

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®**

**Ciencia y
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



Instituto **Tecnológico**®
de Aguascalientes

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
IMPACTO DE LA EXPOSICIÓN A CLORUROS EN LA
INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CONCRETOS REFORZADOS
CON FIBRAS DE ACERO NO CONVENCIONALES

TESIS DE DOCTORADO

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

MC. OSLERY BECERRA PÉREZ

DIRECTOR:

DR. ALEJANDRO MEZA DE LUNA

ASESORES:

DRA. DIDILIA ILEANA MENDOZA CASTILLO

DRA. MARÍA DEL ROSARIO MORENO VIRGEN

DRA. MA. ROSARIO GONZÁLEZ MOTA

DR. ROGELIO SALINAS GUTIÉRREZ

AGUASCALIENTES, AGS., MÉXICO, DICIEMBRE DE 2025.



HOJA EN BLANCO



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 01/abril/2026

No. De Oficio: 011/2026

Asunto: Autorización de Tesis de Grado Para su Impresión

M.C. OSLERY BECERRA PEREZ
P R E S E N T E

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Doctorado, hacemos **CONSTAR** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: " **IMPACTO DE LA EXPOSICIÓN A CLORUROS EN LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO NO CONVENCIONALES**" hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE

DR. ALEJANDRO MEZA DE LUNA

SECRETARIO

DRA. DIDILIA ILEANA MENDOZA CASTILLO

VOCAL

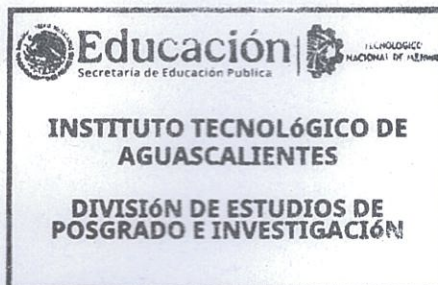
Ma. Rosario Moreno V.
DRA. MARÍA DEL ROSARIO MORENO VIRGEN

VOCAL

DRA. MA. ROSARIO GONZÁLEZ MOTA

VOCAL

DR. ROGELIO SALINAS GUTIÉRREZ



2026
año de
**Margarita
Maza**





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 29/enero/2026
Asunto: Autorización de uso de derechos

BECERRA PEREZ OSLERY, mayor de edad, con domicilio ubicado en **Adolfo Ruiz Cortines 209, Edificio 6, número 103, Primo Verdad INEGI, 20265, Aguascalientes, Aguascalientes** en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada **"IMPACTO DE LA EXPOSICIÓN A CLORUROS EN LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO NO CONVENCIONALES"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada **"IMPACTO DE LA EXPOSICIÓN A CLORUROS EN LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO NO CONVENCIONALES"**, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





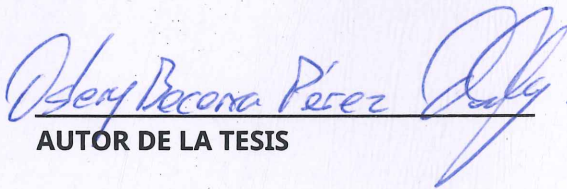
SEXTA - DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de EL AUTOR Y/O TITULAR, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA - AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

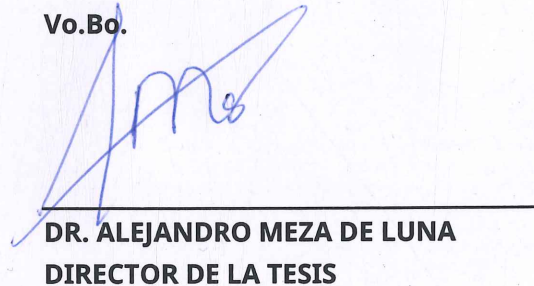
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia


AUTOR DE LA TESIS

Vo.Bo.


DR. ALEJANDRO MEZA DE LUNA
DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





HOJA EN BLANCO

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Dr. Alejandro Meza de Luna, asesor de esta tesis, primeramente, por darme la oportunidad de trabajar en este maravilloso proyecto, por su confianza, compromiso y acompañamiento durante todo el desarrollo de esta investigación. De igual manera, extendiendo mi sincero reconocimiento a los miembros del Comité Evaluador: Dra. Didilia Ileana Mendoza Castillo, por su valiosa contribución en la realización de las caracterizaciones mediante difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía de absorción atómica; a la Dra. María del Rosario Moreno Virgen, por su apoyo fundamental en las caracterizaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS); y al Dr. Rogelio Salinas Gutiérrez, por su supervisión semestral y su importante apoyo en el análisis estadístico y la modelación matemática aplicada en este trabajo. Asimismo, agradezco a la Dra. Ma. Rosario González Mota por su participación y observaciones en las evaluaciones de avances semestrales y la evaluación de esta tesis.

Agradezco a los estudiantes de residencia que participaron activamente en la realización de los ensayos experimentales de esta investigación. Su disposición y compromiso con las tareas asignadas fueron fundamentales para el desarrollo adecuado del trabajo en laboratorio.

Agradezco al TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI, a través del apoyo 805911 por todo el soporte institucional brindado para la realización y conclusión de este proyecto doctoral.

Mi más sincero agradecimiento a mi esposa, Dayaneli Sarduy González, por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante todas las etapas de esta investigación. A mi madre, Arelys Pérez Macías, y a mi padre, Reinaldo A. Becerra Carballosa, por sus consejos, ánimo constante y confianza, y a mi hermano Oslay Becerra Pérez, por su motivación y respaldo, sin su ayuda este proyecto no hubiera sido posible. Finalmente, extendiendo mi gratitud al resto de mis familiares y amigos que estuvieron pendientes de mi avance y brindaron su apoyo emocional y práctico a lo largo de este proceso. A Dios, por bendecirme con la oportunidad de alcanzar este logro que hoy se materializa.

“La investigación consiste en ver lo que todos los demás han visto y pensar lo que nadie más ha pensado”.

Albert Szent-Györgyi

Resumen

El concreto reforzado con fibras de acero (SFRC, por sus siglas en inglés) es susceptible a procesos de degradación química y electroquímica en ambientes con elevadas concentraciones de cloruros. El objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de la degradación inducida por cloruros sobre el comportamiento mecánico, microestructural y químico de concretos reforzados con fibras de acero no convencionales, fabricadas a partir de alambre galvanizado, alambre recocido y alambres recuperados de neumáticos en desuso y se comparó su desempeño con el de fibras producidas a escala industrial, específicamente las Dramix 3D producidas por la empresa Bekaert.

Inicialmente se realizó un análisis bibliográfico y un metaanálisis estadístico para identificar las variables más influyentes en la durabilidad mecánica del SFRC, determinándose que el volumen de fibras y el tiempo de exposición son factores predominantes. Posteriormente, las fibras previamente degradadas en ambientes de cloruros fueron evaluadas mediante ensayos mecánicos de tracción y extracción en morteros de cemento, así como también se hizo la caracterización de estas mediante microscopía digital, microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva y difracción de rayos X. El grado de corrosión se cuantificó mediante variación de masa de las fibras. En una segunda etapa se fabricaron probetas de concreto con contenidos de fibra de 0.5% y 1%, empleando fibras previamente degradadas mediante ciclos acelerados de mojado y secado en soluciones de NaCl y se evaluaron sus propiedades a compresión y a flexión. Finalmente, se estudiaron concretos con fibras no degradadas previamente, expuestos hasta 12 meses a ciclos con cloruros, analizando penetración de iones, carbonatación, lixiviación, evolución del pH y cambios microestructurales.

Los resultados mostraron que la corrosión moderada puede incrementar la adherencia fibra–matriz por aumento de rugosidad superficial, especialmente en fibras recicladas, mientras que exposiciones prolongadas generan productos frágiles que debilitan la interfaz. Las fibras de alambre galvanizado y las fibras industriales mostraron mayor resistencia a la corrosión que las obtenidas a partir de alambre recocido y de neumáticos. Se comprobó que la penetración de cloruros es progresiva y dominante frente a la carbonatación y que además hubo lixiviación de calcio, descalcificación de geles C-S-H y formación de productos de corrosión como óxidos y oxihidróxidos de hierro.

Desde el punto de vista mecánico, la degradación redujo la resistencia máxima en las pruebas de compresión y de flexión debido al deterioro de la matriz; sin embargo, los concretos reforzados conservaron una respuesta postpico elevada y resistencia residual superior al concreto sin fibras y al SFRC de referencia (sin degradación) . En conjunto, se concluyó que la matriz cementicia constituye el componente más vulnerable a la degradación por cloruros a largo plazo, mientras que las fibras recicladas representan una alternativa técnica viable y sostenible, capaz de mantener un desempeño mecánico residual significativo y comparable al de las fibras Dramix en ambientes con cloruros.

Índice

Capítulo I. Introducción.....	5
1.1 Antecedentes.....	8
1.3 Objetivos.....	16
1.4 Hipótesis	16
1.5 Justificación	17
1.6 Esquema de la investigación.....	17
1.7 Contribución	17
Capítulo II. Marco teórico, influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas del SFRC en experimentos de degradación por cloruros	19
2.1 Breve reseña de los compuestos del cemento y el proceso de fraguado	19
2.2 Corrosión inducida por cloruros	20
2.3 Disminución de las propiedades mecánicas del SFRC debido a la corrosión	22
2.4 Influencia de variables experimentales en las propiedades de flexión y de compresión del SFRC en experimentos de degradación por cloruros	28
Capítulo III. Análisis de la variación del comportamiento de <i>pull-out</i> en mortero de las fibras degradadas por cloruros: influencia de la morfología superficial y los productos de corrosión	46
3.1 Introducción.....	46
3.2 Descripción del programa experimental.....	49
3.3 Resultados.....	55
3.4 Discusión	81
Capítulo IV. Influencia de la corrosión de las fibras degradadas en las propiedades mecánicas de los SFRCs.....	85
4.2 Descripción del programa experimental.....	86
4.3 Resultados y discusión	91
4.4 Discusión	103
Capítulo V. Evaluación de la resistencia mecánica de SFRCs expuestos a cloruros ...	106
5.1 Introducción.....	106
5.2 Descripción del programa experimental.....	112
5.3 Resultados.....	120
Conclusiones.....	132
Recomendaciones y futuras líneas de investigación.....	134
Bibliografía.....	135
Anexos.....	150
Artículo 1. Influence of experimental variables on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in chloride degradation experiments: bibliographic review and statistical analysis.	150
Artículo 2. Impact of chloride corrosion on the pull-out resistance of recycled steel fiber in cement mortars.	151

Índice de tablas

Tabla 1.1. Resumen de las principales técnicas de investigación utilizadas en cada capítulo.....	18
Tabla 2.1. Pruebas de efectos fijos para la variación del esfuerzo máximo.	29
Tabla 2.2. Relación datos degradación de SFRC sometidos a esfuerzos de flexión extraídos de la bibliografía..	27
Tabla 2.3. Pruebas de efectos fijos para la variación de la ductilidad.	31
Tabla 2.4. Pruebas de efectos fijos para la variación de la tenacidad.....	33
Tabla 2.5. Pruebas de efectos fijos para la variación de la resistencia residual.	34
Tabla 2.6. Relación datos degradación de SFRC sometidos a esfuerzos de compresión extraídos de la bibliografía.	36
Tabla 2.7. Pruebas de efectos fijos para la variación del módulo de elasticidad.....	38
Tabla 2.8. Pruebas de efectos fijos para la variación del esfuerzo máximo.	40
Tabla 2.9. Pruebas de efectos fijos para la variación de la tenacidad.....	42
Tabla 2.10. Pruebas de efectos fijos para la variación de la resistencia residual.	43
Tabla 3.1. Especificaciones de las fibras.	51
Tabla 3.2. Nomenclatura y condiciones de degradación de las fibras expuestas a soluciones de NaCl.	52
Tabla 3.3 Variación de la rugosidad de la fibra después del proceso de degradación con NaCl al 7% de concentración másica durante 60 días.	57
Tabla 4.1. Cantidad de materiales utilizados en la elaboración de las probetas.	87
Tabla 4.2. Nomenclatura de los especímenes elaborados	88
Tabla 4.3. Variación de las propiedades mecánicas en ensayos de compresión.	94
Tabla 4.4. Variación de las propiedades mecánicas en ensayos de flexión.....	100
Tabla 5.1. Reacciones químicas en el método AgNO ₃	115
Tabla 5.2. Composición elemental obtenida por SEM-EDS del SFRC expuesto a solución de NaCl al 7% durante 12 meses.	123
Tabla 5.3. Propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras bajo diferentes condiciones de exposición a cloruros luego de 12 meses de degradación...	130
Tabla 5.4. Resistencia residual de flexión calculada a partir de la resistencia residual de compresión.	131

Índice de figuras

Figura 1.1. Clasificación de las fibras según su origen..	9
Figura 1.2. Clasificaciones de fibras de acero producidas industrialmente según su forma.....	10
Figura 1.3. Ejemplos de usos del SFRC	11
Figura 1.4. Ejemplos de estructuras deterioradas en Aguascalientes cuya durabilidad pudo haberse incrementado mediante el uso de concreto reforzado con fibras	14
Figura 2.1. Representación del modelo conceptual de deterioro por corrosión en el concreto armado y el concreto reforzado con fibras de acero	21
Figura 2.2. Proceso de corrosión en una barra de acero en concreto armado por la acción de cloruros	21
Figura 2.3. Curva ilustrativa de esfuerzo-deformación para ensayos de compresión y flexión de SFRCs.....	24
Figura 2.4. Esquema representativo del procedimiento de análisis estadístico utilizado la investigación.....	30
Figura 2.5. Gráficas de residuos condicionales para la variación del esfuerzo máximo en pruebas de flexión.....	30
Figura 2.6. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la ductilidad en pruebas de flexión.....	32
Figura 2.7. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la tenacidad en pruebas de flexión	33
Figura 2.8. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la resistencia residual en pruebas de flexión.....	35
Figura 2.8. Gráficas de residuos condicionales para la variación del módulo de elasticidad en pruebas de compresión.....	39
Figura 2.9. Gráficas de residuos condicionales para la variación de esfuerzo máximo en pruebas de compresión	41
Figura 2.10. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la tenacidad en pruebas de compresión	42
Figura 2.11. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la resistencia residual en pruebas de compresión.....	44
Figura 3.1. Curva de tensión-deformación característica para fibras con extremos en forma de ganchos.....	48
Figura 3.2. Fabricación de fibras onduladas no convencionales en el laboratorio.	50
Figura 3.3. Dimensiones de las fibras.....	50
Figura 3.4. Experimentos de degradación de las fibras en soluciones de NaCl.....	51
Figura 3.5. Configuración utilizada para los ensayos de <i>pull-out</i>	54
Figura 3.6. Diferentes modos de fallo observados durante pruebas de extracción.	54
Figura 3.7. Configuración experimental para los ensayos de tracción de las fibras.....	55
Figura 3.8. Grado de corrosión de las fibras con el paso del tiempo.....	56
Figura 3.9. Distribución de elementos en la superficie de las fibras de alambre galvanizado después de 60 días de degradación discontinua.	59
Figura 3.10. Imágenes de microscopio digital de las fibras de alambre galvanizado. ...	60
Figura 3.11. Distribución de elementos en la superficie de las fibras de alambre recocido después de 60 días de degradación discontinua.....	61
Figura 3.12. Imágenes de microscopio digital de las fibras de alambre recocido.....	61
Figura 3.13. Distribución de elementos en la superficie de las fibras de alambre de neumáticos después de 60 días de degradación discontinua.	62
Figura 3.14. Imágenes de microscopio digital de fibras de alambre de neumáticos.	63

Figura 3.15. Distribución de elementos en la superficie de las fibras Dramix después de 60 días de degradación	64
Figura 3.16. Imágenes de microscopio digital de las fibras Dramix.	65
Figura 3.17. Difractogramas obtenidos de los análisis XRD	67
Figura 3.18. Curvas de carga-deslizamiento obtenidas de ensayos de pull-out	69
Figura 3.19. Forma del orificio de salida en el mortero y descripción indicativa de la etapa de extracción de fibras.	70
Figura 3.20. Ángulos de las ondulaciones y ganchos de las fibras antes y después del ensayo de pull-out.	72
Figura 3.21. Curvas de trabajo - deslizamiento de las pruebas de pull-out.	74
Figura 3.22. Esfuerzo de adherencia promedio y esfuerzo de unión equivalente de la unión fibra-matriz	78
Figura 3.23. Gráfico comparativo de las fibras sometidas a ensayos de tracción uniaxial y de <i>pull-out</i>	80
Figura 4.1. Elaboración y curado de las probetas de concreto.	88
Figura 4.2. Ensayos mecánicos de flexión y de compresión	89
Figura 4.3. Curvas de esfuerzo vs. deformación obtenidas a partir de los ensayos de compresión	93
Figura 4.4. Curvas de esfuerzo vs. Deflexión obtenidas a partir de los ensayos de flexión.	99
Figura 5.1. Aumento de la resistencia del concreto vs. tiempo de degradación.	108
Figura 5.2. Microfisuración en la zona interfacial del SFRC asociada a la corrosión inducida por cloruros.	109
Figura 5.3. Lixiviación de la portlandita del concreto.	110
Figura 5.4. Elaboración y curado de los especímenes utilizados para medir la penetración de <i>Cl</i> – y la carbonatación.	113
Figura 5.5. Especímenes de compresión elaborados y cumplida la etapa de curado. ...	114
Figura 5.6. Corte y perforación del concreto para medir la penetración de <i>Cl</i> – y de la carbonatación.	116
Figura 5.7. Evolución temporal de la penetración de iones cloruro en el concreto determinada mediante el método colorimétrico con nitrato de plata.	120
Figura 5.8. Perfil de penetración de cloruro luego de 360 días de degradación.	121
Figura 5.9. Evolución temporal de la penetración de la carbonatación en el concreto determinada mediante el método colorimétrico con fenolftaleína.	122
Figura 5.10. Evolución temporal de la concentración de calcio en solución durante el proceso de degradación del concreto durante 12 meses.	124
Figura 5.11. Variación temporal del pH	125
Figura 5.12. Microestructura de la interfaz fibra–concreto tras 12 meses de exposición a cloruros.	126
Figura 5.13. Microestructura del concreto tras 12 meses de exposición a cloruros.	127
Figura 5.14. Curvas de esfuerzo vs. deformación obtenidas a partir de los ensayos de compresión	128

Capítulo I. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Breve reseña histórica del concreto reforzado con fibras

El concreto se describe como toda mezcla o estructura sólida generada a partir de un agente cementante, el cual se origina a través de la interacción química entre el cemento hidráulico y el agua (Maaruf et al. 2017). El concreto es un material imprescindible en la industria de la construcción, se estima que en la actualidad el consumo global total es de 33 Gt/año (Sverdrup y Olafsdottir, 2023) y se prevé un crecimiento anual de 1.6% para el periodo 2024-2035 (*INDEXBOX*, 2025), lo que lo convierte en el material de construcción más utilizado mundialmente, esto se debe también a la disponibilidad en la naturaleza de las materias primas necesarias para su elaboración y al relativamente bajo costo de estas (Chen et al., 2021a), estos materiales son: cemento, agua, agregado fino (arena) y agregado grueso (grava) (Meza, 2015), aunque se le puede añadir escoria de alto horno, cenizas volantes de carbón o cenizas volcánicas, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz, ceniza de palma, entre otros (Fode et al., 2023). Este material se ha empleado y se sigue utilizando para la construcción de infraestructuras de ingeniería civil como lo son carreteras, puentes, obras hidráulicas, industriales, arquitectura ferroviaria y está presente en prácticamente todas las construcciones civiles de hoy en día (Long et al., 2020), lo que lo ha convertido en el material de construcción por excelencia, y las principales razones es porque posee una elevada resistencia a la compresión, así como a las condiciones medioambientales, pudiendo pasar décadas sin requerir de prácticamente ningún mantenimiento o sustitución (Paul et al., 2020).

A pesar de estas cualidades, el concreto presenta un comportamiento cuasi-frágil debido a su microestructura heterogénea, lo que limita su capacidad para resistir esfuerzos de tracción y flexión. La presencia de defectos estructurales, especialmente en la zona de transición interfacial (ITZ, región del concreto que se encuentra entre la superficie de los agregados y la pasta de cemento endurecida), favorece la iniciación y propagación de microgrietas. Esto genera un comportamiento frágil sin capacidad significativa de deformación plástica, lo que reduce la resistencia en tracción y flexión (Tang et al., 2024). Estos mecanismos explican la necesidad de estrategias de reforzamiento, como la incorporación de refuerzos, que pueden mejorar significativamente la ductilidad del concreto (Chen et al., 2021a).

Desde la antigüedad, se han utilizado diferentes técnicas para añadir refuerzo a las construcciones, por ejemplo, ladrillos de barro cocidos al sol, los cuales eran reforzados con paja, pelo de caballo y otros tipos de fibras vegetales (Behbahani y Nematollahi, 2011), pero no fue hasta mediados del siglo XIX cuando comenzó a utilizarse hierro o acero en forma de malla para el refuerzo de concretos en jardineras y pisos industriales, cuyo objetivo fundamental era proteger el concreto contra el fuego, y es a principios del siglo XX cuando comienza a desarrollarse una teoría compartida entre los científicos y profesionales acerca del refuerzo de concreto con barras de acero, dando lugar a lo que hoy conocemos como hormigón armado o concreto reforzado, (RC, por sus siglas en inglés) (Moussard et al., 2018). Desde entonces y hasta la actualidad se han utilizado barras de acero para el refuerzo de las estructuras de concreto y en 1910 fue propuesto por primera vez el uso de fibras en concretos (Naaman, 1985), comenzando en 1963 las primeras investigaciones acerca del concreto reforzado con fibras, (FRC, por sus siglas en inglés) en los Estados Unidos de América (Romualdi y Batson, 1963). Este consta

generalmente de cinco materiales fundamentales, además del cemento, los agregados fino y grueso y el agua, se le añade además fibras (Wang et al., 2021), de esta forma se comenzaron a utilizar las fibras para el refuerzo de concretos y aunque el RC sigue siendo el más utilizado, el uso de fibras ha tenido un auge significativo en las últimas décadas.

1.1.2 Tipos de fibras utilizadas en el refuerzo de concreto

Existe una gran variedad de fibras utilizadas para el refuerzo de concreto y estas se pueden clasificar en tres grupos fundamentales: según su origen, según su tamaño y según su módulo de elasticidad. Según el origen de la fibra existen dos tipos principales: fibras naturales y fibras manufacturadas por el hombre, las fibras naturales pueden ser de origen mineral, animal o a partir de la celulosa de las plantas, mientras que las fibras manufacturadas pueden ser regeneradas (se procesan químicamente para disolverlas y luego volver a formar filamentos), poliméricas (como el acrílico y el poliéster) y no poliméricas (como las fibras metálicas o de carbono) (Meza y Siddique, 2019; Meza y Shaikh, 2020; Paul et al., 2020; Meza et al., 2021; Abdalla et al., 2023). Esta clasificación se representa de forma más detallada en la Figura 1.1.

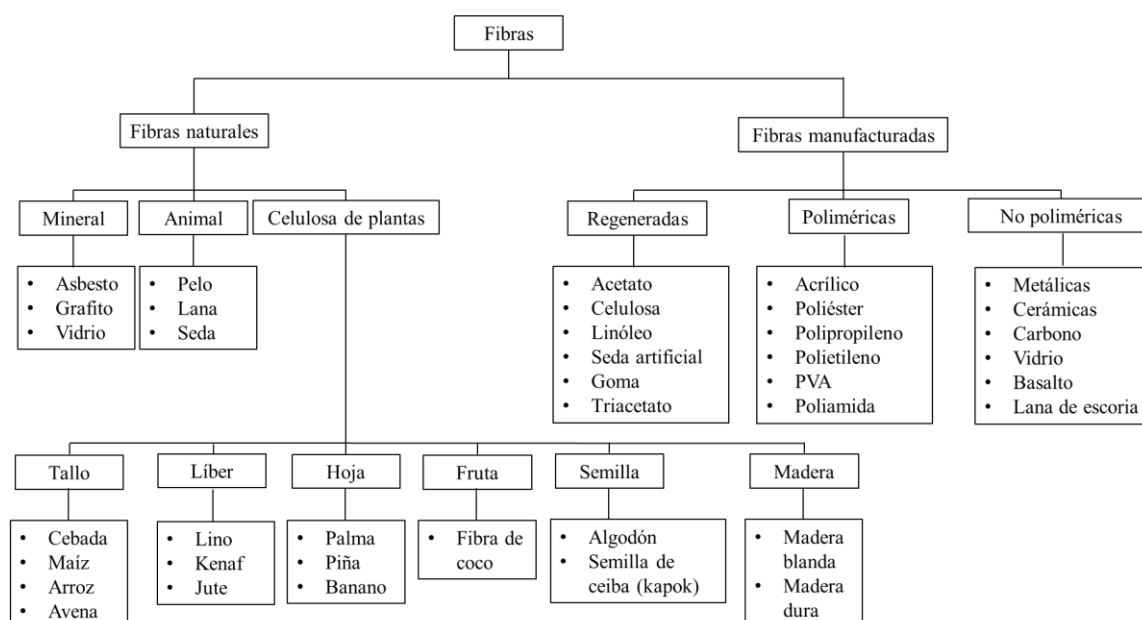


Figura 1.1. Clasificación de las fibras según su origen. Imagen adaptada de (Abdalla et al., 2023).

También se pueden clasificar las fibras según su módulo de elasticidad, aquellas cuyo módulo de elástico es mayor al del concreto se denominan fibras de intrusión dura y en las que es menor son llamadas de intrusión blanda, por ejemplo, el acero, el carbono y el vidrio poseen un módulo de elasticidad superior al de la matriz cementicia, mientras que materiales como el polipropileno y las fibras de origen vegetal se consideran de bajo módulo elástico. Es de importancia este conocimiento, pues en dependencia del uso que tendrá la estructura de concreto a confeccionar, será el tipo de fibra a utilizar, ya que las fibras de intrusión dura mejoran al mismo tiempo la resistencia a la flexión y al impacto, mientras que las de intrusión blanda, pueden mejorar la resistencia al impacto en el concreto, pero no tienen mucha significación en la mejora de otras propiedades del concreto (Behbahani y Nematollahi, 2011). Finalmente, por su tamaño, las fibras pueden

clasificarse en microfibras (longitudes menores a 20 mm y diámetros de 5 a 200 μm) y macrofibras (longitudes de 20 a 80 mm y diámetros de 40 a 120 μm) (Chen et al., 2021a).

De todos los materiales utilizados para elaborar las fibras, el acero es el material más empleado y estudiado para el refuerzo de concreto, obteniéndose así el concreto reforzado con fibras de acero (Horszczaruk, 2009; Hou et al., 2021). El Instituto Americano del Concreto (ACI) define las fibras de acero como longitudes discretas y cortas que son lo suficientemente pequeñas como para dispersarse fácil y aleatoriamente en una mezcla de concreto fresco (ACI 544.1R96, 1996). Existen diferentes clasificaciones de las fibras de acero según su forma, de acuerdo con Salcedo y Will (2017), estas pueden ser rectas, con extremos en forma de ganchos, con extremos en láminas, con extremos con perillas, onduladas (corrugadas), en forma de arcos, irregulares, dentadas, de superficie indentada, y torcidas (ver Figura 1.2). Las longitudes de fibras metálicas que comúnmente se utilizan van desde los 6 mm a 70 mm y la relación de aspecto (relación entre la longitud y el diámetro de la fibra) está comprendida entre 40 y 80. El módulo elástico y la resistencia a la tracción de las fibras de acero es de aproximadamente 200 GPa y entre 800 MPa a 1300 MPa respectivamente en la mayoría de los casos (Zhang et al., 2020).

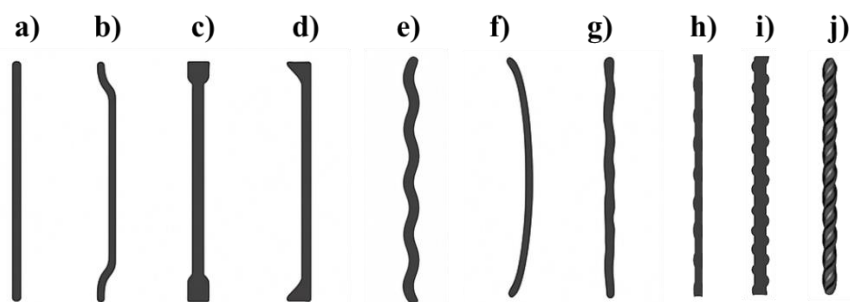


Figura 1.2. Clasificaciones de fibras de acero producidas industrialmente según su forma: a) rectas, b) con extremos en forma de ganchos, c) con extremos en láminas, d) con extremos con perillas, e) onduladas (corrugadas), f) en forma de arcos, g) irregulares, h) dentadas, i) de superficie indentada, y j) torcidas. Imagen de elaboración propia.

1.1.3 Concreto reforzado con fibras de acero

Las fibras de acero distribuidas homogéneamente en la matriz de cemento modifican las propiedades del compuesto tanto en estado fresco como endurecido (ACI 544.1R96, 1996). El SFRC presenta características que lo han hecho destacar en la industria de la construcción, por ejemplo, tiene una mayor resistencia al agrietamiento por contracción plástica y al agrietamiento por contracción por secado y al desconchado que el concreto convencional reforzado con varillas de acero, esto se debe a la tendencia que tienen las fibras de encontrarse más unidas en la matriz del concreto que las barras de refuerzo (Altun et al., 2007; Rao et al., 2013; Zhang et al., 2020). Además, las fibras actúan como puentes cuando se forma una fisura transfiriendo las tensiones de la grieta al concreto, lo que aumenta la eficacia del SFRC y su capacidad de absorción de energía impidiendo que se expandan las grietas o que se formen nuevas fisuras (Li et al., 2022).

Otros estudios demuestran que varias propiedades de los concretos mejoran con la adición de fibras de acero, estas son la resistencia a la tracción, la tenacidad, la durabilidad, la resistencia a la fatiga, la resistencia al impacto y aumento del módulo de elasticidad (Behbahani et al., 2011; Kaur et al., 2014; Ferreira et al., 2018; Zhang et al.,

2022). Al agregar una fracción en volumen del 1% de fibra de acero a un concreto simple, mejora la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de este en un 10% y un 80%, respectivamente (Marcos-Meson et al., 2017; Afroz et al., 2019). Debido a sus excelentes características el SFRC es utilizado en el hormigón proyectado, revestimiento de túneles, construcción de carreteras, construcciones propensas a sufrir daños por terremotos y construcciones con geometrías complejas donde no sería viable emplear refuerzos convencionales (varillas, mallas, armaduras) debido a su diseño (ver Figura 1.3) (Berrocal et al., 2015; Marcos-Meson et al., 2019; Zhang et al., 2020).



Figura 1.3. Ejemplos de usos del SFRC, a: Centro Richard Gilder para Ciencia en el Museo de Historia Natural (Nueva York, EE. UU.), b: Pavimento con SFRC en Anchorage, Alaska, EE. UU., c: Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, d: Centro Heydar Aliyev (Bakú, Azerbaiyán).

Además, el SFRC es ampliamente utilizado en infraestructuras donde existen ambientes corrosivos como, pisos industriales, construcciones para almacenar residuos nucleares, carreteras donde se utilizan sales de deshielo, estructuras hidráulicas y marinas, como muelles, plataformas petrolíferas y gasoductos (Yoo et al., 2020; Hou et al., 2021), esto se debe a que el concreto reforzado con fibras de acero presenta un riesgo de corrosión significativamente menor en comparación con el concreto reforzado con barras de acero convencionales, ya que las fibras de acero pueden reducir el riesgo de entrada de agentes agresivos y la degradación del concreto al controlar el agrietamiento prematuro debido a la contracción o gradientes de temperatura y cargas externas (Carrillo et al., 2017). Además, esta mayor resistencia a la corrosión de las fibras de acero también se atribuye a una combinación de factores como a) la corta longitud de las fibras de acero, que evita diferencias de potencial significativas a lo largo de la fibra y, por lo tanto, limita la formación de regiones de ánodo y cátodo distintas; b) las condiciones de mezclado (las fibras flotan en la matriz de concreto a diferencia del refuerzo de barras) que permiten la formación de una capa interfacial acero-concreto delgada y bien definida rica en hidróxido de calcio (Ca(OH)) sin la presencia de huecos en la interfaz como ocurre con el concreto reforzado con barras (Emon et al., 2017; Marcos-Meson et al., 2019).

Debido a estas características el uso de fibras de acero para el refuerzo de concreto ha aumentado en los últimos años, superando en el año 2022 las 300 000 toneladas anuales en ventas en el mercado mundial, con una tasa de crecimiento anual del 20% (Zhang et al., 2022). Además, un estudio de Grand View Research (2025), mostró que el mercado global de las fibras de acero para el refuerzo de concreto se valoró en 2440 millones de dólares en 2024 y se prevé que alcance los 3190 millones de dólares en 2030,

con una tasa de crecimiento superior al 5%. Sin embargo, la producción de acero representa entre el 7% y el 9% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, liberando entre 1.8 y 2.2 toneladas de CO₂ por tonelada de acero (Zhang et al., 2022) y específicamente, la producción de 1 kg de fibra de acero genera aproximadamente 2.32 kg de CO₂ equivalentes, lo que incluye consumo energético, emisiones, extracción de materias primas y procesamiento (Pushkar y Ribakov, 2020). Por lo tanto, la creciente demanda de fibras de acero podría aumentar la huella de carbono del sector de la construcción. Para abordar este problema, los investigadores están desarrollando fibras de acero recicladas, derivadas de residuos metálicos industriales, con el fin de reducir el uso de recursos y las emisiones. Estudios recientes informan una huella de carbono menor (≈ 0.8 kg CO₂/kg) para las fibras recicladas en comparación con las comerciales (≈ 1.03 kg CO₂/kg) (Biswas et al., 2024). En algunos casos incluso se ha reducido el potencial de calentamiento global (GWP) hasta en un 94% sin comprometer el rendimiento mecánico del concreto (Manso-Morato et al., 2024).

Estudios como el de Emon et al. (2017) estudiaron fibras rectas hechas de alambre de acero galvanizado para el refuerzo de concreto y los resultados mostraron que las fibras tienen propiedades compatibles con las fibras de acero industriales; además, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, los índices de tenacidad y los factores de resistencia residual del concreto reforzado con fibra de acero galvanizado mostraron una mejora significativa en comparación con el concreto simple y, en comparación con el concreto reforzado con fibras industriales, el rendimiento es bastante similar. Por otra parte, estudios como el de Carrillo et al. (2020) compararon las características de dos tipos de concreto, uno reforzado con alambre de neumáticos reciclados y el otro reforzado con fibras industriales. Los resultados indican que la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la relación de Poisson del SFRC con fibras comerciales y recicladas son comparables, de hecho, el concreto reforzado con alambre de neumáticos se comportó mejor bajo esfuerzos de compresión que el concreto con fibras industriales en cuanto a la propagación de grietas.

