

Influência de variáveis experimentais nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (SFRC) em experimentos de degradação de cloretos: revisão bibliográfica e análise estatística

O. Becerra¹ , A. Meza^{1*} , R. Salinas² 

* Autor de Contato: alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

Recebido: 04/10/2022 | Correções recebidas: 15/04/2023 | Aceito: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito de variáveis experimentais no estudo da degradação de cloretos de concretos reforçados com fibras de aço (SFRCs). As informações foram coletadas de diferentes fontes literárias e tratadas por meio do ábaco experimental de Taguchi e da análise de regressão. Os resultados mostram que os fatores mais influentes na degradação dos SFRCs degradados por cloreto são a carga durante a degradação e a abertura da fissura, fatores que impactam estatisticamente na resistência residual e na carga máxima de flexão. No entanto, outros como relação água/cimento, volume de fibras, concentração de cloretos e tempo de degradação mostraram pouca influência na resposta mecânica dos SFRCs.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras de aço; degradação; cloretos; variáveis experimentais; propriedades mecânicas.

Citar como: Becerra, O., Meza, A., Salinas, R. (2023), “Influência de variáveis experimentais nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (SFRC) em experimentos de degradação de cloretos: revisão bibliográfica e análise estatística”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 143 – 157, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

¹ Departamento de Ingeniería Metal-Mecánica, Facultad de Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

² Departamento de Estadística, Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Osler Becerra Pérez contribuiu com a busca e compilação da informação, com a análise estatística da referida informação em cerca de 50%, a discussão dos resultados em 40% e a elaboração do rascunho do artigo. O autor Alejandro Meza de Luna contribuiu com a direção e gestão da investigação, a discussão dos resultados em 40%, revisão e ajustes do artigo em 80%, e as funções de autor correspondente. O autor Rogelio Salinas contribuiu com a análise estatística de todas as informações encontradas em 50%, a discussão dos resultados em 20% e a revisão e ajustes do artigo em 20%.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Influence of experimental variables on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in chloride degradation experiments: bibliographic review and statistical analysis

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the effect of experimental variables in the study of chloride degradation of steel fiber reinforced concrete (SFRCs). The information was collected from different literary sources to later be treated through Taguchi's experimental design and regression analysis. The results show that the most influential factors in the degradation of SFRCs degraded by chloride are the load during degradation and the crack width, factors that statistically impact on residual resistance and maximum flexural load. However, others such as the water/cement ratio, fiber volume, chloride concentration and degradation time showed little influence on the mechanical response of the SFRCs.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; degradation; chlorides; experimental variables; mechanical properties.

Influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras de acero (SFRC) en experimentos de degradación por cloruros: revisión bibliográfica y análisis estadístico

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de variables experimentales en el estudio de la degradación por cloruros de concretos reforzados con fibras de acero (SFRCs). La información fue recopilada de diferentes fuentes literarias para después ser tratada mediante el diseño experimental de Taguchi y análisis de regresión. Los resultados muestran que los factores más influyentes en la degradación de SFRCs degradados por cloruro son la carga durante la degradación y el ancho de fisura, factores que impactan estadísticamente sobre resistencia residual y la carga máxima a flexión. Sin embargo, otros como la relación agua/cemento, el volumen de fibras, la concentración de cloruros y el tiempo de degradación demostraron poca influencia sobre la respuesta mecánica de los SFRCs.

Palabras clave: concretos reforzados con fibra de acero; degradación; cloruros; variables experimentales; propiedades mecánicas.

Nomenclatura:

Vrr: Variação da resistência residual (%)

Vcm: Variação máxima de carga (%)

Rac: Relação água/cimento

Vf: Volume de fibra (%)

Td: Tempo de degradação (dias)

C: Concentração de cloreto (% w/w)

Cd: Carga exercida durante a degradação (kN)

Ca: Corrosão acelerada ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Ag: Abertura das fissuras controladas (mm)

Te: Tipo de experimento

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado a nível mundial, isto se deve principalmente à disponibilidade dos materiais que o constituem (Chen et al., 2021). O concreto possui propriedades que o tornaram o material de construção por excelência, uma vez que apresenta uma elevada resistência à compressão, podendo passar décadas sem exigir praticamente qualquer manutenção ou substituição (Paul et al., 2020). Apesar destas qualidades, o concreto apresenta uma resistência à flexão relativamente baixa devido aos esforços de tração que ocorrem, razão pela qual se tornou necessário o uso de materiais de reforço na preparação do concreto, que permitem melhorar as suas características (Chen et al., 2021). Desde o século XIX até o presente, o aço na forma de barras foi usado para reforçar estruturas de concreto. Embora as armaduras ainda sejam as mais utilizadas para esse fim, o uso de fibras teve um aumento significativo nas últimas décadas, gerando o que é conhecido como concreto reforçado com fibra de aço (CFRA), as fibras melhoram as propriedades de tração do concreto, resistência à fadiga, resistência ao impacto, tenacidade e ajudam a controlar fissuras. (Behbahani e Nematollahi, 2011; Kaur et al., (2012), Ferreira et al., 2018; Zhang et al., 2020). O CFRA é usado, por exemplo, no revestimento de túneis, construção de estradas e edifícios sujeitos a danos causados por terremotos (Berrocal, 2015; Marcos - Meson et al., 2019; Zhang et al., 2020). Além disso, o CFRA é aplicado em infraestruturas onde existam ambientes agressivos como pisos industriais, edifícios para armazenamento de resíduos nucleares, estruturas hidráulicas e marítimas, como docas, plataformas petrolíferas e gasodutos (Doo-Yeol et al., 2021, Hou e outros, 2021). Entre os materiais mais utilizados para esse fim estão o aço, materiais poliméricos e fibras de carbono, embora também tenha sido relatado o uso de vidro, coco, juta e amianto (Meza e Siddique, 2019; Paul et al., 2020; Meza e Shaikh, 2020; Meza et al., 2021), bem como fibra vegetal de agave (Juárez-Alvarado et al., 2017). As fibras de aço são o material mais utilizado e estudado como reforço de concreto (Horszczaruk, 2009; Hou et al., 2021).

