

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

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

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

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

Recibido: 04/10/2022 | Correcciones recibidas: 15/04/2023 | Aceptado: 23/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

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.

Citar como: Becerra, O., Meza, A., Salinas, R. (2023), “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”, 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.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Osler Becerra Pérez contribuyó con la búsqueda y recopilación de información, con el análisis estadístico de dicha información en alrededor de un 50%, la discusión de los resultados en un 40% y la elaboración del borrador del artículo. El autor Alejandro Meza de Luna contribuyó con la dirección y gestión de la investigación, la discusión de los resultados en un 40%, revisión y ajustes del artículo en un 80%, y las funciones de autor de correspondencia. El autor Rogelio Salinas contribuyó con el análisis estadístico de toda la información encontrada en un 50%, la discusión de los resultados en un 20%, y la revisión y ajustes del artículo en un 20%.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 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.

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

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.

Nomenclatura:

Vrr: Variación de la resistencia residual (%)

Vcm: Variación de la carga máxima (%)

Rac: Relación agua/cemento

Vf: Volumen de fibra (%)

Td: Tiempo de degradación (días)

C: Concentración de cloruros (% w/w)

Cd: Carga ejercida durante la degradación (kN)

Ca: Corrosión acelerada (uA/cm²)

Ag: Ancho de fisuras controladas (mm)

Te: Tipo de experimento

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado mundialmente, esto se debe fundamentalmente a la disponibilidad de los materiales que lo constituyen (Chen y col., 2021). El concreto tiene propiedades que lo han convertido en el material de construcción por excelencia, ya que posee una elevada resistencia a la compresión, pudiendo pasar décadas sin requerir de prácticamente ningún mantenimiento o sustitución (Paul y col., 2020). A pesar de estas cualidades, el concreto presenta una relativamente baja resistencia a la flexión debido a los esfuerzos de tensión que se presentan, por lo que se ha hecho necesario la utilización de materiales de refuerzo en la preparación de concretos, que permitan mejorar sus características (Chen y col., 2021). Desde el siglo XIX hasta la actualidad, se ha empleado acero en forma de barras para reforzar las estructuras de concreto. Aunque las barras de refuerzo siguen siendo las más utilizadas para este fin, el uso de fibras ha tenido un auge significativo en las últimas décadas, generando lo que se conoce como concreto reforzado con fibras de acero, (SFRC, por sus siglas en inglés), las fibras mejoran las propiedades a tensión del concreto, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto, la tenacidad y ayudan a controlar el agrietamiento del mismo (Behbahani y Nematollahi, 2011; Kaur y col., (2012), Ferreira y col., 2018; Zhang y col., 2020). El SFRC es utilizado, por ejemplo, en el revestimiento de túneles, construcción de carreteras, y construcciones propensas a sufrir daños por terremotos (Berrocal, 2015; Marcos-Meson y col., 2019; Zhang y col., 2020). Además, el SFRC es aplicado en infraestructuras donde existen ambientes agresivos como, pisos industriales, construcciones para almacenar residuos nucleares, estructuras hidráulicas y marinas, como muelles, plataformas petrolíferas y gasoductos (Doo-Yeol y col., 2021, Hou y col., 2021). Entre los materiales más comúnmente utilizados para este fin se encuentra el acero, materiales poliméricos y fibras de carbono, aunque también se ha reportado el uso de vidrio, coco, yute y amianto (Meza y Siddique, 2019; Paul y col., 2020; Meza y Shaikh, 2020; Meza y col., 2021), así como fibra vegetal de agave (Juárez-Alvarado y col., 2017). Las fibras de acero son el material que más se ha empleado y estudiado como refuerzo del concreto (Horszczaruk, 2009; Hou y col., 2021). Como se ha visto anteriormente los SFRCs son utilizados en infraestructuras sometidas a ambientes agresivos, por ello, la comunidad científica se ha encargado de investigar los diferentes procesos degradativos a los que pueden estar sometidas las estructuras fabricadas con SFRC. Diversas investigaciones indican que la corrosión es el principal mecanismo de degradación de las estructuras de concreto reforzado (Paul y col., 2020; Berrocal y col., 2015; Berrocal y col., 2017). La corrosión causa la disminución de la sección transversal del refuerzo de acero (Berrocal, 2015), lo que influye negativamente en las características mecánicas del concreto reforzado con barras de acero y el SFRC, aunado a esto, es importante decir que el proceso de corrosión afecta no solo a al refuerzo, sino también al concreto que las rodea, esto se debe a que se forman productos de corrosión, los cuales se acumulan en la interfase acero-concreto y al aumentar el volumen se originan presiones internas que causan el agrietamiento del concreto, proceso conocido como spalling (Simões y Santo, 2019), que a su vez aumenta la tasa de corrosión y con ello provoca cambios en las propiedades mecánicas del mismo, entre ellas, la carga máxima y la resistencia residual (Berrocal y col., 2017; Paul y col., 2020). Según Abbas y col., (2014), la penetración de cloruros en paredes de túneles provoca la corrosión del refuerzo disminuyendo así su capacidad de carga. También, otros investigadores como Granju y Balouch, (2005) y Carrillo y col., (2017), afirman que los ambientes corrosivos pueden afectar el desempeño a flexión del SFRC si las fibras de acero son corroídas, ya que éstos provocan reducciones en el pico máximo de carga, acompañado de un comportamiento post-pico frágil y quebradizo. Además, estudios como el de Hou y col., (2021) indican que la disminución de la resistencia residual en SFRCs tiene un estrecho vínculo con la pérdida de masa del refuerzo, la corrosión por picaduras, el deterioro de la adherencia entre el refuerzo-concreto-tasa de corrosión.