Además, Fauzan et al. (2017) mezclaron fibras de acero recicladas de neumáticos desechados en concreto en proporciones de 0, 0.25, 0.75 y 1%, respectivamente; probaron la resistencia a la tracción y obtuvieron que a medida que aumentaba el contenido de fibras, la resistencia a la tracción del concreto también mejoraba continuamente. Por su parte, Aiello et al. (2009) agregaron también fibras obtenidas a partir de alambre de neumáticos usados en una fracción de volumen de 0.23 y 0.46% al concreto y descubrieron que su resistencia a la flexión aumentó un 9.0 y un 15.9%, respectivamente, en comparación con el concreto simple y en otro estudio, Pajak et al. (2021) agregaron al concreto fibras de acero de desecho recuperados durante el proceso de reciclaje de neumáticos luego de finalizar su vida útil, los concretos fueron sometidos a pruebas de flexión de tres puntos, y estas demostraron que las fibras tienen un gran potencial para mejorar la resistencia residual a la tracción por flexión del concreto. Sin embargo, si bien el uso de estas fibras mejoró las propiedades mecánicas del hormigón, aún se desconoce su comportamiento en ambientes corrosivos, aspecto crucial para comprender su desempeño real en estructuras expuestas a agentes agresivos. Por ello, resulta necesario revisar los mecanismos de deterioro que afectan al concreto estructural, en particular la degradación inducida por la penetración de iones cloruro.

1.1.4 Principales tipos de deterioro del concreto estructural, degradación por cloruros

Existen diferentes ambientes degradativos a los que pueden estar expuestas las estructuras fabricadas con concreto. La degradación de este material puede ser tanto física

como química (Chen et al., 2021b), siendo los procesos físicos que los afectan, la fisuración debida a esfuerzos mecánicos (los cuales pueden ser terremotos); la erosión mecánica (la cual está provocada, por ejemplo, por la acción la arena y el agua en los muelles); las altas temperaturas y los ciclos de congelación-descongelación (Carranza et al., 2010).

Por su parte, la degradación por ataques químicos la conforman las reacciones de carbonatación del concreto, las reacciones álcali-sílice, ataque por ácidos y ataque por cloruros. La carbonatación se produce al reaccionar los compuestos básicos del concreto (hidróxido de sodio, calcio y potasio) con los compuestos ácidos del medio ambiente (dióxido de carbono y dióxido de azufre) y dando como productos carbonatos, sulfatos y agua (Grzbowski y Shah, 1990). La reacción álcali-sílice o RCA por sus siglas en inglés, es un proceso químico que involucra iones alcalinos del cemento y ciertos constituyentes silíceos en el agregado. El producto de esta reacción es un gel de sílice complejo, que se hincha al absorber agua (Abbas et al., 2014). Otro de los ataques químicos que sufren los concretos son los causados por ácidos, los cuales promueven la descomposición y disolución de las principales fases de pasta de cemento endurecido y ciertos agregados (Marcos-Meson et al., 2019). Por último, se encuentra la degradación por cloruros, la cual provoca el llamado efecto de corrosión por picadura, esto ocurre cuando se acumulan suficientes cloruros en la superficie de refuerzo y la concentración de estos excede un cierto límite conocido como contenido crítico de cloruro. Esto tiende a causar una ruptura localizada de la película pasiva, siempre que haya suficiente agua y oxígeno disponibles en la superficie del refuerzo (Yoo et al., 2020).

Específicamente, la degradación de concretos reforzados con fibra por la acción de cloruros ha sido ampliamente estudiada, esto debido a que muchas estructuras y obras civiles con este tipo de refuerzo estructural se encuentran expuestas a ambientes agresivos con elevadas concentraciones de este anión (Berrocal et al., 2015; Li et al., 2022), debido a su resistencia a este tipo de ambientes, sin embargo, en entornos complejos con altas concentraciones de iones corrosivos, como los cloruros, las fibras de acero en el SFRC presentan un mayor riesgo de corrosión debido a su composición a base de hierro, lo que aumenta la probabilidad de deterioro del concreto. Este deterioro se atribuye a la infiltración de iones cloruro (Cl^-), lo que provoca la corrosión de las fibras y una disminución de su sección transversal, lo que influye negativamente en las características mecánicas del concreto (Berrocal et al., 2015).

Ahora bien, existe la necesidad de establecer vínculos claros entre los ensayos acelerados de degradación por cloruros realizados en laboratorio y el comportamiento real del concreto reforzado con fibras de acero en ambientes naturales. Estudios recientes han demostrado que, los protocolos acelerados de degradación en el laboratorio permiten intensificar los mecanismos de corrosión y caracterizar la sensibilidad del SFRC a distintos niveles de exposición iónica (Liu et al., 2025). Por ello, diversas investigaciones han explorado los efectos de la degradación por cloruros en tres niveles: fibras, matriz de concreto y el sistema fibra-concreto.

Chen et al. (2021b) informaron que la carga dinámica del SFRC se vio afectada después de la exposición a ciclos húmedo-seco de una solución de cloruro de sodio. Según Abbas et al. (2014), la penetración de cloruros en las paredes de túneles submarinos provoca la corrosión del refuerzo, reduciendo así su capacidad de carga. Otros estudios realizados por Granju y Balouch (2005) y Carrillo et al. (2017) afirman que los entornos corrosivos pueden afectar el comportamiento a flexión del SFRC si las fibras de acero se corroen, ya que esto provoca reducciones en la carga máxima y por otra parte, el estudio de Hou et al. (2021) muestra que la resistencia residual del SFRC está estrechamente relacionada con la pérdida de masa del refuerzo, la corrosión por picaduras y el deterioro

del concreto. Estos trabajos revelan que las propiedades mecánicas de dichos elementos varían significativamente tras la exposición, aunque los resultados difieren en función de las condiciones experimentales, materiales y los tipos de fibra empleados. Esta variabilidad impide aún determinar con precisión como afecta la degradación por cloruros las características mecánicas y la integridad de los SFRC, lo cual sugiere la necesidad de análisis comparativos más rigurosos.

1.1.5 El uso de fibras en el Estado de Aguascalientes

En el Estado de Aguascalientes, las fibras para refuerzo de concreto han sido utilizadas en el pasado y continúan empleándose en diversas obras civiles en la actualidad. Un ejemplo representativo es la planta Nissan 3 (actualmente Jatco), donde se utilizaron fibras metálicas en la construcción de losas para los pisos en distintos niveles de la instalación. De manera más reciente, en la remodelación de la Avenida Siglo XXI (también conocida como Tercer Anillo), se están incorporando fibras poliméricas con el objetivo de reducir la aparición de agrietamientos en el concreto.



Figura 1.4. Ejemplos de estructuras deterioradas en Aguascalientes cuya durabilidad pudo haberse incrementado mediante el uso de concreto reforzado con fibras, a y b: hormigón proyectado para la estabilización de taludes en Ave. Siglo XXI a la altura de Col. Pintores Mexicanos, c: losa prefabricada para cableado de internet en Col. Real del Sol, d: túnel de Ave. 5 de mayo debajo de la Plaza Patria, e: Techo de edificio en la Colonia Primo verdad INEGI.

Asimismo, se proyecta que en futuras obras públicas se requerirá el uso combinado de fibras metálicas y poliméricas, dadas sus ventajas en durabilidad y desempeño estructural. Como parte de esta investigación, se identificaron diversas estructuras en la ciudad que presentan deterioro significativo y presentan un riesgo potencial para ciudadanía, algunas de ellas de construcción reciente. Se estima que, de haberse empleado concreto reforzado con fibras de acero en estas construcciones, su vida útil podría haberse prolongado notablemente. La Figura 1.4 muestra ejemplos ilustrativos de estas estructuras afectadas.

El uso de fibras en infraestructuras civiles en el estado de Aguascalientes ha sido limitado, en gran medida, por la ausencia de empresas locales dedicadas a la producción o comercialización de este tipo de materiales. Actualmente, solo se cuenta con una planta

denominada Concretos Premezclados del Centro, la cual ofrece concreto reforzado con fibras directamente desde sus instalaciones. Como consecuencia, la utilización de esta tecnología requiere adquirir las fibras desde otras regiones del país, lo que incrementa significativamente los costos asociados al transporte y almacenamiento (Meza et al., 2018), además del costo intrínseco del material, que en el caso de las fibras de acero oscila entre 55 y 78 MXN/kg (GAVIONEMEX, 2025).

Ante esta situación, resulta fundamental buscar alternativas que permitan mitigar estas barreras económicas y logísticas. Asimismo, como se ha expuesto en la sección anterior, se proyecta un crecimiento sostenido en el uso de fibras de acero para el refuerzo de concreto, lo cual implicará un mayor consumo de recursos minerales, combustibles fósiles y, en consecuencia, un incremento en la emisión de gases contaminantes derivados de su fabricación. En este contexto, el empleo de fibras no convencionales elaboradas a partir de materiales reciclados surge como una opción ambientalmente sostenible y técnica viable para reducir el impacto ambiental y los costos asociados.

Por estos motivos, en el laboratorio de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico de Aguascalientes se comenzó con la experimentación de fibras onduladas elaboradas a partir de materiales alternativos como el alambre galvanizado y el alambre recocido. Hasta este momento se han realizado pruebas de flexión de tres puntos y se determinó que las muestras de concreto reforzadas con dichas fibras tuvieron un mejor comportamiento post-fisuración que el concreto simple (Meza et al., 2019), además, se observó un ligero aumento en la tenacidad medida con valores que alcanzaron un aumento del 13% respecto a SFRC con fibras industriales y se determinó que el uso de este tipo de fibras es factible y puede conducir a una reducción significativa de hasta un 60% del costo de SFRC hecho de fibras industriales (Meza et al., 2023). En otro estudio, se emplearon fibras elaboradas a partir de alambre de neumáticos en desuso y se estudiaron las estructuras en forma de domo de concreto reforzado con fibra (FRC) en el laboratorio, analizando el rendimiento mecánico a través de la resistencia, la deformación y el modo de falla y los resultados mostraron que el comportamiento de carga-desplazamiento de los elementos abovedados aumenta con la incorporación de fibras obtenidas a partir de alambre de neumáticos, lo cual depende de la dosificación de estas y del material (Meza et al., 2024).

Cabe mencionar que el alambre galvanizado es un material fuerte y a la vez flexible, fácil de moldear, lo que lo hace muy versátil. Sus aplicaciones van desde la creación de piezas artísticas hasta su uso en agricultura, operaciones industriales, telecomunicaciones e infraestructura pública (Panel y acanalados Monterrey, 2024). Está compuesto de acero dulce derivado de varillas de acero laminadas recubiertas con una fina capa de zinc (Gelfi et al., 2017). Por su parte, el alambre recocido es un material flexible procesado mediante recocido para aliviar tensiones internas, lo que mejora su ductilidad y trabajabilidad, este se utiliza comúnmente para amarrar y estabilizar estructuras de acero en el concreto y otros materiales de construcción, así como en la agricultura, los procesos industriales y la artesanía (Aceros CREA, 2024). Finalmente, el alambre de neumáticos, el cual es extraído de las caras laterales de los neumáticos, tiene un elevado contenido de carbono que va del 0.7 al 0.95% lo que le confiere una elevada resistencia (Polyakova y Stolyarov, 2021).

Ahora bien, el empleo de fibras de acero no convencionales obtenidas a partir de materiales reciclados aún no ha sido plenamente aceptado en el ámbito técnico y científico, debido a las incertidumbres que persisten sobre su durabilidad a largo plazo. Diversas investigaciones han abordado parámetros de diseño que influyen en la durabilidad del SFRC cuando se expone a ambientes agresivos, especialmente aquellos con alta presencia de cloruros. No obstante, las metodologías aplicadas y los resultados

obtenidos presentan una considerable heterogeneidad. La mayoría de los estudios disponibles se centran en observaciones macroscópicas del compuesto completo o en procesos de deterioro localizados a nivel de fibra individual, sin establecer vínculos claros entre ambos niveles de análisis. Esta desconexión ha generado un desacuerdo general en torno a la comprensión de la durabilidad del SFRC en condiciones de exposición a cloruros. Aunque existe consenso sobre la tendencia al deterioro progresivo de las propiedades mecánicas del SFRC, todavía se discute el grado de impacto y el papel específico de la corrosión de las fibras en dicho deterioro.

En consecuencia, se requiere el desarrollo de un marco descriptivo más robusto que permita vincular el daño por corrosión en las fibras de acero con las variaciones en el desempeño mecánico del SFRC expuesto a condiciones ambientales agresivas. Por las razones antes mencionadas, en este trabajo se investigó la degradación de concretos reforzados con fibras elaboradas a partir de alambre recocido, alambre galvanizado y alambre proveniente de neumáticos en desuso en ambientes con elevadas concentraciones de cloruro.

1.3 Objetivos

Objetivo General:

- Analizar la influencia de la degradación por cloruros en el comportamiento mecánico y en la adherencia fibra-concreto de concretos reforzados con fibras de acero no convencionales, comparando su desempeño con el de concretos reforzados con fibras de acero industriales, mediante ensayos experimentales y caracterizaciones físico-químicas.

Objetivos específicos:

- Estudiar la problemática actual relacionada con la degradación de concretos reforzados con fibras de acero no convencionales en ambientes de cloruros, la influencia en sus propiedades mecánicas y sus características físicas.
- Determinar la resistencia a la corrosión de las fibras de acero no convencionales y compararla con fibras industriales y caracterizarlas antes y después de su exposición a ambientes con cloruros, utilizando técnicas de SEM, XRD y microscopía digital.
- Analizar la adherencia fibra-concreto y la resistencia a la tracción de las fibras bajo condiciones de corrosión, mediante ensayos tipo pull-out y pruebas de tracción directa en fibras degradadas y compararla con fibras industriales.
- Evaluar la influencia de la degradación de las fibras en el comportamiento mecánico del SFRC, a través de ensayos de compresión y flexión y compararlo con fibras industriales.
- Evaluar la influencia de la degradación de concretos reforzados con fibras de acero no convencionales expuestos a cloruros durante un año en la resistencia a la compresión y compararlo con fibras industriales.
- Estimar la resistencia residual a flexión a partir de la resistencia residual a compresión, con base en correlaciones obtenidas experimentalmente.
- Plantear, en base a los resultados obtenidos, futuras líneas de investigación relacionadas con la degradación de SFRC reforzados con fibras no convencionales en ambientes de cloruros.

1.4 Hipótesis

Las fibras de acero no convencionales producidas localmente a partir de alambre galvanizado, alambre recocido y alambre proveniente de neumáticos mantienen un

desempeño mecánico comparable al de las fibras de acero industriales cuando están expuestas a ambientes con cloruros, lo cual se refleja en valores similares de resistencia a tensión, adherencia fibra-matriz, resistencia a flexión y resistencia a compresión del concreto reforzado, permitiendo su utilización como refuerzo en concretos.

1.5 Justificación

El refuerzo del concreto con fibras de acero no convencionales, elaboradas localmente a partir de alambre galvanizado, recocido y de neumáticos reciclados, responde a la necesidad de mitigar los elevados costos y el impacto ambiental asociados al uso exclusivo de fibras industriales convencionales. Los procesos de corrosión inducida por cloruros representan el principal mecanismo de deterioro en estructuras de concreto expuesto a ambientes agresivos, reduciendo su durabilidad y resistencia mecánica. Aunque el SFRC industrial ha demostrado mejor desempeño frente a estos ataques en comparación con el concreto reforzado convencional, su disponibilidad limitada en Aguascalientes incrementa los costos logísticos y de transporte. Por tanto, validar que las fibras no convencionales locales presentan un comportamiento equivalente en términos de resistencia a la corrosión y capacidad mecánica (medido mediante ensayos de *pull-out*, flexión y compresión, así como caracterizaciones fisico-químicas) permitirá proponer una solución sostenible y económicamente viable para la industria de la construcción regional, optimizando recursos y reduciendo emisiones asociadas a la producción y distribución de refuerzos metálicos.

1.6 Esquema de la investigación

La Tabla 1.1 muestra un resumen de las principales investigaciones realizadas en este estudio. Las técnicas utilizadas se dividen en estudios experimentales y analíticos. Las investigaciones experimentales presentadas en esta tesis abarcan la preparación, exposición, ensayos mecánicos e inspección de fibras y de probetas de SFRC. Las fibras estudiadas fueron las elaboradas a partir de alambre galvanizado, alambre recocido y alambre de neumáticos, además de las fibras industriales Dramix® 3D, mientras que las probetas de concreto fueron de forma cúbica para los ensayos de compresión, de forma prismática para ensayos de flexión y de forma cilíndrica para el análisis de la penetración de cloruros. El análisis de los datos experimentales se fundamentó en una evaluación estadística rigurosa a lo largo de los diferentes capítulos de la tesis. Las técnicas estadísticas aplicadas siguieron una metodología uniforme, lo que permitió garantizar la comparabilidad y la validez de los resultados obtenidos.

1.7 Contribución

Las investigaciones presentadas en este proyecto contribuyeron a establecer una conexión clara entre los hallazgos de estudios previos sobre la durabilidad del SFRC en ambientes degradativos de cloruros. Esta tesis aporta un conjunto de datos experimentales con un alto nivel de detalle, abarcando aspectos mecánicos, químicos y microestructurales, apoyados por un análisis estadístico riguroso. La identificación de los mecanismos de deterioro específicos que afectan la integridad del SFRC sometido a corrosión por cloruros permitió vincular los procesos de transporte de agentes agresivos con los cambios observados en su desempeño mecánico. De este modo, los resultados obtenidos en esta investigación sirven como base para el desarrollo de herramientas de diseño orientadas a la estimación de la vida útil de nuevas estructuras de SFRC, al mismo

tiempo que proporcionan conocimientos clave para el mantenimiento, evaluación y rehabilitación de estructuras existentes expuestas a entornos con presencia de cloruros.

Tabla 1.1. Resumen de las principales técnicas de investigación utilizadas en cada capítulo. Abreviaturas: (L) datos de la literatura, (C) investigación del concreto, (F) investigación de la fibra, (F/C) investigación del material compuesto fibra-concreto.

Tipo de estudio		Capítulos			
Experimental		II	III	IV	V
Tipo de	Continua		F		
Degradación	Ciclos de inmersión y secado		F	F	F/C
Inspección visual	Microscopía digital		F		
	Rugosidad superficial		F		
	Grado de corrosión		F		
	SEM		F		
Mecánico	Tracción		F		
	<i>Pull-out</i>		F		
	Compresión			F/C	F/C
	Flexión de tres puntos			F/C	
Químico	EDS			F	
	XRD			F	
	AAS				C
Analítico					
Estadístico	Análisis exploratorio de datos	L			
	Análisis confirmatorio de datos	L			
	Meta-análisis basado en modelos de efectos mixtos	L			
	Diseño factorial		F	F/C	F/C
Modelado	Método de elementos finitos				F/C

Capítulo II. Marco teórico, influencia de variables experimentales en las propiedades mecánicas del SFRC en experimentos de degradación por cloruros

2.1 Breve reseña de los compuestos del cemento y el proceso de fraguado

El clínker es el componente principal del cemento Portland y constituye el producto intermedio obtenido durante el proceso de fabricación de este. Se forma al calcar a temperaturas cercanas a los 1450 °C una mezcla de materias primas ricas en carbonato de calcio (CaCO_3), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3). Durante la calcinación, estos compuestos reaccionan entre sí y originan una serie de fases minerales cristalinas (principalmente silicato tricálcico (C3S o alita), silicato dicálcico (C2S o belita), aluminato tricálcico (C3A) y aluminoferrito tetracálcico (C4AF)) que en conjunto constituyen el clínker (Quiroz-Portillo et al., 2023).

Durante la reacción del cemento con el agua, los distintos componentes del clínker se hidratan a diferentes velocidades, generando productos con funciones específicas en la microestructura de la pasta endurecida, por ejemplo, geles de silicato cálcico hidratado, portlandita o hidróxido de calcio (CH) y fases aluminicas. Por ejemplo, los silicatos de calcio son los principales responsables del refuerzo de la matriz mediante la formación de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), mientras que las fases aluminato/ferrito aportan reactividad temprana o efectos secundarios en el fraguado (Ahmed et al., 2023). El silicato cálcico hidratado es el producto más crítico de la hidratación en términos estructurales: actúa como la “fase aglutinante” principal, formando una red continua que une partículas de cemento hidratado, agregados y rellenos, reduciendo la porosidad e incrementando la rigidez del concreto. A medida que la hidratación progresa y el gel crece y se densifica, la microestructura se refina, los poros remanentes disminuyen y la capacidad del concreto para resistir esfuerzos mejora sostenidamente. Estudios recientes sobre la densificación del gel C-S-H a escala nanométrica han demostrado cómo su evolución contribuye a la rigidez y resistencia del material (Masoero et al., 2018).

El silicato tricálcico es la fase más rápidamente reactiva del clínker y ejerce un papel dominante en la resistencia temprana del concreto. Su hidratación produce cantidades sustanciales de C-S-H e hidróxido de calcio o portlandita (Ca(OH)_2) (Quiroz-Portillo et al., 2023). Por su parte, el silicato dicálcico reacciona más lentamente (entre 7 y 28 días), generando también C-S-H y Ca(OH)_2 , pero su contribución se manifiesta más claramente en edades medias y tardías. Debido a esta cinética lenta, el C2S es el responsable principal del incremento continuo de resistencia en el concreto más allá de los primeros días. En mezclas con proporciones de belita más elevadas, se ha observado un refuerzo progresivo del material con el paso del tiempo (Shirani et al., 2021).

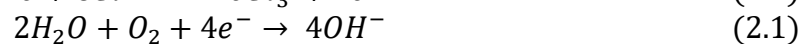
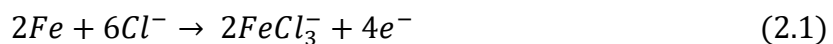
Las fases C3A y C4AF reaccionan con mayor rapidez (primeras 24 horas), liberando calor y brindando reactividad inicial. En presencia de yeso añadido en la molienda del cemento, el C3A forma ettringita al inicio, que luego puede transformarse en monosulfato. Estas fases no contribuyen de forma primaria a la resistencia mecánica, pero participan activamente en el control del fraguado, la estabilidad estructural temprana y la regulación de la velocidad de hidratación. En particular, el C3A es responsable del mayor calor de hidratación en los primeros tiempos, y el yeso añadido actúa como retardante para evitar un fraguado instantáneo (Merlo et al., 2023).

2.2 Corrosión inducida por cloruros

La corrosión es un proceso electroquímico en el cual los electrones fluyen de un ánodo (sustancia que se oxida) hacia un cátodo (sustancia que se reduce) mediante un electrolito que por lo general es una solución acuosa. Diferentes investigaciones indican que la corrosión es el principal mecanismo de degradación de las estructuras de concreto reforzado (Berrocal et al., 2017; Paul et al., 2020). Desde que se comenzó a utilizar el acero de refuerzo en concretos hasta la actualidad se ha documentado que esta es la causa fundamental de fallas estructurales, ocasionando elevados costos de monitoreo, mantenimiento y reemplazo de las estructuras de concreto reforzado (Berrocal et al., 2015). Existen varios los factores que influyen en el proceso de corrosión del refuerzo del concreto, ya que este proceso depende tanto de las características del metal corroído como del medio. Algunos de estos factores son la permeabilidad y porosidad del concreto, espesor del recubrimiento, la presencia de agentes degradativos en la pasta de concreto provenientes de las materias primas y la presencia de agentes externos como el agua (H_2O), el oxígeno (O_2) y las sales que contienen iones cloruro, por ejemplo, el cloruro de aluminio ($AlCl_3$), el cloruro de hierro ($FeCl_2$ o $FeCl_3$), cloruro de amonio (NH_4Cl) y el cloruro de sodio ($NaCl$) (Salazar-Jiménez, 2015).

Hasta el momento, el proceso de deterioro por corrosión de las fibras de acero en el SFRC no está totalmente comprendido, por lo tanto, los estudios que describen la degradación del SFRC (Marcos-Meson, 2019) los han relacionado con los modelos conceptuales utilizados para el refuerzo convencional en concreto (Tuutti, 1982). Este modelo conceptual para el refuerzo convencional describe el proceso de deterioro debido a la corrosión del acero de refuerzo en el concreto como un proceso de dos fases: la fase de iniciación y la fase de propagación (Berrocal et al., 2015, 2017), sin embargo, en su estudio Marcos-Meson, (2019) agregó una etapa crítica en la fase de propagación, que describe el punto en el tiempo en el que se alcanza el daño crítico por corrosión en las fibras de acero, esta fase se alcanza cuando la degradación ha superado los límites de seguridad funcional o estructural. Esto puede suceder por colapso de componentes, caída de recubrimiento o rotura generalizada de la estructura (ver Figura 2.1). La fase de iniciación de la corrosión se define por la despasivación localizada o general del acero. Por lo general, el concreto presenta un pH elevado (entre 12 y 14), lo que favorece la formación de una delgada y estable capa de óxidos e hidróxidos de hierro sobre la superficie del refuerzo, conocida como capa pasiva, que protege al acero contra la corrosión (Li et al., 2022a).

Sin embargo, cuando los iones cloruro penetran el concreto y alcanzan cierta concentración (conocido como límite crítico de cloruro) en la superficie del acero, comienzan a desestabilizar dicha capa al desplazar a los iones hidroxilo (OH^-), formando compuestos como el cloruro férrico que disuelve la capa pasiva (ver Figura 2.2). Este proceso produce picaduras localizadas en el acero, dejando zonas expuestas al medio agresivo (Stefanoni et al., 2018). En las zonas anódicas de la varilla de refuerzo, el hierro metálico se oxida y libera electrones, formando $FeCl_3$ (Ecuación 2.1). Simultáneamente, en las zonas catódicas, los electrones generados reducen el oxígeno disuelto en presencia de agua, regenerando iones OH^- (Ecuación 2.2). Esta combinación de reacciones mantiene activo el proceso de corrosión, estableciendo un flujo de electrones entre regiones anódicas y catódicas que acelera el deterioro localizado del acero (Ann y Song, 2007).



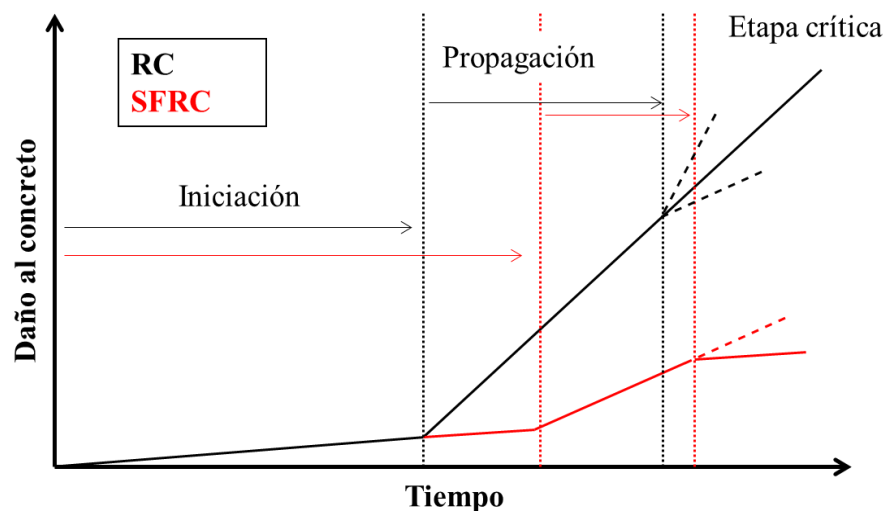


Figura 2.1. Representación del modelo conceptual de deterioro por corrosión en el concreto armado y el concreto reforzado con fibras de acero. Imagen basada en modelos conceptuales existentes para el concreto armado propuestos por Tuutti (1982).

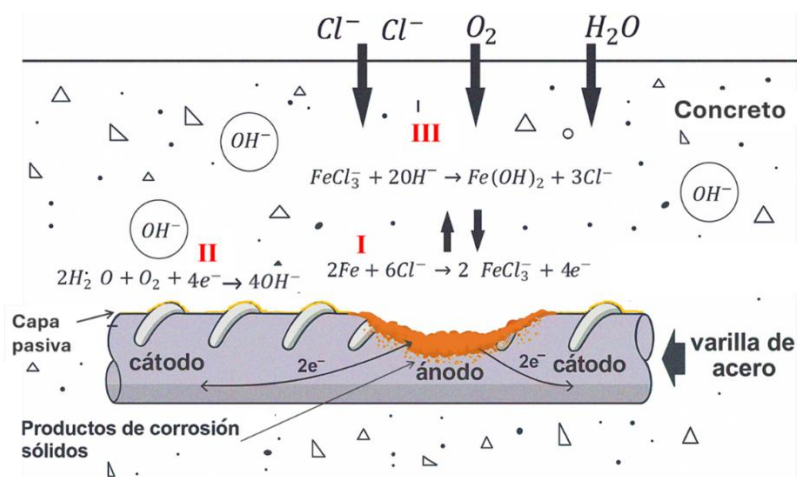
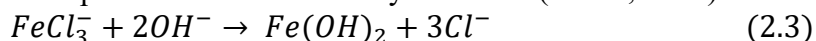


Figura 2.2. Proceso de corrosión en una barra de acero en concreto armado por la acción de cloruros. Imagen adaptada de Rivera-Corral (2016).

Es importante destacar que, en el caso del concreto reforzado con fibras de acero expuesto a cloruros, diversas investigaciones han reportado que el valor límite crítico de cloruros para la iniciación de la corrosión en las fibras puede ser de cinco a diez veces superior al de las barras de refuerzo convencionales (Mangat y Gurusamy, 1987a, Dauberschmidt, 2006). Este comportamiento ha sido atribuido a factores como la mayor homogeneidad superficial del acero de las fibras y a una interfaz acero-concreto más densa y compacta en el caso del SFRC, lo que proporciona una mayor resistencia al ingreso y acumulación de agentes agresivos (Dauberschmidt, 2006).

La segunda fase o fase de propagación de la corrosión se caracteriza por la pérdida progresiva de masa metálica y la formación de productos de corrosión a lo largo del tiempo. La velocidad y severidad de esta fase dependen de múltiples factores, entre ellos las condiciones de exposición ambiental, el contenido de humedad, la temperatura, así como la composición y la microestructura del concreto que rodea al refuerzo (Marcos-Meson, 2019). En esta etapa, los iones Fe^{2+} y OH^- precipitan como hidróxido de hierro II ($Fe(OH)_2$), el cual puede transformarse posteriormente en óxidos de hierro hidratados (Ecuación 2.3). La acumulación de estos productos de corrosión genera un aumento de

volumen significativo, lo que induce presiones internas en el recubrimiento de concreto y provoca su fisuración o desprendimiento superficial (*spalling*). Esta pérdida de integridad favorece aún más la penetración de cloruros y humedad (Tuutti, 1982).



En contraste, en el caso de las fibras de acero, no se han observado efectos estructurales relevantes en la matriz de cemento, como agrietamiento o desconchado por corrosión. Esto se debe principalmente a su menor tamaño y a la distribución dispersa de las fibras en el concreto, lo cual limita la acumulación localizada de productos de corrosión y sus efectos expansivos (Angst et al., 2011; Marcos-Meson, 2019). Basado en este análisis y en el modelo conceptual representado en la Figura 2.1 algunos autores establecen una correlación entre el daño por corrosión y la posible ruptura de la fibra durante su extracción, siempre que las fuerzas de tracción transmitidas a través de la fibra superen la capacidad resistente de su sección transversal reducida por la corrosión. En consecuencia, a nivel del compuesto, la corrosión de fibras de acero individuales puede provocar su fractura durante la apertura de fisuras, lo que conduce a una disminución progresiva de la capacidad de tracción residual del concreto reforzado con fibras de acero a lo largo del tiempo (Nordström, 2005; Marcos-Meson, 2019b).

2.3 Pérdida de las propiedades mecánicas del SFRC debido a la corrosión por cloruros, variables experimentales

2.3.1 Principales propiedades mecánicas de SFRCs afectadas por la degradación por cloruros

Según el informe ACI 544.5R-10 (2010) sobre la durabilidad del concreto reforzado con fibras, propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión y, especialmente, la tenacidad a la flexión, se consideran parámetros eficaces para evaluar el grado de corrosión en el concreto reforzado con fibras de acero. De acuerdo con esta recomendación, el presente estudio incluyó en su revisión bibliográfica tanto ensayos de flexión como de compresión, analizando propiedades mecánicas clave, entre ellas la tenacidad, el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo y la resistencia residual, las cuales han sido ampliamente reconocidas en la literatura como indicadores fundamentales del comportamiento estructural del SFRC, particularmente bajo condiciones de degradación (Becerra et al., 2023).

- *Módulo de elasticidad*

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, representa la rigidez de un material y se define como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica inicial (ver Figura 2.3). Esta propiedad es esencial en cálculos estructurales relacionados con la deformabilidad, el asentamiento y la rigidez general, siendo especialmente relevante en concretos de alta resistencia y en estructuras de gran altura (Gul, 2014). En el caso del concreto reforzado con fibras de acero, se ha demostrado que la incorporación de fibras metálicas incrementa significativamente el módulo de elasticidad en comparación con el concreto convencional, debido a su efecto de puenteo y mejora de la interfaz matriz-refuerzo. Esta mejora favorece la capacidad del material para resistir deformaciones sin alcanzar daño irreversible, lo cual es fundamental para el comportamiento estructural en condiciones de carga (Wang et al., 2022).

No obstante, el ataque por cloruros puede afectar negativamente esta propiedad. Por ejemplo, bajo ciclos de inmersión y secado en soluciones salinas, se ha observado

una reducción del 2.40% en el módulo elástico dinámico de concretos después de 60 ciclos (Wang et al., 2024). Asimismo, estudios realizados en segmentos de túneles sumergidos mostraron una disminución del 42% en la resistencia máxima y del 46.1% en el módulo de elasticidad como consecuencia de la exposición prolongada a cloruros, evidenciando el impacto significativo de estos agentes en la integridad mecánica del concreto (Guo et al., 2021).

- *Esfuerzo máximo*

El esfuerzo máximo, también denominado carga última o capacidad portante máxima, es una propiedad clave en SFRC, definida como la magnitud máxima de carga que puede soportar un elemento antes de experimentar deformaciones permanentes o daño estructural irreversible (ver Figura 2.3) (Kaur et al., 2014). En condiciones de ataque por cloruros, esta propiedad se ve claramente afectada. Revisiones recientes indican que la capacidad de carga máxima disminuye significativamente con el aumento de la corrosión: en vigas reforzadas con fibras y barras, se observó una reducción de hasta un 28.7% respecto a especímenes no corroídos; sin embargo, los valores de degradación fueron menores en SFRC que en concreto armado convencional (RC) sin fibras (Bajić et al., 2025). La investigación de Fernandes y Neves (2024) confirma que bajo condiciones de corrosión severa (como corrientes parásitas o altas concentraciones de cloruros), la prestación a flexión del SFRC puede disminuir hasta un 80%, evidenciando cómo la pérdida de sección de las fibras y su transición de deslizamiento a fractura comprometen la carga máxima del material. Finalmente, estudios de campo y laboratorio han demostrado que mientras mayor sea el nivel de corrosión (por ejemplo, 6%, 10%, 16% de pérdida de masa en acero de refuerzo), menor será la carga de falla alcanzada en pruebas de flexión a cuatro puntos, reduciéndose progresivamente conforme aumenta la exposición a ambientes de cloruros (Hou et al., 2021).

- *Ductilidad*

La ductilidad en estructuras de concreto se define como la capacidad de un elemento para experimentar grandes deformaciones inelásticas antes de la falla. La ductilidad se refleja en la capacidad post-fisura de flexión, donde las fibras controlan la formación de grietas y permiten que el material soporte deformaciones adicionales sin pérdida inmediata de resistencia (ACI 544.1R96, 1996). Este es un parámetro importante para representar la capacidad de deformación de los elementos estructurales, ya que una mayor ductilidad se traduce en deformaciones visibles antes del colapso estructural, lo que es clave en la seguridad, este comportamiento dúctil permite redistribuir momentos y evitar fallos repentinos en miembros flexionados (Hou et al., 2021; Obeidah et al., 2025). Estudios experimentales muestran que el uso de fibras de acero incrementa significativamente la capacidad de deformación plástica (ductilidad), lo que alarga la vida útil estructural y mejora la resistencia a cargas extremas (Kafaji y Azzawi, 2023).