Como visto anteriormente, os SFRCs são utilizados em infraestruturas submetidas a ambientes agressivos, por isso, a comunidade científica tem se encarregado de investigar os diferentes processos de degradação a que as estruturas feitas com SFRC podem ser submetidas. Várias investigações indicam que a corrosão é o principal mecanismo de degradação de estruturas de concreto armado (Paul et al., 2020; Berrocal et al., 2015; Berrocal et al., 2017). A corrosão causa a diminuição da seção transversal da armadura de aço (Berrocal, 2015), o que influencia negativamente nas características mecânicas do concreto armado com barras de aço e o SFRC. Somado a isso, é importante dizer que o processo de corrosão afeta não só as armaduras, mas também o concreto que as envolve. Isso se deve à formação de produtos de corrosão que se acumulam na interface aço-concreto e à medida que o volume aumenta, surgem pressões internas que provocam a fissuração e desprendimento do concreto, processo conhecido como deslocamento (Simões e Santo, 2019), que por sua vez aumenta a taxa de corrosão e, com isso, causa alterações em suas propriedades mecânicas, incluindo carga máxima e resistência residual (Berrocal et al., 2017; Paul et al., 2020). Segundo Abbas et al., (2014), a penetração de cloretos nas paredes dos túneis causa a corrosão das armaduras, reduzindo assim sua capacidade de carga. Além disso, outros pesquisadores, como Granju e Balouch, (2005) e Carrillo et al., (2017), afirmam que ambientes corrosivos podem afetar o desempenho à flexão do SFRC se as fibras de aço forem corroídas, já que essas causam reduções na carga de pico máxima, acompanhada por comportamento frágil pós -pico. Além disso, estudos como o de Hou et al., (2021) indicam que a diminuição da resistência residual em SFRCs tem estreita ligação com a perda de massa da armadura, corrosão por pite, deterioração da aderência entre armadura-concreto-taxa de corrosão. Por outro lado, são vários os fatores que influenciam o processo de corrosão, pois este depende tanto das características do metal corroído quanto do meio ambiente em que se encontra. Um desses fatores é a presença de agentes externos, tais como sais que contém o íon cloreto, por exemplo,

cloreto de alumínio, cloreto de ferro, cloreto de amônio e cloreto de sódio. Esses sais, ao entrar no concreto, diminuem seu pH e aceleram o processo de corrosão da armadura de aço (Salazar-Jiménez, 2015). Especificamente, a degradação por cloretos causa o chamado efeito de corrosão por pites, isso ocorre quando cloretos suficientes se acumulam na superfície da armadura, favorecendo assim o processo corrosivo em uma área específica do material (Berrocal et al., 2015). A degradação do concreto reforçado com fibras pela ação dos cloretos tem sido amplamente estudada, devido à exposição das infraestruturas a ambientes agressivos com elevadas concentrações deste ânion (Berrocal et al., 2015). É por isso que pesquisas têm sido feitas tanto no efeito da degradação nas fibras, no concreto, quanto no conjunto fibra-concreto, conseguindo que suas propriedades mecânicas variem tanto, depois de serem submetidas a processos degradáveis por cloretos. Diferentes tipos de fibras e concretos foram testados em diferentes condições experimentais, o que fez com que os resultados obtidos nas referidas investigações fossem muito variados e nem sempre correlacionados entre si, por isso ainda não está completamente claro o que são as variáveis experimentais que mais afetam as características mecânicas do concreto e em que medida o fazem, o que poderia ser resolvido por meio de análises e pesquisas comparativas. Pelas razões acima mencionadas, este estudo compila dados experimentais obtidos em condições de laboratório, relacionados com a degradação de SFRC sob a ação de cloretos. Os dados das diferentes investigações foram submetidos a uma análise estatística onde se identificam as variáveis experimentais que mais influenciam a corrosão das fibras, a deterioração geral do concreto e até que ponto afetam as suas propriedades quando submetidas a esforços de flexão. Para isso, a análise dos dados experimentais obtidos da bibliografia foi realizada por meio do delineamento experimental robusto de Taguchi, que é um método de análise focado em maximizar uma relação sinal-ruído (S/R) específica para cada uma das variáveis estudadas, (Kuehl, 2000). O objetivo desta pesquisa é conhecer as variáveis experimentais que afetam as respostas, que são a diminuição da carga máxima e a diminuição da resistência residual após o processo de degradação. Uma análise de regressão também foi utilizada para representar os resultados obtidos através da análise experimental. Deseja-se que os resultados alcançados sirvam de base para os pesquisadores que iniciam o estudo do concreto armado com fibras de aço e sua degradação pela ação dos cloretos, desde uma revisão e análise bibliográfica do que de mais relevante foi publicado a respeito deste tema nos últimos anos.

2. PROCEDIMENTO

Como parte do procedimento seguido nesta pesquisa, em primeiro lugar, foram identificadas as variáveis experimentais que foram estudadas ao longo do tempo por meio da realização de ensaios de flexão de SFRCs que foram previamente expostos à degradação por cloretos e cuja variação influencia diretamente nas propriedades mecânicas de carga máxima e resistência residual. Para a análise dos dados obtidos, foi utilizado o projeto experimental Taguchi com a ajuda do Software Minitab (Minitab 17.0), além disso, foi realizada uma análise de regressão onde foi corroborada a influência das variáveis experimentais na variável resposta (ver Figura 1).