Por otra parte, son varios los factores que influyen en el proceso de corrosión, ya que este depende tanto de las características del metal corroído como del medio circundante en que el mismo se encuentra. Uno de estos factores es la presencia de agentes externos como las sales que contienen el ion cloruro, por ejemplo, el cloruro de aluminio, el cloruro de hierro, cloruro de amonio y el cloruro de sodio. Estas sales al entrar en el concreto disminuyen su pH y aceleran el proceso de corrosión del refuerzo de acero (Salazar-Jiménez, 2015). Específicamente, la degradación por cloruros, provoca el llamado efecto de corrosión por picadura, esto ocurre cuando se acumulan suficientes cloruros en la superficie de refuerzo favoreciendo así el proceso corrosivo en una zona específica del material (Berrocal y col., 2015).

La degradación de concretos reforzados con fibra por la acción de cloruros ha sido ampliamente estudiada, esto debido a la exposición de infraestructuras a ambientes agresivos con elevadas concentraciones de este anión (Berrocal y col., 2015). Es por ello que se han llevado a cabo investigaciones enfocadas tanto el efecto de la degradación en las fibras, en el concreto, como en el conjunto fibra-concreto, obteniendo que tanto varían las propiedades mecánicas de los mismos, luego de ser sometidos a procesos degradativos por cloruros. Disímiles tipos de fibras y concretos bajo diferentes condiciones experimentales han sido puestos a prueba, esto ha dado lugar a que los resultados obtenidos en dichas investigaciones sean muy variados y no siempre se correlacionen unos con otros, por lo que todavía no queda totalmente claro cuáles son las variables experimentales que más afectan las características mecánicas de los concretos y en qué medida lo hacen, lo que podría solucionarse mediante la realización de análisis comparativos e investigación.

Por las razones anteriormente mencionadas, en este estudio se hace una recopilación de datos experimentales obtenidos en condiciones de laboratorio, relacionadas con la degradación de SFRC bajo la acción de cloruros. Los datos provenientes de diferentes investigaciones se sometieron a un análisis estadístico donde se identifican las variables experimentales que más influyen en la corrosión de las fibras, en el deterioro en general de los concretos y en qué medida afectan sus propiedades al ser sometidos a esfuerzos por flexión. Para ello, se realizó el análisis de datos experimentales obtenidos de la bibliografía mediante el diseño experimental robusto de Taguchi, el cual es un método de análisis que está enfocado en maximizar una razón señal ruido (S/R) específica para cada una de las variables estudiadas, (Kuehl, 2000). El objetivo de la presente investigación es conocer las variables experimentales que afectan a las respuestas, las cuales son la disminución de la carga máxima y disminución de la resistencia residual luego del proceso de degradación. También se empleó un análisis de regresión que represente los resultados obtenidos mediante el análisis experimental. Se desea que los resultados alcanzados sirvan como base para los investigadores que comienzan en el estudio de los concretos reforzados con fibras de acero y su degradación por la acción de cloruros, pues se hace una revisión y análisis bibliográfico de lo más relevante publicado respecto a este tema en los últimos años.

2. PROCEDIMIENTO

Como parte del procedimiento seguido en esta investigación, primeramente, se identificaron las variables experimentales que se han estudiado a lo largo del tiempo al realizar ensayos a flexión de SFRCs que, han sido previamente expuestos a degradación por cloruros y cuya variación influye de manera directa en las propiedades mecánicas de carga máxima y resistencia residual. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el diseño experimental de Taguchi mediante la ayuda del Software Minitab (Minitab 17.0), además se hizo un análisis de regresión donde se corroboró la influencia de las variables experimentales en la variable de respuesta (ver Figura 1).

