, são estáveis e compatíveis com o ambiente alcalino prevalente em um concreto de cimento Portland não fissurado e/ou carbonatado. Assim como ocorre com o concreto armado convencional, quando os álcalis do concreto são lixiviados ou quando é carbonatado, o pH do meio cai para um nível não seguro, de maneira que a corrosão se torna suscetível, mesmo em concreto não fissurado.

Embora fibras de aço de baixo carbono possam sofrer corrosão severa quando localizadas superficialmente, as fibras de aço mais internas permanecem livres de corrosão mesmo sob altos teores de cloreto (BERROCAL, LUNDGREN, & LÖFGREN, 2016). Positivamente, é importante destacar que as fibras possuem papel fundamental no controle da fissuração do CRF. Ou seja, por inibir o surgimento de fissuras, as fibras dificultam o acesso de agentes agressivos, sendo que em estruturas mistas protegem mais o aço convencional quando comparado com o cobrimento em concreto simples, além da autoproteção das próprias fibras. Devido à natureza discreta das fibras, a maior homogeneidade da superfície por conta do processo produtivo e a interface fibra-matriz mais densa são fatores que tornam as fibras de aço carbono incorporadas no CRF mais duráveis em relação ao aço convencional (MARCOS-MESONA, *et al.*, 2018)

Contudo, ainda há inconsistências e a não convergência de estudos sobre a compreensão total dos mecanismos que governam a corrosão de fibras de aço carbono (MARCOS-MESONA, *et al.*, 2018). Portanto, por motivos de segurança é importante que considerações especiais sejam tomadas em condições extremamente severas de exposição, especialmente em zonas marinhas ou industriais com ciclagem de molhagem/secagem. É esperada a perda de capacidade de reforço mecânico provocada pela perda de seção/diâmetro dos filamentos das fibras de aço carbono

comum, especialmente daqueles mais superficiais e expostos às intempéries sob menor cobrimento. Isso é explicado pela mudança no padrão de falha na ruptura do concreto reforçado com fibras de aço de arrancamento para fratura da fibra, decaindo, assim, a sua tenacidade. Adicionalmente, impactos estéticos também podem ocorrer devido a manchas provocadas pelo processo de corrosão (BENTUR & MINDESS, 2006) (JOHNSTON, 2010).

Diante desse contexto, torna-se importante seguir as recomendações da NBR 15530 (ABNT, 2019), a qual menciona que o uso de revestimentos de zinco (Zn) ou ligas de zinco/alumínio (Zn/Al) é amplamente recomendado para a proteção contra ambientes alcalinos (passivação). O tipo e a quantidade devem ser declarados pelo fabricante e no caso da galvanização (Zn), a determinação da espessura do revestimento deve ser realizada de acordo com a ISO 7989-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION, 2006).

Ademais, boas práticas já preconizadas por normas técnicas clássicas de concreto devem ser seguidas, sob a ótica prescritiva ou de desempenho

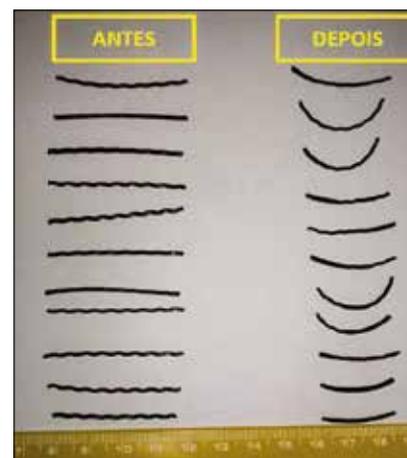
do material CRF. Adicionalmente, do ponto de vista estrutural, é importante a limitação da abertura de fissuras no que tange ao Estado Limite de Serviço (ELS), diminuindo a vulnerabilidade a quaisquer agentes corrosivos. Finalmente, é sugerida a combinação do concreto reforçado com fibras de aço com outros sistemas (revestimentos protetores poliméricos, por exemplo), a que fatalmente aumentará a redundância e reserva de segurança da solução conjunta adotada.