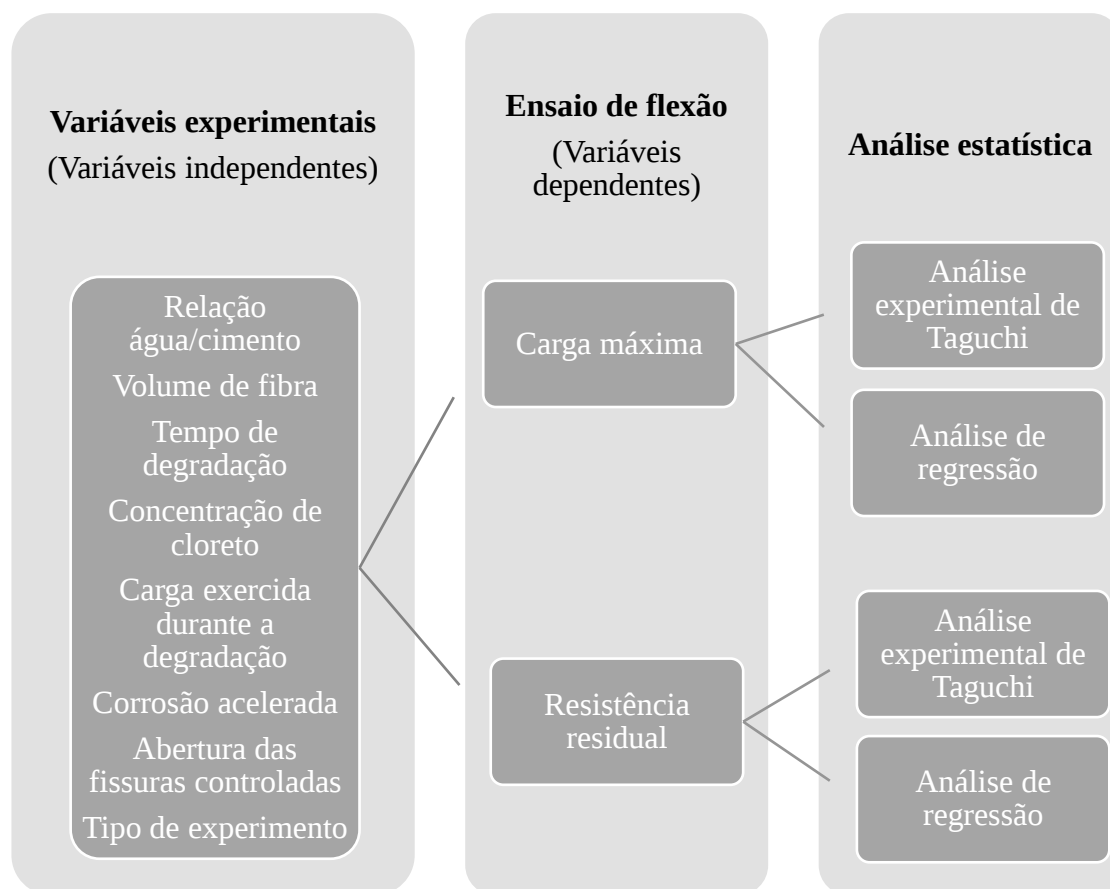


Figura 1. Esquema representativo do procedimento seguido da análise.

Uma das variáveis mais estudadas é a relação água/cimento (a/c). As proporções de água e cimento que são utilizadas na preparação do concreto influenciam significativamente nos processos corrosivos que a estrutura pode sofrer, isso porque quanto maior a quantidade de água, maior será a densidade de microporos que haverá na matriz do concreto, os quais facilitam a entrada de agentes corrosivos como cloretos. Além disso, quanto maior a quantidade de água, maior a umidade na estrutura, que é o eletrólito que facilita a reação de oxidação das fibras de aço. Segundo Balouch et al., (2010), quando há altas relações água/cimento ($a/c = 0,78$), as fibras que estão próximas à superfície do concreto ($< 1 \text{ mm}$), apresentam sinais de corrosão e quanto mais essa proporção for reduzida, menor será a espessura necessária para que não haja corrosão nas fibras.

Outra variável determinante na degradação do SFRC é o volume de fibras (V_f) a ser utilizado no preparo das amostras, diversos autores têm direcionado seus estudos para determinar sua influência nas propriedades mecânicas desses concretos. Por exemplo, em seu estudo, Chen et al., (2021), chegaram à conclusão de que após o processo de degradação com cloreto de sódio, usando um maior teor de fibras, obtém-se como resultado um aumento da resistência dinâmica e, portanto, um aumento da tensão. Além disso, a concentração de cloretos (C) da solução aquosa com a qual o elemento de concreto em estudo se degrada tem influência significativa na corrosão das fibras e, portanto, nas propriedades do concreto estudado. Foi demonstrado que o teor máximo de cloretos em estruturas de concreto convencionais não deve ultrapassar 0,4% a 1,0% em peso de cimento, sendo este valor maior para os SFRCs, chegando a valores admissíveis de até 1,7% (Berrocal et al., 2013).

Por outro lado, em vários estudos de degradação de SFRCs, tem-se optado por fissurar o concreto de forma a obter maiores taxas de corrosão em períodos mais curtos, por isso a abertura das fissuras controladas (A_g) é uma variável considerada nesta pesquisa. Os resultados mostram que as fissuras

permitem o transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas (Berrocal et al., 2015; Blagojevic, 2016), demonstrando que se este exceder um determinado limite de abertura de fissura, eles poderão ser vistos afetam as propriedades do concreto. Pesquisas revelaram que o coeficiente de difusão de cloreto é semelhante em SFRC não fissurado e fissurado com aberturas de fissuras inferiores a 0,2 mm (Hou et al., 2021), o que dá uma certa medida de abertura de fissura para uso em experimentos deste tipo.

Outra variável a ter em conta é o tempo de degradação (T_d) a que é submetida a amostra em estudo. O processo de degradação do concreto armado pode ser dividido em duas etapas fundamentais: iniciação e propagação. A primeira etapa é considerada como o tempo necessário para que os agentes externos entrem nas estruturas de concreto e causem a despassivação do aço. Na segunda etapa, ocorre a propagação da corrosão do aço e começam a ocorrer alterações na estrutura que reduzem sua segurança, o que indica que quanto maior o tempo gasto em condições degradadas, é de se esperar que o dano à estrutura seja maior (Berrocal e outros, 2015). Por outro lado, é importante mencionar que as estruturas de CRFA submetidas a ambientes degradativos e sob cargas de flexão, podem sofrer efeitos em suas propriedades mecânicas, devido à dupla influência da corrosão e da aplicação de uma força externa. Por esta razão, a carga durante a degradação (C_d) é uma variável que tem sido investigada em diversos estudos dedicados a este tema.

Embora a influência das cargas durante o processo de corrosão do concreto reforçado com fibras ainda não esteja totalmente esclarecida, foi demonstrado que a ação de forças em vigas experimentais de CRFAs aumentou a abertura das fissuras controladas formadas, o que pode ocasionar um aumento na taxa de corrosão das fibras (Li et al., 2018). É importante ressaltar que muitos pesquisadores utilizam métodos alternativos para realizar experimentos de degradação em concreto armado com fibras de aço, isso se deve ao fato de que o processo de corrosão das fibras é lento e em alguns casos pode levar anos para que haja efeitos apreciáveis de danos ao concreto de forma natural (Taqi et al. 2021). Portanto, a corrosão acelerada (C_a) surge como uma alternativa experimental apropriada nestes casos, que consiste em fazer uma corrente elétrica fluir nos corpos de prova de SFRC enquanto eles estão sob a ação de cloretos. Esse efeito combinado faz com que o limite de cloretos que deve ser ultrapassado para que ocorra a despassivação do aço diminua e, portanto, a corrosão das fibras ocorra mais rapidamente (Tang e Wilkinson, 2020).

Por último, outra das variáveis experimentais a ter em conta nos estudos de degradação é o tipo de experiência (T_e), uma vez que existem duas formas de realizar estes ensaios. Um consiste na molhagem contínua da peça de concreto com uma solução de cloreto de sódio (NaCl) por um tempo determinado e o outro é baseado em ciclos de umedecimento e secagem, nos quais os corpos de prova de concreto são submersos em soluções de cloreto de sódio depois deixa-se secar por outro período definido, e assim o ciclo é repetido um certo número de vezes. Tem sido demonstrado que este tipo de experimento é a condição ambiental mais desfavorável para estruturas de SFRC submetidas a condições de degradação causadas pela ação de cloretos (Balouch et al., 2010).