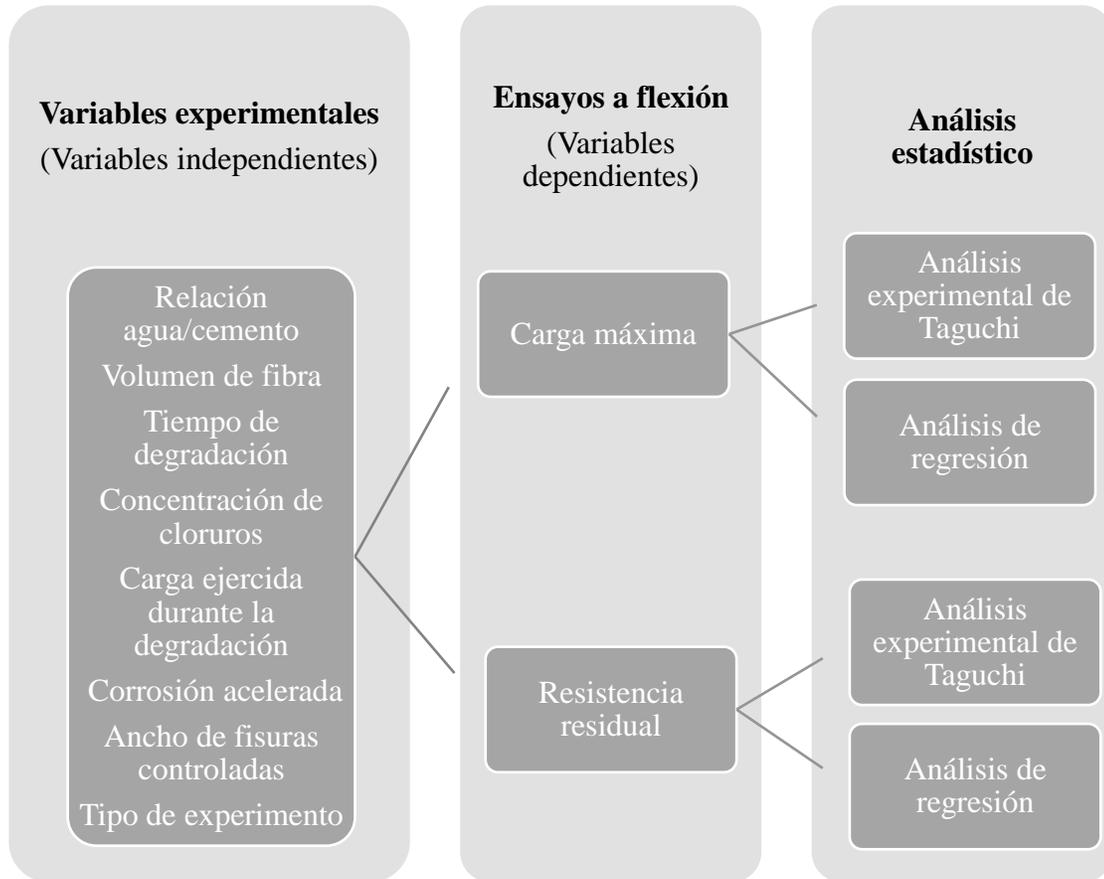


Figura 1. Esquema representativo del procedimiento seguido en la investigación.

Una de las variables más estudiadas es la relación agua/cemento (R_{ac}). Las proporciones de agua y cemento que se utilizan al preparar el concreto influyen de manera significativa en los procesos corrosivos que puede sufrir la estructura, esto se debe a que entre mayor es la cantidad de agua, mayor densidad de microporos habrá en la matriz del concreto, los cuales facilitan la entrada de agentes corrosivos como lo son los cloruros. Además, mientras mayor sea la cantidad de agua, mayor será la humedad en la estructura, la cual es el electrolito que facilita la reacción de oxidación de las fibras de acero. Según Balouch y col., (2010), al existir relaciones agua/cemento (R_{ac}) elevadas ($R_{ac} = 0.78$), las fibras que se encuentran cerca de la superficie del concreto ($< 1 \text{ mm}$), presentan signos de corrosión y mientras más se redujo esta proporción, menor fue el espesor necesario para que no hubiera corrosión en las fibras. Otra variable determinante en la degradación de los SFRC es el volumen de fibras (V_f) a utilizar en la preparación de las muestras, varios autores han encaminado sus estudios en determinar su influencia en las propiedades mecánicas de estos concretos. Por ejemplo, en su estudio, Chen y col., (2021), llegan a la conclusión que luego del proceso de degradación con cloruro de sodio, al utilizar un contenido de fibra mayor, se obtiene como resultado un incremento en la resistencia dinámica y por ende un incremento en la deformación. También, la concentración de cloruros (C) de la solución acuosa con que se degrada la pieza de concreto en estudio tiene una influencia significativa en la corrosión de las fibras y por tanto en las propiedades de los concretos estudiados. Se ha demostrado que el contenido máximo de cloruro en estructuras de concreto convencionales no debería superar del 0.4 al 1.0% por peso de cemento, siendo esta cifra mayor para los SFRCs, llegando a valores permisibles hasta del 1.7% (Berrocal y col., 2013). Por otra parte, en varios estudios de degradación de SFRCs se ha optado por agrietar los concretos con el fin de obtener mayores índices de corrosión en menores períodos de tiempo, es por ello que el ancho de fisuras controladas (A_g) es una variable a tener en cuenta en esta investigación, los resultados muestran que las grietas permiten el transporte de agentes