3. FIBRAS POLIMÉRICAS

É preciso ter ciência de que processos de envelhecimento e impacto na durabilidade do CRF podem ocorrer por efeitos associados à própria matriz cimentícia, à fibra em si e às mudanças intersticiais de fibra-matriz. Ensaio acelerados comumente adotados em concreto convencional, ataque químico por sulfatos, por exemplo, pode ser referenciado para qualificação do CRF. No entanto, aqui será abordado exclusivamente o problema atrelado a sensibilidade das fibras ao ataque dos álcalis, o que é um problema comum as fibras naturais, de vidro e poliméricas (BENTUR & MINDESS, 2006) (JOHNSTON, 2010).



A



B

FIGURA 1

ASPECTO DA FIBRA POLIMÉRICA BASEADA EM PET APÓS O ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO MEIO ALCALINO: A) ESCURECIMENTO DA SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO PROVOCADO PELA DEGRADAÇÃO DO PET; B) VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DE COMPRIMENTO, DIÂMETRO E ENRIJECIMENTO DOS FILAMENTOS APÓS O ATAQUE ALCALINO

FONTE: AUTOR (2025)

O que ocorre é que há certos tipos de polímeros termoplásticos, o exemplo mais conhecido é um tipo de poliéster: o PET - polietileno tereftalato, que é reconhecido por ser um material que sofre grave deterioração por hidrólise e dissolução quando em contato com os álcalis do cimento (SALVADOR & FIGUEIREDO, 2013). É importante esclarecer uma confusão terminológica que ocorre no mercado com as poliolefinas, grupo que engloba os polietilenos de baixa ou alta densidade, polietileno reticulado (PE) e o polipropileno (PP), ou seja, materiais intrinsecamente de elevada estabilidade em ambientes alcalinos.

Exatamente para evitar este tipo de problema que a NBR 16942 (ABNT, 2021) prediz que o polímero base ou as misturas de polímeros da fibra devem ser declarados pelo fabricante ou fornecedor e devem ser, obrigatoriamente, resistentes a meios alcalinos, de acordo com o método de ensaio descrito nesta mesma normativa para avaliação da resistência da fibra à ação do meio alcalino. O ensaio consiste em submeter três amostras de 10,0 g de fibra em 200,0 g de solução de hidróxido de sódio 1 M (40 g/L, pH 14), durante 30 dias, a uma temperatura de 60°C. Tais condições aceleradas são equivalentes ao período de 13 anos de exposição à solução de poros de uma matriz cimentícia (pH 13) à temperatura de 20°C, conforme a equação de Arrhenius (SALVADOR & FIGUEIREDO, 2013), o que não é demasiadamente conservador vide as atuais vidas úteis mínimas de projeto praticadas para estruturas de concreto. Como resultado, neste ensaio é avaliado a perda de massa da fibra com consequente avaliação visual da formação de resíduos e alterações superficiais e estruturais dos filamentos de fibra. Um exemplo da aplicação deste ensaio é mostrado na Figura 1 e Tabela 1, cuja perda de massa foi de cerca de 40%, ultrapassando consideravelmente o requisito normativo de 5%.

Além da declaração do fabricante, outro teste bastante singelo que pode ser realizado no canteiro de obras é o

TABELA 1

PERDA DE MASSA OBTIDA EM ENSAIO DE RESISTÊNCIA ALCALINA DE FIBRA PET

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa individual (%)	Perda de massa média (%)
1	10,1	6,2	-38,6	-39,1
2	10,0	6,1	-39,0	
3	10,1	6,1	-39,6	

de densidade sob imersão em água com a fibra suspeita em questão. Como o PET apresenta uma massa específica na ordem de $\gamma = 1,3 \text{ g/cm}^3$, esse afunda quando em contato com água, enquanto o polipropileno flutua, vide a massa específica da ordem de $\gamma = 0,92 \text{ g/cm}^3$, vide Figura 2. Apesar da simplicidade, é importante notar que esse teste não possui caráter reprobatório e não é normatizado, servindo apenas como um alerta. Há outros tipos de fibras



FIGURA 2

COMPORTAMENTO DAS FIBRAS PET (AO FUNDO) E PP (FLUTUANDO) NO TESTE DE IMERSÃO EM ÁGUA

FONTE: AUTOR (2025)

poliméricas, a exemplo das fibras PVA (Álcool Polivinílico), que são exceções, pois possuem massa específica superior