Por otro lado, diversos estudios han evidenciado que la degradación por cloruros afecta la ductilidad del SFRC. Hassanvand et al. (2023) realizaron ensayos de flexión a cuatro puntos en vigas de concreto pretensado con fibras corroídas, observando que, a medida que aumentó el nivel de corrosión, se redujeron tanto la carga máxima como la ductilidad. De forma similar, Fernandes y Neves (2024) reportaron en ensayos de flexión a cuatro puntos que la corrosión de las fibras disminuye la capacidad residual en flexión y la ductilidad conforme se incrementa el daño por cloruros. Por su parte, Bajić et al. (2025) señalaron que, aunque la pérdida de ductilidad en concretos reforzados con fibras

fue menor que en el concreto reforzado convencional, la corrosión ocasionó una disminución en esta propiedad y modificó el modo de falla de las probetas.

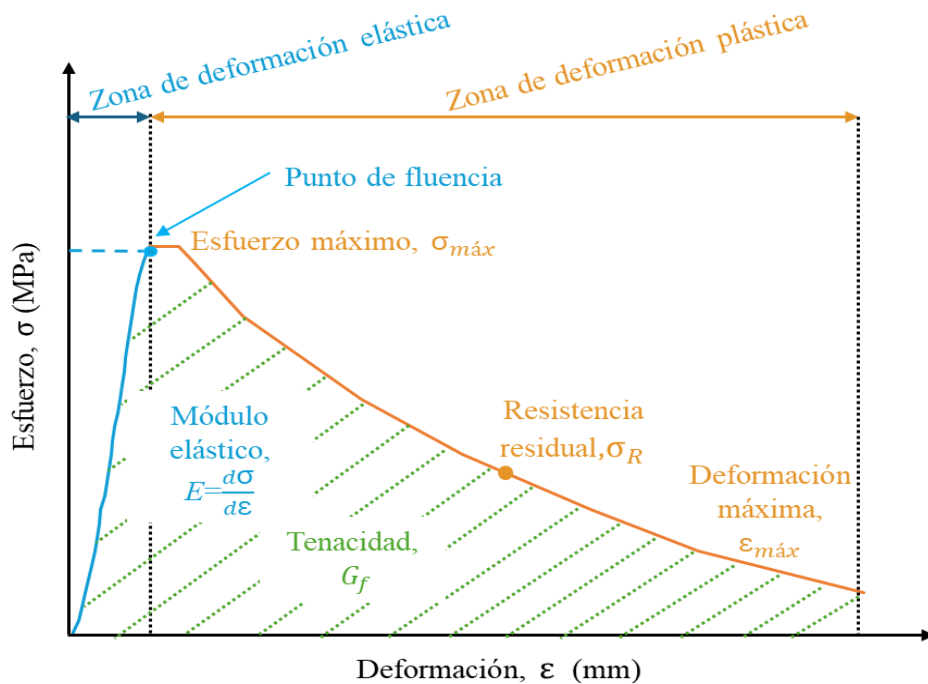


Figura 2.3. Curva ilustrativa de esfuerzo-deformación para ensayos de compresión y flexión de SFRCs. Fuente: elaboración propia.

- *Tenacidad*

La tenacidad es una propiedad esencial del concreto reforzado con fibras de acero, ya que representa su capacidad para absorber energía durante la deformación progresiva hasta alcanzar la fractura (ver Figura 2.3). En términos mecánicos, indica cuánta energía puede disiparse mediante el puenteo de grietas por las fibras, retardando el colapso frágil del material y mejorando su comportamiento post-fisura (Xu et al., 2025). Dicho concepto se puede representar gráficamente como el área bajo la curva carga-deformación (ver figura 2). En su estudio Koo et al. (2023), confirman que la tenacidad bajo cargas de flexión y la capacidad de absorción de energía aumentan con el contenido y la resistencia de tracción de las fibras, alcanzando mejoras de hasta 139% en capacidad de absorción de energía respecto al concreto sin fibras. Por otro lado, Marcos-Meson et al. (2020d) observaron que en SFRC fisurado expuesto a ciclos húmedo-seco de cloruros hasta dos años, la tenacidad tiende a conservarse, incluso si ocurre corrosión localizada en fibras dentro de grietas. En estas condiciones, la degradación de la fibra que afecta la tenacidad resulta secundaria, aunque estadísticamente significativa, comparada con la distribución y contenido de fibras, y en otro estudio realizado por los mismos autores (Marcos-Meson et al., 2020a) respaldan las hipótesis que sugieren que el daño por corrosión de las fibras de acero podría no ser el único mecanismo responsable del deterioro observado en el SFRC agrietado expuesto a ambientes corrosivos y que el fortalecimiento de la unión fibra-matriz con el tiempo puede conllevar una disminución de la tenacidad a la tracción del compuesto debido a la rotura de las fibras.

- *Resistencia residual*

Según Kaur et al., (2012), la resistencia residual está representada por la carga promedio posterior a la fisuración que un material puede soportar durante un intervalo de deflexión específico. Por lo tanto, se puede definir a la resistencia residual como la capacidad que poseen los SFRC de soportar cargas luego de la aparición de la primera fisura a causa de una fuerza exterior (ver Figura 2.3). La capacidad de carga residual de vigas de concreto corroídas, es un índice importante para la evaluación de la seguridad estructural. Los estudios experimentales indican que esta 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 (Hou et al., 2021).

La resistencia residual es una propiedad clave del SFRC, definida como la carga promedio que el material puede soportar después de la fisuración, dentro de un rango específico de deflexión (Kaur et al., 2014). En otras palabras, refleja la capacidad del SFRC de seguir soportando carga tras la aparición de la primera grieta bajo tensión externa. Un estudio empírico reciente (Jin et al., 2025) basado en una base de datos de 887 ensayos prismáticos mostró que la resistencia a la flexión residual está fuertemente influenciada por el contenido de fibra, la resistencia a la tracción de la fibra y las características del concreto (resistencia a la compresión), lo que afecta directamente la capacidad residual tras la fisuración. Este índice es esencial para evaluar la seguridad estructural de elementos de concreto corroídos. La capacidad de carga residual de vigas expuestas a ambientes con cloruros está íntimamente relacionada con la pérdida de masa del refuerzo, la corrosión por picaduras y la degradación de la adherencia fibra-concreto, especialmente ante una elevada tasa de corrosión (Hou et al., 2021).

2.3.2 Variables experimentales

Las investigaciones previas sobre la durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero han considerado una amplia gama de parámetros de diseño, tales como la relación agua/cemento, el volumen de fibras, la concentración de cloruros, el tiempo de exposición a ambientes agresivos, la forma de degradación (inmersión continua o ciclos de mojado y secado), la presencia o no de grietas y las cargas durante la degradación (Becerra et al., 2023). Esta diversidad de variables experimentales complica la comparación directa entre estudios y limita la formulación de conclusiones consistentes. No obstante, su análisis resulta indispensable para obtener una visión integral del estado del arte, identificar vacíos de conocimiento y definir con mayor precisión los objetivos de investigación.

- *Relación agua-cemento*

Una de las variables más estudiadas en la durabilidad del concreto es la relación agua/cemento (W/C), la cual incide directamente en los procesos corrosivos de la estructura. A medida que aumenta el contenido de agua en la mezcla, se incrementa la porosidad capilar de la matriz del concreto, lo que facilita la penetración de agentes agresivos como los iones cloruro. Además, un mayor contenido de agua implica una humedad interna elevada, que actúa como electrolito y favorece la oxidación de las fibras de acero (Paul et al., 2020). Según Granju y Balouch (2010), en concretos con relaciones agua/cemento altas (0.78), las fibras ubicadas a profundidades menores de 1 mm presentan signos evidentes de corrosión. En cambio, al reducir dicha relación, disminuye también la profundidad mínima requerida para evitar la corrosión de las fibras. En otro estudio (Yang et al., 2022) analiza el efecto de la relación W/C en la penetración de

cloruros y la integridad de las fibras metálicas del SFRC. Los resultados muestran que, aunque hubo manchas de óxido en la superficie, las fibras internas permanecieron intactas incluso con profundidades de penetración mayores a 20 mm.

- *Volumen de fibras*

Otra variable ampliamente estudiada es la cantidad de fibras utilizadas en la elaboración del concreto, la cual se expresa como el porcentaje en volumen de fibras respecto al volumen total del mortero de concreto. La influencia del contenido de fibras en la durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero ha sido ampliamente documentada en la literatura. Un contenido moderado, en torno al 1.5% en volumen, puede mejorar la resistencia dinámica y favorecer mayores deformaciones residuales tras la exposición a cloruros, debido al efecto de densificación en la interfaz acero-concreto (Bai et al., 2009). No obstante, dosis elevadas de fibras pueden provocar aglomeraciones, dificultar la trabajabilidad y aumentar la porosidad interna del material, lo cual reduce su capacidad para resistir ataques químicos y procesos de degradación (Liu et al., 2025).

- *Concentración de cloruros*

Además de las variables anteriormente descritas, la concentración de cloruros en la solución de degradación ejerce un control decisivo sobre la corrosión de las fibras y, por ende, sobre las propiedades mecánicas del SFRC. En concreto convencional reforzado, las normas de la Asociación Americana del Concreto (ACI) y estudios de la Administración Federal de Carreteras - Investigación y Tecnología (FHWA) sugieren que el contenido total de cloruros solubles no debería superar el 0.4% - 0.6% en peso (0.4% w/w – 0.6% w/w) de cemento para evitar la iniciación de la corrosión (FHWA-HRT-12-067, 2012). Para el SFRC, varios autores han encontrado que su tolerancia al cloruro es aún mayor. Por ejemplo, Berrocal et al. (2013) revisaron el estado del arte y señalaron que los límites críticos de cloruro pueden llegar hasta el 1.7% para SFRC antes de iniciar la corrosión de las fibras, mientras que otro estudio realizado por Raupach et al. (2004) señala que este porcentaje puede llegar a ser hasta de 4.5%. Estos datos confirman que el SFRC soporta concentraciones de cloruro sustancialmente superiores a las permitidas para el concreto reforzado con varillas, gracias a la densificación de la interfaz fibra-matriz y al reducido diámetro de las fibras, que limitan la formación de zonas corrosivas.

- *Tiempo de degradación*

El tiempo de exposición a ambientes agresivos es una de las variables determinantes más influyentes en la degradación de SFRC, y como se vio anteriormente, este proceso puede comprenderse a través de dos etapas clave: la iniciación, que consiste en el tiempo que tardan los cloruros en alcanzar la superficie del acero y causar la pérdida de la pasivación; y la propagación, en la cual la corrosión avanza activamente, provocando cambios estructurales como reducción de la sección de acero, fisuración del recubrimiento y pérdida de adherencia (Tuutti, 1982). Evidentemente, a mayor tiempo expuesto, mayor es el daño en las fibras de acero, algunos estudios recientes validan esta relación tiempo-daño. Por ejemplo, en su estudio Akduman (2025) reporta diferencias significativas entre el tiempo de inicio de corrosión en SFRC (~137 días) y el de propagación (hasta varios años), lo que demuestra que prolongar la exposición incrementa el deterioro estructural y la reducción de capacidad mecánica del concreto. Por otra parte, en su estudio Leung y Hou (2015) demostraron que el uso de fibras de acero en el concreto

mejora significativamente la durabilidad estructural. En particular, concluyeron que la vida útil de una viga de SFRC puede aumentar entre un 58% y un 154% en comparación con vigas de concreto armado convencional, subrayando el potencial del SFRC para extender el tiempo de servicio en entornos altamente degradativos.

- *Corrosión acelerada*

Cabe destacar que el proceso de corrosión en fibras embebidas en concreto suele ser lento y progresivo, y en condiciones naturales pueden transcurrir varios años antes de que los efectos de la degradación sean claramente apreciables (Tang y Wilkinson, 2020; Taqi et al., 2021), por este motivo muchos investigadores optan por emplear métodos de degradación acelerados. Uno de estos procedimientos consiste en acelerar el proceso de corrosión mediante corriente eléctrica, la cual es una alternativa experimental válida para investigaciones que requieren resultados en menor tiempo, sin embargo, en el presente estudio no se consideraron las investigaciones que utilizaron métodos de corrosión acelerada mediante corriente eléctrica, dado que estos pueden alterar el mecanismo natural de degradación. En su lugar, se optó por procedimientos más representativos del entorno real, como los ciclos de mojado y secado en soluciones salinas, con el fin de simular de manera más precisa las condiciones de ataque por cloruros en estructuras expuestas a ambientes marinos o de alta salinidad. Este método consiste en sumergir los especímenes de concreto en soluciones de NaCl durante un período determinado, seguido de una fase de secado controlado. El ciclo se repite una cantidad establecida de veces para emular el efecto acumulativo del ingreso de cloruros a lo largo del tiempo. Diversos estudios han demostrado que esta metodología reproduce de manera efectiva un entorno altamente desfavorable para el SFRC, permitiendo evaluar con mayor realismo la progresión de la corrosión inducida por cloruros (Balouch et al., 2010).

- *Ancho de fisuras*

En diversos estudios sobre la degradación del concreto reforzado con fibras de acero, puestos a prueba en ensayos de flexión, se ha optado por crear fisuras controladas en el concreto antes de la degradación, con el fin de acelerar los procesos de corrosión y obtener resultados en períodos más cortos. En este contexto, el ancho de fisura es una variable crítica para considerar, ya que las grietas actúan como canales preferenciales para el ingreso de agentes agresivos hacia el interior de la matriz cementicia (Berrocal et al., 2015). Los resultados disponibles indican que, por debajo de ciertos umbrales de apertura, las fisuras no alteran significativamente el comportamiento del SFRC. Por ejemplo, Hou et al. (2021) demostraron que el coeficiente de difusión de cloruros es comparable en SFRC no fisurados y en especímenes con fisuras menores a 0.2 mm. En cambio, otros estudios que evaluaron grietas de aproximadamente 0.3 mm reportaron daños sustanciales por corrosión de las fibras de acero cuando los especímenes fueron sometidos a inmersión parcial o ciclos húmedo-seco con cloruros, lo que derivó en una reducción considerable de la resistencia residual a la tracción (Mangat y Gurusamy, 1987b; Nordström, 2005). Asimismo, Leung y Hou (2015) analizaron el impacto de las fisuras en el proceso de iniciación de la corrosión en SFRC, confirmando que la presencia de grietas acelera notablemente esta etapa, al facilitar el transporte de iones cloruro. Estos resultados muestran la importancia de controlar la fisuración en estructuras reforzadas con fibras expuestas a ambientes agresivos.

- *Corrosión bajo tensión*

Las estructuras de SFRC expuestas a ambientes degradativos y sometidas a cargas mecánicas, ya sean de compresión o flexión, pueden experimentar un deterioro significativo en sus propiedades debido a la acción combinada de la corrosión y la carga. Esta interacción puede intensificar los procesos de daño, comprometiendo la integridad y la durabilidad del material (Hou et al., 2021). Existe un fenómeno conocido como "corrosión bajo tensión", el cual describe la fractura frágil de un material dúctil (como el acero) cuando se encuentra bajo la influencia simultánea de un medio corrosivo y una carga de tracción. En estas condiciones, el material puede fallar a tensiones considerablemente inferiores a las esperadas en condiciones no agresivas, como lo describe (Carranza et al., 2010). Aunque el efecto específico de las cargas aplicadas durante la degradación de SFRC aún no se comprende completamente, diversos estudios han evidenciado su influencia.

Por ejemplo, Li et al. (2018) observaron que los efectos combinados de la carga sostenida y la duración del proceso de corrosión resultan ser considerablemente más severos que los efectos individuales de cada uno de estos factores sobre el comportamiento estructural de las vigas de concreto. Se observó que, a medida que se incrementa el nivel de carga sostenida aplicada durante la exposición corrosiva, tanto la resistencia máxima como la ductilidad estructural se reducen notablemente conforme aumenta el tiempo de exposición al ambiente agresivo. Asimismo, un estudio reciente de Bajić et al. (2025) reportó que, en elementos fisurados expuestos a cargas externas y a ambientes con cloruros, se produjo una degradación funcional acelerada del SFRC, en comparación con especímenes sin carga aplicada. Esto evidencia que la carga, al actuar en conjunto con el proceso corrosivo, modifica los mecanismos de deterioro y agrava la pérdida de propiedades estructurales. Por estas razones, en esta investigación se considera fundamental analizar y comparar estudios donde se haya evaluado el comportamiento del SFRC bajo carga mecánica durante su exposición a entornos corrosivos, ya que representan condiciones reales de servicio a las que podrían enfrentarse las estructuras en campo.

2.4 Influencia de variables experimentales en las propiedades de flexión y de compresión del SFRC en experimentos de degradación por cloruros

En este análisis bibliográfico se tomaron como modelo de estudio los ensayos de flexión y de compresión en SFRC, ya que los esfuerzos de flexión y de compresión representan una de las condiciones de carga más habituales en elementos estructurales como lo son losas, vigas, segmentos de túneles y pavimentos. Medir el comportamiento a flexión y a compresión de probetas de SFRC proporciona información práctica sobre sus propiedades mecánicas, como lo son el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo, la ductilidad, la tenacidad y la resistencia residual, variables, que como se vio anteriormente son esenciales para la seguridad y vida útil de una estructura (Vijayan et al., 2022) y todas ellas están directamente relacionadas con la contribución de las fibras al desempeño del material (de Carvalho y de Melo, 2025). Por estos motivos, varios autores recomiendan los ensayos de flexión y de compresión como indicadores fiables de durabilidad y rendimiento post-fisura para fibras metálicas; por tanto, su elección favorece la comparabilidad con estudios previos y normas técnicas (EN 14651, 2005; Fernandes y Neves, 2024; Praseetha et al., 2025). Además, esta investigación está enfocada en la degradación de SFRC por cloruros, por lo que la corrosión de las fibras modifica la

adherencia fibra-matriz, la tenacidad y la capacidad residual del concreto; por lo tanto, las pruebas de flexión y de compresión son las más indicadas para evaluar el desempeño post-fisura y la efectividad de las fibras para evitar la propagación de grietas, ya que las fibras están diseñadas para controlar grietas y mantener la carga después de la fisuración (Frazão et al., 2015; Hou et al., 2021).

2.4.1 Descripción del programa experimental

En primer lugar, se identificaron las variables experimentales más comunes utilizadas en los estudios sobre la degradación del SFRC por cloruros. Estas variables, analizadas en el epígrafe anterior, se relacionan con ensayos de flexión y compresión realizados tras la degradación por cloruros y afectan directamente las propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo, la ductilidad, la tenacidad y la resistencia residual del concreto (ver Figura 2.4). Para la búsqueda, se consideraron los siguientes criterios: investigaciones que emplearon exclusivamente fibras de acero; estudios que incluyeron degradación por cloruros, aunque hubiera otros tipos de degradación; reportes de variación en al menos una de las cuatro propiedades mecánicas mencionadas; y la existencia de un grupo de control para calcular el efecto.

Es importante señalar que esta revisión no consideró los siguientes aspectos a la hora de realizar la búsqueda bibliográfica debido a la alta variabilidad de estos factores entre estudios:

- La proporción ni el tipo de materiales utilizados en la elaboración del concreto (relación agregados-cemento, granulometría de los agregados).
- Las propiedades de la matriz de concreto (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, contenido de adiciones como cenizas o sílice)
- El tipo de fibra de acero (lisa, corrugada, reciclada de neumáticos, galvanizada, Dramix, etc.) o la calidad ni la geometría de las fibras de acero (longitud, diámetro, relación de aspecto, forma de anclaje)
- Las condiciones ambientales de operación (temperatura, ciclos de humedad-sequedad, presencia de oxígeno).
- Las dimensiones de las probetas ensayadas, ni el método de aplicación de la carga en los ensayos de flexión (tres puntos, cuatro puntos, pretensado).

En su lugar, se procuró la selección de variables experimentales comunes y comparables.

El objetivo principal del estudio fue conocer la influencia de la variación de las principales variables experimentales sobre las propiedades mecánicas del SFRC degradado por cloruros. Así, se buscó identificar qué factores (relación agua/cemento, volumen de fibras, tiempo de degradación, concentración de cloruros, corrosión bajo tensión, corrosión acelerada y ancho de fisuras) ejercen un efecto predominante en las propiedades mecánicas y, en consecuencia, en la durabilidad y desempeño estructural del SFRC. Los resultados se obtuvieron a partir de la información reportada en cada una de las investigaciones consultadas.

En algunos casos, los valores de las propiedades mecánicas se encontraban explícitamente descritos en el cuerpo del documento; sin embargo, en muchas ocasiones fue necesario realizar un trabajo de extracción y cálculo. Así, se procedió a digitalizar datos contenidos en tablas y figuras proporcionadas por los autores y, cuando la información no estaba disponible de forma directa, se calcularon las propiedades requeridas empleando fórmulas establecidas, así como metodologías derivadas de la literatura. Este proceso implicó un análisis minucioso, la verificación cruzada de resultados y la normalización de criterios para garantizar la comparabilidad entre estudios.

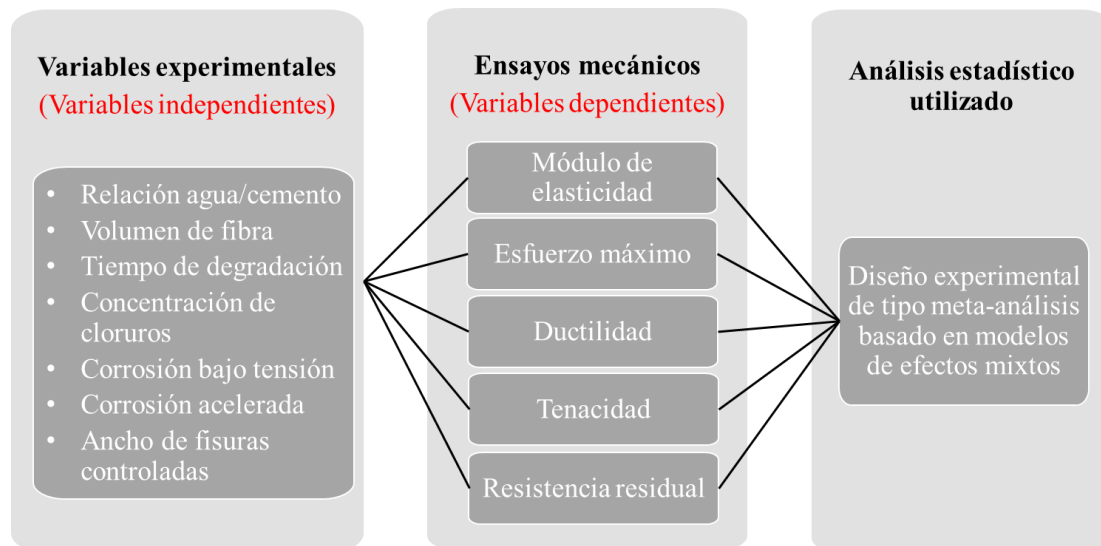


Figura 2.4. Esquema representativo del procedimiento de análisis estadístico utilizado en la investigación.

En este estudio se utilizó un diseño experimental de tipo meta-análisis basado en modelos de efectos mixtos. Se recopilaban datos de concretos reforzados con fibras de acero sometidos a degradación por cloruros en ensayos de flexión y de compresión. Esta estrategia permitió integrar resultados heterogéneos de múltiples estudios, considerando tanto las variables relacionadas con la mezcla y el refuerzo, como las propiedades mecánicas resultantes. Se adoptó un modelo de efectos mixtos para tener en cuenta las diferencias sistemáticas entre estudios, incorporando como efecto aleatorio cada estudio investigado y como efectos fijos las variables experimentales. Esta aproximación es adecuada cuando los datos no provienen de un diseño experimental controlado único, sino de múltiples fuentes con distintos tamaños de muestra y configuraciones. El procesamiento estadístico se realizó en Minitab 22, utilizando el módulo “Modelo de efectos mixtos” con el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML) y la corrección de Kenward-Roger para los grados de libertad. Esta combinación proporciona estimadores más robustos y control del error tipo I al comparar efectos fijos en diseños desbalanceados. Este enfoque metodológico permitió evaluar de manera la influencia relativa de cada variable sobre las propiedades mecánicas del SFRC degradado por cloruros, así como comparar y contextualizar los resultados con la literatura existente.

2.4.2 Propiedades de flexión evaluadas en experimentos de degradación por cloruros

La Tabla 2.1 resume la base de datos utilizada, construida a partir de la recopilación sistemática de resultados publicados sobre SFRCs sometidos a degradación por cloruros. Se incluyen tanto variables experimentales como las propiedades mecánicas derivadas de los ensayos de flexión. Todas las variaciones se expresan respecto a muestras de control sin degradación.

Tabla 2.1. Relación datos degradación de SFRC sometidos a esfuerzos de flexión extraídos de la bibliografía. *Rac*: relación agua/cemento, *Vf*: volumen de fibras, *Td*: tiempo de degradación, *Cc*: concentración de cloruros, *Ct*: corrosión bajo tensión, *Ca*: corrosión acelerada, *Af*: ancho de fisura, *Vem*: variación del esfuerzo máximo, *Vd*: variación de la ductilidad, *Vt*: variación de la tenacidad y *Vrr*: variación de la resistencia residual. Todas las variaciones se tomaron respecto a una muestra de control que no se degradó. Los valores entre paréntesis de la columna *Ct* corresponden al porciento de carga aplicado respecto a la resistencia máxima de flexión. N/A representa que el valor numérico de la variable no fue proporcionado en el estudio o bien no pudo ser calculado.

<i>Estudio</i>	<i>Rac</i>	<i>Vf</i> (%)	<i>Td</i> (días)	<i>Cc</i> (% w/w)	<i>Ct</i> (kN)	<i>Ca</i>	<i>Af</i> (mm)	<i>Vd</i> (%)	<i>Vem</i> (%)	<i>Vt</i> (%)	<i>Vrr</i> (%)
Nguyen et al. (2018)	0.54	1.50	803	3.5	0.00	No	0.00	N/A	N/A	N/A	28.79
Nguyen et al. (2018)	0.54	1.50	803	3.5	54.0	No	0.00	N/A	N/A	N/A	42.28
Nguyen et al. (2018)	0.54	1.50	803	3.5	89.0	No	0.14	N/A	N/A	N/A	66.62
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	365	3.5	0.00	Si	0.15	N/A	5.45	N/A	9.41
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	365	3.5	0.00	Si	0.30	N/A	-22.14	N/A	-18.87
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	365	7.0	0.00	Si	0.15	N/A	-1.92	N/A	2.35
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	365	7.0	0.00	Si	0.30	N/A	-32.82	N/A	-33.96
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	730	3.5	0.00	Si	0.15	N/A	3.25	9	-11.30
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	730	3.5	0.00	Si	0.30	N/A	16.01	-10	1.64
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	730	7.0	0.00	Si	0.15	N/A	-21.75	33	-7.83
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.20	730	7.0	0.00	Si	0.30	N/A	17.20	-19	12.30
Michel et al. (2013)	0.43	0.50	24	3.0	0.00	No	0.07	-17.40	N/A	N/A	26.44
Michel et al. (2013)	0.43	1.00	24	3.0	0.00	No	0.07	-5.14	N/A	N/A	20.39
Berrocal et al. (2017)	0.47	0.50	27	3.5	0.00	No	0.00	-17.10	1.29	N/A	17.98
Berrocal et al. (2017)	0.47	0.50	97	3.5	0.00	No	0.00	-23.13	-23.56	N/A	19.10
Bui et al. (2021)	0.50	1.00	28	3.0	0.00	No	0.00	-8.16	2.66	N/A	29.59
Bui et al. (2021)	0.50	1.50	28	3.0	0.00	No	0.00	N/A	1.30	N/A	19.39
Bui et al. (2021)	0.50	2.00	28	3.0	0.00	No	0.00	4.66	0.86	N/A	16.33
Yoo et al. (2020)	0.20	2.00	30	3.5	0.00	Si	0.00	6.9	-2.1	N/A	0.0
Yoo et al. (2020)	0.20	2.00	60	3.5	0.00	Si	0.00	0.0	2.0	N/A	-11.9
Yoo et al. (2020)	0.20	2.00	90	3.5	0.00	Si	0.00	-2.8	20.1	N/A	-11.0
Yoo et al. (2020)	0.20	2.00	120	3.5	0.00	Si	0.00	-36.4	-2.9	N/A	-38.3

Tabla 2.1. Relación datos degradación de SFRC sometidos a esfuerzos de flexión extraídos de la bibliografía. *Rac*: relación agua/cemento, *Vf*: volumen de fibras, *Td*: tiempo de degradación, *Cc*: concentración de cloruros, *Ct*: corrosión bajo tensión, *Ca*: corrosión acelerada, *Af*: ancho de fisura, *Vem*: variación del esfuerzo máximo, *Vd*: variación de la ductilidad, *Vt*: variación de la tenacidad y *Vrr*: variación de la resistencia residual. Todas las variaciones se tomaron respecto a una muestra de control que no se degradó. Los valores entre paréntesis de la columna *Ct* corresponden al porcentaje de carga aplicado respecto a la resistencia máxima de flexión. N/A representa que el valor numérico de la variable no fue proporcionado en el estudio o bien no pudo ser calculado (Continuación).

<i>Estudio</i>	<i>Rac</i>	<i>Vf</i> (%)	<i>Td</i> (días)	<i>Cc</i> (% w/w)	<i>Ct</i> (kN)	<i>Ca</i>	<i>Af</i> (mm)	<i>Vd</i> (%)	<i>Vem</i> (%)	<i>Vt</i> (%)	<i>Vrr</i> (%)
Bernard (2004)	0.50	1.50	210	3.5	0.00	No	0.10	N/A	-22.94	-6.7	-37.50
Bernard (2004)	0.50	1.50	420	3.5	0.00	No	0.10	N/A	-21.06	-49.8	N/A
Bernard (2004)	0.50	1.50	720	3.5	0.00	No	0.10	N/A	-27.65	-25.2	N/A
Bernard (2004)	0.50	1.50	210	3.5	0.00	No	1.00	N/A	-4.93	-23.7	N/A
Bernard (2004)	0.50	1.50	420	3.5	0.00	No	1.00	N/A	-18.89	-34.8	N/A
Bernard (2004)	0.50	1.50	720	3.5	0.00	No	1.00	N/A	-30.86	-49.3	N/A
Hou et al. (2021)	0.47	0.75	72	3.5	6.8 (10%)	Si	0.00	22.8	-15.8	N/A	-8.5
Hou et al. (2021)	0.47	0.75	72	3.5	13.6 (20%)	Si	0.06	1.5	-19.0	N/A	-8.1
Hou et al. (2021)	0.47	0.75	72	3.5	20.4 (30%)	Si	0.09	22.1	-16.8	N/A	-12.9
Hou et al. (2021)	0.47	0.75	72	3.5	27.2 (40%)	Si	0.12	9.4	-23.9	N/A	-12.2
Hou et al. (2021)	0.47	0.75	72	3.5	34.0 (50%)	Si	0.14	-1.3	-23.2	N/A	-13.5
Frazão et al. (2021)	0.43	1.00	90	3.5	0.00	Si	0.50	37.5	0.0	N/A	46.7
Frazão et al. (2021)	0.43	1.00	90	3.5	0.00	Si	1.00	54.7	8.1	N/A	50.0
Hassanvand et al. (2023)	0.38	0.5	365	5.0	0.00	Si	0	-5.0	-5.9	-3.8	N/A
Hassanvand et al. (2023)	0.38	0.5	730	5.0	0.00	Si	0	-22.2	-16.5	-43.8	N/A
Hassanvand et al. (2023)	0.38	0.5	365	5.0	0.00	Si	0	-5.0	-5.9	-3.8	N/A
Hassanvand et al. (2023)	0.38	0.5	730	5.0	0.00	Si	0	-22.2	-16.5	-43.8	N/A
Hassanvand et al. (2023)	0.38	0.5	1095	5.0	0.00	Si	0	-15.5	-20.1	-48.8	N/A
Hassanvand et al. (2023)	0.38	1.0	365	5.0	0.00	Si	0	-9.6	-4.7	-59.4	N/A

- *Variación del esfuerzo máximo (Vem)*

Para esta variable el ajuste fue adecuado ($R^2 = 83.4\%$, R^2 ajustado ($R^2(aj.)$) = 78.8%). El componente aleatorio “Estudio” explicó un 16.7% de la variabilidad total en Vem y su efecto no fue estadísticamente significativo ($p = 0.339$). Esto indica que las diferencias entre investigaciones aportaron solo una fracción menor de la dispersión observada, mientras que la mayor parte (83.3%) se atribuye al error residual, lo que significa que la mayor parte de la variabilidad en Vem no está asociada a diferencias entre estudios, sino a factores internos no captados por las variables del modelo, lo que indica que la base de datos es relativamente homogénea, es decir, que las observaciones procedentes de diferentes estudios presentan un comportamiento similar.

En el análisis de efectos fijos, las variables que resultaron estadísticamente significativas fueron el tiempo de degradación y la concentración de cloruros (Tabla 2.2), ambas con coeficientes (coef.) negativos ($F = 13.81$, $p = 0.003$, coef. = -10.04 ; $F = 7.04$, $p = 0.013$, coef. = -5.83 , respectivamente). Esto refleja que un mayor tiempo de exposición y un mayor contenido de cloruros se asocian con una disminución progresiva del esfuerzo máximo respecto al control. Por su parte, el volumen de fibras mostró un efecto protector positivo de carácter marginal ($F = 4.61$, $p = 0.077$, coef. = $+6.67$), lo que sugiere una atenuación parcial de la pérdida de resistencia pico con el incremento de fibras. El resto de predictores y la interacción evaluada no alcanzaron significancia estadística ($p > 0.05$), lo que indica que, en este conjunto de datos, su contribución sobre Vem es secundaria frente a la influencia ejercida por Td y Cc .

Tabla 2.2. Pruebas de efectos fijos para la variación del esfuerzo máximo.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
<i>Rac</i>	-5.16	1.72	0.266
<i>Vf</i>	6.67	4.61	0.077
<i>Td</i>	-10.03	13.81	0.003
<i>Cc</i>	-5.83	7.04	0.013
<i>Ct</i>	-2.07	0.43	0.527
<i>Af</i>	1.99	0.84	0.371
<i>Ca</i>	1.83	0.20	0.371
<i>Vf*Ct</i>	2.66	0.57	0.575

Además, la interacción $Vf * Ct$ no fue significativa en el modelo, ya que el coeficiente es pequeño (2.67), el valor F es muy bajo (0.57) y el valor p alto (0.57), lo que confirma que no existe un efecto combinado relevante entre estas dos variables sobre Vem . En otras palabras, el impacto de las fibras sobre el esfuerzo máximo no depende de si el concreto estuvo o no bajo carga durante la degradación. Las gráficas de residuos asociadas a Vem muestran alineación razonable en la gráfica de probabilidad normal (ver Figura 2.5 a) y dispersión sin patrón claro en la gráfica de residuos versus valores ajustados (homocedasticidad aceptable) (Figura 2.5 b). Por su parte, el histograma de residuos (Figura 2.5 c). mostró una distribución aproximadamente simétrica y cercana a la normal, lo que respalda el supuesto de normalidad planteado en el modelo y la gráfica de residuo condicional versus el orden de observación (Figura 2.5d) no evidenció patrones definidos ni secuencias prolongadas de residuos positivos o negativos, lo que sugiere que los errores son independientes y no están relacionados con el orden en que se tomaron las observaciones.