Através da revisão bibliográfica realizada, foram obtidos dados experimentais de diferentes trabalhos relacionados com a degradação do concreto armado com fibras de aço (ver Tabela 1). Conforme mencionado, este trabalho enfocou a influência das variáveis experimentais mencionadas na redução da carga máxima e da resistência residual após o processo de degradação em ensaios de flexão. Em geral, os autores se basearam na norma EN 14651:2007 para ensaios de flexão em três pontos (Marcos- Meson et al., 2021), bem como nas normas EN 1015-3:1999, EN 413-2: 2016 e EN 14889-1:2006 para a utilização de superplastificante, o teor de ar e o tipo de fibra a utilizar respetivamente na preparação de corpos de prova de concreto (Marcos-Meson et al., 2020).

Tabela 1. Lista de trabalhos consultados para obtenção dos dados estudados.

Autor	a/c	Vf (%)	Td (dias)	C (%w/w)	Cd (kN)	Ca (uA/cm²)	Ag (mm)	Vcm (%)	Vrr (%)
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	0	0	0	-	28,79
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	54	0	0	-	42,28
Nguyen, 2018	0,54	1,3	812	3,5	89	0	0,14	-	66,62
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	3,5	0	0	0,15	5.45	9,41
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	3,5	0	0	0,3	-22.14	-18,87
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	7	0	0	0,15	-1.92	2,35
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	365	7	0	0	0,3	-32.82	-33,96
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	3,5	0	0	0,15	3.25	-11,30
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	3,5	0	0	0,3	16.01	1,64
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	7	0	0	0,15	-21.75	-7,83
Marcos-Meson, 2021	0,44	1,2	730	7	0	0	0,3	17.20	12,30
Michel, 2013	0,43	0,5	24	3	0	150	0,07	-	26,44
Michel, 2013	0,43	1	24	3	0	150	0,07	-	20,39
Berrocal, 2017	0,47	0,5	27	3,5	0	100	0	1.29	17,98
Berrocal, 2017	0,47	0,5	97	3,5	0	100	0	-23.56	19,10
Bui, 2021	0,5	1	28	3	0	150	0	2.66	29,59
Bui, 2021	0,5	1,5	28	3	0	150	0	1.30	19,39
Bui, 2021	0,5	2	28	3	0	150	0	0.86	16,33
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	28	3,5	0	0	0	-1.90	1,43
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	70	3,5	0	0	0	1.24	-10,00
Doo-Yeol, 2020	0,2	2	140	3,5	0	0	0	3.86	22,86
Bernard, 2019	0,5	1,5	176	3,5	0	0	0,15	15.31	37,50
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	13,6	200	0,06	23.35	1,98
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	20,4	200	0,09	13.55	2,97
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	27,2	200	0,12	30.51	4,95
Hou, 2021	0,47	0,75	72	3,5	34	200	0,14	14.23	5,94

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito de variáveis experimentais na variação da carga máxima

Para determinar o efeito das variáveis experimentais na variação da carga máxima (V_{cm}), foram selecionados os valores de diminuição da carga máxima que mais se repetiram em ensaios de flexão de SFRCs após serem submetidos a processos de degradação por cloretos. Para isso, foi feito um histograma com esses valores, obtendo que o maior número de variações são de -6 a 5% (ver Figura 2), porém, neste trabalho optou-se por não trabalhar com valores negativos, pois isso significa que há um aumento da carga máxima nos concretos estudados após serem expostos a cloretos e o estudo desse comportamento não é objetivo deste artigo. Portanto, foram tomados valores positivos de 0 a 31% e esses dados foram usados.

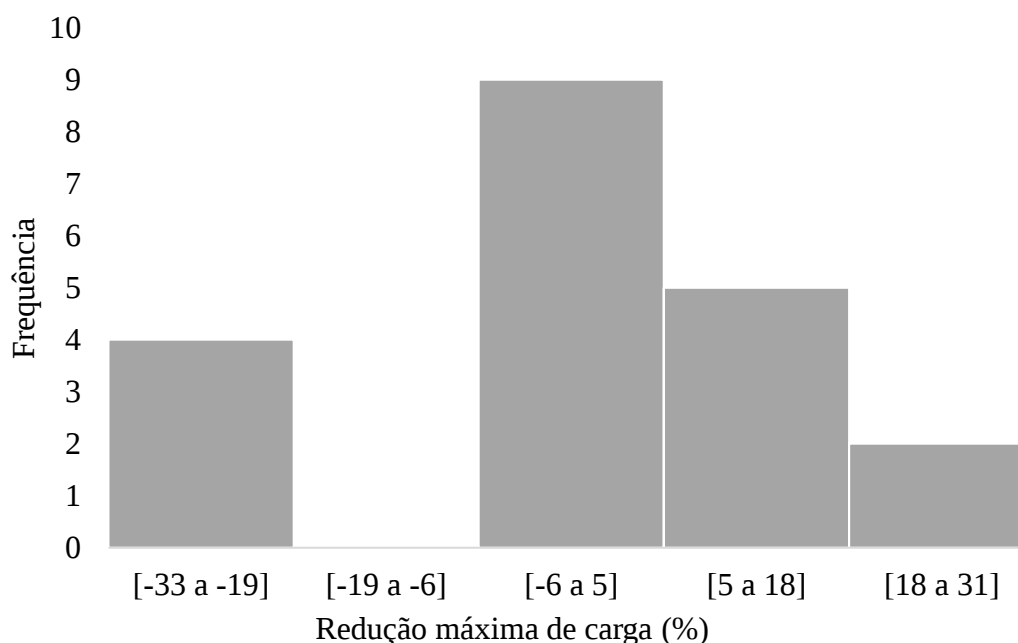


Figura 2. Histograma de variação de carga máxima.