agresivos al interior de las estructuras (Berrocal y col., 2015; Blagojevic, 2016), demostrando que si este supera cierto umbral de ancho de fisuras, podrían verse afectadas las propiedades de los concretos. Investigaciones han revelado que el coeficiente de difusión de cloruro es similar en SFRC no fisurados y en fisurados con anchos de grietas inferior a 0.2 mm (Hou y col., 2021), lo que da una cierta medida del ancho de fisuras a utilizar en experimentos de este tipo. Otra variable a tener en cuenta es el tiempo de degradación (Td) al que se someta la muestra estudiada. El proceso de degradación de los concretos reforzados puede dividirse en dos etapas fundamentales: iniciación y propagación. La primera etapa es considerada como el tiempo necesario que requieren los agentes externos para ingresar en las estructuras de concreto y causar la depasivación del acero. En la segunda etapa ocurre la propagación de la corrosión del acero y comienzan a ocurrir cambios en la estructura que reducen la seguridad de la misma, lo que indica que mientras mayor sea el tiempo transcurrido en condiciones de degradación es de esperar que el daño en la estructura sea mayor (Berrocal y col., 2015). Por otra parte, es importante mencionar que las estructuras de SFRC sometidas a ambientes degradativos y bajo cargas por flexión, podrían sufrir afectaciones de sus propiedades mecánicas, esto debido a la doble influencia de la corrosión y la aplicación de una fuerza externa. Por tal motivo la carga durante la degradación (Cd) es una variable que ha sido investigada en variedad de estudios dedicados a este tema. Aunque aún no está completamente claro la influencia de cargas durante el proceso de corrosión de concretos reforzados con fibra, se ha demostrado que la acción fuerzas a vigas experimentales de SFRCs, han aumentado el ancho de fisuras controladas formadas, lo que podría provocar un aumento en la velocidad de corrosión de las fibras (Li y col., 2018). Es importante señalar que muchos investigadores utilizan métodos alternativos para realizar experimentos de degradación en concretos reforzados con fibras de acero, esto se debe a que el proceso de corrosión de las fibras es lento y en algunos casos podrían pasar años para que existan efectos apreciables de daños en los concretos de forma natural (Taqi y col. 2021). Por tanto, la corrosión acelerada (Ca) surge como una alternativa experimental adecuada en estos casos, esta consiste en hacer fluir una corriente eléctrica en los especímenes de SFRC a la vez que se encuentran bajo la acción de cloruros. Este efecto combinado provoca que el umbral de cloruro que es necesario superar para que ocurra la depasivación del acero, disminuya y por lo tanto ocurra la corrosión de las fibras con mayor rapidez (Tang y Wilkinson, 2020). Por último, otra de las variables experimentales a tener en cuenta en estudios de degradación es el tipo de experimento (Te), ya que existen dos formas de realizar estas pruebas. Una consiste en el mojado continuo de la pieza de concreto con una solución de cloruro de sodio (NaCl) durante un tiempo determinado y la otra se basa en ciclos de mojado y secado, en los cuales, los especímenes de concreto son sumergidos en soluciones de NaCl durante un determinado tiempo y luego dejados secar durante otro lapso de tiempo definido, y así se repite el ciclo una cierta cantidad de veces. Se ha demostrado que este tipo de experimento resulta la condición ambiental más desfavorable para las estructuras de SFRC sometidas a condiciones de degradación provocadas por la acción de cloruros (Balouch y col., 2010).

Por la revisión bibliográfica realizada, se obtuvieron datos experimentales de diferentes trabajos relacionados con la degradación de concretos reforzados con fibras de acero (ver Tabla 1). Como se ha mencionado, este trabajo se enfocó en la influencia de las variables experimentales anteriormente mencionadas en la reducción de la carga máxima y la resistencia residual luego del proceso de degradación en pruebas de flexión. De manera general, los autores se basaron en la norma EN 14651: 2007 para los ensayos de flexión de tres puntos (Marcos-Meson y col., 2021), así como en las normas EN 1015-3:1999, EN 413-2: 2016 y EN 14889-1: 2006 para el uso de superplastificante, el contenido de aire y el tipo de fibra a utilizar respectivamente en la elaboración de los especímenes de concreto (Marcos-Meson y col., 2020).

Tabla1. Relación de trabajos consultados para obtener los datos estudiados.

Autor	Rac	Vf (%)	Td (días)	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 Y DISCUSIÓN

3.1. Efecto de variables experimentales sobre la variación de la carga máxima

Para determinar el efecto de las variables experimentales sobre la variación de la carga máxima (V_{cm}), se seleccionaron los valores de disminución de carga máxima que más se repitieron en ensayos por flexión de SFRCs luego de ser sometidos a procesos degradativos por cloruros. Para ello, se realizó un histograma con estos valores, obteniéndose que el mayor número de variaciones se encuentran de -6 a 5% (ver Figura 2), no obstante, en este trabajo se decidió no trabajar con los valores negativos, pues esto significa que existe un aumento de la carga máxima en los concretos estudiados luego de ser expuestos a cloruros y no es objetivo de la presente investigación el estudio de este comportamiento. Por lo tanto, se tomaron los valores positivos de 0 a 31% y con estos datos se trabajó.