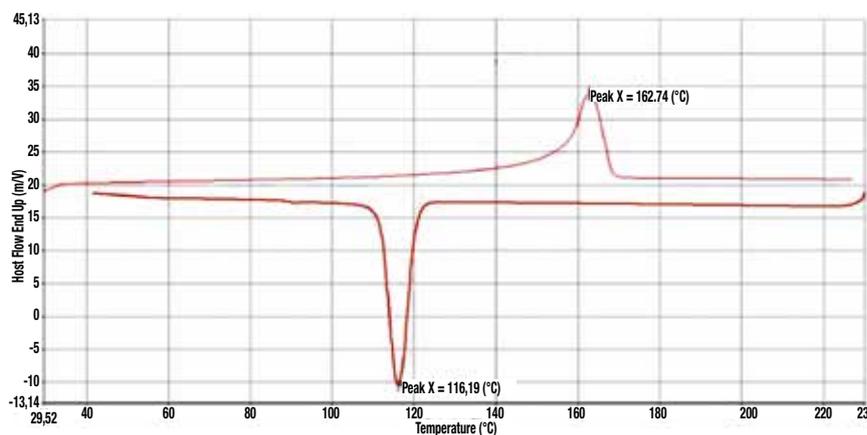


FIGURA 3

PERFIL TÍPICO OBTIDO NA ANÁLISE DSC DE UMA FIBRA COMPOSTA INTEGRALMENTE POR PP

FONTE: AUTOR (2025)

à da água e, portanto, afundam mesmo sendo um tipo de polímero reconhecidamente resistente ao meio alcalino.

Embora haja críticas sobre a dificuldade na correlação e modelagem com as situações reais de campo, o teste acelerado de resistência alcalina é de suma importância para comparação entre diferentes produtos comerciais e garantia da durabilidade dos compósitos, já que aqueles confeccionados com fibras PET podem perder até 50% da sua capacidade de resistência residual à tração em longas idades (>168 dias), quando comparada à idade referencial de 28 dias (SALVADOR & FIGUEIREDO, 2013).

De maneira complementar, este autor sugere para a próxima revisão normativa a adoção de técnicas microanalíticas, englobando a análise FTIR (sigla em inglês para espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) e DSC (sigla em inglês para calorimetria exploratória diferencial), as quais possibilitam a investigação de componentes majoritários e minoritários das fibras a partir da absorbância ou transmitância característica da vibração e estrutura do material (FTIR) e pela determinação das temperaturas de transição de fases dos materiais e sua natureza termodinâmica (DSC). É importante mencionar que a análise FTIR já é contemplada, mesmo que optativa, pela norma de aditivos químicos para concreto para verificação de uniformidade (ABNT, 2019). Nota-se que os polímeros apresentam temperaturas de fusão características, sendo que o polietileno funde a cerca de 134°C, o polipropileno a cerca de 160°C e o poliéster a 257°C (ACI, 2018). A Figura 3 mostra o perfil típico de uma análise DSC de uma fibra composta integralmente por PP (Temperatura de fusão -162°C).

Já, na Figura 4, é mostrado um perfil típico de uma análise DSC de uma fibra composta parcialmente por PE e PP (Temperaturas de fusão de -133°C e -160°C, respectivamente). De forma complementar, temos, na Figura 5, uma análise comparativa dos espectros obtidos por FTIR entre ambas as fibras, sendo a diferença pronunciada pela banda