3.1.1. Análise de plotagem de sinal-ruído

Analisando a Figura 3, é possível determinar quais fatores de controle têm maior incidência na variável resposta (a variação da carga máxima), isso é feito observando as linhas em cada variável, quando as linhas são horizontais não há efeito presente e cada nível afeta a resposta da mesma forma, enquanto quando as linhas não são horizontais, se houver um efeito principal e cada nível influencia a resposta de forma diferente, ou seja, quanto maior a distância na posição vertical entre os pontos plotados, maior a magnitude do efeito (Antony et al., 2006). Portanto, é possível afirmar que a abertura das fissuras controladas (A_g) é a variável com maior efeito sobre a capacidade máxima de carga à flexão de corpos de prova de SFRCs degradados por cloretos. Essa variável é seguida pelo volume da fibra (V_f), tempo de degradação (T_d), concentração de cloreto (C) e corrosão acelerada (Ca), em ordem de incidência na variável resposta, que são aquelas com maior separação entre seus níveis. Finalmente, a relação água/cimento (a/c), a carga durante a degradação (C_d) e o tipo de experimento (Te), são os fatores com menor efeito na variação da carga máxima. Porém, como o objetivo deste trabalho é encontrar os valores das variáveis experimentais que provocam uma maior queda na carga máxima, estas podem ser determinadas pelo maior valor de cada fator no gráfico sinal-ruído da Figura 3 (marcada por um círculo vermelho). Portanto, um

projeto experimental recomendado para obter os maiores efeitos experimentais da variação máxima da carga de flexão em corpos de prova de SFRCs é o seguinte: a/c (0,47), Vf (0,75%), Td (72 dias), C (7%), Cd (27,2 kN), Ca (200 uA /cm²), Ag (0,12) e Te (úmido-seco).

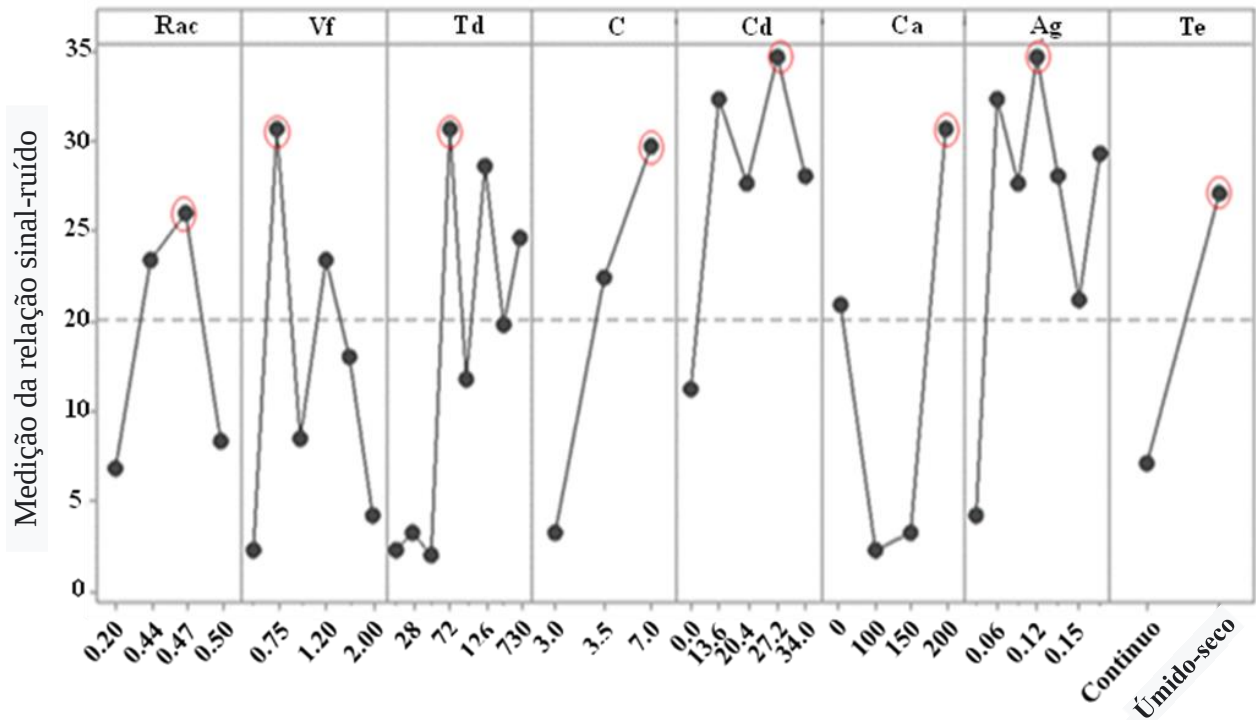


Figura 3. Gráfico de efeitos principais para relações sinal-ruído para experimentos de carga máxima.

3.1.2. Análise de regressão

Analisando a Tabela 2, que é o resultado da análise de variância para as variáveis estudadas, pode-se constatar que, para nenhuma das variáveis estudadas, o valor de p é inferior a 0,05, o que significa que estas não têm impacto estatístico sobre os resultados da variação da carga máxima em flexão. Na verdade, a variável com maior impacto estatístico na figura anterior, que foi a abertura das fissuras controladas, teve um Valor p de 0,081 nesta análise. Isso mostra que a análise de variância não é uma ferramenta útil neste caso para determinar a influência das variáveis explicativas sobre a variável resposta.

Tabela 2. Análise de variância das variáveis estudadas para variação da carga máxima.

Variáveis	Valor-p
Relação água/cimento	0,544
Porcentagem de fibra	0,841
Tempo de degradação	0,305
Concentração de NaCl	0,963
Carga durante a degradação	0,812
Corrosão acelerada	0,557
Abertura da fissura	0,081
Tipo do experimento	0,677

Analisando as equações de regressão para a variável qualitativa, que neste estudo é do tipo experimento, é possível determinar quais são as variáveis experimentais que possuem poder explicativo sobre a variável resposta (ver equações 1 e 2). Isso pode ser determinado pelas variáveis que possuem coeficiente positivo, que neste caso são a abertura da fissura controlada, a concentração de NaCl e a corrosão acelerada. Essas equações foram obtidas com os dados usados neste estudo usando o Minitab.

Equação de regressão para o tipo de variável experimental contínua:

$$V_{cm} = 13.0 - 28.4 R_{ac} - 1.35 V_f - 0.027 T_d + 0.14C - 0.126 C_d + 0.045 C_a + 112.0 A_g \quad (1)$$

Equação de regressão para o tipo úmido-seco da variável experimental:

$$V_{cm} = 17.6 - 28.4 R_{ac} - 1.35 V_f - 0.027 T_d + 0.14C - 0.126 C_d + 0.045 C_a + 112.0 A_g \quad (2)$$

Considerando assim os estudos realizados até agora, para determinar a influência das variáveis experimentais na variação da carga máxima, que foram o gráfico de efeitos principais para relações sinal-ruído, a análise de variância e as equações de regressão, é possível concluir que a abertura de fissuras controladas é a variável experimental que tem maior efeito sobre a carga máxima em concreto armado com fibras de aço que sofrem degradação por cloretos, embora não existam trabalhos dedicados especificamente ao estudo da influência desta variável na carga máxima.