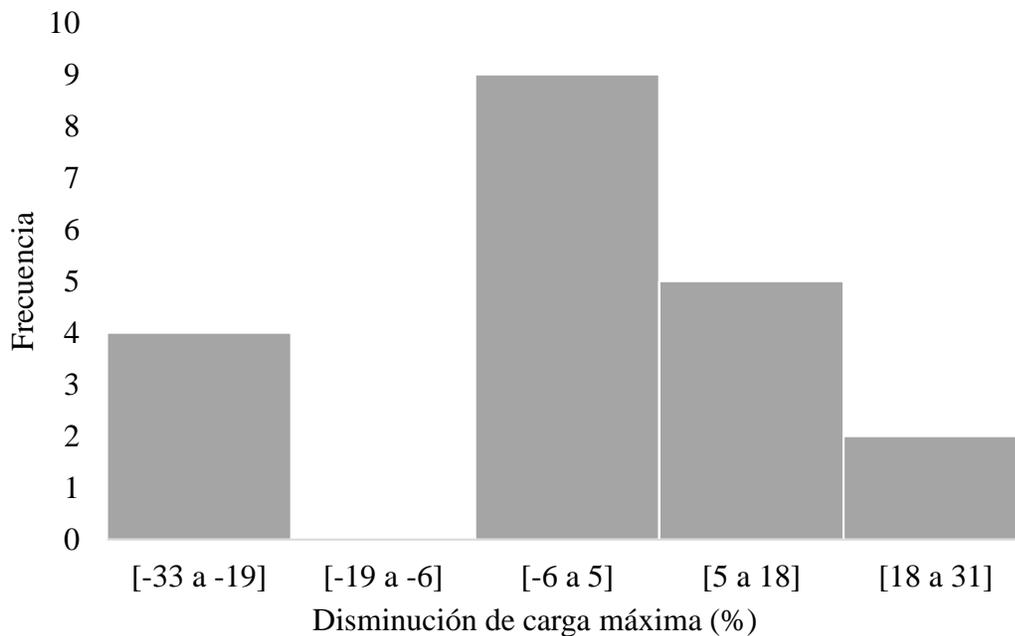


Figura 2. Histograma de variación de carga máxima.

3.1.1. Análisis de la Gráfica de Señal-Ruido

Analizando la Figura 3, es posible determinar cuáles factores de control tienen más incidencia en la variable de respuesta (la variación de la carga máxima), esto se hace mediante la observación de las líneas en cada variable, cuando las líneas son horizontales no hay un efecto presente y cada nivel afecta la respuesta de la misma manera, mientras que cuando las líneas no son horizontales si existe un efecto principal y cada nivel influyen en la respuesta de manera diferente, es decir, cuanto mayor sea la distancia en la posición vertical entre los puntos trazados, mayor será la magnitud del efecto (Antony y col., 2006). Por lo tanto, es posible afirmar que el ancho de fisuras controladas (A_g) es la variable con mayor efecto en la capacidad de carga máxima a flexión de especímenes SFRCs degradados por cloruros. A esta variable le siguen el volumen de fibra (V_f), el tiempo de degradación (T_d), la concentración de cloruros (C) y la corrosión acelerada (C_a), por orden de incidencia en la variable de respuesta, los cuales, son las que presentan mayor separación entre sus niveles. Por último, son la relación agua/cemento (R_{ac}), la carga durante la degradación (C_d) y el tipo de experimento (T_e), los factores con menor efecto sobre la variación de la carga máxima. Ahora bien, al ser objetivo de este trabajo encontrar que valores de las variables experimentales que causan una mayor disminución de la carga máxima, estos pueden ser determinados por el mayor valor de cada factor en la gráfica de señal-ruido en la Figura 3 (señalados por un círculo

rojo). Por tanto, un diseño de experimento recomendado para obtener los mayores efectos experimentales de variación de carga máxima a flexión en especímenes de SFRCs es la siguiente: Rac (0.47), Vf (0.75%), Td (72 días), C (7%), Cd (27.2 kN), Ca (200 uA/cm²), Ag (0.12) y Te (húmedo-seco).

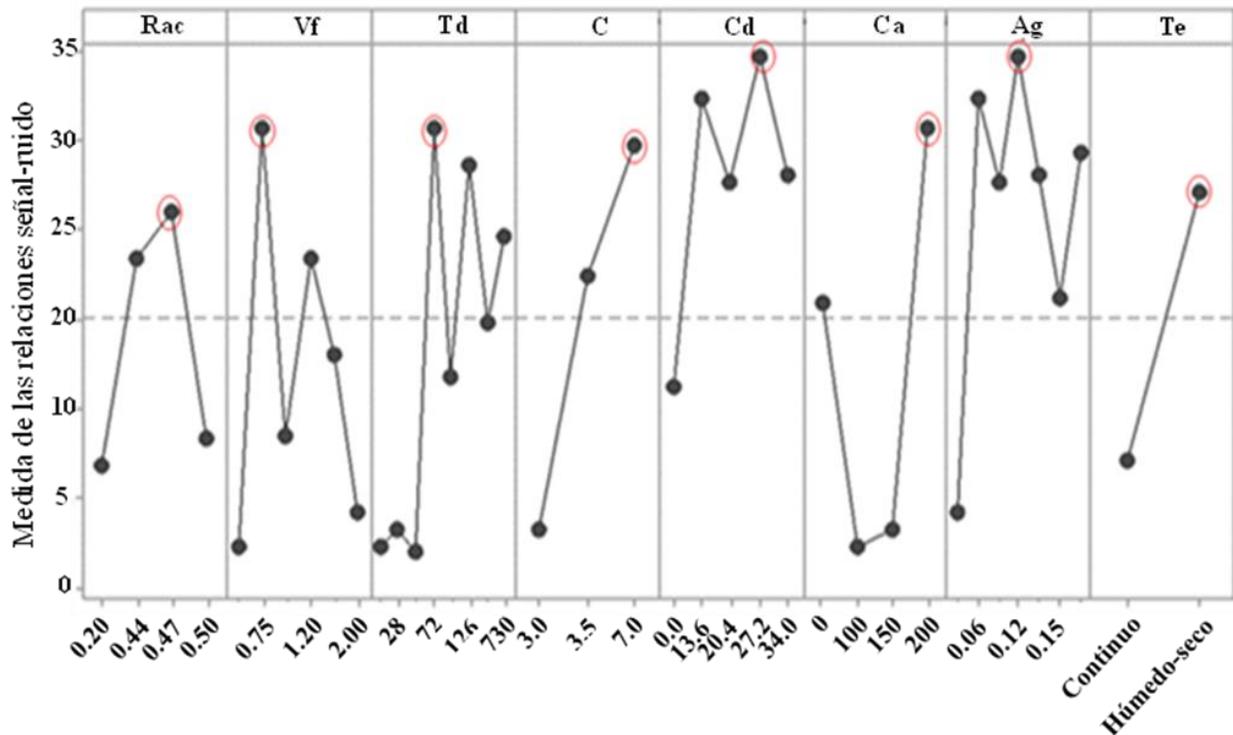


Figura 3. Gráfica de efectos principales para relaciones señal-ruido para experimentos de carga máxima.