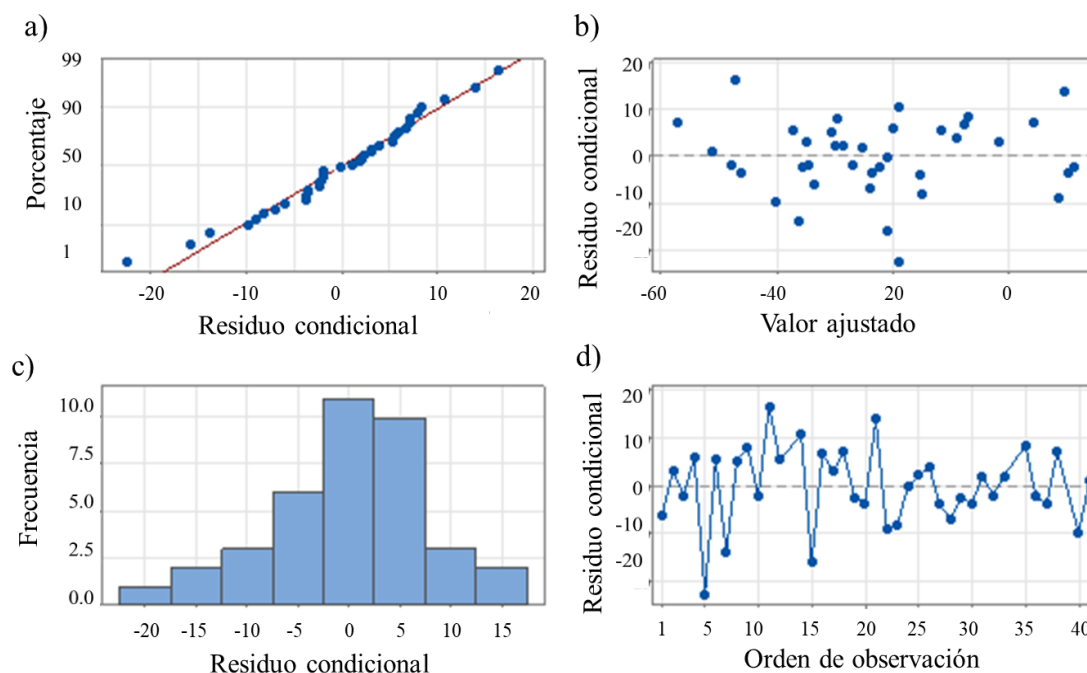


Figura 2.5. Gráficas de residuos condicionales para la variación del esfuerzo máximo, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

De este análisis se pudo concluir que la disminución de V_{em} con T_d y C_c se podía deber a una posible pérdida de sección transversal de las fibras y el deterioro interfacial fibra-matriz a medida que progresa la corrosión, reduciendo la capacidad de alcanzar el pico máximo. El volumen de fibras mostró una tendencia positiva, lo que indica que al aumentar la cantidad de fibras se incrementa la capacidad de esfuerzo máximo del concreto, este refuerzo adicional ayuda a retrasar la propagación de la grieta principal. Sin embargo, este efecto protector resulta limitado en comparación con la influencia negativa del tiempo de degradación y la concentración de cloruros, que reducen de forma más marcada la resistencia máxima.

Los resultados concuerdan con estudios experimentales que reportan disminuciones del esfuerzo máximo en los SFRCs luego de la exposición prolongada a cloruros, y mitigación parcial al incrementar el volumen de fibras. Trabajos como Hassanvand et al. (2023) en vigas corroídas reportan reducción de capacidad pico con el aumento del daño, mientras que Marcos-Meson et al. (2021) y Berrocal et al. (2017) documentan que, aunque las fibras mejoran el desempeño post-fisuración, su contribución en el pico se vuelve limitada cuando la corrosión avanza; Nguyen et al. (2018) y Frazão et al. (2016) muestran efectos favorables de V_f en condiciones moderadas, que disminuyen bajo exposiciones más severas a cloruros. En conjunto, la evidencia apoya que T_d y C_c gobiernan la disminución de V_{em} , con V_f actuando como mitigante parcial.

- *Variación de la ductilidad (V_d)*

El modelo de efectos mixtos ajustado para V_d presentó un buen desempeño ($R^2 = 89.40\%$; R^2 (aj.) = 86.47%), lo que indica el modelo tiene un alto poder explicativo y describe de forma confiable la relación entre las variables experimentales y la ductilidad del SFRC. El componente aleatorio “*Estudio*” aportó el 73.3% de la variabilidad total en V_d (ver Tabla 2.6), lo que refleja que hay diferencias importantes entre los resultados

reportados por las distintas investigaciones incluidas en la base de datos. Sin embargo, este efecto no alcanzó significancia estadística ($p = 0.102$), por lo que no puede afirmarse con certeza que dichas diferencias entre estudios expliquen de manera consistente la variación observada. El 26.7% restante se atribuye al error residual, es decir, a la dispersión dentro de cada estudio o a variables no consideradas en el modelo (las c). El análisis identificó como variable significativa únicamente al tiempo de degradación (Td) (Tabla 2.3), con un coeficiente negativo (coef. = -13.01; $F = 16.85$; $p < 0.05$). Esto significa que a medida que aumenta el tiempo de exposición en ambientes con cloruros, la ductilidad del SFRC se reduce en comparación con la muestra de control.

Tabla 2.3. Pruebas de efectos fijos para la variación de la ductilidad.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
<i>Rac</i>	4.49	0.31	0.598
<i>Vf</i>	4.51	0.87	0.361
<i>Td</i>	-13.01	16.85	0.000
<i>Cc</i>	-3.75	2.45	0.131
<i>Ct</i>	-3.57	0.40	0.535
<i>Af</i>	3.12	1.47	0.236
<i>Ca</i>	-8.75	1.16	0.323
<i>Vf*Ct</i>	4.09	0.25	0.625

Ni el volumen de fibras, ni la concentración de cloruros ni el resto de los factores alcanzaron significancia estadística ($p > 0.05$), lo que indica que, en este conjunto de datos, la ductilidad está gobernada principalmente por la duración de la degradación. La interacción *Vf*Ct* mostró un coef. = +4.09; $F = 0.25$; $p = 0.625$, por lo que no resultó significativa. Esto significa que el impacto del volumen de fibras en la ductilidad no se ve modificado de forma clara por la presencia o ausencia de corrosión bajo tensión. Aunque el coeficiente positivo sugiere una ligera tendencia a mejorar la ductilidad cuando ambos factores actúan juntos.

Por su parte, la gráfica de probabilidad normal de los residuos mostró alineación aceptable con la diagonal (Figura 2.6a), confirmando que se cumple el supuesto de normalidad; la gráfica de residuos versus valores ajustados (Figura 2.6b) presentó dispersión aleatoria y sin patrones definidos, lo que respalda la homocedasticidad; el histograma de residuos evidenció una distribución aproximadamente simétrica, reforzando la validez del supuesto de normalidad (Figura 2.6c) y finalmente la gráfica de residuos condicionales versus el orden de observación (Figura 2.6d) no mostró tendencias ni rachas de signos, lo que indica independencia de los errores, pero si cabe destacar que se detectó un valor atípico relevante en la fila 22 de la base de datos (observación 22), presentó un residuo negativo estandarizado elevado, lo que indica que el modelo subestimó el valor real de la ductilidad en ese caso, es decir, predijo un resultado menor al observado experimentalmente, aunque esto no compromete la validez del análisis.

Los resultados indican que la reducción significativa de la ductilidad con el tiempo de exposición concuerda con lo reportado en la literatura, donde la corrosión progresiva de las fibras disminuye su capacidad de evitar las grietas y favorece fallas más frágiles (Hassanvand et al., 2023; Fernandes y Neves, 2024). La ausencia de significancia para el volumen de fibras y la concentración de cloruros podría explicarse por la dispersión entre estudios y por el hecho de que la ductilidad es una propiedad fuertemente dependiente de la integridad de las fibras a lo largo del tiempo. Así, aunque un mayor contenido de fibras tiende a mejorar la ductilidad en condiciones iniciales (Yoo et al., 2020b), conforme avanza la degradación esta propiedad se ve más afectada. Por lo tanto, se puede concluir

que el caso de la variación de la ductilidad, el factor determinante es el tiempo de degradación.

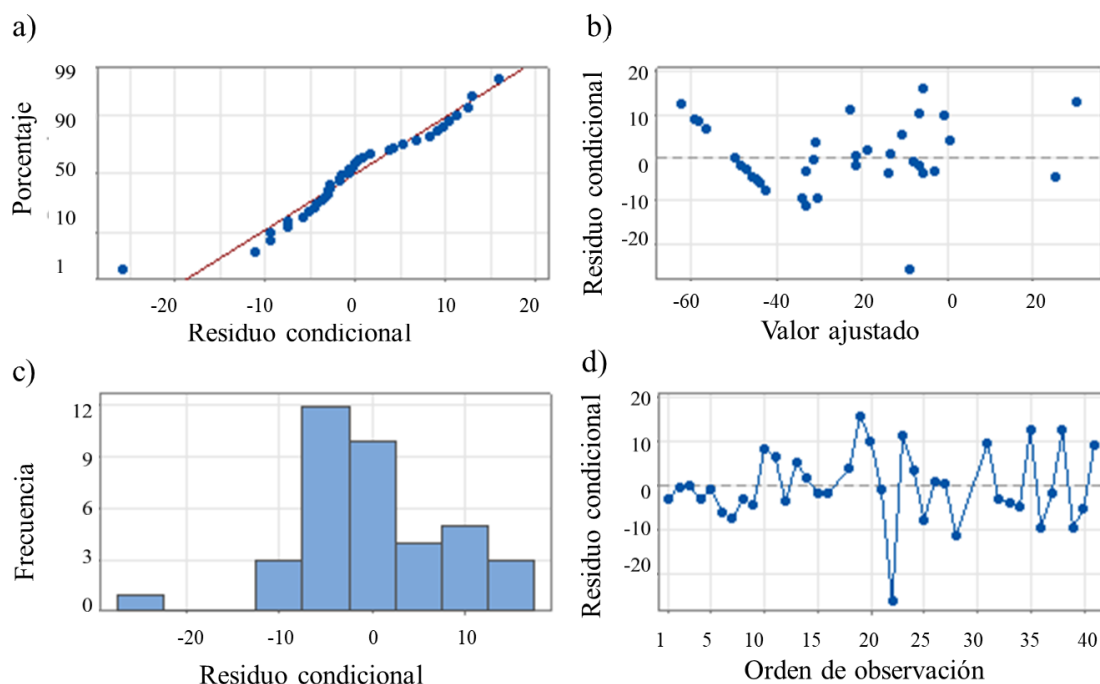


Figura 2.6. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la ductilidad, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

- *Variación de la tenacidad (V_t)*

El modelo de efectos mixtos para la variación de la tenacidad mostró un ajuste muy alto ($R^2 = 94.08\%$; $R^2(\text{aj.}) = 92.19\%$), lo que indica que el conjunto de variables incluidas explica gran parte de la dispersión observada en los datos. El efecto aleatorio asociado a la variable “*Estudio*” representó el 91.1% de la variabilidad total, quedando solo el 8.9% en el error residual. Aunque este componente no fue estrictamente significativo ($p = 0.052$), refleja que la mayor parte de las diferencias en tenacidad se deben a variaciones entre estudios, más que a la dispersión dentro de cada investigación. La Tabla 2.4 muestra que ninguno de los predictores alcanzó significancia estadística ya que $p > 0.05$. El tiempo de degradación y la concentración de cloruros, que en otras propiedades resultaron determinantes, aquí no mostraron una relación clara con la variación de la tenacidad. El volumen de fibras exhibió un coeficiente positivo (+3.76) pero sin significancia ($p = 0.308$), lo que sugiere una tendencia leve de mayor absorción de energía con más fibras, aunque no consistente entre estudios. La interacción $Vf * Ct$ presentó un efecto moderado (coef. = +6.29; $p = 0.151$), lo que apunta a que el beneficio de las fibras podría depender de si actúan bajo tensión o no, pero el resultado no es concluyente. El diagnóstico de residuos mostró un comportamiento adecuado del modelo. La gráfica de probabilidad normal (Figura 2.7a) evidenció una alineación aceptable de los residuos con la línea de referencia, lo que confirma el cumplimiento del supuesto de normalidad. Asimismo, la gráfica de residuos versus valores ajustados (Figura 2.7b) no presentó patrones definidos, indicando homocedasticidad en los errores.

Tabla 2.4. Pruebas de efectos fijos para la variación de la tenacidad.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
Rac	-6.75	0.86	0.387
Vf	3.76	1.09	0.308
Td	-2.35	1.25	0.276
Cc	-0.17	0.01	0.908
Ct	-4.82	2.46	0.132
Af	0.54	0.07	0.791
Ca	4.46	0.36	0.572
$Vf * Ct$	6.29	2.23	0.151

El histograma de residuos (Figura 2.7c) reveló una distribución aproximadamente simétrica, lo que refuerza la validez del modelo. Finalmente, la gráfica de residuos condicionales frente al orden de observación (Figura 2.7d) no mostró secuencias prolongadas ni tendencias marcadas, lo que confirma la independencia de los residuos. Se identificaron dos observaciones con residuos estandarizados fuera de rango: la observación 10 y la 26, en ambos casos, el modelo sobrestimó la pérdida de tenacidad respecto a los valores reales. Se puede concluir que la ausencia de significancia en los predictores indica que la tenacidad del SFRC degradado por cloruros es más sensible a factores propios de cada investigación que a las variables generales consideradas en este modelo. Esto concuerda con lo señalado por Berrocal et al. (2017) y Marcos-Meson et al. (2021), quienes destacan que la tenacidad depende fuertemente de la interacción fibra-matriz, del tipo y geometría de las fibras y del método de ensayo. En este contexto, el hecho de que el factor “*Estudio*” explique más del 90% de la variabilidad indica que la variación de la tenacidad no puede atribuirse de forma consistente a las variables consideradas en el modelo (Rac , Vf , Td , Cc , Ct , Af y Ca). Por el contrario, la respuesta está fuertemente condicionada por las características particulares de cada investigación, tales como el tipo y geometría de las fibras, las propiedades de la matriz de concreto, método de ensayo empleado etc.

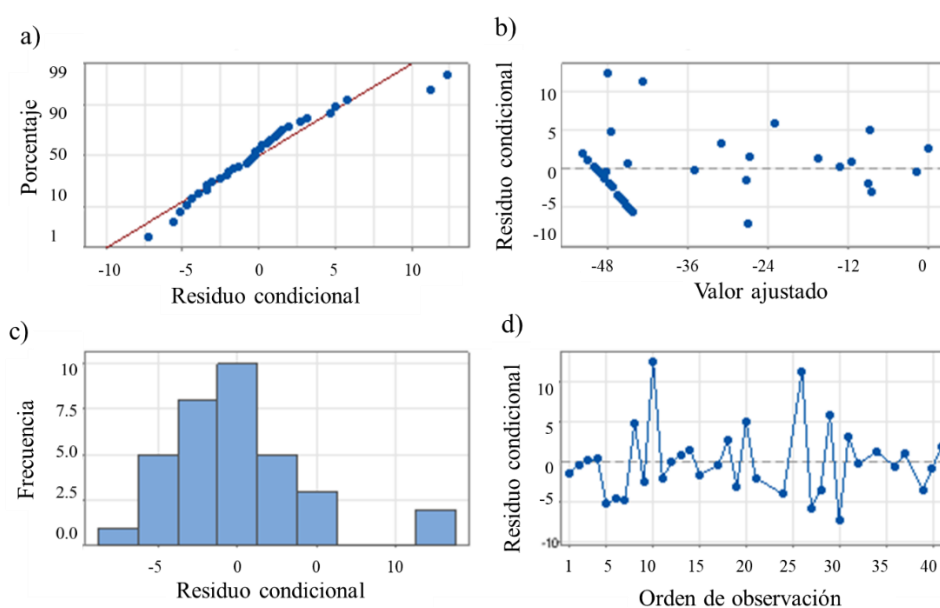


Figura 2.7. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la tenacidad, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

- *Variación de la resistencia residual (V_{rr})*

El modelo de efectos mixtos para la variable variación de la resistencia residual presentó un desempeño sólido ($R^2 = 89.76\%$; R^2 (aj.) = 86.84%), lo que indica que las variables incluidas explicaron gran parte de la variación observada en la resistencia residual de los SFRCs estudiados. El factor aleatorio “*Estudio*” explicó el 75.2% de la variabilidad, aunque no alcanzó significancia estadística ($p = 0.059$). El 24.8% restante correspondió al error residual, confirmado como significativo ($p < 0.05$). Esto sugiere que las diferencias entre estudios tienen un papel importante en la variabilidad de V_{rr} , pero también existe una proporción relevante de dispersión no explicada.

En cuanto a los efectos fijos, el único predictor significativo fue el tiempo de degradación, con un coeficiente negativo (coef. = -12.85 ; $F = 10.03$; $p = 0.004$) (ver Tabla 2.5). Esto indica que, a mayor duración de la exposición a cloruros, mayor es la pérdida de resistencia residual respecto al control. El resto de los predictores no resultó significativo ($p > 0.05$). La concentración de cloruros mostró una tendencia negativa (coef. = -3.25 ; $p = 0.252$), aunque sin soporte estadístico. El volumen de fibras, la corrosión bajo tensión y la presencia de fisuras (Af) tampoco demostraron efectos concluyentes, y la interacción $Vf * Ct$ fue no significativa ($p=0.192$), lo que sugiere que la capacidad de las fibras para sostener cargas pospico no depende claramente de si la corrosión ocurre bajo tensión. El diagnóstico de residuos evidenció un desempeño adecuado del modelo. La gráfica de probabilidad normal (Figura 2.8a) mostró un alineamiento apropiado de los residuos con la línea de referencia, lo que confirma el cumplimiento del supuesto de normalidad. De igual forma, la gráfica de residuos versus valores ajustados (Figura 2.8b) presentó una dispersión aleatoria, compatible con la homocedasticidad.

Tabla 2.5. Pruebas de efectos fijos para la variación de la resistencia residual.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
<i>Rac</i>	0.95	0.01	0.920
<i>Vf</i>	1.22	0.06	0.810
<i>Td</i>	-12.85	10.03	0.004
<i>Cc</i>	-3.25	1.38	0.252
<i>Ct</i>	1.56	0.13	0.719
<i>Af</i>	4.96	2.36	0.136
<i>Ca</i>	6.18	0.50	0.500
<i>Vf*Ct</i>	8.31	1.79	0.192

El histograma de residuos (Figura 2.8c) reveló una distribución aproximadamente simétrica, reforzando la validez del modelo, mientras que la gráfica de residuos condicionales frente al orden de observación (Figura 2.8c) no mostró secuencias prolongadas de valores positivos o negativos, lo que indica que los residuos se distribuyen de manera aleatoria a lo largo de las observaciones. Esta ausencia de patrones definidos confirma que los errores son independientes entre sí y que el modelo no presenta sesgos relacionados con el orden en que se registraron los datos. En cuanto a los valores atípicos, se identificaron tres observaciones con residuos estandarizados elevados: las observaciones 7, 22 y 23, en todos los casos, el modelo subestimó la pérdida real de resistencia residual, prediciendo valores más altos que los observados. Estos valores atípicos reflejan condiciones particulares en los ensayos mecánicos que no fueron captadas por el modelo.

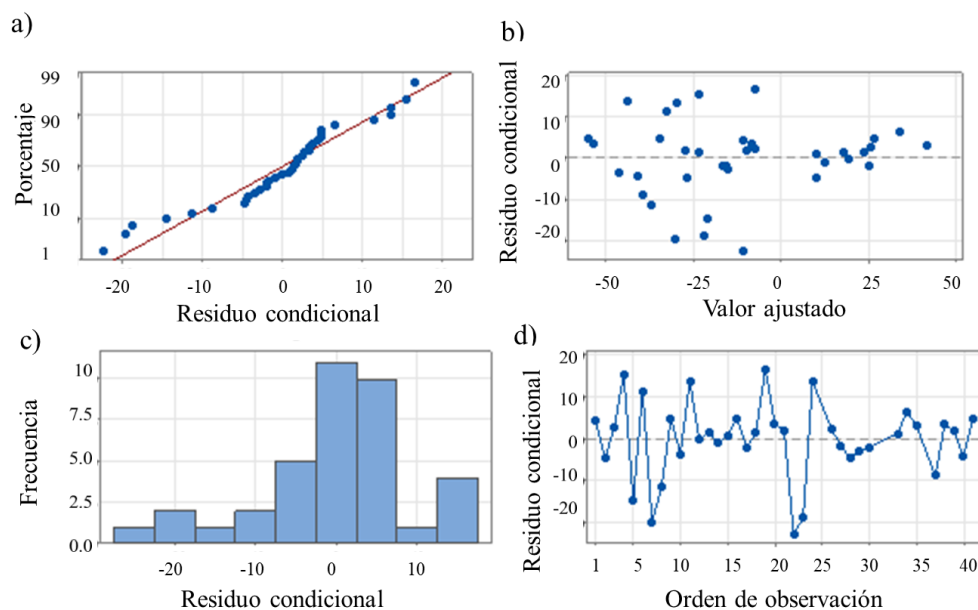


Figura 2.8. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la resistencia residual, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

El hallazgo de que solo el tiempo de degradación fue significativo coincide con estudios previos, donde la pérdida de adherencia fibra-matriz por corrosión reduce la capacidad residual en flexión (Berrocal et al., 2017; Hassanvand et al., 2023). Aunque la concentración de cloruros es clave en la iniciación de la corrosión, su efecto directo en la resistencia residual es menor, ya que la propagación depende más del tiempo de exposición que de la concentración inicial (Nguyen et al., 2018; Marcos-Meson et al., 2021). Asimismo, la falta de significancia del volumen de fibras se asocia a la pérdida de su efecto una vez corroídas, en línea con Frazão et al. (2019).

En los modelos analizados, el tiempo de degradación fue la variable dominante, con coeficientes negativos y significativos en la resistencia residual, mientras que las demás no alcanzaron significancia estadística. No obstante, la concentración de cloruros mostró una tendencia negativa coherente con la literatura, y el volumen de fibras una tendencia positiva como factor mitigante, aunque secundaria. Por ello, ambas variables (C_c y V_f) deben mantenerse en futuros estudios como complementarias al tiempo de degradación. Las variables R_{ac} , C_t , C_a y A_f no resultaron significativas, posiblemente por la heterogeneidad y dispersión entre estudios; sin embargo, no deben descartarse, ya que bajo condiciones más controladas podrían influir, especialmente en interacción con otras variables. En conjunto, el metaanálisis confirma que la degradación del SFRC en ambientes con cloruros es multifactorial, donde el tiempo de exposición es el factor dominante, pero la concentración de cloruros, el volumen de fibras y otras variables siguen siendo relevantes para comprender el comportamiento a largo plazo.

2.4.3 Propiedades de compresión evaluadas en experimentos de degradación por cloruros

La Tabla 2.6 resume la base de datos utilizada para el análisis de los ensayos de compresión en SFRCs. En ella se integran las principales variables experimentales reportadas en la literatura, junto con las propiedades mecánicas derivadas de estos ensayos. Al igual que en el caso de los ensayos de flexión, todas las variaciones se expresan respecto a muestras de control no degradadas.

Tabla 2.6. Relación datos degradación de SFRC sometidos a esfuerzos de compresión extraídos de la bibliografía. *Rac*: relación agua/cemento, *Vf*: volumen de fibras, *Td*: tiempo de degradación, *Cc*: concentración de cloruros, *Ct*: corrosión bajo tensión, *Ca*: corrosión acelerada, *Vme*: variación del módulo de elasticidad, *Vem*: variación del esfuerzo máximo, *Vt*: variación de la tenacidad y *Vrr*: variación de la resistencia residual. Todas las variaciones se tomaron respecto a una muestra de control que no se degradó. N/A representa que el valor numérico de la variable no fue proporcionado en el estudio o bien no pudo ser calculado.

<i>Estudio</i>	<i>Rac</i>	<i>Vf</i> (%)	<i>Td</i> (días)	<i>Cc</i> (% w/w)	<i>Ct</i> (kN)	<i>Ca</i>	<i>Vme</i> (%)	<i>Vem</i> (%)	<i>Vt</i> (%)	<i>Vrr</i> (%)
Chen et al. (2021a)	0.56	0.5	30	6	0	Si	7.22	-0.16	5	8.76
Chen et al. (2021a)	0.56	0.5	60	6	0	Si	-2.19	-1.6	2.12	3.35
Chen et al. (2021a)	0.56	0.5	90	6	0	Si	5.16	-0.19	4.74	7.33
Chen et al. (2021a)	0.56	1	30	6	0	Si	13.26	15.51	10.87	8.56
Chen et al. (2021a)	0.56	1	60	6	0	Si	14.09	6.78	12.13	11.41
Chen et al. (2021a)	0.56	1	90	6	0	Si	11.48	7.5	13.11	10.61
Chen et al. (2021a)	0.56	2	30	6	0	Si	25.29	23.59	25.13	27.46
Chen et al. (2021a)	0.56	2	60	6	0	Si	28.26	26.34	31.18	23.99
Chen et al. (2021a)	0.56	2	90	6	0	Si	24.17	20.97	24.69	29.74
Gao et al. (2023)	0.43	1	420	7	0	No	6.5	1.59	-0.34	8.56
Tai et al. (2024)	0.5	1	360	7	0	No	10.7	7.9	1.07	7.66
Frazão et al. (2015)	0.52	0.5	365	7	0	No	1.13	-0.46	0.15	0.56
Nguyen et al. (2018)	0.54	1.5	803	3.5	0	No	0	13.22	8.77	28.79
Nguyen et al. (2018)	0.54	1.5	803	3.5	54	No	0	11.66	11.03	42.28
Nguyen et al. (2018)	0.54	1.5	803	3.5	89	No	0.14	4.67	7.22	66.62
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.2	365	3.5	0	Si	0.15	5.45	8.08	9.41
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.2	365	3.5	0	Si	0.3	-22.14	7.41	-18.87
Marcos-Meson et al. (2021)	0.44	1.2	365	7	0	Si	0.15	-1.92	5.37	2.35
Baltazar-Zamora et al. (2019)	0.47	1	180	7	0	Si	9.29	2.96	1.53	5.38
Baltazar-Zamora et al. (2019)	0.47	1	180	7	0	Si	12.05	8.63	8.82	7.35
Zhang et al. (2021)	0.4	1	365	3.5	0	Si	11.8	11.67	5.93	11.99
Zhang et al. (2021)	0.5	1	365	3.5	0	Si	8.52	7.71	5.64	5.38
Zhang et al. (2021)	0.6	1	365	3.5	0	Si	13.11	7.29	7.22	12.09

Tabla 2.6. Relación datos degradación de SFRC sometidos a esfuerzos de compresión extraídos de la bibliografía. *Rac*: relación agua/cemento, *Vf*: volumen de fibras, *Td*: tiempo de degradación, *Cc*: concentración de cloruros, *Ct*: corrosión bajo tensión, *Ca*: corrosión acelerada, *Vme*: variación del módulo de elasticidad, *Vem*: variación del esfuerzo máximo, *Vt*: variación de la tenacidad y *Vrr*: variación de la resistencia residual. Todas las variaciones se tomaron respecto a una muestra de control que no se degradó. N/A representa que el valor numérico de la variable no fue proporcionado en el estudio o bien no pudo ser calculado (Continuación).

<i>Estudio</i>	<i>Rac</i>	<i>Vf</i> (%)	<i>Td</i> (días)	<i>Cc</i> (% w/w)	<i>Ct</i> (kN)	<i>Ca</i>	<i>Vme</i> (%)	<i>Vem</i> (%)	<i>Vt</i> (%)	<i>Vrr</i> (%)
Zhang et al. (2021)	0.7	1	365	3.5	0	Si	12.95	11.83	6.77	8.47
Zhang et al. (2021)	0.8	1	365	3.5	0	Si	10.85	2.42	1.38	4.88
Youssari et al. (2023)	0.5	1.5	180	7	50	No	N/A	16.66	9.44	14.55
Youssari et al. (2023)	0.5	1.5	365	7	50	No	N/A	11.24	13.62	9.93
Youssari et al. (2023)	0.5	1.5	760	7	50	No	N/A	3.76	4.2	11.92
Zhao et al. (2018)	0.53	0.5	360	3	0	Si	-2.18	4.47	N/A	1.35
Zhao et al. (2018)	0.53	0.5	360	3	0	Si	-1.05	3.02	N/A	4.66
Zhao et al. (2018)	0.53	0.5	360	3	0	Si	4.82	9.14	N/A	-0.36
Zhao et al. (2018)	0.53	1	360	6	0	Si	9.45	7.61	N/A	11.07
Zhao et al. (2018)	0.53	1	360	6	0	Si	10.16	12.58	N/A	5.17
Zhao et al. (2018)	0.53	1	360	6	0	Si	5.02	5.17	N/A	10.27
Zhao et al. (2018)	0.53	2	360	9	0	Si	18.84	11.85	N/A	19.98
Zhao et al. (2018)	0.53	2	360	9	0	Si	23.08	25.72	N/A	20.39
Zhao et al. (2018)	0.53	2	360	9	0	Si	15.77	9.2	N/A	15.48
Sadeghi-Pouya et al. (2013)	0.4	0.5	180	3.5	30	Si	4.9	2.11	2	9.82
Sadeghi-Pouya et al. (2013)	0.4	0.5	180	3.5	30	Si	7.19	3.92	-1.58	-1.14
Sadeghi-Pouya et al. (2013)	0.4	1	180	3.5	30	Si	11.61	11.34	16.63	13.08
Sadeghi-Pouya et al. (2013)	0.4	1	180	7	60	Si	13.99	6.06	1.32	5.2
Sadeghi-Pouya et al. (2013)	0.4	1.5	180	7	60	Si	14.16	23.57	9.77	19.41
Sadeghi-Pouya et al. (2013)	0.4	1.5	180	7	60	Si	13.45	18.79	14.6	15.43
Graeff et al. (2009)	0.5	2	90	3.5	0	No	28.56	N/A	26.51	N/A
Graeff et al. (2009)	0.5	2	90	3.5	0	No	23.82	N/A	25.41	N/A
Anandan et al. (2014)	0.5	0.5	180	3.5	30	Si	7.2	4.08	N/A	10.78

- *Variación del módulo de elasticidad (Vme)*

El modelo de efectos mixtos ajustado para la variación del módulo de elasticidad presentó un buen desempeño, con valores de $R^2 = 91.2\%$ y $R^2(aj.) = 88.9\%$. Estos indicadores reflejan que el modelo explica de manera adecuada la dispersión de los datos y que las variables incluidas permiten describir con fiabilidad el comportamiento del SFRC degradado por cloruros. La variable aleatoria “*Estudio*” explicó el 18.5% de la variabilidad en Vme , mientras que el error residual aportó el 81.5%. El valor $p > 0.05$ asociado al factor “*Estudio*” indica que las diferencias entre investigaciones no fueron estadísticamente significativas, por lo que la mayor parte de la variación se debe a factores internos de cada ensayo o a la aleatoriedad experimental. En el análisis de efectos fijos (Tabla 2.7), el volumen de fibras se identificó como la variable más influyente, con un coeficiente positivo (+7.42) y significancia estadística ($p = 0.015$). Este resultado indica que un mayor contenido de fibras atenúa la pérdida de rigidez y favorece la conservación del módulo de elasticidad frente a la corrosión. El tiempo de degradación también resultó significativo (coef. = -9.87; $p = 0.008$), lo que confirma que la exposición prolongada a cloruros disminuye de manera progresiva la rigidez del concreto.

Tabla 2.7. Pruebas de efectos fijos para la variación del módulo de elasticidad.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
<i>Vf</i>	7.42	6.97	0.015
<i>Td</i>	-9.87	9.82	0.008
<i>Cc</i>	-4.26	3.37	0.082
<i>Rac</i>	-2.58	1.12	0.312
<i>Ct</i>	-1.92	0.57	0.467
<i>Af</i>	1.24	0.44	0.511
<i>Ca</i>	0.83	0.38	0.543
<i>Vf*Ct</i>	2.17	0.63	0.439

La concentración de cloruros mostró un efecto negativo (coef. = -4.26) con una tendencia consistente, aunque sin significancia estadística en todos los casos ($p = 0.082$), lo que sugiere un papel secundario frente al tiempo de degradación. El resto de predictores (*Rac*, *Ct*, *Af*, *Ca*) y la interacción $Vf * Ct$ no alcanzaron significancia estadística ($p > 0.05$). El diagnóstico de residuos mostró un comportamiento adecuado del modelo (Figura 3.1). La gráfica de probabilidad normal (Figura 2.8a) evidenció un alineamiento aceptable de los residuos con la línea de referencia, lo que confirma el cumplimiento del supuesto de normalidad. La gráfica de residuos versus valores ajustados (Figura 2.8b) no presentó patrones definidos, sugiriendo homocedasticidad. El histograma de residuos (Figura 2.8c) mostró simetría, reforzando la validez del modelo. Finalmente, la gráfica de residuos condicionales frente al orden de observación (Figura 2.8d) no evidenció secuencias prolongadas, lo que respalda la independencia de los errores.

Los resultados indican que la variación del módulo de elasticidad en SFRCs degradados por cloruros está principalmente gobernada por el volumen de fibras y el tiempo de degradación. La relevancia de *Vf* se explica porque un mayor contenido de fibras mejora el anclaje de microfisuras y retrasa la disminución del módulo de elasticidad asociado a la corrosión. Por otro lado, el efecto negativo del tiempo de degradación confirma que la exposición prolongada incrementa la pérdida de adherencia fibra-matriz y acelera la reducción del módulo. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Nguyen (2018), Marcos-Meson et al. (2021), Chen et al. (2021a) y Song (2023), quienes

documentan que la degradación por cloruros produce disminuciones en el módulo de elasticidad debido a la reducción de la sección transversal de las fibras y al deterioro interfacial.