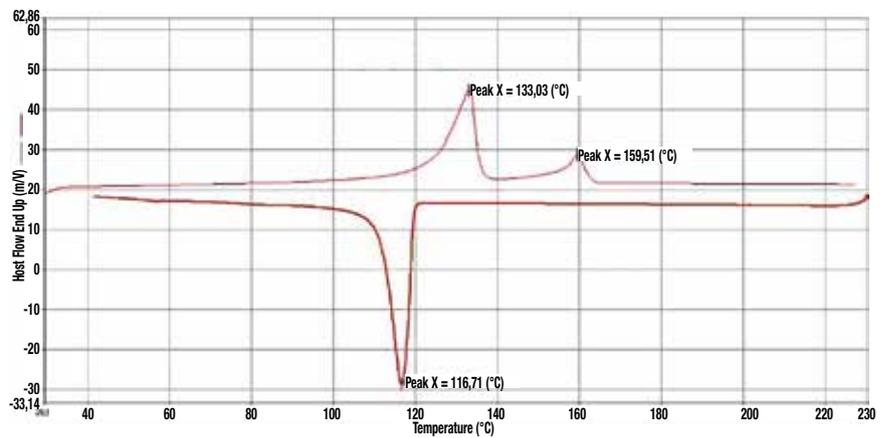


FIGURA 4

PERFIL TÍPICO OBTIDO NA ANÁLISE DSC DE UMA FIBRA COMPOSTA POR BLEND DE PE E PP

FONTE: AUTOR (2025)

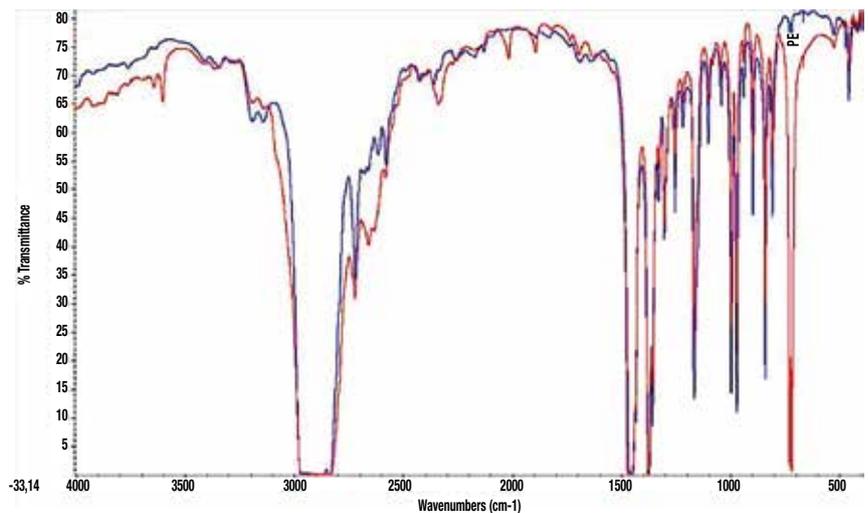


FIGURA 5

ESPECTROS COMPARATIVOS OBTIDOS POR ANÁLISE FTIR DE FIBRAS PP E PE + PP

FONTE: AUTOR (2025)

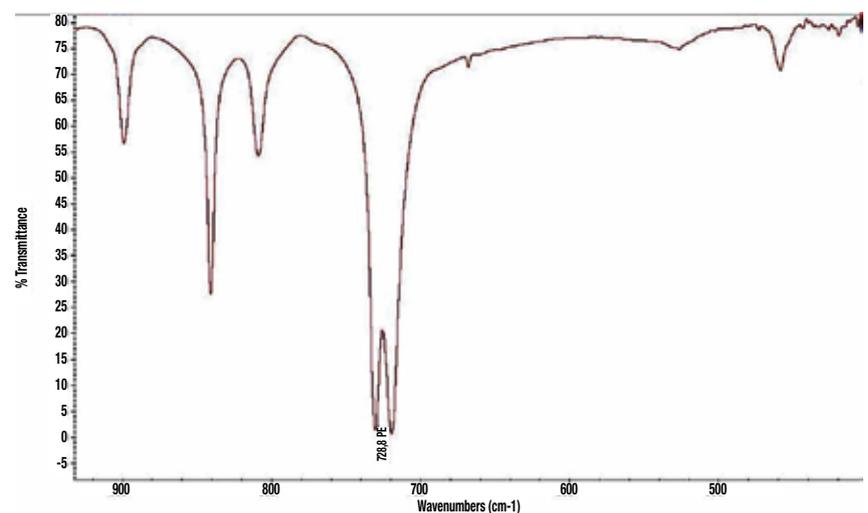


FIGURA 6

ANÁLISE FTIR: DESTAQUE PARA A BANDA CARACTERÍSTICA DO GRUPO PE DA FIBRA PE+PP

FONTE: AUTOR (2025)

característica ao PE no número de onda de -728 cm^{-1} , destacado na Figura 6.