3.1.2. Análisis de regresión

Analizando la Tabla 2, la cual es el resultado del análisis de varianza para las variables estudiadas, se puede determinar que, para ninguna de dichas variables estudiadas el Valor p es menor a 0.05, lo que significa que estas no impactan estadísticamente en los resultados de variación de la carga máxima a flexión. De hecho, la variable con mayor impacto estadístico en la figura anterior, la cual fue el ancho de fisuras controladas, tuvo un Valor p de 0.081 en este análisis. Esto demuestra que el análisis de varianza no es una herramienta útil en este caso para determinar la influencia de las variables explicativas sobre la variable de respuesta.

Tabla 2. Análisis de varianza de las variables estudiadas para variación de carga máxima.

Variabes	Valor p
Relación agua/cemento	0.544
Porcentaje de fibra	0.841
Tiempo de degradación	0.305
Concentración de NaCl	0.963
Carga durante la degradación	0.812
Corrosión acelerada	0.557
Ancho de fisura	0.081
Tipo de experimento	0.677

Haciendo el análisis de las ecuaciones de regresión para la variable cualitativa, la cual en este estudio es el tipo de experimento, se pueden determinar cuáles son las variables experimentales que tienen poder explicativo sobre la variable de respuesta (ver ecuaciones 1 y 2). Esto es posible determinarlo por las variables que cuenten con coeficiente positivo, las cuales que en este caso son el ancho de fisura controlada, la concentración de NaCl y la corrosión acelerada. Estas ecuaciones fueron obtenidas con los datos con que se trabajan en este estudio mediante el uso de Minitab.

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento continuo:

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

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento húmedo-seco:

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

Considerando por tanto los estudios realizados hasta el momento, para determinar la influencia de las variables experimentales sobre la variación de la carga máxima, los cuales fueron la gráfica de efectos principales para relaciones señal-ruido, el análisis de varianza y de las ecuaciones de regresión, es posible concluir que el ancho de fisuras controladas es la variable experimental que mayor efecto tiene sobre la carga máxima en concretos reforzados con fibras de acero que sufren degradación por cloruros, aunque no existen trabajos dedicados específicamente al estudio de la influencia de esta variable sobre la carga máxima, en investigaciones como la de Hou y col., (2021) se muestran resultados contradictorios, pues al utilizar un $A_g = 0.06$ mm la disminución de la carga máxima es de 23.35%, mientras para anchos de grietas de 0.09 mm es de 13.55% y para valores de 0.12 mm la variación es de 30.51%., lo que demuestra que la variación de esta propiedad no solo depende de esta variable. Por otra parte, otra de las variables con influencia en variación de la carga máxima según los resultados aquí obtenidos es la concentración de cloruros, aunque esta información no ha podido ser corroborada aún por falta de información bibliográfica, en trabajos como el de Marcos-Meson y col. (2021) se aprecia como influye de manera negativa esta variable en las propiedades de los SFRCs estudiados.

3.2. Efecto de variables experimentales en la variación de la resistencia residual

Para analizar los datos de variación de resistencia residual (V_{rr}) obtenidos se hizo de forma similar que para los datos de carga máxima a flexión. Se realizó un histograma de la variación de la resistencia residual, donde, como se observa en la Figura 4, la mayor frecuencia de variaciones se encuentra de 0 a 17% y de 17 a 34%, son por tanto estos los datos que se tomaron para este estudio. Se observa además que existen valores por debajo de cero, los cuales no se utilizaron por las razones anteriormente mencionadas, al igual que los datos mayores a 34% ya que son poco frecuente este tipo de resultados.