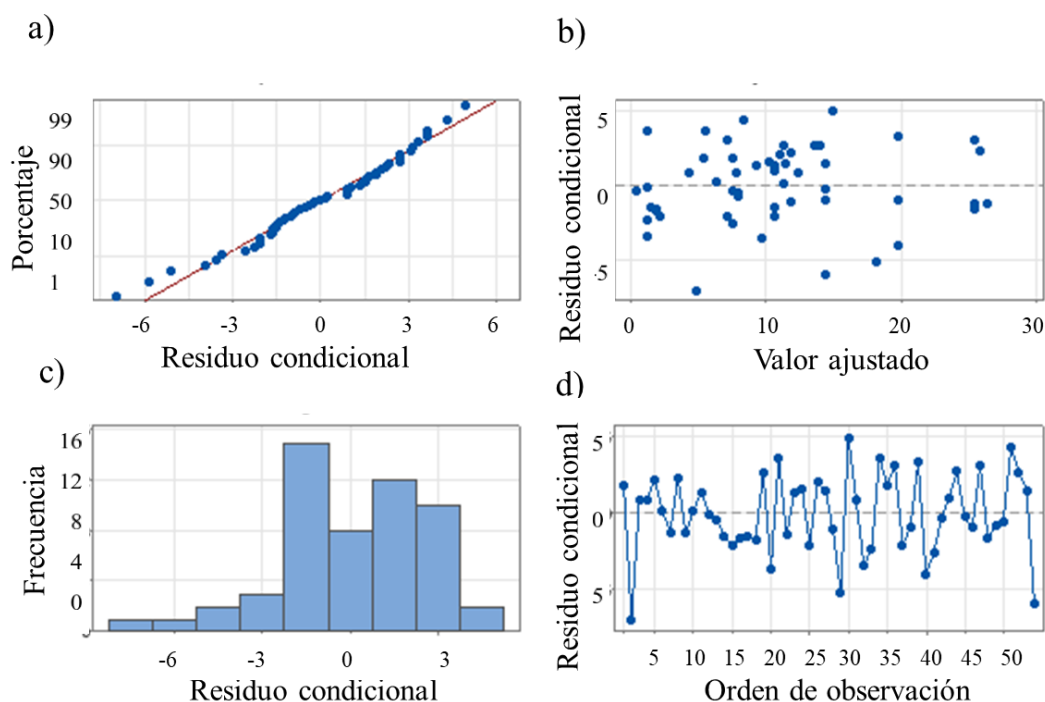


Figura 2.8. Gráficas de residuos condicionales para la variación del módulo de elasticidad en ensayos de compresión, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

- *Variación del esfuerzo máximo (V_{em})*

El modelo de efectos mixtos ajustado para la variación del esfuerzo máximo presentó un ajuste adecuado, con $R^2 = 83.4\%$ y $R^2(aj.) = 78.8\%$. Esto indica que las variables incluidas explican una alta proporción de la variabilidad observada en el esfuerzo máximo de los SFRC degradados por cloruros. El componente aleatorio “*Estudio*” explicó un 16.7% de la variabilidad total en V_{em} , sin alcanzar significancia estadística ($p = 0.339$). En contraste, el error residual representó el 83.3%, lo que sugiere que la mayor parte de la variabilidad no proviene de diferencias entre estudios, sino de factores internos no captados por el modelo o del azar experimental.

En el análisis de la variación del esfuerzo máximo (Tabla 2.8) se observa que el volumen de fibras es el predictor más influyente del modelo, con un coeficiente positivo de +6.69, un valor F elevado (35.89) y una significancia estadística muy marcada ($p < 0.05$). Esto significa que, al aumentar el contenido de fibras en el concreto, se atenúa la pérdida del esfuerzo máximo o incluso se recupera parte de la capacidad respecto a la muestra de control. El tiempo de degradación también resultó significativo, pero con un efecto contrario, reflejado en un coeficiente negativo (-2.95) y un valor p de 0.038; en este caso, a medida que se prolonga la exposición a cloruros, se incrementa la reducción del esfuerzo máximo, lo cual confirma el efecto negativo del tiempo sobre las fibras y la interfaz con la matriz. Finalmente, variables como la concentración de cloruros, la relación agua/cemento, la corrosión bajo tensión, la condición de corrosión acelerada y la interacción $Rac * Vf$ no presentaron significancia ($p > 0.05$), lo que sugiere que, en este

análisis, no existe evidencia de que modifiquen de forma relevante la variación del esfuerzo máximo.

Tabla 2.8. Pruebas de efectos fijos para la variación del esfuerzo máximo.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
<i>Rac</i>	-0.19	0.03	0.869
<i>Vf</i>	6.69	35.89	0.000
<i>Td</i>	-2.95	4.74	0.038
<i>Cc</i>	-1.08	0.80	0.378
<i>Ct</i>	0.21	0.03	0.874
<i>Ca</i>	0.52	0.11	0.749
<i>Rac*Vf</i>	-0.36	0.07	0.797

El diagnóstico de residuos (Figura 2.9) confirmó que el modelo se ajusta de manera adecuada a los datos. La gráfica de probabilidad normal (Figura 2.9a) mostró que los residuos siguen una trayectoria cercana a la línea de referencia, lo que indica que los errores se distribuyen aproximadamente de manera normal, cumpliendo con uno de los supuestos fundamentales del análisis. La gráfica de residuos frente a valores ajustados (Figura 2.9b) presentó una dispersión aleatoria, sin tendencias ni formas definidas, lo cual respalda la validez del supuesto de homogeneidad de varianzas: en otras palabras, los errores no aumentan ni disminuyen de forma sistemática a medida que cambia el valor estimado por el modelo. El histograma de residuos (Figura 2.9c), por su parte, exhibió una distribución aproximadamente simétrica, con forma semejante a la campana de Gauss, reforzando la conclusión de que los errores son normales y equilibrados alrededor de cero.

Finalmente, la gráfica de residuos condicionales frente al orden de observación no mostró secuencias prolongadas de residuos positivos o negativos, lo que significa que los errores aparecen de manera aleatoria y no dependen del orden en que se introdujeron los datos. En el análisis de los valores atípicos asociados identificó una observación poco común en la fila 17 de la base de datos (Figura 2.9d). Este caso presentó un residuo estandarizado de -4.74, ampliamente superior al umbral de ± 3 que se utiliza habitualmente para la detección de valores influyentes, en este caso el modelo subestimó la magnitud de la pérdida de esfuerzo máximo registrada experimentalmente, generando un error negativo muy elevado. No obstante, al tratarse de un único valor extremo y dada la consistencia del resto de los datos, no compromete de forma decisiva la validez del modelo. Estos resultados respaldan el supuesto de independencia de los errores, es decir, que las observaciones no presentan correlaciones entre sí.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que la variación del esfuerzo máximo en SFRCs degradados por cloruros está determinada principalmente por el volumen de fibras y el tiempo de degradación, mientras que las demás variables ejercen un papel secundario. El predominio de *Vf* confirma que un mayor contenido de fibras permite sostener mayores niveles de esfuerzo al mejorar el puenteo de fisuras y retrasar la inestabilidad pospico. Este efecto ha sido documentado por investigaciones que destacan la capacidad de las fibras para retardar la pérdida de resistencia en ambientes agresivos, siempre que su contenido sea adecuado (Marcos-Meson et al., 2021). Por otro lado, el efecto negativo del tiempo de degradación evidencia que la exposición prolongada a cloruros acelera la pérdida de adherencia fibra-matriz y, con ello, la disminución de la capacidad resistente. Dicho comportamiento ha sido señalado en estudios experimentales que coinciden en que la duración de la exposición es un factor más determinante para explicar la degradación mecánica del SFRC (Becerra et al., 2023).

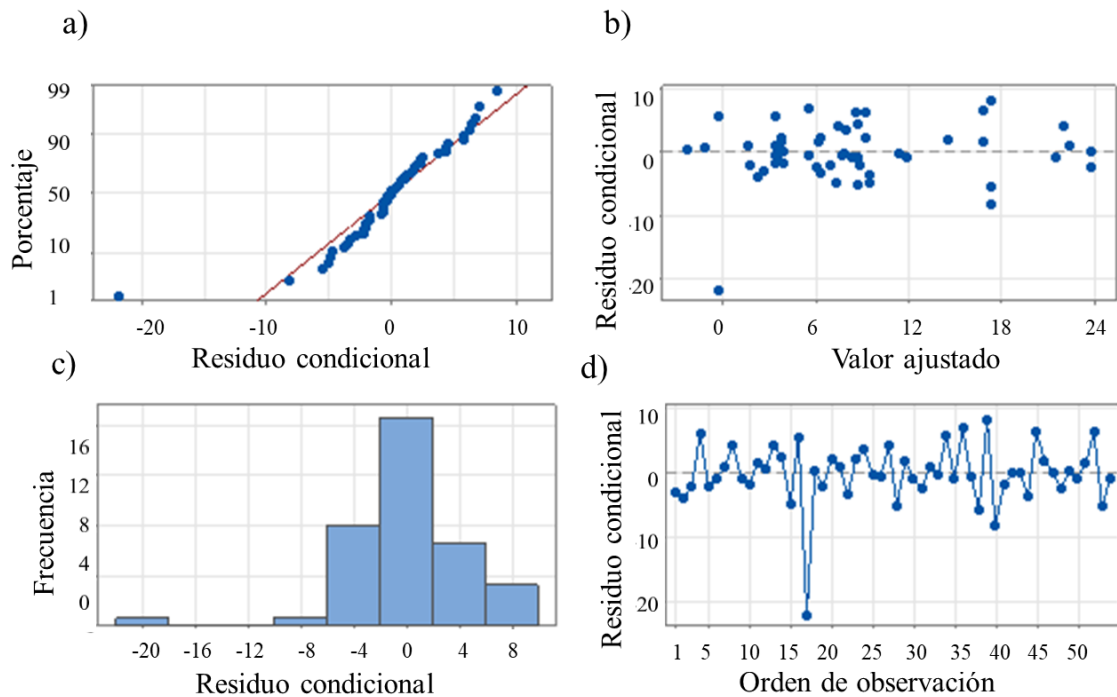


Figura 2.9. Gráficas de residuos condicionales para la variación de esfuerzo máximo, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

- *Variación de la tenacidad (V_t)*

El modelo de efectos mixtos ajustado para V_t presentó un buen desempeño, con $R^2 = 83.52\%$ y $R^2(\text{aj.}) = 81.01\%$, lo que indica que los predictores incluidos explican una parte sustancial de la variabilidad observada en los datos. El efecto aleatorio “*Estudio*” aportó solo un 6.44% de la variabilidad, sin resultar significativo ($p = 0.318$), mientras que el 93.56% restante se atribuyó al error residual. Esto implica que las diferencias entre investigaciones son limitadas y que la mayor parte de la variación de V_t se debe a factores internos no contemplados por el modelo o a dispersión dentro de los propios ensayos. El análisis de los efectos fijos identificó tres predictores significativos (Tabla 2.9). El volumen de fibras fue el factor dominante (coef. = +7.55; $F = 139.75$; $p < 0.05$). Esto demuestra que un mayor contenido de fibras incrementa de forma clara la tenacidad, al mejorar la absorción de energía durante el proceso de fractura. El tiempo de degradación mostró un efecto negativo (coef. = -3.30; $F = 23.45$; $p < 0.05$), confirmando que la exposición prolongada a cloruros reduce de manera significativa la capacidad del material para absorber energía después de la fisuración. La concentración de cloruros también resultó significativa (coef. = -1.94; $F = 9.50$; $p = 0.005$), lo cual indica que soluciones más concentradas intensifican la pérdida de tenacidad. El resto de las variables (Rac , Ct , Ca y la interacción $Rac*Vf$) no alcanzaron significancia ($p > 0.05$), lo que muestra que, en este conjunto de datos, su influencia en V_t es secundaria frente a los tres predictores principales.

Las gráficas de la Figura 2.10 confirmaron la validez del modelo. La gráfica de probabilidad normal mostró un alineamiento aceptable de los residuos con la diagonal, respaldando el supuesto de normalidad (Figura 2.10a). Los residuos frente a valores ajustados se distribuyeron de forma aleatoria, sin evidencias de heterogeneidad de varianza (Figura 2.10b). El histograma de residuos exhibió una distribución aproximadamente simétrica (Figura 2.10c). Finalmente, la gráfica de residuos frente al

orden de observación no reveló secuencias prolongadas, lo que confirma la independencia de los errores (Figura 2.10d).

Tabla 2.9. Pruebas de efectos fijos para la variación de la tenacidad.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
Rac	0.22	0.12	0.734
Vf	7.55	139.75	0.000
Td	-3.30	23.45	0.000
Cc	-1.94	9.50	0.005
Ct	-0.28	0.20	0.659
Ca	0.02	0.00	0.977
$Rac*Vf$	0.44	0.25	0.619

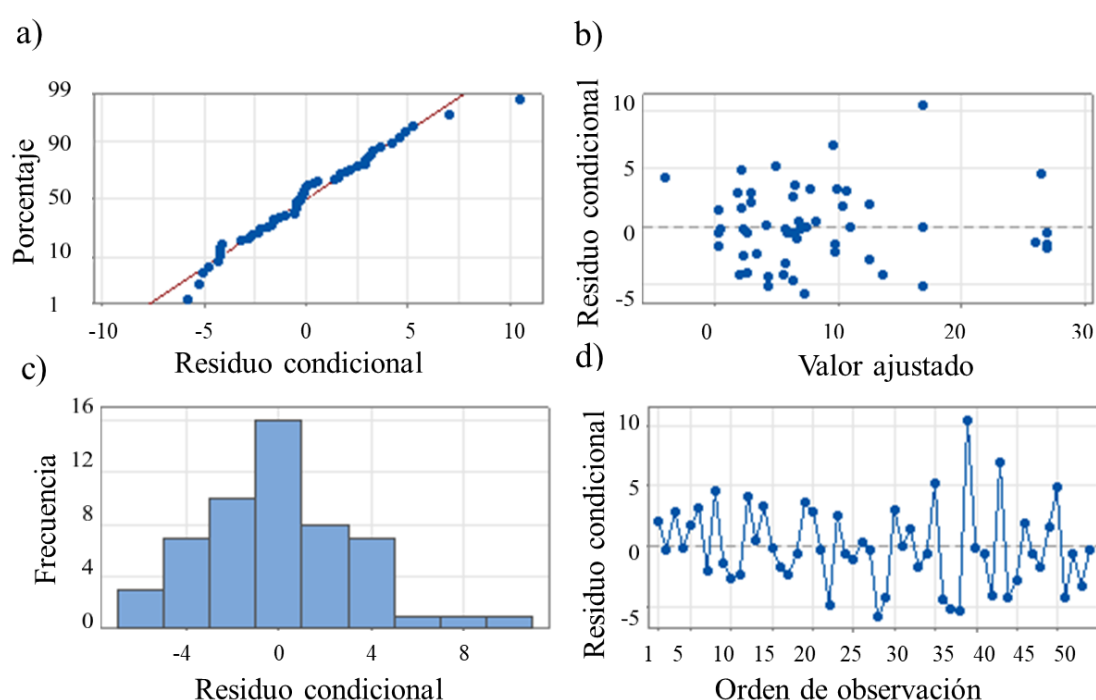


Figura 2.10. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la tenacidad, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

También se identificaron tres observaciones con residuos estandarizados fuera de rango (Figura 2.10d). La observación 28 mostró un valor observado de Vt muy inferior al predicho, lo que indica que el modelo sobreestimó la tenacidad real. Por el contrario, las observaciones 39 y 43 presentaron valores observados superiores a los ajustados, lo que sugiere que el modelo subestimó la capacidad de absorción de energía en esos casos. Estos datos atípicos reflejan condiciones particulares en los ensayos que no fueron captadas por el modelo. En conjunto, estos resultados muestran que la tenacidad del SFRC degradado por cloruros y sometidos a esfuerzos de compresión está gobernada principalmente por el volumen de fibras, seguido por el tiempo de degradación y, en menor medida, por el resto de las variables. El predominio de Vf confirma la importancia de aumentar el contenido de fibras para mejorar la absorción de energía y retrasar el colapso por fractura, mientras que la acción combinada del tiempo y la concentración de

cloruros acelera la pérdida de adherencia fibra-matriz y disminuye la efectividad del refuerzo en todo el proceso.

En conclusión, el análisis estadístico de la variación de la tenacidad mostró que las variables con mayor peso fueron el volumen de fibras, el tiempo de degradación y la concentración de cloruros. Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura. Berrocal et al. (2017) y Marcos-Meson et al. (2021) señalan que la pérdida de tenacidad está directamente relacionada con la progresión de la corrosión en las fibras, mientras que Frazão et al. (2015, 2019) y (Yoo, et al., 2020b) destacan el papel protector de un mayor contenido de fibras para mantener la capacidad de absorción de energía en estados iniciales de degradación. Finalmente, estudios más recientes como Song et al. (2023) confirman que el avance temporal de la corrosión y la concentración de cloruros gobiernan la reducción sostenida de propiedades mecánicas, incluida la tenacidad.

- *Variación de la resistencia residual (V_{rr})*

El modelo de efectos mixtos para la variación de la resistencia residual mostró un ajuste adecuado ($R^2 = 84.2\%$; $R^2(\text{aj.}) = 81.8\%$), lo que indica que el conjunto de predictores explica una proporción alta de la variabilidad en los datos. El componente aleatorio “*Estudio*” explicó el 61.9% de la variabilidad total y fue estadísticamente significativo ($p = 0.029$), lo que demuestra que existen diferencias notables entre los resultados reportados en las distintas investigaciones. El 38.1% restante correspondió al error residual, asociado a variaciones internas en cada estudio o a factores no incluidos en el modelo.

En cuanto a los efectos fijos, los predictores más influyentes fueron el volumen de fibras y la corrosión bajo tensión (Tabla 2.10). El volumen de fibras resultó altamente significativo (coef. = +6.76; $F = 24.63$; $p < 0.001$), confirmando que un mayor contenido de fibras mejora la capacidad residual del SFRC, al sostener cargas tras el pico de esfuerzo. La corrosión bajo tensión también fue significativa (coef. = +5.35; $F = 9.86$; $p = 0.003$), sugiriendo que, en los estudios donde las fibras fueron sometidas a esfuerzos durante la degradación, se produjo un aumento de la adherencia fibra-concreto que contribuyó a mantener la resistencia pospico. Por el contrario, ni el tiempo de degradación ni la concentración de cloruros alcanzaron significancia estadística, aunque C_c mostró una tendencia negativa (coef. = -2.35; $p = 0.134$), lo que concuerda con la pérdida progresiva de adherencia fibra-matriz reportada en la literatura (Berrocal et al., 2017; Hassanvand et al., 2023). La interacción $Rac*V_f$ no resultó significativa ($p = 0.522$), lo que indica que el efecto de las fibras no depende de la relación agua/cemento en esta base de datos.

Tabla 2.10. Pruebas de efectos fijos para la variación de la resistencia residual.

Término	Coef.	Valor F	Valor p
Rac	0.36	0.08	0.785
V_f	6.57	24.63	0.000
Td	0.31	0.03	0.858
C_c	-2.35	2.34	0.134
C_t	5.38	9.86	0.003
Ca	3.65	2.35	0.148
$Rac*V_f$	1.03	0.42	0.522

El diagnóstico de residuos (Figura 2.11) respaldó la validez del modelo. La gráfica de probabilidad normal (Figura 2.11a) mostró alineación aceptable, confirmando la

normalidad de los errores. La gráfica de residuos frente a valores ajustados (Figura 2.11b) presentó dispersión aleatoria, sin patrones definidos, lo que confirma homogeneidad de varianzas. El histograma (Figura 2.11c) reveló simetría en la distribución de los residuos, reforzando la validez del ajuste, mientras que la gráfica de residuos frente al orden de observación (Figura 2.11d) no mostró secuencias prolongadas, confirmando independencia de los errores. Respecto a valores atípicos, se detectaron dos observaciones destacadas: la observación 15, con un residuo estandarizado positivo, donde el modelo subestimó la resistencia residual real; y la observación 17, con un residuo negativo marcado, donde el modelo sobrestimó la capacidad residual observada. Estos casos sugieren condiciones particulares de ensayo no captadas por el modelo, posiblemente asociadas a diferencias en la calidad de las fibras o en la homogeneidad del concreto.

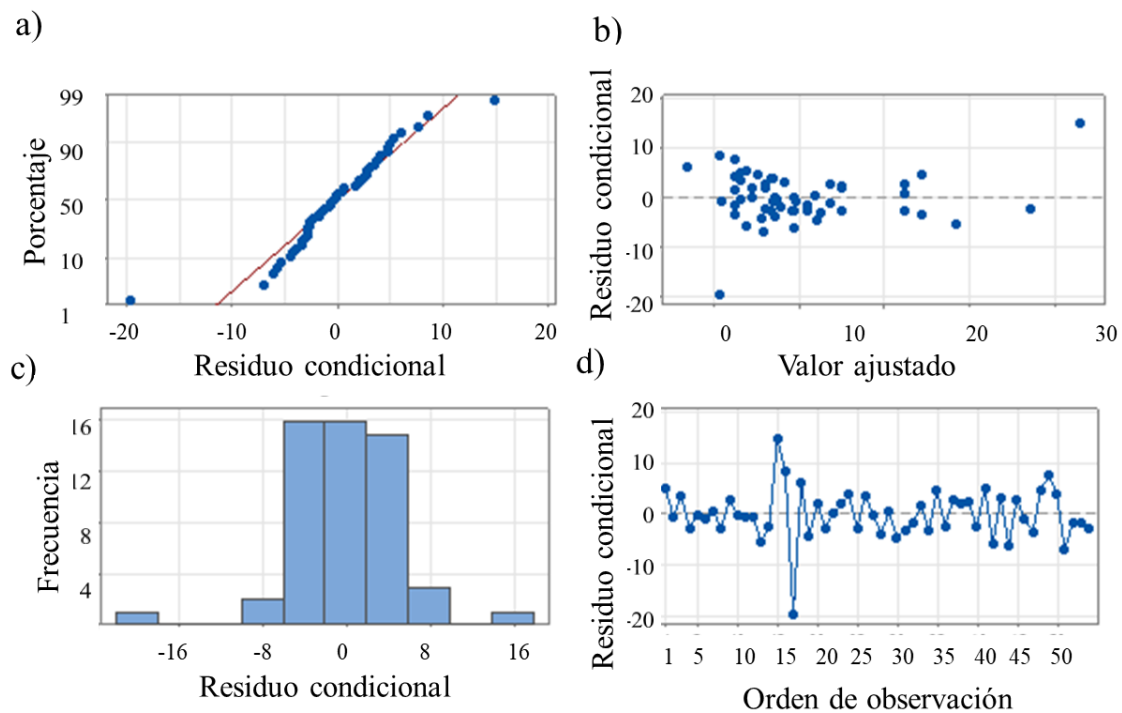


Figura 2.11. Gráficas de residuos condicionales para la variación de la resistencia residual, a: gráfica de probabilidad normal, b: gráfica de residuo condicional vs. ajustes condicionales, c: Histograma, d: gráfica de residuo condicional vs. orden.

En conjunto, los resultados muestran que la variación de la resistencia residual en SFRCs degradados por cloruros está gobernada principalmente por el contenido de fibras y, en segundo lugar, por la corrosión bajo tensión. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Frazão et al. (2015), Berrocal et al. (2017) y Nguyen et al. (2018), quienes documentan que la capacidad pospico depende fuertemente de la integridad de las fibras tras la fisuración y del nivel de esfuerzo al que estuvieron sometidas durante la degradación. El tiempo de exposición y la concentración de cloruros, aunque teóricamente son relevantes, no resultaron significativos en este análisis, lo que sugiere que su efecto queda condicionado por la interacción con el contenido y la condición de carga de las fibras.

Los resultados del análisis de compresión muestran que el volumen de fibras constituye la variable más influyente en la respuesta de los SFRCs degradados por cloruros en pruebas de compresión, actuando como un factor de refuerzo que mitiga parcialmente las pérdidas mecánicas. En el caso de la variación del módulo de elasticidad y del esfuerzo máximo, el incremento de fibras permitió sostener mayores niveles de

rigidez inicial y resistencia pico, confirmando su papel en la interconexión de microfisuras y en la estabilización de la matriz bajo carga. Esta tendencia fue consistente con lo observado en la variación de la tenacidad y de la resistencia residual, donde el mayor contenido de fibras se asoció a una absorción de energía más prolongada y a una capacidad pospico mejorada, incluso frente a la progresiva degradación.

El tiempo de degradación se identificó como la segunda variable más relevante, con efectos negativos evidentes sobre V_{me} , V_{em} y V_t , reflejando que la exposición prolongada a cloruros acelera la pérdida de adherencia fibra-matriz y potencia la reducción de la capacidad portante. En cambio, la concentración de cloruros mostró un efecto secundario: aunque en algunos modelos su significancia estadística fue limitada, las tendencias negativas apuntan a que ambientes con mayores contenidos de cloruros exacerbaban el deterioro a medida que avanza el tiempo de exposición. Por su parte, la corrosión bajo tensión emergió como un factor relevante en la resistencia residual, evidenciando que la combinación entre carga mecánica y ataque químico intensifica la pérdida de capacidad pospico. En contraste, variables como la relación agua/cemento, la condición de corrosión acelerada o las interacciones entre predictores no mostraron efectos consistentes en los modelos, lo que resalta la necesidad de estudiarlas de manera más focalizada en investigaciones futuras.

Estos hallazgos, en conjunto, sugieren que la respuesta a compresión del SFRC en ambientes con cloruros está dominada por la interacción entre la cantidad de fibras y la evolución temporal del daño del concreto, con la concentración de cloruros y la condición de carga como moduladores secundarios. Esta conclusión es coherente con lo reportado en la literatura experimental (Frazão et al., 2015; Berrocal et al., 2017; Nguyen et al., 2018; Chen et al., 2021a; Marcos-Meson et al., 2021; Song et al., 2023) que documenta pérdidas sostenidas de rigidez y resistencia bajo cloruros, pero también confirma que un mayor contenido de fibras permite retrasar la inestabilidad estructural y mejorar el desempeño residual del material.

Capítulo III. Análisis de la variación del comportamiento de *pull-out* en mortero de las fibras degradadas por cloruros: influencia de la morfología superficial y los productos de corrosión

La adherencia entre las fibras de acero y la matriz cementicia constituye un factor crítico en el desempeño de los SFRCs, al controlar la transferencia de esfuerzos y la disipación de energía durante la fisuración (Wu et al., 2021). En los capítulos anteriores se presentó la influencia de la exposición a cloruros sobre las propiedades físicas y mecánicas de concretos reforzados con fibras de acero. Además, se efectuó un análisis estadístico de tipo meta-analítico y de efectos mixtos que permitió cuantificar la variabilidad atribuible a los diferentes factores estudiados en los experimentos de degradación y ensayos mecánicos, identificándose que la corrosión y las propiedades superficiales de las fibras son factores clave en la respuesta mecánica de los concretos.

Sobre esta base, el presente capítulo se enfoca en el comportamiento de la adherencia fibra-concreto bajo condiciones de degradación por cloruros, con el propósito de relacionar directamente el grado de corrosión y las modificaciones microestructurales de las fibras con su capacidad de transferencia de esfuerzos. Este análisis constituye un vínculo esencial para interpretar los resultados estadísticos previamente obtenidos y orientar futuros experimentos, ya que permite comprender con mayor detalle los mecanismos de adherencia fibra-concreto y su impacto en la respuesta macroscópica de los SFRCs. Se describen los materiales y procedimientos experimentales empleados, los resultados a nivel microestructural y mecánico, y finalmente se discute la relación entre grado de corrosión, características superficiales y desempeño de las fibras mediante ensayos de *pull-out*.

3.1 Introducción

Los ensayos de *pull-out* unilaterales de fibras consisten en extraer una fibra embebida en un material cementicio, dejando solo uno de sus extremos expuesto a la carga. Es decir, la fibra se introduce parcialmente en la matriz y se aplica una fuerza de tracción en el extremo libre mientras el otro extremo permanece confinado dentro del mortero o concreto. Este tipo de pruebas se emplean comúnmente para caracterizar la variación de la unión fibra-matriz en el SFRC, ya que permite evaluar, de manera controlada, la fuerza de adherencia, el comportamiento carga-deslizamiento y la energía absorbida en la interfaz fibra-matriz, reproduciendo condiciones más cercanas a las que ocurren en fisuras reales, donde la fibra queda anclada en un solo lado de la matriz. En particular, aquellos ensayos de *pull-out* donde se utilizan fibras con extremos en forma de gancho permiten describir con precisión las fuerzas transferidas a lo largo de todo el proceso de extracción (Marcos-Meson et al., 2020). Por su parte, Abrishambaf et al. (2017) demostraron que la capacidad de refuerzo de las fibras de acero recicladas de neumáticos depende directamente de su adherencia con la matriz de concreto. En este sentido, resulta imprescindible comprender el mecanismo de extracción de las fibras mediante pruebas de *pull-out*.

Este proceso se divide en cuatro etapas fundamentales según Marcos-Meson et al. (2020) y Frazão et al. (2015) (ver Figura 3.1). La primera etapa corresponde a la “unión

adhesiva perfecta” entre la matriz cementicia y la fibra (I), en la cual la adherencia química de la interfaz es capaz de resistir la carga de tracción aplicada a la fibra. Diversos estudios han señalado que esta unión inicial se debe principalmente a interacciones químicas entre los productos de hidratación del cemento como el gel de sílice y la superficie de las fibras, lo cual contribuye a una adhesión primaria antes del inicio del deslizamiento (Oh et al., 2025). En esta fase inicial no se observa deslizamiento, y cualquier variación en el comportamiento se relaciona directamente con las propiedades elásticas de la interfaz y con la calidad del contacto inicial fibra-matriz, factores muy sensibles a la rugosidad superficial y a la presencia de productos de hidratación que recubren a la fibra (Monazami y Gupta, 2022).

La segunda etapa se conoce como etapa de desprendimiento (II) y ocurre cuando la tensión aplicada alcanza un valor crítico que excede la resistencia de la unión adhesiva. Esta etapa se desarrolla en dos fases: en la primera, la interfaz comienza a romperse gradualmente desde el extremo libre de la fibra hasta alcanzar la zona del gancho; en la segunda, el gancho se comprime contra la matriz que lo rodea y entra en juego la unión mecánica. En este punto, las variaciones en la respuesta dependen tanto de la rigidez de la matriz circundante, que puede verse afectada por microfisuras inducidas por la carga o por la degradación química, como de la rigidez y elasticidad propias de la fibra (Maia et al., 2025).

La tercera etapa es el enderezamiento progresivo del gancho (III), donde la carga transferida desde el gancho hacia la matriz aumenta con el deslizamiento hasta alcanzar un valor máximo. Una vez superado este pico, la carga tiende a disminuir conforme el gancho se abre y pierde su capacidad de anclaje. La magnitud de esta etapa está fuertemente influenciada por la geometría del alambre (longitud, diámetro y ángulo del gancho), por el grado de adherencia mecánica inicial y por las propiedades de resistencia de la matriz en la zona de contacto. El comportamiento aquí observado es crucial para determinar la capacidad de absorción de energía del sistema fibra-matriz (Abdallah y Rees, 2019).

Finalmente, la cuarta etapa corresponde a la extracción por fricción residual (IV), en la que la fibra, ya parcialmente recta, se desliza dentro de la matriz bajo la acción de fuerzas de fricción. En esta fase, el comportamiento depende de la presión normal ejercida por la matriz sobre la fibra, de la rugosidad superficial y del grado de corrosión presente, que puede modificar tanto el coeficiente de fricción como la sección transversal de la fibra. Esta etapa define la resistencia residual y está estrechamente vinculada a la durabilidad y a la capacidad de redistribución de esfuerzos en concretos reforzados con fibras expuestos a ambientes agresivos (Maia et al., 2025).

Los estudios relacionados con el comportamiento de *pull-out* de fibras corroídas en morteros de cemento son bastante limitados en la literatura reciente, la mayoría de estos se centran en fibras industriales rectas o con extremos en forma de gancho, sin que se haya reportado (hasta donde se sabe) investigaciones con fibras obtenidas de alambre recocido, galvanizado o de neumáticos reciclados. Los resultados obtenidos sobre el impacto de la degradación por cloruros en las propiedades de *pull-out* de las fibras son variados: algunos trabajos informan una disminución en la carga máxima, una menor fuerza de adhesión entre concreto y fibra, menor tenacidad y mayor incidencia de rotura de fibra debido a la pérdida de sección transversal por corrosión (Bernard, 2015; Marcos-Meson et al., 2021).

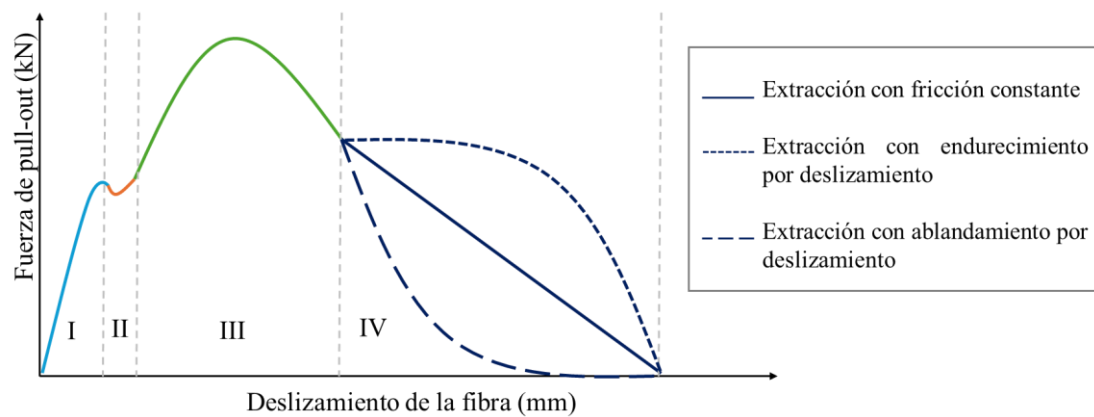


Figura 3.1. Curva de tensión-deformación característica para fibras con extremos en forma de ganchos. Imagen adaptada de Frazão et al. (2015).

Sin embargo, otros estudios han encontrado resultados contrapuestos. Por ejemplo, Alobaidi et al. (2023) observaron un aumento en la fuerza de máxima y en la energía de *pull-out* para fibras con gancho expuestas a ambientes húmedo-seco con cloruros, atribuible al incremento de rugosidad superficial provocado por la corrosión, hasta cierto grado crítico. Además, Yoo et al. (2020b) reportan que la capa de óxido (productos de corrosión) incrementa la rugosidad de la fibra y puede mejorar la adherencia inicial con la matriz, siempre que la degradación no sea tan severa que comprometa la sección efectiva de la fibra. En otro trabajo, Frazão et al. (2015) observaron un aumento de la resistencia residual y la tenacidad tras la exposición al agua salada; los autores justifican estos resultados debido al aumento de la rugosidad superficial en toda la fibra debido a la corrosión causada por cloruros. Estos resultados se ven respaldados por otro estudio que investigó el comportamiento de extracción de fibras precorroídas incrustadas en mortero, donde se obtuvieron resultados similares (Alizade et al., 2016). Adicionalmente, Banthia y Foy (1989) ya habían sugerido que, en ciertos casos, la mejora en la resistencia de la unión fibra-matriz tras la degradación por cloruros puede estar relacionada con el incremento de la fricción, derivado de la expansión localizada de los productos de corrosión en la zona del gancho de la fibra. Estos hallazgos, junto con trabajos más recientes, muestran que el efecto de la corrosión en la adherencia no es unidireccional, sino que depende del tipo de fibra, del nivel de degradación y de las condiciones de exposición.