Em pesquisas como a de Hou et al., (2021) são mostrados resultados contraditórios, pois ao usar $A_g = 0,06$ mm a diminuição da carga máxima é de 23,35%, enquanto para aberturas de fissura de 0,09 mm é de 13,55% e para valores de 0,12 mm a variação é de 30,51%, o que mostra que a variação desta propriedade não depende apenas desta variável. Por outro lado, outra das variáveis com influência na variação da carga máxima conforme os resultados aqui obtidos é a concentração de cloretos, embora esta informação ainda não tenha sido confirmada por falta de informação bibliográfica, em estudos como a de Marcos-Meson et al. (2021) mostra como essa variável influencia negativamente as propriedades dos SFRCs estudados.

3.2. Efeito de variáveis experimentais na variação da resistência residual

Para analisar os dados de variação da resistência residual (V_{rr}) obtidos, foi feito de forma semelhante aos dados de carga máxima de flexão. Foi feito um histograma da variação da resistência residual, onde conforme observado na Figura 4, a maior frequência de variações é de 0 a 17% e de 17 a 34%, portanto esses são os dados que foram tomados. Observa-se também que existem valores abaixo de zero, que não foram utilizados pelos motivos citados, assim como dados superiores a 34%, visto que esses tipos de resultados são raros.

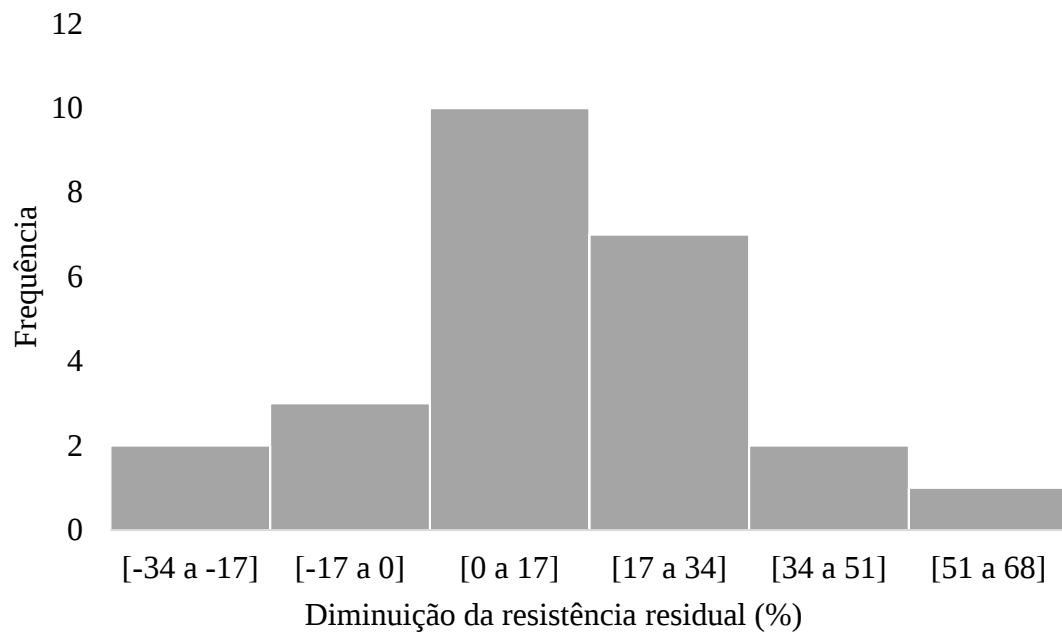


Figura 4. Histograma de variação da resistência residual.

3.2.1. Análise do Gráfico de sinal-ruído

Analisando a Figura 5, é possível determinar que os fatores de controle que reduzem a variabilidade são, em primeiro lugar, a carga de flexão durante a degradação, pois é aquela que apresenta maior tendência vertical no gráfico sinal-ruído.

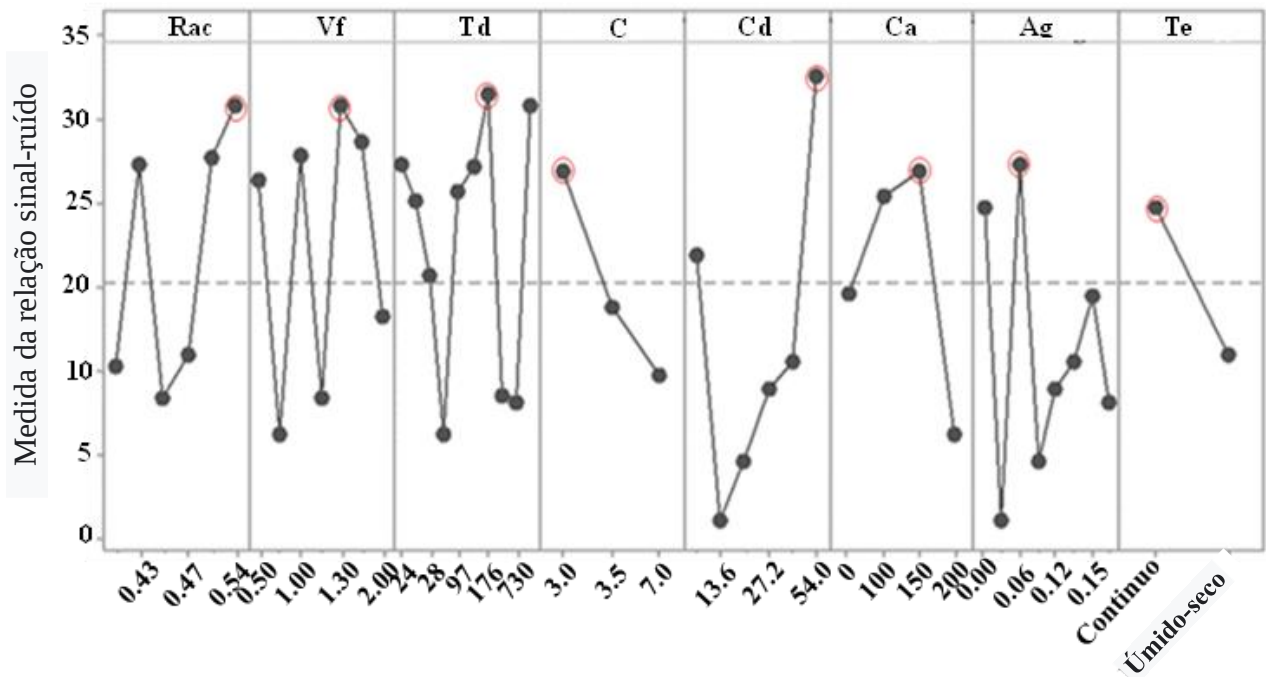


Figura 5. Gráfico de efeitos principais para relações sinal-ruído para experimentos de resistência residual.