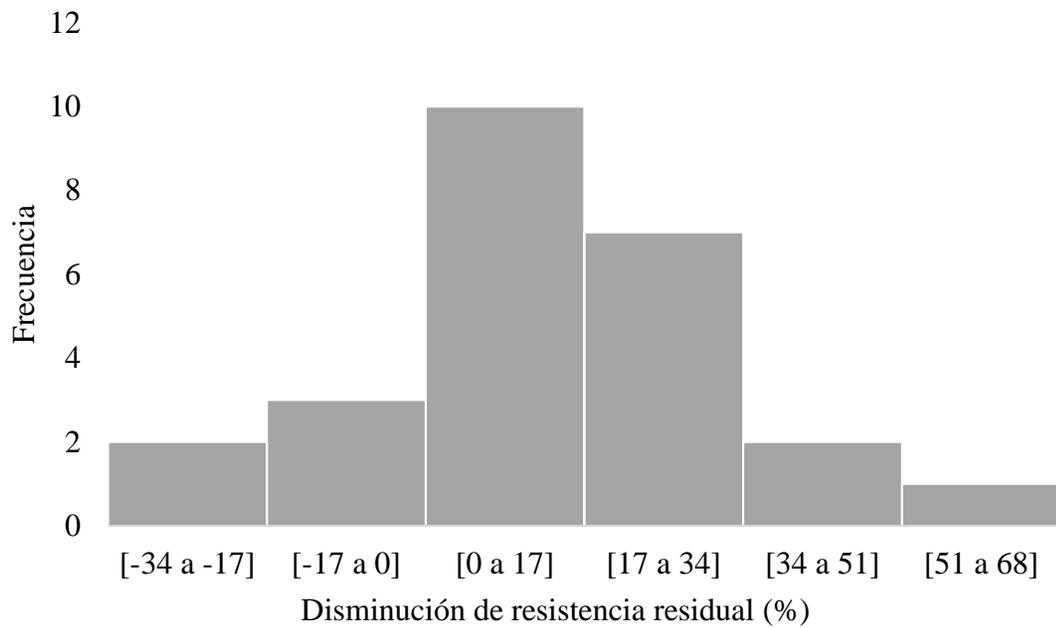


Figura 4. Histograma de variación de resistencia residual.

3.2.1. Análisis de la Gráfica de Señal-Ruido

Analizando la Figura 5, es posible determinar que los factores de control que reducen la variabilidad son, en primer lugar, la carga a flexión durante la degradación, ya que es la que presenta una mayor tendencia vertical en el gráfico señal-ruido.

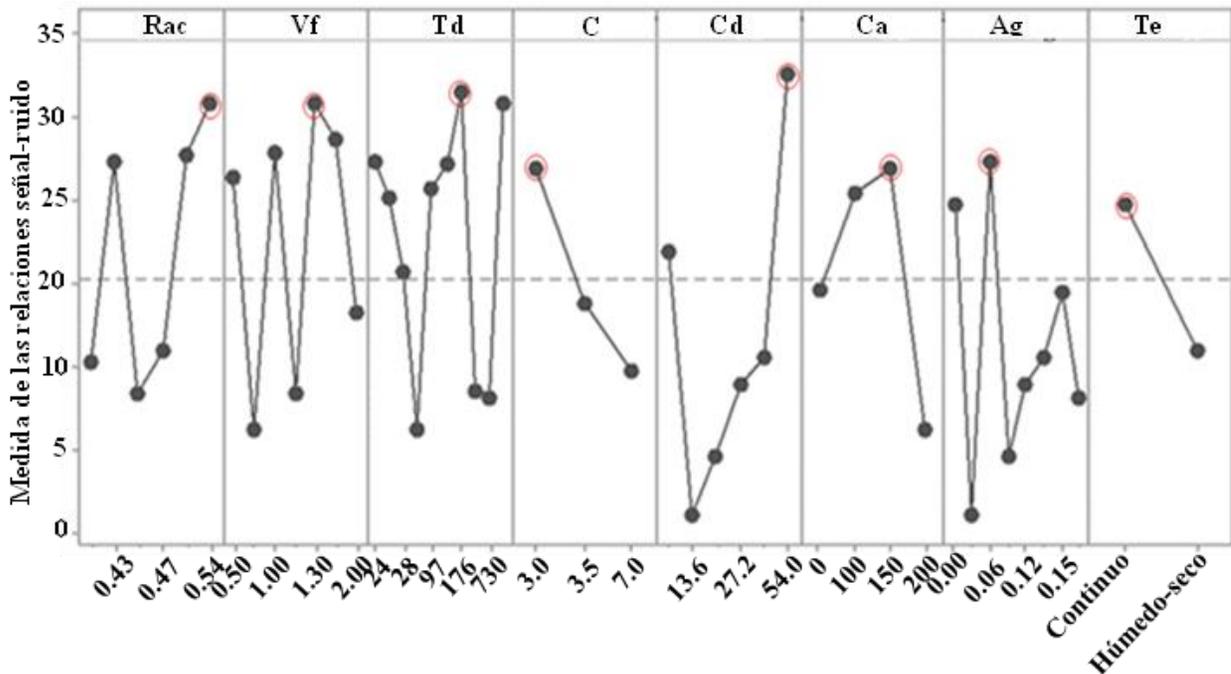


Figura 5. Gráfica de efectos principales para relaciones señal – ruido para experimentos de resistencia residual.

Le sigue la relación agua/cemento, el volumen de fibras, el tiempo de degradación y el ancho de fisuras controladas, siendo los niveles recomendados en cada caso para obtener mayores efectos en la disminución de la resistencia residual los siguientes: Cd (54 kN), Rac (0.54), Vf (1.3%), Td (176

días) y Ag (0.07 mm), respectivamente. Estos valores se obtienen tomando el valor del nivel más elevado en cada factor en la Figura 5, señalados con un círculo rojo. Por su parte, las demás variables se encuentran más cerca de la media y tienen un menor efecto sobre la relación de señal-ruido, no obstante, para llevar a cabo un diseño experimental con el fin de obtener los mayores niveles de variación de resistencia residual también se deben tener en cuenta. Por lo tanto, en el caso de la concentración de cloruros, la corrosión acelerada y el tipo de experimento, los valores recomendados son 3%, 150 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y experimento continuo respectivamente.