Como se ha visto, a pesar de los numerosos estudios sobre la variación en la resistencia de adherencia fibra-concreto o fibra-mortero como consecuencia de la degradación por cloruros, hasta ahora ningún trabajo ha abordado en detalle este problema usando fibras onduladas de alambre galvanizado, recocido o de neumáticos reciclados, degradadas mediante la exposición a soluciones de NaCl. En este contexto, el presente estudio busca cubrir dicha laguna de conocimiento y aporta la primera caracterización detallada del impacto que la corrosión por cloruros ejerce sobre la resistencia de *pull-out* de fibras alternativas onduladas, demostrando cómo los cambios en la morfología superficial generados por la corrosión se reflejan en variaciones directas del comportamiento de adherencia. Esta información resulta particularmente relevante, dado que la respuesta mecánica del SFRC se fundamenta en la interacción fibra-matriz, responsable del puenteo de fisuras, la capacidad residual de carga y la disipación de energía durante el proceso de fractura (Marcos-Meson et al., 2020). Al determinar los umbrales de deterioro a partir de los cuales la pérdida de adherencia se vuelve significativa, los resultados proporcionan criterios prácticos de diseño y parámetros de durabilidad indispensables para considerar el uso de fibras recicladas en ambientes donde

existan cloruros. Para ello, se evaluarán las propiedades de adhesión de fibras no convencionales onduladas, obtenidas a partir de alambre recocido, galvanizado y de neumáticos, tras su exposición a ambientes degradativos de cloruro con una concentración del 7% w/w, durante períodos de 30 y 60 días

3.2 Descripción del programa experimental

En este estudio se realizaron dos tipos de pruebas experimentales. La primera consistió en ensayos de *pull-out* unilaterales de fibras incrustadas en morteros, previamente sometidas a degradación durante 30 o 60 días en una solución de NaCl a una concentración del 7% en peso, además se elaboraron 5 muestras de referencia (es decir sin degradación) para cada tipo de fibra (alambre galvanizado, alambre recocido, alambre de neumáticos y fibras Dramix 3D®), en total se prepararon 60 muestras para las pruebas de *pull-out* unilaterales. En esta investigación, al mortero de cemento se le denomina también “probeta”, cada combinación fibra-mortero se considera una “muestra”; un grupo de cinco muestras expuestas a la misma concentración de cloruro durante el mismo tiempo se considera un “conjunto de réplica”, es decir, cinco muestras idénticas para la misma prueba de extracción unilateral.

De las pruebas de *pull-out* unilaterales se midió la fuerza de *pull-out* y el esfuerzo máximo se evaluó comparando las curvas de esfuerzo-deslizamiento. Para complementar, se construyeron gráficos de barras que representan la fuerza de adhesión y el trabajo total de extracción, comparando los distintos grupos de muestras. Asimismo, se efectuaron inspecciones visuales de las fibras tras la extracción para identificar daños por corrosión, y se midieron los cambios de rugosidad superficial con microscopía, con el fin de correlacionar la evolución de la superficie con el comportamiento mecánico registrado en los ensayos de *pull-out*. El segundo experimento consistió en exponer fibras sueltas a una solución de NaCl al 7% en peso durante 30 y 60 días, seguido de ensayos de tracción directa. Estas fibras tenían las mismas características que las empleadas en los ensayos de *pull-out*, y el propósito fue evaluar los cambios en sus propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, resistencia y deformación,) derivados de la corrosión inducida por cloruro en los mismos períodos de exposición que las muestras de mortero con fibra.

3.2.1 Elaboración de las fibras no convencionales en el laboratorio

Las fibras se fabricaron a partir de los tipos de alambre ya mencionados (véase la Figura 3.2). La figura ilustra, de manera secuencial, el proceso de obtención y preparación de las fibras no convencionales empleadas en el estudio. Se comenzó con la selección y corte de alambres (recocido, galvanizado y de neumáticos) (Figura 3.2a), seguido del proceso de ondulado mediante una máquina que genera la geometría ondulada característica de las fibras (Figura 3.2b), esta fue diseñada y fabricada por Meza-de Luna et al. (2018). Después se muestra la etapa de corte en longitudes controladas de 60 mm, obteniéndose fibras con dimensiones uniformes aptas para su incorporación al mortero (Figura 3.2c).

La longitud de 60 mm de las fibras se les dio según la normativa existente en la Guía para el Diseño y la Construcción de Estructuras de Hormigón Reforzado con Fibra (CNR-DT 204/2006), otras dimensiones específicas de cada fibra se muestran en la Figura 3.3. Las fibras elaboradas quedaron con una relación de aspecto de 33.3 para las fibras de alambre recocido, 50 para las de alambre galvanizado, 67 para las fibras de alambre de neumático y las fibras industriales Dramix 3D tienen una relación de aspecto de 80 por defecto. La Tabla 3.1 muestra las propiedades de cada fibra.

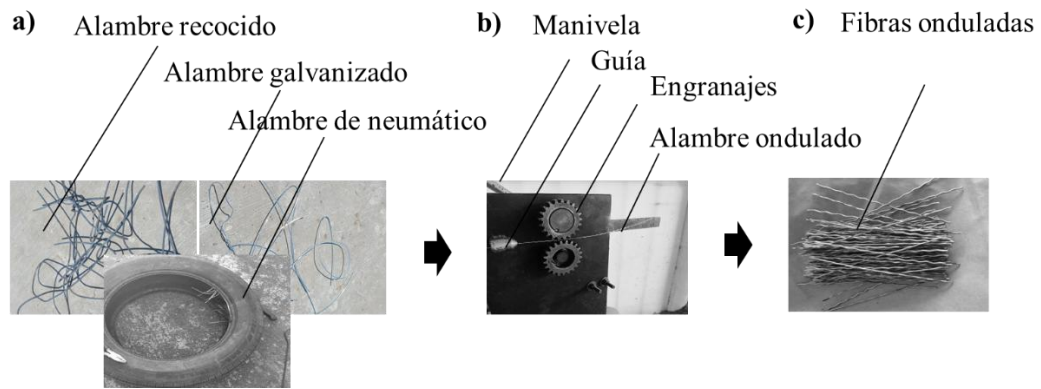


Figura 3.2. Fabricación de fibras onduladas no convencionales en el laboratorio.

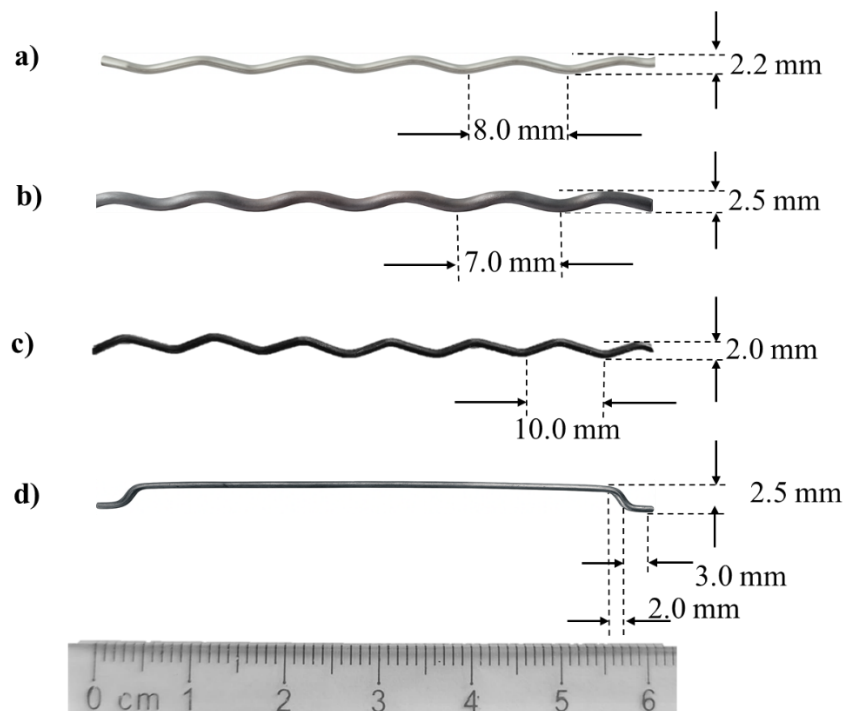


Figura 3.3. Dimensiones de las fibras, a: fibra de alambre galvanizado, b: fibra de alambre recocido, c: fibra de alambre de neumáticos, d: fibra Dramix 3D.

3.2.2 Experimentos de degradación de las fibras

Para realizar la degradación de las fibras mediante exposición a cloruros, se seleccionaron diez fibras de cada tipo como muestras de control sin degradación. De estas, cinco se utilizaron en los ensayos de *pull-out* y las otras cinco en los ensayos de tracción, con el propósito de establecer una base de comparación que permitiera evaluar los efectos de la corrosión inducida tanto en la adherencia fibra-matriz como en el comportamiento mecánico intrínseco de las fibras. Adicionalmente, se expusieron diez fibras de cada tipo a soluciones salinas durante 30 días y otras diez durante 60 días (Figura 3.4). Al igual que en el grupo de control, las fibras degradadas se destinaron parcialmente a los ensayos de *pull-out* y a las pruebas de tracción directa. Durante cada período de exposición, las fibras fueron sometidas a ciclos de mojado y secado de 7 días, alternando entre inmersión en solución de NaCl y exposición al aire ambiente. Este procedimiento reproduce de manera más realista las condiciones de servicio en estructuras de concreto, las cuales suelen

encontrarse en ambientes con humedad variable y periodos intermitentes de sequedad (Bernard, 2015; Marcos-Meson et al., 2021).

Tabla 3.1. Especificaciones de las fibras.

Tipo de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Relación de aspecto	Forma	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo elástico (GPa)
Alambre galvanizado	60	1.20	50	Ondulada	773	162
Alambre recocido	60	1.80	33	Ondulada	714	103
Alambre de neumáticos	60	1.30	67	Ondulada	2073	230
Dramix 3D	60	0.75	80	Extremo con ganchos	1125	200

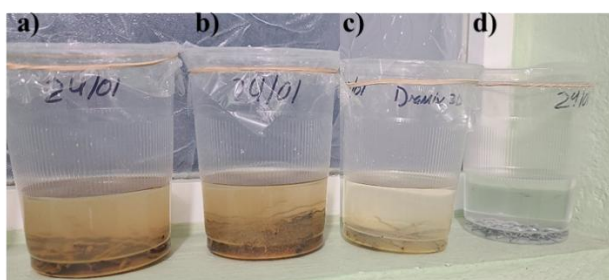


Figura 3.4. Experimentos de degradación de las fibras en soluciones de NaCl al 7% en peso, a: alambre recocido, b: alambre de neumáticos, c: Dramix 3D, d: alambre galvanizado.

De forma paralela, se incluyeron grupos adicionales de cinco fibras de cada tipo que fueron sometidas a inmersión continua en solución de NaCl durante los mismos periodos de 30 y 60 días. Esto permitió establecer una comparación directa entre ambas modalidades de degradación (continua y discontinua) y analizar sus diferencias en términos de severidad del ataque y de los efectos resultantes sobre la resistencia mecánica de las fibras. Las pruebas se realizaron en contenedores individuales que contenían una solución de NaCl al 7% en peso, preparada con agua corriente y sal, siguiendo las concentraciones utilizadas en estudios previos para acelerar la corrosión. Dichas soluciones se renovaron cada dos semanas para mantener su concentración efectiva, asegurando condiciones estables de exposición.

Todos los ensayos se desarrollaron a temperatura ambiente, garantizando que los resultados pudieran compararse con estudios reportados en la literatura que emplearon condiciones similares (Ahn et al., 2012; Marcos-Meson, Solgaard, et al., 2020). Los detalles de las muestras y de las soluciones empleadas se presentan en la Tabla 3.2. En los contenedores mencionados en la primera columna, la nomenclatura adoptada permite identificar fácilmente las condiciones de ensayo: el primer término hace referencia al medio de degradación (C para las muestras de control y Cl para las expuestas a cloruros); el segundo término el tipo de degradación (C para degradación continua y D para

degradación discontinua), el tercer término indica la concentración de la solución salina (7% en peso); y el cuarto término corresponde al tiempo de exposición (30 o 60 días).

Tabla 3.2. Nomenclatura y condiciones de degradación de las fibras expuestas a soluciones de NaCl.

Contenedores	Medio degradativo	Tiempo de exposición (días)
	Sin degradación	0
CIC-7-30	Agua de la llave + 7% NaCl	30
CIC-7-60	Agua de la llave + 7% NaCl	60
CID-7-30	Agua de la llave + 7% NaCl	30
CID-7-60	Agua de la llave + 7% NaCl	60

3.2.2.1 Determinación del grado de corrosión en las fibras

El grado de corrosión en las fibras se determinó siguiendo el procedimiento propuesto por (Yoo et al., 2020b), a partir de la pérdida de masa después de la degradación. Para ello, se seleccionaron 10 fibras de cada tipo, de las cuales cinco se degradaron mediante inmersión continua y cinco mediante ciclos húmedo-seco, todas con un tiempo de exposición de 60 días. El pesaje periódico de las fibras se efectuó cada 15 días utilizando una balanza analítica Ohaus serie PR, con una precisión de 0.001 g. Antes de cada pesaje, las fibras fueron limpiadas para eliminar la capa de óxidos superficiales generada por la corrosión. Este procedimiento consistió en sumergir las fibras en etanol durante 5 minutos y, posteriormente, frotarlas cuidadosamente con un paño hasta que no se observaran restos visibles de óxido en el material de limpieza, de acuerdo con la metodología descrita por (Yoo et al., 2020b).

El grado de corrosión se calculó mediante la Ecuación 3.1, que relaciona la pérdida de masa con la condición inicial de las fibras (Taqi et al., 2021):

$$\text{Grado de corrosión, \%} = \frac{w^0 - w}{w^0} * 100 \quad (3.1)$$

donde w^0 es la masa inicial de la fibra y w es la masa final de la fibra.

- *Inspección visual de las fibras mediante microscopio digital y determinación de la rugosidad*

Todas las fibras se analizaron utilizando un microscopio digital *KEYENCE VHX-6000*, este equipo permitió realizar observaciones de alta resolución de la superficie metálica y medir, luego de las pruebas de pull-out, la deformación de las fibras y del orificio de salida en el mortero. Además, con este instrumento se midió la rugosidad superficial de las fibras, comparando los valores absolutos obtenidos en las muestras de control con los de las fibras degradadas. Se utilizó la Ecuación 3.2 para calcular el parámetro de rugosidad superficial Ra y cuantificar este efecto:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.2)$$

Donde y_i es la altura del i -ésimo punto (um) extraído de las imágenes utilizando la altura de la coordenada. Ra define la media aritmética de los perfiles de altura en cada muestra. Este análisis permitió cuantificar las variaciones en la topografía superficial producidas por la corrosión inducida por cloruros y establecer posteriormente su relación con el comportamiento mecánico observado en los ensayos de *pull-out*.

- *Caracterización de las fibras mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de energía dispersiva*

Las fibras degradadas de manera intermitente durante 60 días se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de dispersión de energía, utilizando un microscopio electrónico de barrido modelo LSM-5900LV de la marca Jeol. El análisis SEM permitió obtener micrografías de alta resolución de la superficie de las fibras, evidenciando los cambios morfológicos asociados a la corrosión. Por su parte, la técnica EDS se empleó para identificar y cuantificar la composición elemental de los productos de corrosión formados en la superficie, proporcionando información complementaria sobre los mecanismos de degradación inducidos por la exposición a cloruros.

- *Caracterización de los productos de corrosión mediante difracción de rayos X*

Se realizaron caracterizaciones mediante difracción de rayos X de los productos de corrosión recuperados de las fibras, con el propósito de identificar las fases cristalinas formadas durante la degradación (principalmente óxidos e hidróxidos de hierro) y correlacionarlas tanto con los cambios morfológicos observados mediante SEM/EDS como con la variación en el comportamiento mecánico registrada en los ensayos de *pull-out*. Los análisis se realizaron en un difractómetro PANalytical Empyrean, empleando radiación Cu K α ($\lambda_{K\alpha1} = 1.540598 \text{ \AA}$; $\lambda_{K\alpha2} = 1.544426 \text{ \AA}$; relación $K\alpha2/K\alpha1 = 0.5$). Se utilizó una configuración de centrifugadora de reflexión-transmisión con goniometría Theta/Theta, sin monocromador, de acuerdo con las condiciones estándar de análisis recomendadas para compuestos ferrosos. Los productos de corrosión fueron separados mecánicamente de la superficie de las fibras con ayuda de una cuchilla, asegurando la remoción de las capas superficiales sin arrastrar material metálico de base. Posteriormente, las muestras se secaron hasta eliminar la humedad y, de cada una, se obtuvo un polvo fino.

3.2.3 Ensayos de *pull-out*

- *Elaboración de las muestras*

Las probetas para los ensayos de pull-out se prepararon siguiendo el diseño de mezcla sugerido por Meza de Luna y Shaikh (2020). La cantidad total de arena empleada fue de 3908 g (44.31%), con un tamaño máximo de partícula de 2 mm; se utilizaron 1664.32 g de agua (18.87%) y 3273 g de cemento (37.11%), para obtener una relación agua/cemento (a/c) de 0.51. En total se elaboraron sesenta probetas de mortero, cada una con una masa aproximada de 63 g. Se trabajó con cinco réplicas por cada conjunto experimental, lo que dio como resultado 15 muestras para cada tipo de fibra. Las fibras utilizadas fueron las degradadas de forma discontinua durante 30 y 60 días y se insertaron verticalmente en moldes cónicos que contenían la mezcla fresca, a una profundidad de 20 mm desde la superficie y localizadas en el centro de la matriz, siguiendo el procedimiento descrito por Marcos-Meson et al. (2020) (Figura 3.5b). El contenido de aire en las mezclas no pudo determinarse por falta del equipo específico; en su lugar, las probetas fueron vibradas manualmente durante 1 minuto, con el fin de liberar la mayor cantidad posible de aire atrapado en la matriz cementicia. Posteriormente, las muestras de mortero se dejaron fraguar durante 24 horas, tras lo cual fueron desmoldadas y curadas en agua durante 28 días, conforme a los procedimientos recomendados por Ahn et al. (2012) y

Hornáková y Lehner (2022). Todas las operaciones descritas se realizaron a temperatura ambiente.

- *Ejecución de los ensayos*

En este estudio se utilizó una configuración de ensayo típica para los ensayos de *pull-out* unilaterales. Las probetas se ensayaron utilizando la misma máquina de ensayos universal de 30 kN, Instron 1026, utilizada para ensayos de tracción, bajo una carga de tracción constante. Las matrices de mortero se sujetaron mediante una cápsula de aluminio, las fibras se sujetaron con mordazas y la tensión se midió con una báscula de gancho de la marca Mini Crane Scale modelo OSC-L (véase la Figura 3.5a). Los ensayos de pull-out se ejecutaron a la velocidad mínima admisible de la máquina, que era de 0.5 mm/min. La fuerza de tracción aplicada se incrementó hasta que se produjo una falla en la fuerza de adhesión entre la fibra y el mortero, siguiendo las indicaciones de la norma EN 14651 para ensayos de flexión de tres puntos, ya que actualmente aún no existe normativa para este tipo de pruebas (Kragh et al., 2019). Finalmente, las fibras fueron clasificadas según el modo de fallo registrado durante los ensayos (Figura 3.6), distinguiéndose entre: (1) extracción completa de la fibra, (2) rotura de la fibra y (3) rotura del mortero. Esta clasificación permitió identificar la incidencia de cada tipo de fallo y relacionarlo con las condiciones de degradación y el tipo de fibra empleada.

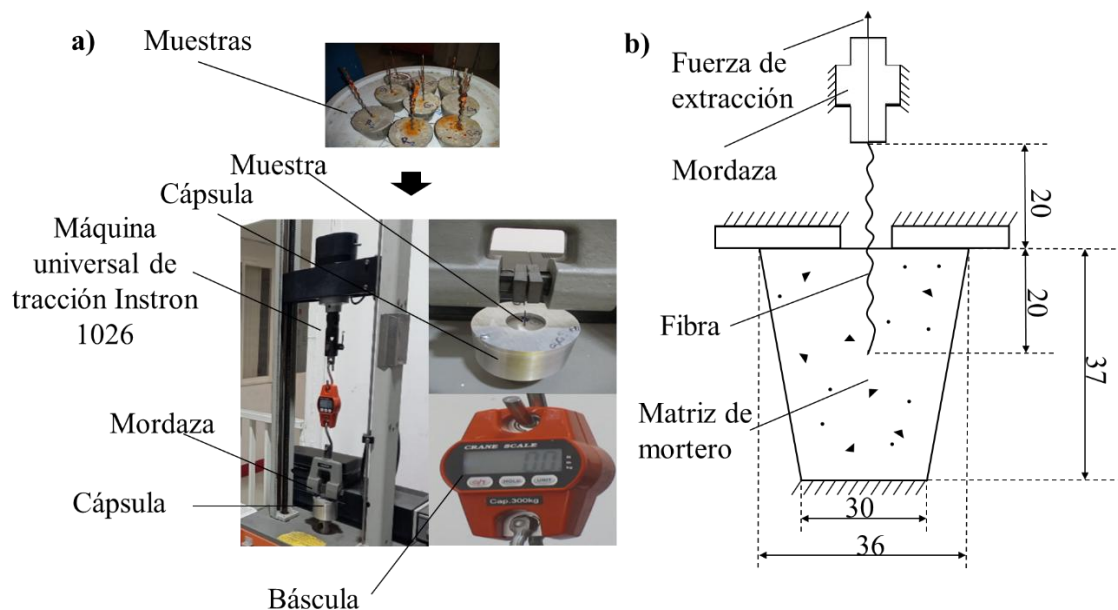


Figura 3.5. Configuración utilizada para los ensayos de *pull-out*: a) máquina de tracción, b) dimensiones de las muestras utilizadas (las dimensiones se muestran en mm).



Figura 3.6. Diferentes modos de fallo observados durante pruebas de extracción.

3.2.4 Ensayos de tracción

Una parte de las fibras degradadas se evaluó mediante ensayos de tracción directa, realizados de acuerdo con la norma ASTM C1557-14, la cual establece el procedimiento para determinar las propiedades mecánicas de fibras individuales empleadas en materiales compuestos. Previo al ensayo, todas las fibras fueron limpiadas cuidadosamente, ya que estas correspondieron a las mismas que se habían utilizado para recolectar los productos de corrosión destinados a los análisis de XRD. La limpieza permitió garantizar que no quedaran restos de óxidos superficiales que pudieran interferir en la medición de su resistencia mecánica.

Las pruebas se realizaron en una máquina universal Instron 1026, con capacidad de 30 kN, operada bajo control de desplazamiento a velocidad constante de 0.5 mm/min. No se empleó un controlador de carga específico, sino que la aplicación de la fuerza se mantuvo estable a la velocidad indicada. Cada fibra se sujetó mediante mordazas metálicas, con una longitud libre de 28 mm entre mordazas, asegurando así la correcta alineación de la muestra. La configuración del montaje se muestra en la Figura 3.5, donde la única variación con la configuración utilizada en las pruebas de pull-out fue que se sustituyó la cápsula de aluminio donde iba el mortero por otra mordaza para sujetar la fibra (ver la Figura 3.7).

De cada condición experimental (control, 30 días y 60 días de exposición, tanto en régimen de inmersión continua como de ciclos húmedo-seco) se ensayaron cinco fibras por grupo, lo que permitió obtener resultados estadísticamente representativos. A partir de las curvas carga-deformación, se calcularon los principales parámetros mecánicos de interés como el módulo de elasticidad de la fibra, el esfuerzo máximo a tracción, la deformación unitaria última. Estos parámetros fueron comparados entre fibras sin degradación y fibras expuestas a cloruros, con el objetivo de correlacionar la pérdida de propiedades mecánicas con el tipo y tiempo de exposición. Además, los resultados de tracción se analizaron de manera complementaria a los obtenidos en los ensayos de *pull-out*, para evaluar de forma conjunta la influencia de la corrosión sobre la adherencia fibra-matriz y sobre la resistencia propia de las fibras.

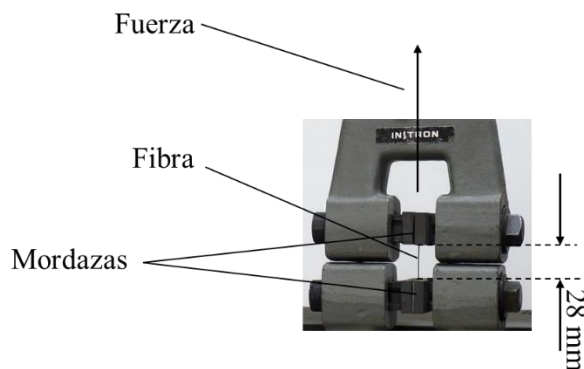


Figura 3.7. Configuración experimental para los ensayos de tracción de las fibras.

3.3 Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos experimentales diseñados para evaluar el efecto de la degradación por cloruros en la adherencia fibra-matriz y en las propiedades mecánicas de las fibras no convencionales analizadas. Los hallazgos se organizan de manera secuencial, comenzando con la determinación del grado de corrosión a partir de la pérdida de masa de las fibras, seguido

de las caracterizaciones microestructurales mediante SEM/EDS y XRD, que permitieron identificar los cambios morfológicos y las fases cristalinas formadas en los productos de corrosión. Posteriormente, se presentan los resultados de los ensayos mecánicos de pull-out y de tracción de fibras, los cuales aportan información sobre el comportamiento de la adherencia y la resistencia residual tras la exposición a ambientes con cloruros. La integración de estos resultados ofrece una visión general del proceso de degradación y de sus efectos en las propiedades físicas y mecánicas de las fibras y del sistema fibra-matriz, lo que constituye la base para la interpretación y el análisis comparativo que se desarrollará en la sección de discusión.

3.3.1. Grado de corrosión en las fibras

El grado de corrosión de las fibras se evaluó a partir de la pérdida de masa porcentual tras la exposición a soluciones de NaCl durante 60 días, considerando tanto la degradación continua (inmersión) como la degradación discontinua (ciclos húmedo-seco). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.8. En términos generales, se observó un incremento sistemático de la pérdida de masa con el tiempo de exposición. Asimismo, el régimen de degradación discontinua produjo pérdidas de masa superiores a las de la degradación continua, lo que indica que los ciclos de humedad y secado aceleran la corrosión en todas las fibras estudiadas.

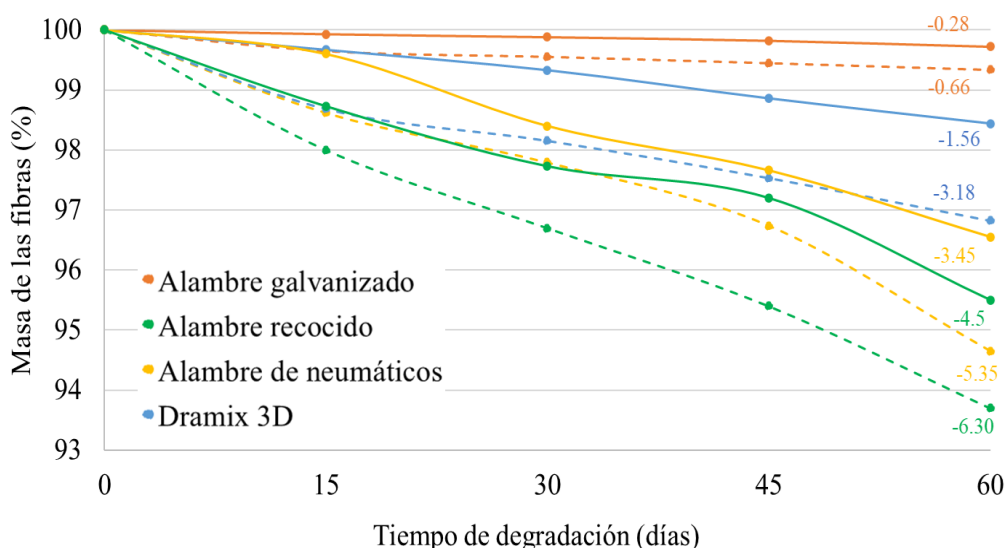


Figura 3.8. Grado de corrosión de las fibras con el paso del tiempo. Las líneas continuas pertenecen a la forma de degradación continua y las líneas discontinuas pertenecen a la degradación mediante ciclos de mojado y secado.

Las fibras galvanizadas fueron las menos afectadas, con pérdidas de 0.28% en inmersión continua y 0.66% en régimen discontinuo, lo que pone en evidencia el efecto protector del recubrimiento de zinc de este material frente al ataque por cloruros. Las fibras recocidas presentaron el deterioro más severo, alcanzando pérdidas de 4.50% y 6.30% en los dos regímenes, lo que demuestra su alta vulnerabilidad por carecer de un recubrimiento que limite el avance de la corrosión. Las fibras recicladas de alambre de neumáticos mostraron un comportamiento intermedio con pérdidas de 3.45% en inmersión continua y 5.35% en ciclos húmedo-seco, mientras que las fibras Dramix 3D presentaron un desempeño mejor que las fibras recocidas y recicladas, aunque inferior al de las galvanizadas, con pérdidas de 1.56% y 3.18% respectivamente.

De esta manera, la jerarquía de resistencia a la corrosión establecida a partir de estos resultados corresponde a galvanizado como la opción más resistente, seguido de Dramix 3D, fibras recicladas de neumáticos y finalmente las fibras de alambre recocido como la condición más susceptible. La comparación entre los métodos degradativos muestra que, en promedio, las fibras expuestas a degradación discontinua duplicaron o incluso triplicaron la pérdida de masa registrada en inmersión continua. Este efecto se explica por la alternancia entre humedad y oxigenación en los ciclos húmedo-seco, que acelera los procesos de corrosión localizada en comparación con la exposición continua (Yoo et al., 2023a).

3.3.2. Determinación de la rugosidad

Se evaluó la rugosidad superficial de las fibras antes y después del proceso de degradación como indicador adicional de corrosión. Se observó un aumento significativo de la rugosidad debido a la oxidación de las fibras. Además, se identificó una relación directa entre el aumento de la rugosidad y la intensidad del proceso de corrosión. La Tabla 3.3 muestra la rugosidad de las fibras antes de la degradación (*Ra inicial*) y después de la degradación (*Ra final*). Los resultados de rugosidad media aritmética muestran un incremento notable en todas las fibras tras los ciclos de degradación, lo que confirma que la corrosión inducida por cloruros altera significativamente la morfología superficial, lo que concuerda con estudios previos (Yoo, et al., 2020b; Zhang et al., 2020).

En las fibras galvanizadas, el valor inicial de 0.009 μm aumentó a 0.012 μm , lo que representa una variación moderada del 133%, asociada a la pérdida parcial de la capa protectora de zinc y a la formación de óxidos superficiales delgados. En contraste, las fibras recocidas experimentaron el cambio más severo: de 0.015 μm a 0.068 μm , equivalente a un incremento del 433%, evidenciando un ataque corrosivo profundo en ausencia de recubrimiento protector. Un comportamiento similar se observó en las fibras de neumáticos reciclados, que pasaron de 0.013 μm a 0.070 μm , con una variación del 438%, reflejando una rugosidad muy elevada vinculada a la formación de capas de óxido. Por su parte, las fibras Dramix 3D mostraron un aumento intermedio, de 0.010 μm a 0.037 μm , correspondiente al 270%, lo cual sugiere que, aunque el diseño industrial de estas fibras ofrece mayor resistencia que las recocidas o recicladas, la superficie aún se ve fuertemente afectada por los cloruros. En conjunto, la tendencia indica que las fibras sin recubrimiento (recocido y neumáticos) presentan un deterioro mucho más marcado que las galvanizadas o Dramix. El incremento de rugosidad es un indicador directo de la pérdida de material metálico y de la heterogeneidad superficial generada por la corrosión, lo cual podía repercutir en la adherencia fibra-matriz.

Tabla 3.3 Variación de la rugosidad de la fibra después del proceso de degradación con NaCl al 7% de concentración másica durante 60 días.

Fibras	<i>Ra inicial</i> (μm)	<i>Ra final</i> (μm)	Variación (%)
Alambre galvanizado	0.009	0.012	133
Alambre recocido	0.015	0.068	433
Alambre de neumáticos	0.013	0.070	438
Dramix 3D	0.010	0.037	270

3.3.3 Caracterización por SEM y EDS e inspección visual de fibras mediante microscopio digital

La técnica de espectroscopía de energía dispersiva permitió analizar la distribución y concentración de los elementos presentes en la superficie corroída de las fibras de acero provenientes de neumáticos reciclados. El mapeo elemental obtenido muestra que los elementos predominantes son hierro (Fe) y oxígeno (O), lo cual indica la formación de óxidos e hidróxidos de hierro como productos principales de corrosión. Asimismo, se detectaron sodio (Na) y cloro (Cl), lo que confirma la influencia del medio de degradación empleado, compuesto por una solución de cloruro de sodio. También se identificó carbono (C), propio de la composición del acero, dado que este elemento forma parte fundamental de su estructura cristalina y de sus propiedades mecánicas. En menores proporciones aparecieron silicio (Si), calcio (Ca), magnesio (Mg) y plomo (Pb), posiblemente asociados a impurezas superficiales o a residuos de fabricación del alambre original. Es importante señalar que la presencia de estos elementos ha sido reportada previamente por (Wang et al., 2008) en estudios sobre la composición química de alambres de acero extraídos de neumáticos, lo que respalda la naturaleza heterogénea del material utilizado en este tipo de fibras recicladas.

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido permitió examinar la morfología superficial de las fibras corroídas y evaluar el grado de deterioro generado por la exposición a cloruros. Las micrografías obtenidas revelaron una superficie heterogénea, con presencia de picaduras, grietas finas y acumulaciones de productos de corrosión distribuidas irregularmente a lo largo de la fibra. Estas irregularidades son indicativas de un ataque localizado, característico de la corrosión por cloruros, y evidencian la pérdida de continuidad del material metálico. En comparación con las fibras control, las degradadas, presentan una textura más rugosa y con zonas donde el metal base se encuentra parcialmente expuesto, lo que confirma un proceso progresivo de deterioro superficial.

Complementariamente, la técnica de espectroscopía de energía dispersiva permitió analizar la distribución y concentración de los elementos presentes en la superficie corroída de las fibras. El mapeo elemental obtenido muestra que los elementos predominantes son hierro (Fe) y oxígeno (O), lo cual indica la formación de óxidos e hidróxidos de hierro como productos principales de corrosión. Asimismo, se detectaron sodio (Na) y cloro (Cl), lo que confirma la influencia del medio de degradación empleado, compuesto por una solución de cloruro de sodio. También se identificó carbono (C), propio de la composición del acero, dado que este elemento forma parte fundamental de su estructura cristalina y de sus propiedades mecánicas. En menores proporciones aparecieron silicio (Si), calcio (Ca), magnesio (Mg) y plomo (Pb), posiblemente asociados a impurezas superficiales o a residuos de fabricación del alambre original. Es importante señalar que la presencia de estos elementos ha sido reportada previamente por Wang et al. (2008) en estudios sobre la composición química de fibras de acero.

- *Fibras de alambre galvanizado*

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido reveló que las fibras de alambre galvanizado no presentaban signos visibles de corrosión significativa tras el proceso de exposición a cloruros. La superficie metálica conserva en gran medida la continuidad del recubrimiento de zinc, mostrando únicamente una delgada capa superficial de óxido distribuida de manera irregular. En la Figura 3.9b y 3.10 se aprecia una morfología más o menos homogénea, con rugosidad moderada y sin evidencias de desprendimiento de los productos de corrosión, aunque en ciertas zonas se observan

picaduras muy superficiales y grietas finas que sugieren el inicio de un ataque localizado, propio de la corrosión por cloruros. Asimismo, se detectaron depósitos cristalinos y granulares, asociados a la precipitación de sales tras la etapa de secado (Figura 3.9b).

Los resultados de espectroscopía de energía dispersiva (véase la Figura 3.8a y 3.8c) corroboran esta observación. La relación atómica Fe:O $\approx$ 0.75 es consistente con la estequiometría de Fe₃O₄ (3Fe:4O), fase habitual en etapas iniciales o intermedias de la corrosión del acero bajo condiciones con disponibilidad intermitente de oxígeno y presencia de cloruros, especialmente cuando coexisten zonas con distinto potencial redox (Nasrazadani y Raman, 1993). La señal apreciable de Zn confirma que el recubrimiento galvanizado no ha sido totalmente consumido, lo cual es un comportamiento esperado cuando la corrosión es moderada, mientras que la presencia de Na y Cl reflejan el depósito salino procedente de la solución de NaCl. Además, según McMahon et al. (2019), en superficies galvanizadas, además de óxidos/hidróxidos de hierro, suelen detectarse fases de zinc propias de ambientes clorurados, por ejemplo, la simonkolleita (Zn₅(OH)₈Cl₂·H₂O), la cual podría encontrarse en el estudio de XRD.