Segue-se a relação água/cimento, o volume de fibras, o tempo de degradação e a abertura das fissuras controladas, sendo recomendados em cada caso os seguintes níveis para obter maiores

efeitos na redução da resistência residual: Cd (54 kN) , a/c (0,54), Vf (1,3%), Td (176 dias) e Ag (0,07 mm), respectivamente. Esses valores são obtidos tomando o valor do nível mais alto em cada fator da Figura 5, marcado com um círculo vermelho. Por outro lado, as outras variáveis estão mais próximas da média e têm menos efeito na relação sinal-ruído, porém, para realizar um planejamento experimental a fim de obter também os maiores níveis de variação da resistência residual. em conta. Portanto, no caso de concentração de cloreto, corrosão acelerada e tipo de experimento, os valores recomendados são 3%, 150 uA /cm² e experimento contínuo respectivamente.

3.2.2. Análise de regressão

Foi também realizada uma análise de regressão onde se estudou a análise de variância (Tabela 3), obtendo-se que o valor de p era inferior a 0,05 nas variáveis: carga durante a degradação (0,000) e tipo de experimento (0,002), o que significa que estas variáveis têm maior influência na variação da resistência residual à flexão do que as demais. O referido resultado não é totalmente coincidente com os obtidos no gráfico Sinal/Ruído, pois na referida figura a variável tipo de experimento pouco influencia na variável resposta, sendo este um elemento a ser analisado em estudos futuros.

Tabela 3. Análise de variância das variáveis estudadas para variação da resistência residual.

Variáveis	Valor-p
Relação água/cimento	0,401
Porcentagem de fibra	0,452
Tempo de degradação	0,196
Concentração de NaCl	0,085
Carga durante a degradação	0,000
Corrosão acelerada	0,907
Abertura da fissura	0,081
Tipo de experimento	0,002

Por outro lado, analisando os coeficientes de cada fator nas equações de regressão (ver equações 3 e 4), é possível determinar as variáveis com maior influência na resposta: a carga durante a degradação, a relação água/cimento e o tempo de degradação, o que coincide com os resultados obtidos na Figura 5 e em parte com a tabela 3.

Equação de regressão para o tipo variável de experimento contínuo

$$V_{rr} = 19.5 + 23.4 R_{ac} - 4.93 V_f + 0.019 T_d - 2.81C + 0.555 C_d - 0.006 C_a - 46.8 A_g \quad (3)$$

Equação de regressão para o tipo úmido-seco da variável experimental

$$V_{rr} = 3.1 + 23.4 R_{ac} - 4.93 V_f + 0.019 T_d - 2.81C + 0.555 C_d - 0.006 C_a - 46.8 A_g \quad (4)$$

É possível concluir então que, nos estudos de degradação de SFRCs pela ação de cloretos, a variável experimental que tem maior incidência na variação da resistência residual é a carga a que os corpos de prova de concreto são submetidos durante a degradação. Resultados semelhantes foram encontrados por Nguyen et al. (2018), que obtiveram uma diminuição na capacidade de carga do concreto estudado, uma vez fissurado por terem sido submetidos a uma carga mantida enquanto expostos a cloretos, constataram que as fibras de aço sofriam corrosão quando a carga aplicada era superior a 50% da carga de escoamento. Da mesma forma, Hou et al. 2021 constatou que ao aumentar os níveis de carga mantida ao concreto e sob condições severas de corrosão, a capacidade

de carga destes foi afetada. Da mesma forma, a relação água/cimento tem influência marcante na variação da resistência residual, conforme os resultados aqui encontrados, embora não existam atualmente na literatura estudos dedicados a comparar como essa variável influencia nessa propriedade. Por fim, como foi visto, o tempo de degradação também influencia nessa característica, sendo esse resultado contraditório ao obtido por Marcos-Meson et al., 2021, pois obtiveram poucas alterações no desempenho mecânico dos SFRCs degradados por cloretos e dióxido de carbono por 1 e 2 anos. Isso significa que os resultados obtidos neste tipo de estudo permanecem contraditórios e pesquisas futuras são necessárias.

4. CONCLUSÕES

Através da análise dos estudos realizados sobre a degradação do concreto reforçado com fibras de aço pela ação dos cloretos, e tendo em conta as principais variáveis experimentais que afetam as propriedades de resistência residual e carga máxima dos referidos concreto, é possível chegar nas seguintes conclusões:

1. Os resultados encontrados na bibliografia mostram que os processos de degradação por cloretos não só afetam negativamente as propriedades mecânicas do SFRC, mas que, em alguns casos, essas propriedades podem ter uma melhora após a degradação, isso é atribuído a um aumento da ligação resistência entre o concreto e a fibra devido ao aumento da rugosidade da superfície devido à corrosão.
2. Fazendo uma análise dos resultados obtidos para os experimentos onde foi avaliada a variação da carga máxima de flexão, verifica-se que a variável cuja variação mais afeta esta propriedade é a abertura das fissuras controladas, sendo o valor de 0,12 mm o mais afeta a variável de resposta, da mesma forma, ordenando as variáveis de acordo com sua influência na variação da carga máxima suportada pelo SFRC e para obter os maiores valores de perda desta propriedade seria o seguinte: Ag (0,12 mm), Vf (0,75%), Td (72 dias), C (7%), Ca (200 uA /cm²), tipo de experimento (úmido-seco) e a/c (0,47).
3. No caso da resistência residual à flexão, a variável experimental que tem maior efeito sobre esta propriedade é a carga aplicada durante a degradação, verificando-se que sua influência é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a carga, é de se esperar que a resistência residual após o processo de degradação é mais afetada, da mesma forma foi obtida uma ordem de variáveis quanto à influência na resistência residual, pelo que é possível recomendar os seguintes valores de cada variável a utilizar para obter as maiores diminuições nesta propriedade em experimentos de degradação: Cd (54 kN), a/c (0,54), Vf (1,3%), Td (176 dias), Ag (0,07 mm), C (3%), Ca (150 uA /cm²) e tipo de experimento (contínuo). Essas variáveis foram ordenadas da mais influente para a menos influente.
4. Devido aos resultados obtidos, recomenda-se continuar com o estudo da influência de variáveis experimentais com outras propriedades do concreto armado com fibras de aço, como durabilidade, tenacidade e ductilidade, bem como a influência de outras variáveis como o material das fibras, o tamanho e a forma dos corpos de prova de concreto e o tipo de matéria-prima utilizada para sua confecção.