3.2.2. Análisis de regresión

También se realizó un análisis de regresión donde se estudió el análisis de varianza (Tabla 3), obteniéndose que el Valor p fue menor a 0.05 en las variables: carga durante la degradación (0.000) y tipo de experimento (0.002), lo que significa que estas variables tienen mayor influencia en la variación de la resistencia residual a flexión que las demás. Dicho resultado no es totalmente coincidente con los obtenidos en la gráfica de Señal/Ruido, pues en dicha figura la variable tipo de experimento tiene poca influencia en la variable de respuesta, lo cual es un elemento a analizar en futuros estudios.

Tabla 3. Análisis de varianza de las variables estudiadas para variación de resistencia residual.

Variabes	Valor p
Relación agua/cemento	0.401
Porcentaje de fibra	0.452
Tiempo de degradación	0.196
Concentración de NaCl	0.085
Carga durante la degradación	0.000
Corrosión acelerada	0.907
Ancho de fisura	0.081
Tipo de experimento	0.002

Por otra parte, analizando los coeficientes de cada factor en las ecuaciones de regresión (ver ecuaciones 3 y 4), es posible determinar las variables con mayor influencia en respuesta son: la carga durante la degradación, la relación agua/cemento y el tiempo de degradación, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en la Figura 5 y en parte con la tabla 3.

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento continuo

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

Ecuación de regresión para la variable tipo de experimento húmedo-seco

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

Es posible concluir entonces que, en los estudios de degradación de SFRCs por la acción de cloruros, la variable experimental que más incidencia tiene sobre la variación de la resistencia residual es la carga a la que son sometidos los especímenes de concreto durante la degradación. Resultados similares encontraron Nguyen y col. (2018), los cuales obtuvieron una disminución de la capacidad de carga de los concretos estudiados, una vez agrietados al haber sido sometidos a una carga sostenida mientras eran expuestos a cloruros, estos encontraron que las fibras de acero sufrieron corrosión cuando la carga aplicada fue del 50% de la carga de fluencia. De manera similar Hou y col. 2021 encontraron que al aumentar los niveles de carga sostenida a los concretos y bajo

condiciones de corrosión severa, la capacidad de carga de estos se vio afectada. De igual forma, la relación agua/cemento tiene marcada influencia en la variación de la resistencia residual, según los resultados aquí encontrados, aunque no existen actualmente en la literatura trabajos dedicados a comparar como influye esta variable en dicha propiedad. Por último, como se ha visto, el tiempo de degradación tiene también influencia en esta característica, siendo este resultado contradictorio con el obtenido por Marcos-Meson y col., 2021, ya que estos obtuvieron pocos cambios en el rendimiento mecánico de los SFRCs degradados por cloruros y dióxido de carbono durante 1 y 2 años. Lo cual significa que los resultados obtenidos en este tipo de estudios siguen siendo contradictorios y se requiere de futuras investigaciones.

4. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los estudios realizados referentes a la degradación de concretos reforzados con fibras de acero por la acción de cloruros, y tomando en cuenta las principales variables experimentales que afectan las propiedades de resistencia residual y carga máxima de dichos concretos es posible arribar a las siguientes conclusiones:

1. Los resultados encontrados en la bibliografía muestran que los procesos degradativos por cloruros no solo afectan negativamente las propiedades mecánicas de los SFRC, sino que, en algunos casos, dichas propiedades pueden tener una mejoría luego de la degradación, esto se le atribuye a un aumento de la fuerza de unión entre el concreto y la fibra a causa de un aumento en la rugosidad superficial debido a la corrosión.
2. Haciendo un análisis en los resultados obtenidos para los experimentos donde se evaluó la variación de la carga máxima a flexión, se encuentra que la variable cuya variación incide más en esta propiedad es el ancho de fisuras controladas, siendo un valor de 0.12 mm el que más afecta la variable de respuesta, de igual forma, al ordenar las variables según su influencia en la variación de la carga máxima que soportan los SFRC y para obtener los mayores valores de pérdida de esta propiedad quedaría de la siguiente forma: Ag (0.12 mm), Vf (0.75%), Td (72 días), C (7%), Ca (200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), tipo de experimento (húmedo-seco) y Rac (0.47).
3. Para el caso de la resistencia residual a flexión, la variable experimental que más efecto tiene sobre esta propiedad, es la carga durante la degradación, encontrando que su influencia es directamente proporcional, es decir a mayor carga es de esperar que la resistencia residual luego del proceso degradativo se vea más afectada, de igual forma se obtuvo un orden de variables en cuanto a la influencia en la resistencia residual, por lo que es posible recomendar los siguientes valores de cada variable a emplear para obtener las mayores disminuciones de esta propiedad en experimentos de degradación: Cd (54 kN), Rac (0.54), Vf (1.3%), Td (176 días), Ag (0.07 mm), C (3%), Ca (150 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) y tipo de experimento (continuo). Estas variables fueron ordenadas desde la que más influye hasta la que menos lo hace.
4. Por los resultados obtenidos, se recomienda continuar con el estudio de la influencia de variables experimentales con otras propiedades de los concretos reforzados con fibras de acero como podrían ser la durabilidad, la tenacidad y la ductilidad, así como la influencia de otras variables como lo son el material de las fibras, el tamaño y la forma de los especímenes de concreto y el tipo de materia prima utilizado para la elaboración de estos.

5. REFERENCIAS

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*, *Acı 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., Jongvivalsakul, P., Limpaninlachat, 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), *Efect 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>.