4. FIBRAS DE VIDRO

Conforme já citado, a exposição das fibras de vidro a um ambiente alcalino leva a um rápido processo de deterioração, acarretando perdas de resistência, massa e diâmetro do filamento, devido a um processo de quebra das ligações Si-O-Si do vidro pelos íons OH^- existentes na solução de poros da matriz cimentícia (JOHNSTON, 2010). De forma a mitigar eficientemente tal problema de forma econômica, a incorporação de zircônio na composição do vidro apresentou-se como a solução mais eficaz para estabilidade química em soluções alcalinas.

Com base nesse contexto, a norma brasileira específica que a fibra deve ser composta por vidro resistente ao meio

alcalino da matriz cimentícia e específica que a composição deve conter teor mínimo de 16% de dióxido de zircônio (ZrO_2) (ABNT, 2021). Diferentemente das ligações Si-O, as ligações Zr-O são apenas levemente atacadas pelos íons OH^- , reduzindo consideravelmente a degradação do material devido a uma maior estabilidade da rede vítrea e/ou da formação de uma camada superficial protetora rica em ZrO_2 .

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A durabilidade do concreto reforçado com fibras (CRF) depende diretamente da resistência das fibras ao meio alcalino das matrizes cimentícias. As fibras metálicas apresentam boa estabilidade, mas podem sofrer corrosão em ambientes extremamente agressivos, exigindo revestimentos protetores. As fibras poliméricas, especialmente

as de PET, são altamente suscetíveis à degradação alcalina, enquanto as de polipropileno demonstram maior resistência. Já as fibras de vidro convencionais deterioram-se rapidamente, sendo essencial o uso de composições com alto teor de zircônio para garantir estabilidade química. Diante dessas variáveis, normas como NBR 15530, NBR 16941, NBR 16942 e NBR 16938 são fundamentais para a garantia de desempenho e qualidade das fibras utilizadas. Métodos avançados, como análise FTIR e DSC, podem complementar a qualificação prévia das fibras via avaliação de suas composições. A correta seleção das fibras e o cumprimento das normas são essenciais para garantir a longevidade e desempenho do CRF em aplicações estruturais e não estruturais, independentemente de questões mercadológicas. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALLIED MARKET RESEARCH. (2023). Global Concrete Fiber Market - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022-2031. Portland, United States.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (2018). ACI PRC-544.4-18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete. Farmington Hills.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). NBR 11768-2: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 2: Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16938: Concreto reforçado com fibras — Controle da qualidade. Rio de Janeiro.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16941: Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- [8] BENTUR, A., & MINDESS, S. (2006). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press.
- [9] BERNARD, E. S. (2002). Correlations in the behaviour of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens. *Materials and Structures*, 35, pp. 156-164.
- [10] BERROCAL, C., LUNDGREN, K., & LÖFGREN, I. (2016). Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art. *Cement and Concrete Research*, 80, pp. 69-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.006>.
- [11] CARMONA, S., & MOLINS, C. (2019). Use of BCN test for controlling tension capacity of fiber reinforced shotcrete in mining works. *Construction and Building Materials*, 198, pp. 399-410.
- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. (2006). ISO 7989-1: Steel wire and wire products - Non-ferrous metallic coatings on steel wire - Part 1: General Principles.
- [13] JOHNSTON, C. D. (2010). Fiber-Reinforced Cements and Concretes (Vol. 3: Advances in Concrete Technology). London: Taylor & Francis Group.
- [14] KURDOWSKI, W. (2014). Cement and Concrete Chemistry. In: Chapter 6 - Concrete Properties. Springer Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7_6
- [15] MARCOS-MESONA, V., MICHELA, A., SOLGAARD, A., FISCHER, G., EDVARDSEN, C., & SKOVHUS, T. (2018). Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review. *Cement and Concrete Research*, 103, pp. 1-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.016>.
- [16] SALVADOR, R., & FIGUEIREDO, A. (2013). Evaluation of the durability of synthetic macrofibers in cement matrices. Conference: 7th International Conference Fibre Concrete 2013, (pp. 1-10). Prague, Czech Republic.