5. REFERÊNCIAS

Abbas, S., Soliman, A. M., Nehdi, M. L. (2014), *Mechanical Performance of reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Lining Segments: A Case Study*, *Aci Materials Journal*, 501-510.

Antony, F., Perry, D., Wang, C., Kumar, M. (2006), *An application of Taguchi method of*

- experimental design for new product design and development process*, Operations and Quality Management Unit, Caledonian Business School, Glasgow Caledonian University, Glasgow, UK, <http://dx.doi.org/10.1108/01445150610645611>.
- Balouch, S. U., Forth, J. P., Granju, J. L. (2010), *Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, 40, 410–414, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.001>.
- Behbahani, H., Nematollahi, B. (2011), *Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review*, ICSECM, Kandy-SriLanka.
- Bernard, E. S. (2019), *Durability of fibre-reinforced shotcrete*, TSE P/L, Penrith, Australia, <http://dx.doi.org/10.1201/9780203023389.ch6>.
- Berrocal, C. G., Fernandez, I., Lundgren, K., Löfgren, I. (2017), *Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC*, Composites Part B, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.020>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I. (2015), *Corrosion of Steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art*, Cement and Concrete Research, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.006>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I. (2013), *Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: a review*, Fibre concrete, Prague, Czech Republic.
- Blagojevic, A. (2016), *The Influence of Cracks on the Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures in relation to Chloride-Induced Corrosion: A Look from a Different Perspective*, Doctoral Thesis, Delft University of Technology: Delft, The Netherlands.
- Bui, L. V. H., Jongvivatsakul, P., Limpaninlach, P., Stitmannathum, B., Nguyen, T. T., Nguyen, T. P. (2021), *Simulation of shear behavior of corroded reinforced concrete beams flexurally repaired with steel fiber-reinforced concrete*, Structures, 34, 1545–1559. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.087>.
- Carrillo, J., Cárdenas, Pulido, J., Aperador, W. (2017), *Propiedades mecánicas a flexión del concreto reforzado con fibras de acero bajo ambientes corrosivos*, Revista Ingeniería de Construcción, 32, 59-72.
- Chen, H., Zhou, X., Li, Q., He, R., Huang, X. (2021), *Dynamic Compressive Strength Tests of Corroded SFRC Exposed to Drying–Wetting Cycles with a 37 mm Diameter SHPB*, Materials, 14, 2267, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14092267>.
- Doo-Yeol, Y., Shin, W., Chun, B., Banthia, N. (2021), *Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance*, Cement and Concrete Research, 133, 106091, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>.
- Ferreira, M. P., Oliveira, M. H., Lima, Neto A. F., Tapajós, L. S., Nascimento, A. J. C., Freire, M. C. (2018), *Influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con mantas de PRFC*, Revista ALCONPAT, 9 (1), 30 – 47, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>.
- Granju, J. L., Balouch, S. U. (2005), *Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks*, Cement and Concrete Research, 572– 577, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>.
- Horszczaruk, E. K. (2009), *Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete*, Wear, 267, 110–115, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.010>.
- Hou, L., Peng, Y., Xu, R., Zhang, X., Huang, T., Chen, D. (2021), *Corrosion behavior and flexural performance of reinforced SFRC beams under sustained loading and chloride attack*, 242, 112553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112553>.
- Juárez-Alvarado, C. A., González López, J. R., Mendoza-Rangel, J. M., Zaldivar Cadena, A. A. (2017), *Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico*, Revista ALCONPAT, 7 (2), 135-147, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.189>.

- Kaur, G., Pal Singh, S. (2012), *Flexural performance of fibrous concrete with cement additions*, Construction Materials, 167, 14-25, <http://dx.doi.org/10.1680/coma.12.00008>.
- Kuehl, R. O. (2000), *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, Arizona.
- Li, H., Li B., Jin, R., Li, S., Yu, J. G. (2018), *Effects of sustained loading and corrosion on the performance of reinforced concrete beams*, Construction and Building Materials, 169, 179–187.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., Michel, A. (2019), *Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review*, Construction and Building Materials, 200, 490–501, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051>.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Solgaard, A., Edvardsen, C., Michel, A. (2021), *Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet–Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide*, Materials, 14, 2642, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14102642>.
- Marcos-Meson, V., Geiker, M., Fischer, G., Solgaard, A., Jakobsen, U. H., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., Michel, A., Danner, T. (2020), *Durability of cracked SFRC exposed to wet-dry cycles of chlorides and carbon dioxide – Multiscale deterioration phenomena*, Cement and Concrete Research, 135, 106120, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106120>.
- Meza, A., Shaikh, F. U. A. (2020), *Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement*, Constr. Build. Mater, 265, 120331, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>.
- Meza, A., Pujadas, P., Meza, L. M., Pardo-Bosch, F., López-Carreño, R. D. (2021), *Mechanical Optimization of Concrete with Recycled PET Fibres Based on a Statistical-Experimental Study*, Materials, 14-240, <http://dx.doi.org/10.3390/ma14020240>.
- Meza, A., Siddique, S. (2019), *Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber*, Construction and Building Materials, 213, 286–291, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>.
- Michel, A., Solgaard, A. O. S., Pease, B. J., Geiker, M. R., Stang, H., Olesen, J. F. (2013), *Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete*, Corrosion Science, 77, 308–321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.019>.
- Nguyen, W., Duncan, J. F., Jen, G., Ostertag, C. P. (2018), *Influence of matrix cracking and hybrid fiber reinforcement on the corrosion initiation and propagation behaviors of reinforced concrete*, Corrosion Science, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.004>.
- Paul, S. C., Van Zijl, G. P., Branko Šavija, B. (2020), *Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review*, Materials, 13, 4562, <http://dx.doi.org/10.3390/ma13204562www>.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015), *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*, Tecnología en Marcha, 28, 127-136.
- Simões, Y. S., Santo, C. F. R. (2019), *Contribución de las vigas de concreto armado degradadas por la acción del fuego: Análisis comparativo entre el refuerzo estructural con fibras de carbono y láminas metálicas*, Revista ALCONPAT, 9 (1), 48 – 64, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.259>.
- Tang, K., Wilkinson, S. (2020), *Corrosion resistance of electrified railway tunnels made of steel fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials, 230, 117006, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117006>.
- Taqi, F. Y., Mashrei, M. A., Oleiwi, H. M. (2021), *Experimental study on the effect of corrosion on shear strength of fibre-reinforced concrete beams*, Structures, 33, 2317-2333, <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.006>.
- Zhang, P., Kang, L., Wang, J., Guo, J., Hu, S., Ling, Y. (2020), *Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature—A Review*, Applied Sciences, 10, 2324, <http://dx.doi.org/10.3390/app10072324>.