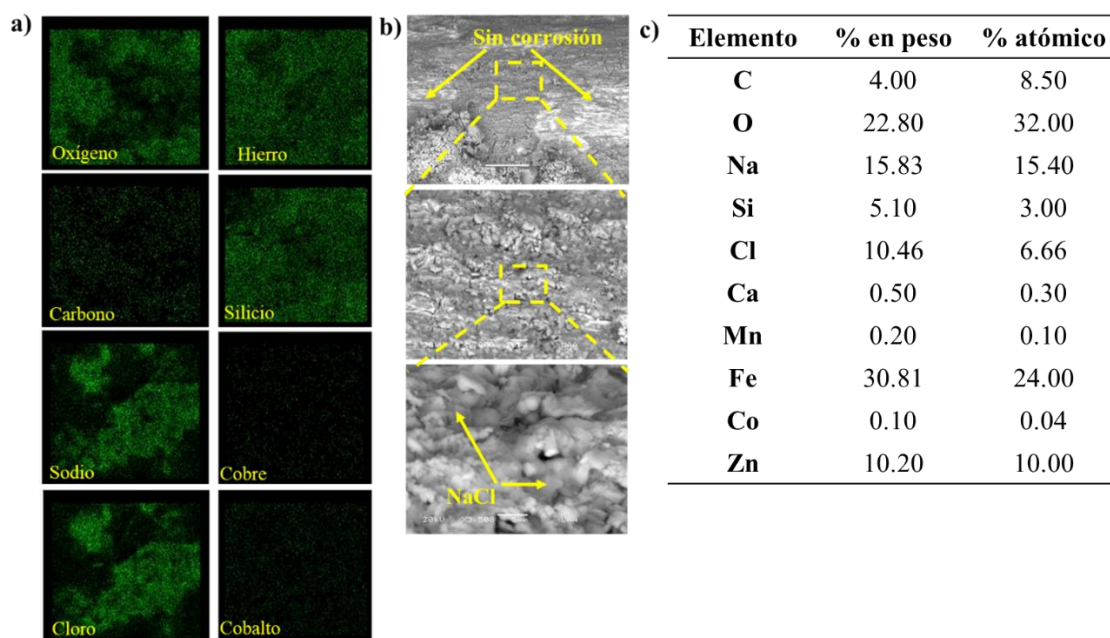


Figura 3.9. Distribución de elementos en la superficie de las fibras de alambre galvanizado después de 60 días de degradación discontinua: a) Mapeo EDS de los elementos O, Fe, C, Si, Na, Cu, Cl y Co; b) Imágenes SEM; c) Tabla de composición.

Estos resultados indican que las fibras galvanizadas experimentaron un proceso de degradación leve, con una superficie parcialmente oxidada pero aún protegida, esto se puede corroborar en la Figura 3.10. La conservación del zinc superficial sugiere un comportamiento análogamente protector al efecto galvánico, donde el Zn continúa actuando como ánodo de sacrificio frente al hierro base. Este escenario favorece la integridad estructural de la fibra, limitando la pérdida de sección transversal. La Figura 3.10 muestra la morfología superficial de la fibra de alambre galvanizado observada mediante microscopio digital a diferentes niveles de aumento. En la Figura 3.9a (lente: ZS20X20), se aprecia una vista general de la fibra, donde se distingue la acumulación de productos de corrosión de tonalidad marrón-rojiza concentrados principalmente en las zonas de curvatura y ondulación. La mayor acumulación de productos de corrosión en estas zonas se asocia directamente con los efectos microestructurales inducidos por la

deformación en frío durante el proceso de conformado de la fibra. Las ondulaciones, generadas por doblado y compresión repetida, producen tensiones residuales que favorecen la aparición de microfisuras en la capa de zinc de esta fibra, reduciendo su continuidad y permitiendo una mayor penetración de iones cloruro y de oxígeno (Tzimas y Papadimitriou, 2001).

Al aumentar la resolución del microscopio a 150 aumentos (Figura 3.10b), se observa con mayor detalle la superficie del recubrimiento, donde aparecen microdepósitos de productos de corrosión distribuidos de forma irregular pero no se observan estructuras complejas de óxidos ni hidróxidos. En conjunto, las observaciones sugieren que el proceso de corrosión en el alambre galvanizado se encuentra en una fase incipiente, caracterizada por la formación localizada de compuestos de hierro. Esta condición es coherente con los resultados obtenidos por SEM/EDS y confirma que, en las primeras etapas de exposición, el recubrimiento galvanizado continúa proporcionando protección efectiva, aunque comienzan a desarrollarse los primeros productos de corrosión asociados a la acción del cloruro de sodio.

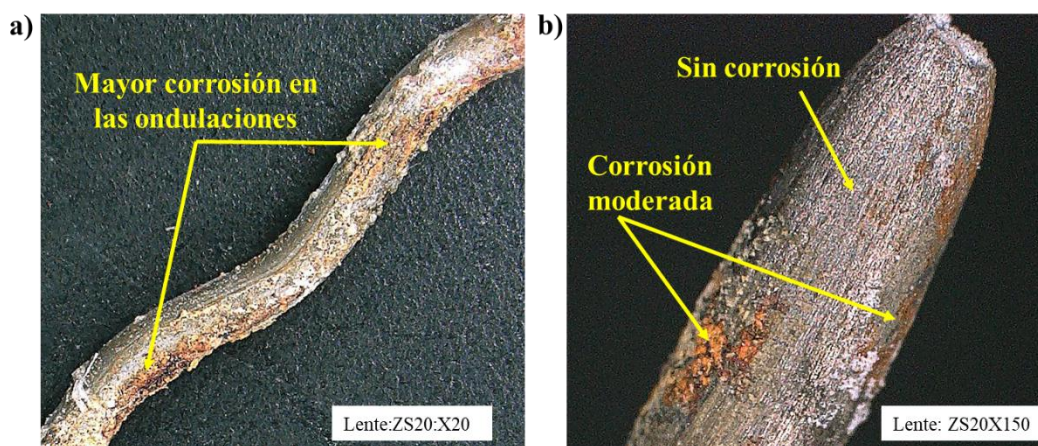


Figura 3.10. Imágenes de microscopio digital de las fibras de alambre galvanizado.

- *Fibras de alambre recocido*

En el caso de las fibras de alambre recocido, los análisis realizados mediante SEM y EDS evidencian un estado de degradación más avanzado en comparación con las fibras galvanizadas. Las micrografías SEM muestran superficies con una rugosidad marcada y la presencia de fisuras y cavidades irregulares, resultado de un ataque corrosivo más severo (Figura 3.11b). Se observan también áreas con desprendimiento parcial de material, lo que indica que la corrosión ha penetrado hacia el interior del acero, debilitando la integridad superficial de la fibra. En la Figura 3.12a se observa además que, la corrosión se ha extendido prácticamente sobre toda la superficie de la fibra, evidenciando un ataque generalizado del acero. Asimismo, se aprecia una reducción notable de la sección transversal en una zona específica, lo que confirma la severidad del proceso corrosivo y su impacto directo sobre la integridad estructural de la fibra.

En esta fibra, se observó una capa compacta y agrietada, la cual es común en atmósferas altamente salinas. Se encontró que, bajo las condiciones experimentales y debido a la rápida oxidación, la magnetita (Fe_3O_4) parece convertirse con el tiempo en estructuras más desarrolladas, como lo muestra la Figura 3.12b. Los cristales que crecen a partir de la magnetita y que aparecen como filamentos finos y porosos o láminas afiladas podían ser de ferrehidrita ($\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$). La formación de estructuras tipo nido de goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) ocurre directamente sobre la capa sedimentaria en forma de patrones

florales. Además, la relación atómica Fe:O fue de 23.40:50.23, similar al 25:50 teórico para α -FeOOH (Figura 3.11c). También la composición superficial dominada por hierro y oxígeno, con valores de 45.96% en peso y 34.36%, respectivamente indican un proceso de oxidación avanzada del acero, asociado a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro, principalmente magnetita y goethita, que son productos típicos de corrosión en ambientes clorurados (Raman et al., 1989; Antunes et al., 2014).

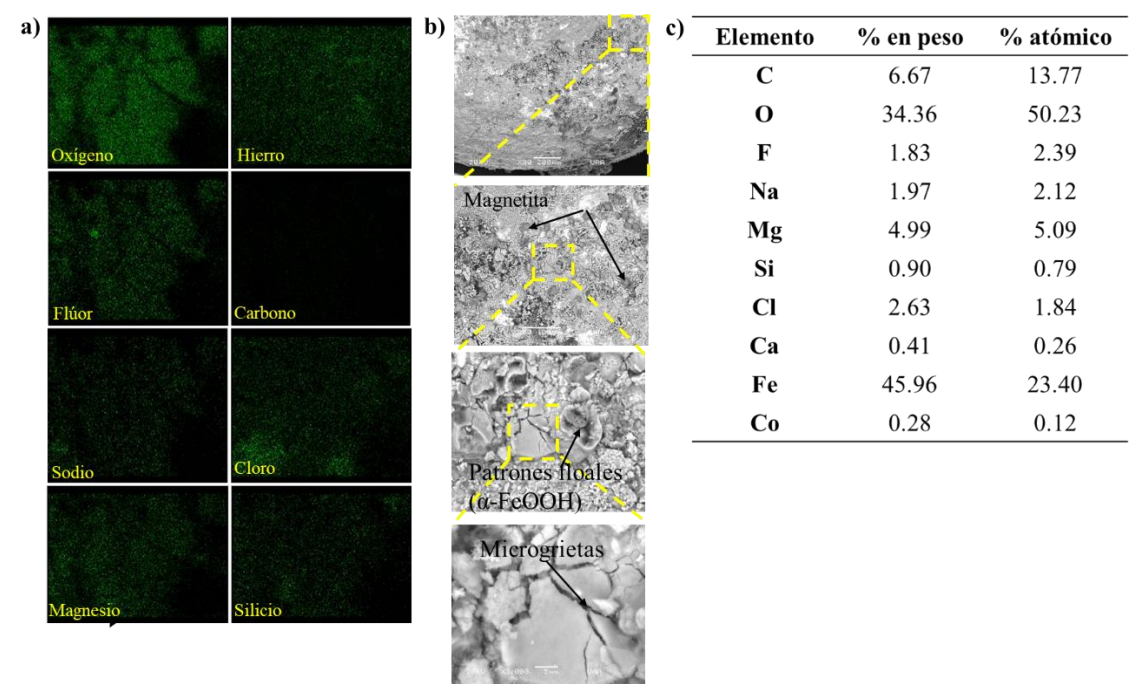


Figura 3.11. Distribución de elementos en la superficie de las fibras de alambre recocido después de 60 días de degradación discontinua: a) Mapeo EDS de los elementos O, Fe, F, C, Na, Cl, Mg y Si; b) Imágenes SEM; c) Tabla de composición.



Figura 3.12. Imágenes de microscopio digital de las fibras de alambre recocido.

En conjunto, los resultados confirman que la corrosión del acero recocido progresa mediante la formación de una capa mixta de óxidos compactos y productos hidratados, donde la presencia de cloruros y oxígeno promueve la ruptura periódica de la película pasiva y la regeneración de nuevos óxidos, un mecanismo típico del ataque por cloruros en ciclos húmedo-seco (Yoo et al., 2020b; Marcos-Meson et al., 2021). La detección de flúor (1.83%), sodio (1.97%) y cloro (2.63%) confirma la penetración de iones provenientes de la solución salina en la superficie metálica, lo que sugiere la existencia

de un proceso de corrosión localizada asistida por cloruros. La presencia de magnesio (4.99%) y calcio (0.41%), en proporciones moderadas, puede atribuirse a la precipitación de sales insolubles procedentes del agua utilizada. Por su parte, el carbono (6.67%) es característico del acero base, aunque parte de este contenido puede corresponder a compuestos carbonatados o a residuos orgánicos adsorbidos durante las etapas de secado.

- *Fibras de alambre de neumáticos*

La Figura 3.13c muestra que el hierro (Fe) presenta un alto porcentaje en peso (34.27%) pero bajo en átomos (24.61%), lo cual sugiere una oxidación parcial del hierro con la consecuente formación de óxidos y, posiblemente, cloruros de hierro. El oxígeno, por su parte, alcanza un 32.02% atómico, confirmando un estado avanzado de oxidación y apoyando la hipótesis de que en la superficie se formaron óxidos e hidróxidos de hierro. El análisis de la relación atómica Fe:O arrojó un valor de 0.768, cercano a la relación teórica de 0.75 correspondiente a la magnetita, lo que respalda la presencia predominante de esta fase como producto de corrosión.

La oxidación en las fibras de alambre de neumáticos dio lugar a una capa de óxido compacta y agrietada, cuya morfología se asemeja a la del suelo seco y resquebrajado por la falta de humedad (véanse las Figuras 3.13b y 3.14b). Este mismo aspecto fue corroborado mediante el microscopio digital, donde se apreció una capa negra con grietas bien definidas (véase la Figura 3.14b). De manera coincidente, Raman et al. (1989) documentaron que, en atmósferas altamente salinas, luego de tres meses de exposición, se desarrollan capas sucesivas de óxido compuestas principalmente por magnetita, la cual se adhiere fuertemente al acero. Por lo tanto, es razonable asumir que la capa de óxido formada en las fibras de acero de neumáticos está constituida en su mayoría por Fe_3O_4 .

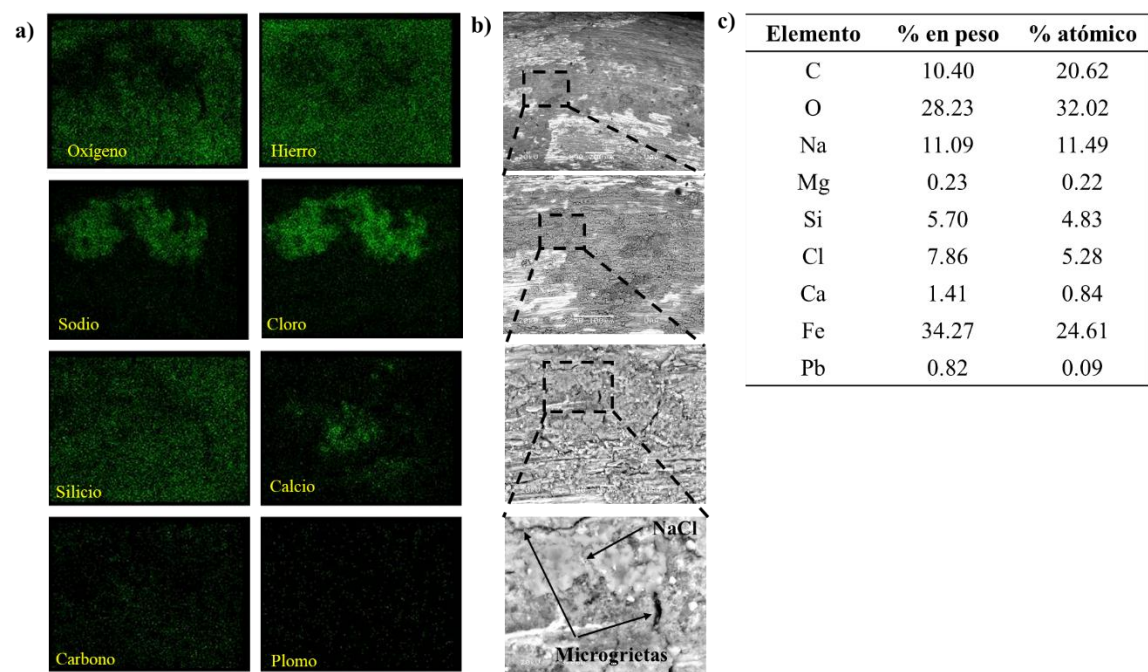


Figura 3.13. Distribución de elementos en la superficie de las fibras de alambre de neumáticos después de 60 días de degradación discontinua: a) Mapeo EDS de los elementos O, Fe, Na, Cl, Si, Ca, C y Pb; b) Imágenes SEM; c) Tabla de composición.

Adicionalmente, en algunas zonas localizadas se observaron formaciones superficiales con crecimiento en forma de pluma (Figura 3.14b). Aunque la fase asociada

a esta morfología no ha podido ser identificada con certeza, podría corresponder a ferrihidrita, como sugieren estudios previos en aceros expuestos a soluciones con cloruros bajo condiciones de inmersión continua (Raman et al., 1989; Antunes et al., 2014). Este hallazgo revela que, además de la magnetita, pueden coexistir fases secundarias que dependen de las condiciones locales de humedad, oxigenación y concentración de cloruros. La Figura 3.14 muestra la fibra de alambre de neumático observada con un microscopio digital a diferentes aumentos. La Figura 3.14a (Lente: ZS20X20) muestra una vista general de la fibra, evidenciando una acumulación de productos de corrosión de color marrón rojizo en todas sus superficies, característicos de la oxidación del hierro. A mayor aumento, se identifican dos fases principales de productos de corrosión: magnetita y ferrihidrita ($\text{Fe}_4(\text{OH},\text{O})_{12}$), véase la Figura 3.14b (Lente: ZS20X150). La magnetita se encuentra en áreas más compactas, mientras que la ferrihidrita aparece como una fase más amorfa, por lo que es posible asumir que puede actuar como una capa de relleno en etapas muy tempranas de la corrosión. Sin embargo, debido a su inestabilidad y baja adhesión, no es muy eficaz para aumentar la fricción con el concreto (Lu et al., 2020). También se aprecian microfisuras, que podrían estar asociadas a procesos de expansión volumétrica durante la formación de óxidos, que comprometen la integridad de la fibra.

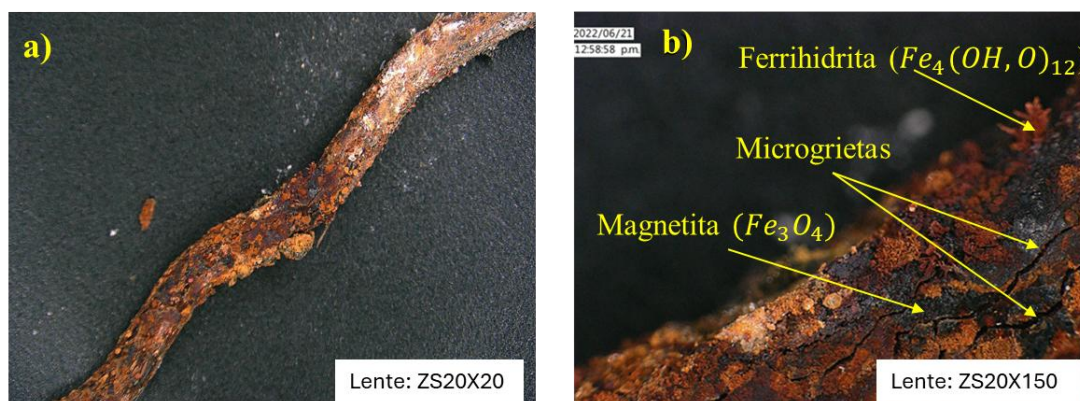


Figura 3.14. Imágenes de microscopio digital de fibras de alambre de neumáticos.

- *Fibras Dramix 3D*

El mapeo EDS de las fibras Dramix (Figura 3.15a) revela la distribución elemental en la superficie corroída del acero. La combinación de Fe y O en alta proporción atómica confirma la formación de óxidos de hierro como principales productos de corrosión. La presencia de cloruros (Cl) evidencia el carácter agresivo del medio, responsable de acelerar los procesos de oxidación. Otros elementos detectados, como C, Si y Mn, forman parte de la propia composición del acero, dado que estas fibras corresponden a un acero al carbono con adiciones de Si y Mn que mejoran sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión. Asimismo, se identificó una concentración relativamente elevada de Ca, probablemente asociada al contenido mineral del agua utilizada en la preparación de la solución de NaCl, lo que explica su aparición en el análisis superficial.

En cuanto a la cuantificación puntual (Figura 3.15c), la fracción analizada presentó 21.05% en peso de Fe pero únicamente 9.12% atómico, lo que indica que una parte significativa del hierro se encuentra oxidada. El oxígeno alcanzó valores de 32.69% en peso y 49.45% atómico, lo cual confirma un estado avanzado de oxidación y la formación de una capa de óxido estable sobre la superficie metálica. Las micrografías SEM de la Figura 3.15b muestran, al igual que en el caso de las fibras de acero

procedentes de alambre de neumáticos, una capa de óxido compacta y agrietada, cuya morfología sugiere que se trata tentativamente de magnetita. Sobre esta capa se observan además estructuras superficiales con aspecto de cápsulas semejantes a fibras de algodón.

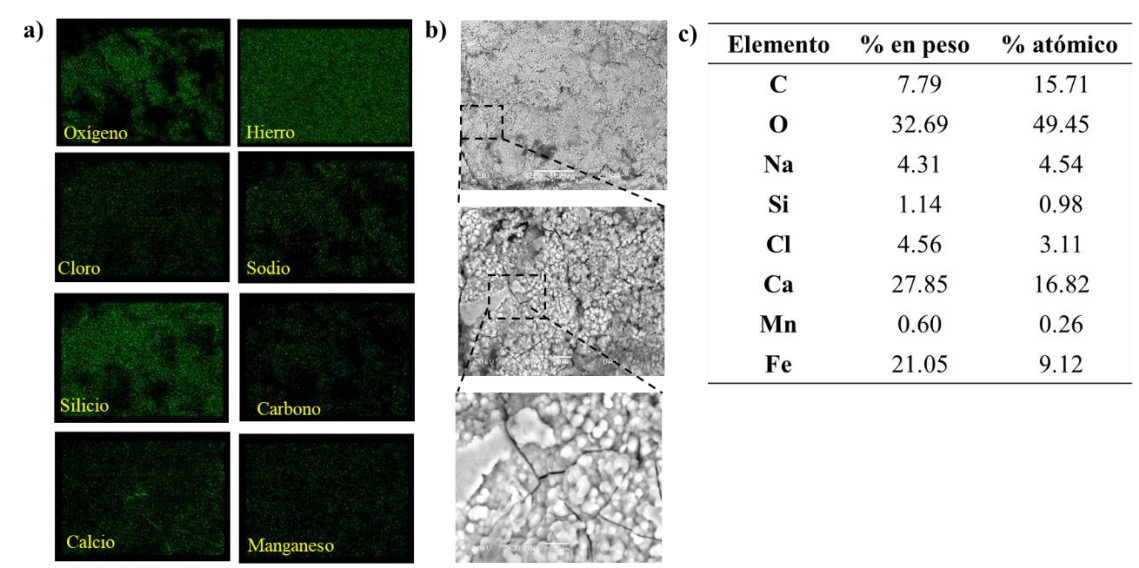


Figura 3.15. Distribución de elementos en la superficie de las fibras Dramix después de 60 días de degradación: a) Mapeo EDS de los elementos O, Fe, Na, Cl, Si, C, Ca y Mn; b) Imágenes SEM; c) Tabla de composición.

Estudios previos, como los de Raman et al. (1989) y Dhaiveegan et al. (2016), han asociado estas formaciones con fases de α -FeOOH (goethita) en estado amorfo, típicamente generadas en ambientes con cloruros bajo condiciones de inmersión intermitente. La coexistencia de estas morfologías sugiere que, además de magnetita, se desarrollan fases secundarias dependientes de la disponibilidad local de oxígeno y de la humedad, lo que resalta la complejidad de los mecanismos de corrosión en estas fibras. La Figura 3.16 presenta imágenes de microscopio digital de fibras Dramix degradadas. Los productos de corrosión son apenas visibles en toda la superficie de la fibra después de 60 días, excepto en la zona del gancho de la fibra (Figura 3.14a). La corrosión localizada en el gancho puede deberse a tensiones residuales en estas áreas causadas por la deformación en frío del acero, que genera un potencial electroquímico diferente al del resto de la fibra y provoca la formación anódica (Banthia y Foy, 1989). Esto se puede apreciar con mayor detalle en la Figura 3.16b, donde se observa la formación de productos de corrosión localizados en el gancho, mientras que prácticamente no hay signos de corrosión en los laterales. Además, se observa una capa de óxido oscuro, similar a las fibras de alambre de un neumático, lo que confirma la presencia de magnetita.

3.3.4. Caracterización mediante XRD, identificación de fases de corrosión

Los difractogramas de rayos X obtenidos para las fibras estudiadas, presentados en la Figura 3.17, revelan la formación de óxidos e hidróxidos de hierro como principales productos de corrosión, los cuales se distinguen claramente por sus posiciones y distribuciones características de intensidad en el rango de 2θ . Las fases cristalinas predominantes corresponden a α -FeOOH (goethita), γ -FeOOH (lepidocrocita), magnetita y óxido e hidróxido de zinc en el caso de las fibras galvanizadas, acompañadas por señales secundarias de NaCl (halita) provenientes del medio de exposición. Los resultados obtenidos son coherentes con las observaciones microestructurales por SEM, que

mostraron superficies rugosas y heterogéneas, con zonas de pérdida de material, acumulaciones irregulares de productos de corrosión y microgrietas asociadas al crecimiento diferenciado de las fases férricas.

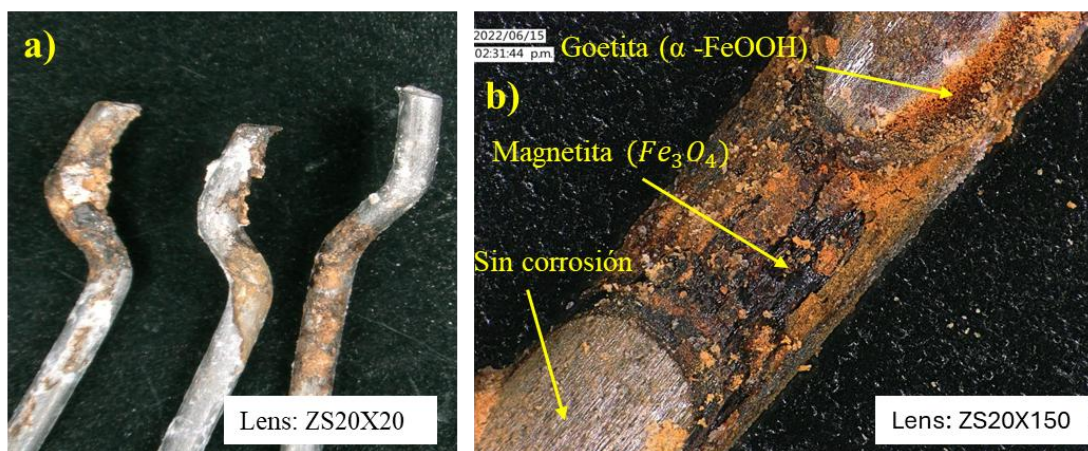


Figura 3.16 Imágenes de microscopio digital de las fibras Dramix.

- *Fibras de alambre galvanizado*

Las fibras de alambre galvanizado mostraron picos intensos localizados en $2\theta \approx 26.5^\circ$ y 32° , característicos de la fase de óxido de zinc o zincita (ZnO) con estructura tipo wurtzita, lo que confirma que la oxidación del zinc fue el proceso dominante en la superficie del recubrimiento y se detectaron picos secundarios de baja intensidad en $2\theta \approx 26^\circ$, 28.8° , y 36° asociados con hidróxido de zinc, conocido como wülfingita, $[\text{Zn}(\text{OH})_2]$. La presencia de estas fases coincide con las observaciones realizadas mediante microscopía electrónica de barrido, donde se apreciaron depósitos granulares y estructuras propias de los hidroxiclорuros de zinc, lo que confirma que el proceso de corrosión se encuentra en una fase inicial de degradación, caracterizada por una formación superficial y localizada de productos de corrosión.

El hecho de que los picos asociados a óxidos de hierro (por ejemplo, Fe_3O_4 en $2\theta \approx 24^\circ$, 38.8° , 42.5° y 43.5°) sean de muy baja intensidad sugiere una mínima participación del sustrato de acero en la reacción, lo cual implica que el recubrimiento de zinc todavía cumple efectivamente su función como ánodo de sacrificio. En este estado, el zinc se oxida preferentemente, protegiendo al acero subyacente de la corrosión directa. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Vera et al. (2013) y Wallinder y Leygraf (2017), quienes observaron que, durante las primeras etapas de exposición de aceros galvanizados en medios clorados, la fase predominante es el ZnO , mientras que el $\text{Zn}(\text{OH})_2$ actúa como una fase intermedia inestable que puede transformarse en óxidos más estables conforme avanza la degradación.

En concordancia, las imágenes SEM obtenidas muestran una superficie con acumulaciones localizadas de productos cristalinos y microgrietas superficiales, pero sin una destrucción significativa del recubrimiento metálico, lo que refuerza la interpretación de que la corrosión se encuentra en un estado incipiente y controlado. La coexistencia de ZnO y $\text{Zn}(\text{OH})_2$ observada tanto por XRD como por SEM refleja un proceso de autopasivación parcial, donde los productos de corrosión del zinc forman una barrera compacta que reduce la difusión de iones cloruro hacia el acero. Este comportamiento es típico de los recubrimientos galvanizados expuestos a soluciones salinas de baja a moderada agresividad, y ha sido ampliamente documentado en estudios recientes sobre

la evolución inicial de la corrosión en sistemas Zn-Cl (Manhabosco et al., 2018; Yadav et al., 2024).

- *Fibras de alambre recocido*

El patrón de difracción de rayos X correspondiente a los productos de corrosión formados en las fibras de acero recocido (Figura 3.17) evidenció la presencia predominante de fases de óxidos e hidróxidos de hierro, lo que confirma el avanzado proceso de oxidación detectado en las observaciones microestructurales. Los picos más intensos se localizaron en $2\theta \approx 30.1^\circ$, 35.5° , 43.1° , 57.0° y 62.6° , correspondientes a la magnetita, junto con señales secundarias en $2\theta \approx 26.6^\circ$, 36.0° y 53.3° , atribuibles a lepidocrocita y goethita. En menor proporción se identificaron reflexiones de hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) en torno a $2\theta \approx 33.2^\circ$ y 49.5° , lo que sugiere una progresión parcial del proceso de oxidación hacia fases más estables.

Estos resultados son consistentes con las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido, donde se observó una superficie fuertemente corroída, con formación de capas de óxido heterogéneas y evidencias de pérdida de sección metálica. La textura rugosa y las grietas observadas en las micrografías son características del crecimiento diferencial de magnetita y lepidocrocita, fases que tienden a desarrollarse de manera secuencial en medios con cloruros bajo condiciones de humedad intermitente. El predominio de magnetita indica que parte del hierro se ha transformado en una fase relativamente estable y compacta, la cual puede desempeñar un papel parcialmente protector al limitar la difusión de oxígeno y cloruros hacia el interior del metal. Sin embargo, la coexistencia con lepidocrocita y goethita (fases más porosas y menos adherentes) sugiere una película de corrosión mixta, lo que concuerda con la alta pérdida de masa registrada y con el aspecto microestructural irregular documentado en las fibras degradadas durante 60 días.

El desarrollo de estas fases ha sido ampliamente descrito en la literatura. Según Raman et al. (1989) y Antunes et al. (2014), la magnetita se forma bajo condiciones de reducción parcial del oxígeno, mientras que la lepidocrocita y la goethita surgen en zonas más oxigenadas, en especial durante los ciclos húmedo-seco, donde las variaciones de humedad favorecen la transformación de los hidróxidos iniciales en óxidos más cristalinos. De acuerdo con Zhang et al. (2024), la presencia de lepidocrocita genera una película frágil y lubricante que reduce el anclaje mecánico de la fibra con la matriz cementicia, mientras que la magnetita, al contrario, forma una capa densa y adherente que puede mejorar localmente la interacción mecánica en las primeras etapas del proceso corrosivo. En conjunto, el patrón de difracción y la morfología superficial indican que las fibras de acero recocido experimentan un proceso de corrosión activa, caracterizado por la formación sucesiva de óxidos e hidróxidos de hierro, donde la magnetita domina como fase principal y la lepidocrocita actúa como precursor en la transición hacia estados más avanzados de degradación.

- *Fibras de alambre de neumáticos*

En las fibras de alambre de neumáticos se identificó magnetita, en concordancia con hallazgos previos. Sin embargo, no se detectó ferrihidrita, probablemente debido a su naturaleza predominantemente amorfa, lo que limita su detectabilidad por XRD. En cambio, se observó la formación de lepidocrocita. La lepidocrocita se desarrolla típicamente como una capa porosa y débilmente adherente, actuando como un lubricante que disminuye el coeficiente de fricción entre la fibra y el mortero (Zhang et al., 2024). Por el contrario, la magnetita es un producto de corrosión más estable y eléctricamente

conductor, que a menudo forma una capa densa que contribuye al enclavamiento mecánico y mejora la adhesión específica al mortero. Estudios experimentales sobre inhibidores de corrosión han demostrado que la presencia de magnetita puede mitigar la pérdida de adhesión en comparación con otras fases de óxido de hierro (Anbazhakan et al., 2025).

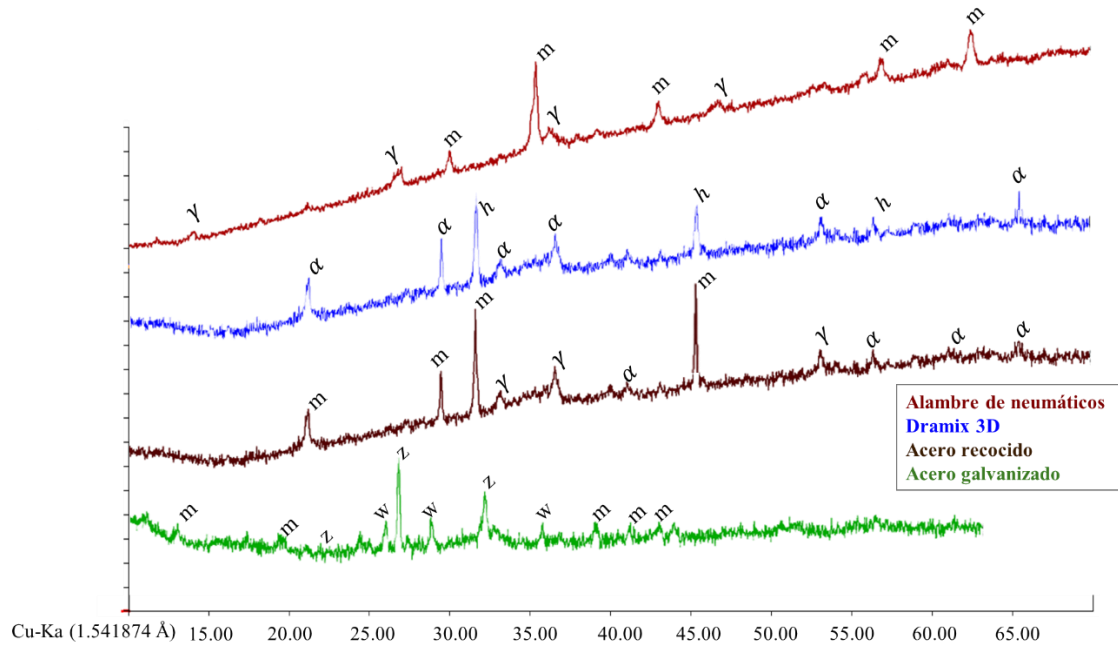


Figura 3.17. Difractogramas obtenidos de los análisis XRD, γ : lepidocrocita, m: magnetita, α : goethita, h: halita, z: zincita, w: wülfingita.

- *Fibras Dramix*

Por otro lado, se identificó la formación de goethita en las fibras Dramix. La goethita tiende a formar una capa relativamente compacta y adherente; Sin embargo, su alto volumen molar y rigidez pueden generar tensiones localizadas en la interfaz acero-mortero, lo que favorece la microfisuración y el desprendimiento parcial bajo condiciones de carga de extracción (Dong et al., 2020). Además, se detectó la presencia de NaCl (halita), que forma cristales salinos que suelen corresponder a la acumulación superficial de cloruros; su presencia indica que los cloruros están disponibles y en estado cristalino adheridos a la fibra. Estos hallazgos concuerdan con estudios de SEM realizados previamente.

3.3.4 Pruebas mecánicas

- *Ensayos de pull-out*

La Figura 3.18 muestra las curvas de carga-deslizamiento para cada fibra, expresadas como fuerza de *pull-out* (N) frente al deslizamiento de la fibra (mm); el deslizamiento medido corresponde al desplazamiento de la mordaza de la máquina universal para ensayos de tracción con la que se realizaron las pruebas. El análisis de datos busca describir los cambios en las propiedades mecánicas de *pull-out* de fibras individuales expuestas a los diferentes ambientes degradantes estudiados. En este estudio se centra en propiedades como la carga máxima de *pull-out*, la energía de *pull-out* y la resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz cementosa, además, se examinó la

resistencia a la tracción de las fibras. En esta investigación, todas las variaciones en las propiedades mecánicas analizadas se comparan con la muestra de control C (las muestras que no se degradaron). Cualquier otra referencia se indicará específicamente.

Al analizar la carga máxima de *pull-out* en la curva de control de cada una de las gráficas, se puede observar que este valor fue de 496 N para las fibras de alambre galvanizado, 941 N para el alambre recocido, 1094 N para el alambre de neumáticos y de 279 N en las fibras Dramix. Aunque todas estas fibras tienen diferentes diámetros, se aprecia que la fuerza máxima de *pull-out* de las fibras de alambre de neumáticos es mucho mayor en comparación a las demás debido a dos factores fundamentales. La primera causa es la forma ondulada de las fibras, esta forma aumenta el área de contacto entre la fibra y el mortero, lo que a su vez provoca la suma de las tensiones de adhesión. Además, la forma en zigzag proporciona superficies de soporte adicionales en las direcciones X y Y, y la fuerza de tracción ejercida sobre la fibra se transmite al mortero en forma de tensiones de compresión. Dado que el mortero tiene una alta resistencia a la compresión, esta característica ayuda a prevenir su falla y, por lo tanto, aumenta la resistencia a la extracción de la fibra.

El segundo factor es el alto contenido de carbono del alambre de acero utilizado en los neumáticos, que oscila entre el 0.7% y el 0.95% (Polyakova y Stolyarov, 2021). Este alto contenido de carbono confiere a las fibras una alta dureza, lo que se traduce en la mayor tensión de compresión entre la fibra y el mortero mencionada anteriormente. En comparación, los demás alambres poseen un bajo contenido de carbono. Por ejemplo, se sabe que las fibras Dramix contienen pequeñas cantidades de carbono, ya que requieren entre un 30% y un 50% menos de acero que las varillas de refuerzo tradicionales (Bekaert, 2021), que generalmente contiene menos del 0.6% de carbono (N·CMT·2·03·001/04). Las muestras que se confeccionaron con fibras degradadas durante 30 días mostraron diversos comportamientos en las pruebas de *pull-out*. En las fibras de alambre galvanizado disminuyó la carga máxima un 19.5%, de forma similar ocurrió en las fibras Dramix, donde la carga máxima disminuyó un 7.2%.

Este comportamiento fue el esperado debido a la influencia de la degradación de las fibras. En el caso de las fibras de alambre recocido se observó que en todos los casos las fibras se rompieron, tanto en las probetas de control como en las degradadas. Esto se debe a la mayor adherencia de estas fibras a la matriz de cemento, causada fundamentalmente por su forma y de su mayor diámetro en comparación con las demás fibras, (véase la Tabla 3.1) se traduce en una mayor superficie de contacto fibra-matriz y, por lo tanto, en una mayor adherencia.

En los primeros 30 días de degradación, las fibras de acero recocido presentaron una deformación máxima igual a la muestra control (ver Figura 3.18b), lo cual indica que luego de este tiempo de exposición la afectación a la fibra no tuvo implicaciones significativas en su comportamiento mecánico. En el caso de las fibras de alambre de neumáticos se observó un aumento del 8.72% en la fuerza máxima de *pull-out* de los primeros 30 días (véase la Figura 3.18b). Este efecto se ha descrito previamente en otras investigaciones (Alizade et al., 2016; Banthia y Foy, 1989; C. Frazão et al., 2015), las cuales justifican estos resultados debido a la formación de productos de corrosión en la superficie de las fibras que aumentan la rugosidad y con ello la adherencia fibra-mortero. Luego de 60 días de degradación, las fibras de alambre galvanizado disminuyeron su carga máxima de *pull-out* un 25.6% y las fibras Dramix un 9.6%.

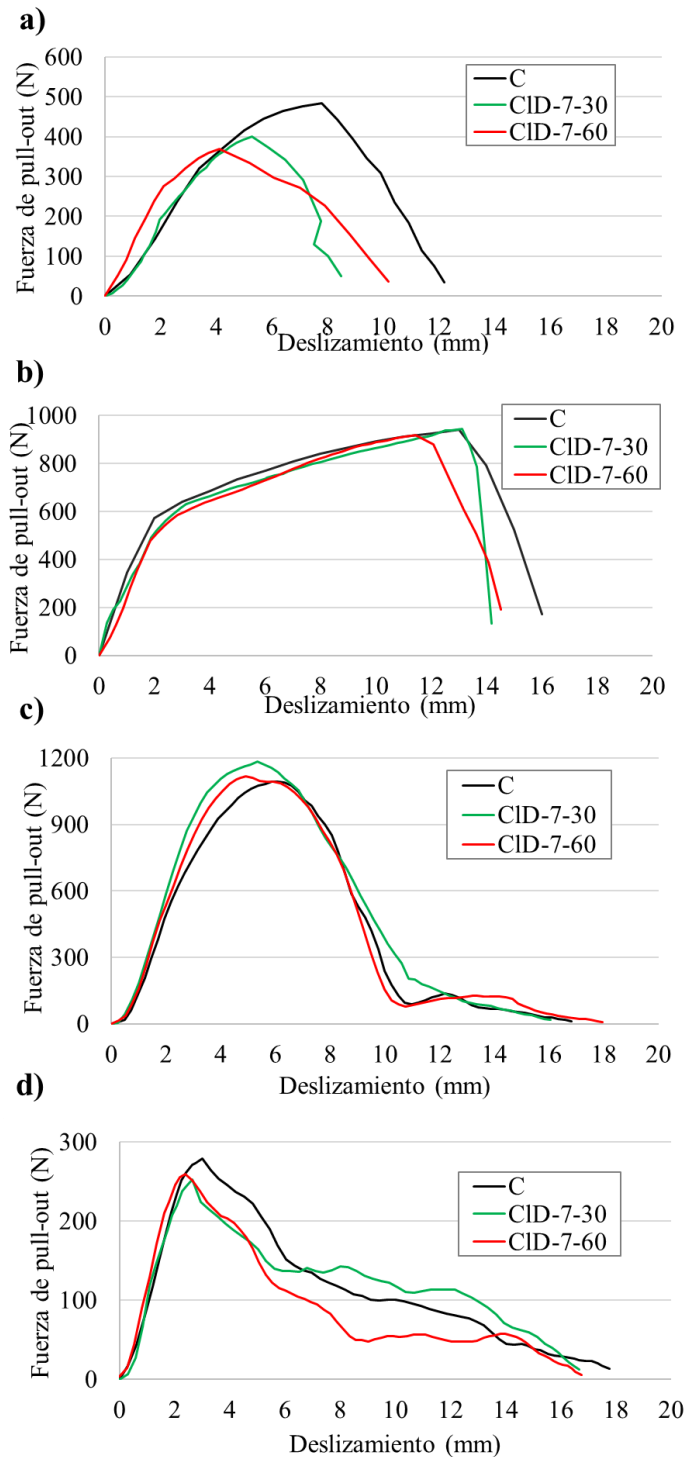


Figura 3.18. Curvas de carga-deslizamiento obtenidas de ensayos de pull-out: a) fibras de alambre galvanizado, b) fibras de alambre recocido, c) fibras de alambre de neumáticos, d) fibras Dramix 3D.

En las fibras de acero recocido, la variación de la carga máxima de *pull-out* fue menos significativa después de 60 días de exposición (aproximadamente un 2%), pero fue notoria la disminución de la ductilidad; las fibras se rompieron cuando la deformación máxima alcanzó los 11.4 mm, que al compararla con el control (13 mm) supuso una reducción del 12.3%; esto significa que la exposición prolongada de las fibras de acero recocido a los medios degradativos estudiados provoca una disminución significativa de

su deformación máxima (ver Figura 3.18b). En el caso de las fibras de alambre de neumáticos, tras 60 días de exposición, la carga máxima de pull-out disminuyó en comparación con los primeros 30 días, alcanzando valores similares a C.

Otra observación importante de la Figura 3.18 es la variación en el comportamiento de *pull-out* de las fibras, el cual se puede diferenciar mediante las curvas. En todas las fibras, la curva es diferente, en el caso de las fibras Dramix esta es recta con extremos en forma de gancho, y el comportamiento de *pull-out* obedece a las cuatro etapas explicadas en la introducción de este capítulo: la primera y la segunda etapa son la unión adhesiva y el desprendimiento de la matriz de la fibra (0 a 2 mm de deslizamiento) (véase la Figura 3.18d), mientras que en la tercera etapa se obtiene la carga máxima de *pull-out*, causada por el enderezamiento del gancho (2 a 5 mm de deslizamiento). La cuarta etapa es la etapa de extracción, donde la fibra se desliza por el interior del mortero hasta su completa eliminación (a partir de 5 mm de deslizamiento) (véase Figura 3.19c).

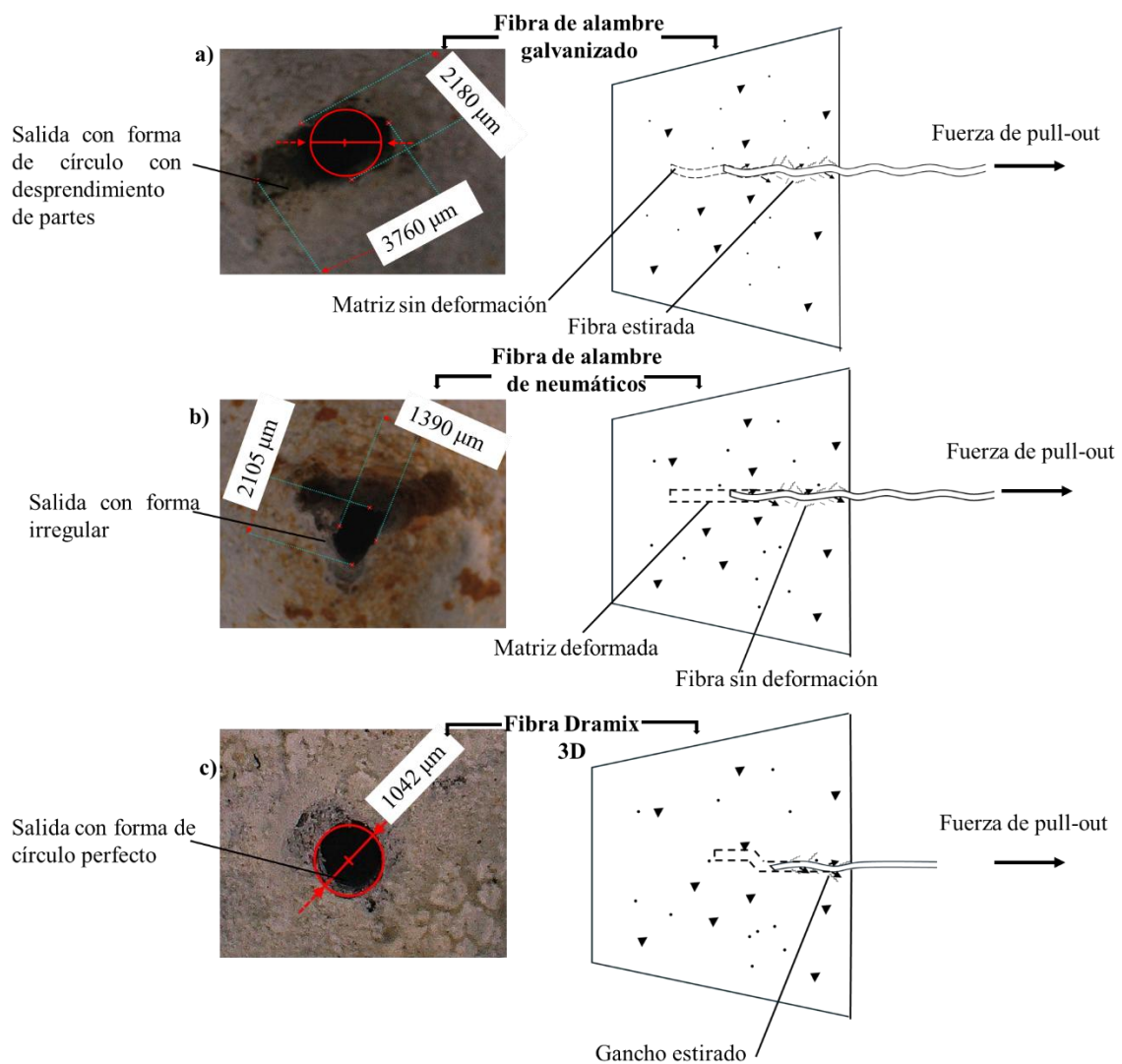


Figura 3.19. Forma del orificio de salida en el mortero y descripción indicativa de la etapa de extracción de fibras.

La curva de *pull-out* de las fibras de acero galvanizado, a pesar de tener una forma diferente a la de las fibras Dramix, también consta de cuatro etapas: la unión adhesiva y la desunión (de 0 a 3 mm de deslizamiento aproximadamente) (véase Figura 3.18a),

seguida del enderezamiento de las ondulaciones de la fibra hasta alcanzar la fuerza máxima de *pull-out* (de 3 mm a 8 mm aproximadamente), y finalmente, la etapa de extracción (de 8 mm a 12 mm aproximadamente) (véase Figura 3.19a). Llama la atención que esta parte de la curva sea diferente a la de las fibras industriales, ya que el deslizamiento se realiza a través del canal creado por las ondulaciones de la fibra, que ofrece poca resistencia a la extracción. Para las fibras de alambre de neumáticos su alta dureza impidió que se deformaran durante la prueba de *pull-out*. La Figura 3.20 muestra la deformación de todas las fibras tras la extracción, la cual se calculó mediante la variación de la amplitud de los ángulos del gancho en caso de las fibras industriales y de las ondulaciones en las fibras no convencionales antes y después de la prueba.

Las fibras de alambre de neumáticos solo se deformaron un 0.63% respecto a la fibra de referencia, mientras que las de alambre galvanizado se deformaron un 19.1%, las de alambre recocido un 16.5% y el gancho de las fibras Dramix se deformó un 15.4%. Esto indica que las fibras de alambre de neumáticos no se deformaron como las de acero galvanizado y las Dramix, las cuales se enderezaron para salir del interior del mortero, sino que estas rompieron la matriz de mortero circundante para poder salir. Por lo tanto, se observó que la extracción de las fibras de alambre de neumáticos consta de solo tres etapas: la primera es la adhesión entre la matriz de mortero y la fibra (0 a 2 mm de deslizamiento).

A partir de este punto, comienza la etapa 2, donde se produce el desprendimiento gradual de la fibra y la unión mecánica entre la fibra y la matriz. Allí se alcanza la máxima fuerza de extracción hasta que la matriz que la rodea se rompe (2 a 4 mm de deslizamiento) (Ver Figura 3.18). Se observa que no hay una etapa de enderezamiento de la fibra, ya que estas prácticamente no se deforman y, por lo tanto, la deformación se produce en la matriz circundante, evidencia de esto lo es también el agujero de salida de la fibra en el mortero, en la Figura 3.19 se aprecia que a diferencia de las demás, este agujero es irregular a causa de la ruptura del mortero.

Por otro lado, se observa una marcada disminución de la pendiente de la curva en las fibras de acero de neumáticos en la Figura 3.18, desde el punto de carga máxima (aproximadamente 6 mm) hasta aproximadamente 10 mm de deslizamiento. Este comportamiento se debe a que la fibra se desprende gradualmente desde el punto de carga máxima, comienza la unión mecánica entre la fibra y la matriz y se produce la ruptura de la matriz de forma abrupta, por lo que las variaciones en la fuerza de *pull-out* en esta etapa están relacionadas con la dureza de la matriz del mortero. Cuanto más rápida sea la ruptura de la matriz, más rápido disminuirá la pendiente de la curva; por lo tanto, este tipo de fibra prácticamente no ofrece resistencia pospico.

El tiempo tuvo una influencia notable en las fibras degradadas, ya que la resistencia máxima de *pull-out* aumentó después de los primeros 30 días en las fibras de acero de neumáticos, pero disminuyó después de 60 días. En el caso de las fibras industriales y las de alambre galvanizado, la disminución en esta propiedad se observó después de 30 días de exposición y se agravó aún más luego de 60 días. Cabe destacar que, como se ha visto, en algunas pruebas con fibras de alambre de neumáticos, se destruyó la matriz del mortero, como se lo muestra la Figura 3.6c. También se observó que las fibras expuestas a cloruros durante 30 días destruyeron el mortero con mayor frecuencia que los morteros de control y que las degradadas durante 60 días, lo que indica un aumento en la adhesión fibra-matriz de las muestras degradadas en este tiempo. También se pueden observar variaciones en la tenacidad a partir del análisis de las gráficas de carga-deslizamiento, considerando que la tenacidad se define como el trabajo total necesario para extraer la fibra y se calcula como el área bajo una gráfica de carga-deslizamiento; esto se analizará con más detalle en la siguiente sección.

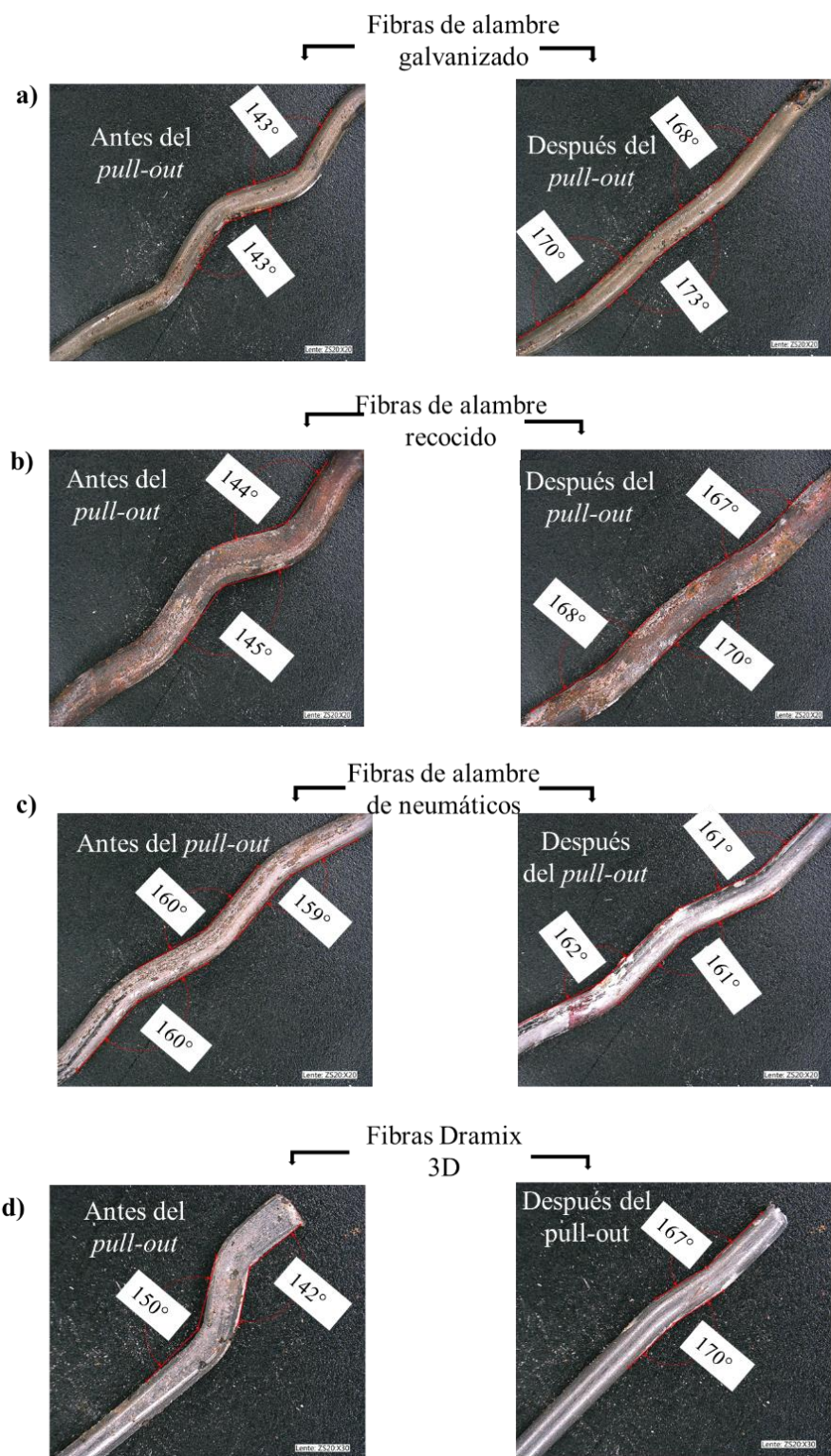


Figura 3.20. Ángulos de las ondulaciones y ganchos de las fibras antes y después del ensayo de pull-out.

3.3.5 Influencia de la degradación en la tenacidad

La tenacidad es la energía total expresada en el trabajo necesario para extraer la fibra del mortero. Las curvas de trabajo-deslizamiento se obtuvieron a partir de la Figura

3.18 calculando el área bajo las curvas de carga-deslizamiento. Se utilizó la Ecuación 3.3 para calcular el trabajo (Behbahani et al., 2011):

$$W_p = \int_{s=0}^{s=L_E} P(s) ds \quad (3.3)$$

Donde W_p es el trabajo total de pull-out de la fibra, s es el deslizamiento (mm), L_E es la longitud de la fibra deslizada (mm) y P es la fuerza de *pull-out* dependiente del deslizamiento (N). La Figura 3.21 muestra los resultados obtenidos del trabajo total de pull-out, considerando un deslizamiento de 12 mm, alcanzado por todas las fibras estudiadas. En general, el comportamiento del trabajo de extracción de las fibras es consistente con los resultados mostrados en las gráficas de carga-deslizamiento. El análisis del trabajo de pull-out, permite evaluar la capacidad de las fibras para transferir esfuerzos y disipar energía durante el proceso de fisuración del mortero. Las curvas correspondientes a las cuatro tipologías de fibra evidencian un comportamiento diferenciado en función del tipo de material y del grado de degradación, pero con tendencias generales coherentes con los resultados obtenidos previamente en los análisis de carga-deslizamiento y en las caracterizaciones microestructurales.

En términos generales, todas las curvas presentan una inflexión característica alrededor de los 2 mm de deslizamiento, lo que marca la transición entre el desprendimiento inicial de la interfaz (fase dominada por adhesión química) y la etapa de anclaje mecánico por fricción (etapa 2). Este cambio de pendiente ha sido reportado por diversos autores como indicativo del inicio del “enderezamiento” de las fibras (Frazão et al., 2015; Marcos-Meson et al., 2020), y una pendiente menor en esta etapa indica, que la energía requerida es considerablemente menor que en las etapas posteriores. En el caso de las fibras de alambre galvanizado, la segunda etapa del proceso de extracción, correspondiente a la ruptura de la unión adhesiva y al inicio del anclaje mecánico, ocurre entre los 2 y 4 mm de deslizamiento. En este tramo, la pendiente de la curva aumenta con respecto a la etapa inicial, lo que indica que se requiere una fuerza superior para continuar el desplazamiento de la fibra, reflejando la contribución progresiva de la fricción interfacial. Esta fase se encuentra claramente definida en las muestras de referencia y en las expuestas durante 30 días (CID-7-30), mientras que en las fibras degradadas durante 60 días el máximo esfuerzo se alcanza prematuramente, alrededor de los 2 mm, evidenciando una pérdida temprana de adherencia.

La tercera etapa, comprendida entre los 4 y 6 mm de deslizamiento, se asocia al enderezamiento de las ondulaciones de la fibra, proceso en el que la carga transferida depende directamente de la integridad superficial del alambre. En las muestras de referencia, la pendiente continúa aumentando, lo que demuestra que la fibra conserva su resistencia estructural y su capacidad de anclaje. En cambio, en las fibras degradadas, la acción corrosiva reduce la fricción y la capacidad de anclaje mecánico, provocando que la energía total disipada al final del ensayo sea inferior a la del control (R), en concordancia con la pérdida progresiva de adherencia observada en las curvas de trabajo-deslizamiento. La tercera etapa, comprendida entre los 4 y 6 mm de deslizamiento, se asocia al enderezamiento de las ondulaciones de la fibra, proceso en el que la carga transferida depende directamente de la integridad superficial del alambre. En las muestras de referencia, la pendiente continúa aumentando, lo que demuestra que la fibra conserva su resistencia estructural y su capacidad de anclaje. En cambio, en las fibras degradadas, la acción corrosiva reduce la fricción y la capacidad de anclaje mecánico, provocando que la energía total disipada al final del ensayo sea inferior a la del control (R), en concordancia con la pérdida progresiva de adherencia observada en las curvas de trabajo-deslizamiento.

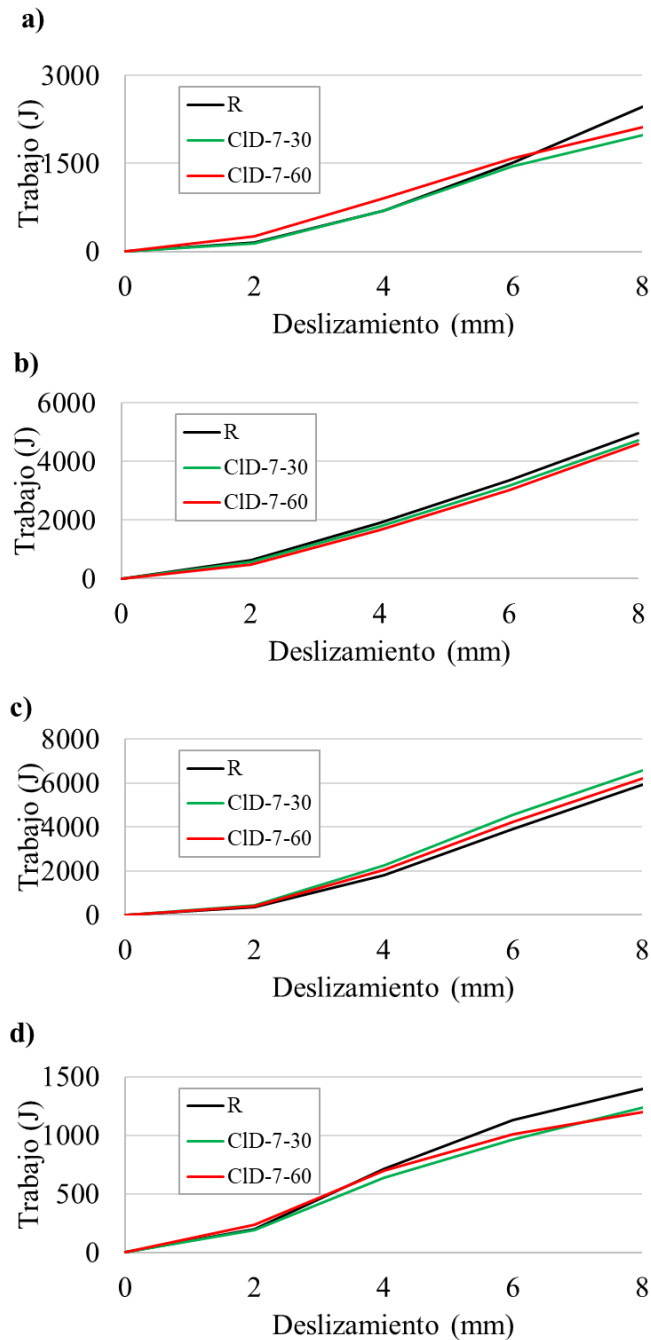


Figura 3.21. Curvas de trabajo - deslizamiento de las pruebas de pull-out: : a) fibras de alambre galvanizado, b) fibras de alambre recocido, c) fibras de alambre de neumáticos, d) fibras Dramix 3D.

En las fibras de alambre recocido (Figura 3.21b), la forma de las curvas de trabajo difiere completamente de la observada en los demás tipos de fibra, ya que en este caso el proceso de *pull-out* se compone únicamente de dos etapas, debido a que no ocurre la extracción de la fibra, sino su rotura prematura. La primera etapa, dominada por la unión química entre la superficie de la fibra y la matriz cementicia, se extiende aproximadamente hasta los 2 mm de deslizamiento. A partir de este punto inicia la interacción mecánica fibra-mortero, pero en lugar de producirse el desplazamiento progresivo de la fibra a través de la matriz, ocurre el enderezamiento del tramo libre de la fibra comprendido entre la superficie del mortero y la mordaza de la máquina de ensayo

(véase Figura 3.20b). Como resultado, la energía de *pull-out* se mantiene prácticamente constante en todas las muestras analizadas, sin incrementos significativos durante la elongación de la fibra, hasta que se produce la rotura. Este comportamiento evidencia la fragilidad inducida por la corrosión, lo que limita la disipación de energía del sistema. La homogeneidad de las curvas refuerza la idea de que la degradación superficial y la disminución de la sección efectiva controlan completamente la respuesta del material, conduciendo a un fallo gobernado por la rotura del acero más que por la pérdida gradual de adherencia.

Por otro lado, las fibras obtenidas de alambre de neumáticos exhibieron el mejor desempeño en términos de energía disipada, registrando las mayores áreas bajo la curva de trabajo, con valores superiores a 6000 J. Este resultado refleja la alta resistencia mecánica del material y, en consecuencia, una notable capacidad de anclaje y resistencia a la extracción. Tal como se observó en el análisis de la Figura 3.20c, el ensayo de *pull-out* de este tipo de fibra se desarrolló en tres etapas bien definidas, claramente identificables en la curva correspondiente de la Figura 3.6c: la etapa 1 (0-2 mm), dominada por la adhesión inicial; la etapa 2 (2-4 mm), donde se produce el desprendimiento progresivo y la ruptura parcial de la unión fibra-matriz; y la etapa 3 (4-8 mm), en la que la fibra fractura la matriz circundante y crea su propio canal para salir.

Resulta especialmente destacable que en esta última etapa la pendiente de la curva aumenta significativamente, lo que evidencia que el proceso de extracción final (caracterizado por la fricción intensa entre la superficie corroída de la fibra y el mortero) requirió las mayores fuerzas de tracción. Este comportamiento sugiere que la degradación inicial generó una mayor rugosidad superficial y un efectivo microanclaje mecánico debido a la formación de productos de corrosión adherentes, lo que incrementó la fricción interfacial tras 30 días de exposición. Sin embargo, después de 60 días, la ligera reducción de la energía acumulada indica que la corrosión avanzó lo suficiente como para afectar la interfaz, disminuyendo gradualmente la adherencia. Este fenómeno, caracterizado por una mejora inicial seguida de una pérdida progresiva de resistencia, coincide con lo descrito por Abrishambaf et al. (2017) y Wang et al. (2023a), quienes reportaron un “efecto dual de la corrosión” en la respuesta *pull-out* de fibras metálicas expuestas a soluciones salinas.

Finalmente, las fibras Dramix 3D (Figura 3.d), mostraron el comportamiento más característico de anclaje mecánico. Las curvas de fuerza exhiben un tramo inicial de pendiente suave asociado a la rotura adhesiva, seguido por un ascenso pronunciado hasta el máximo, correspondiente al enderezamiento del gancho, y una etapa pospico donde la carga se mantiene elevada por fricción y deformación plástica localizada. La energía acumulada refleja fielmente este comportamiento, creciendo de manera sostenida hasta el final del ensayo. Tras 30 días, se observó una ligera disminución de energía, mientras que después de 60 días se registró una recuperación en el tramo final, atribuida al aumento de fricción inducido por la rugosidad del gancho corroído. Este tipo de respuesta confirma que la geometría del extremo permite conservar una fracción significativa de la resistencia residual incluso bajo corrosión moderada.

En conjunto, los resultados confirman que la degradación por cloruros ejerce un efecto negativo sobre la adherencia fibra-matriz, reflejando la influencia conjunta del tipo de material que compone la fibra, los productos de corrosión, y la geometría de la fibra. Este comportamiento está en concordancia con lo reportado por Yoo et al., (2020b) quienes destacan que la interacción entre microestructura, corrosión y geometría de la fibra define la durabilidad y eficiencia del anclaje en concretos reforzados con fibras expuestos a cloruros.

3.3.6 Influencia de la degradación en las fuerzas de adherencia fibra-mortero

Otra forma de cuantificar el comportamiento de la adherencia fibra-matriz es mediante la esfuerzo de adherencia promedio y el esfuerzo de adherencia equivalente; en este artículo, se las denominará conjuntamente esfuerzos de adherencia. La primera evalúa la resistencia al deslizamiento entre el mortero y la fibra de acero. Para calcular esta propiedad se utilizó la Ecuación 3.4 (Abdallah et al., 2017):

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{\pi * d_f * L_E} \quad (3.4)$$

donde τ_{av} es el esfuerzo de adherencia promedio entre la matriz y la fibra, P_{max} es la carga máxima promedio en cada caso, d_f es el diámetro de la fibra y L_E es la longitud de la parte de la fibra incrustada en el concreto. El esfuerzo de adherencia promedio solo considera la fuerza de extracción promedio máxima necesaria para retirar las fibras del mortero. Sin embargo, la resistencia de adherencia equivalente evalúa el trabajo total necesario para extraer las fibras. El esfuerzo de adherencia equivalente se calcula mediante la Ecuación 3.5 (Abdallah et al., 2017):

$$\tau_{eq} = \frac{2 * W_p}{\pi * d_f * L_E^2} \quad (3.5)$$

donde τ_{eq} es el esfuerzo de adherencia equivalente.

El análisis de los parámetros de adherencia obtenidos evidencia comportamientos diferenciados entre los distintos tipos de fibra (Figura 3.22). En general, los valores de esfuerzo de adherencia promedio tienden a disminuir con el tiempo de exposición, mientras que el esfuerzo de unión equivalente τ_{eq} refleja la capacidad residual del sistema para disipar energía durante la extracción. Las fibras de alambre galvanizado (Figura 3.22a) presentan una reducción progresiva tanto en τ_{av} como en τ_{eq} pasando de 5.68 MPa y 3.27 MPa en el control a 4.33 MPa y 2.81 MPa tras 60 días. La ligera recuperación de τ_{eq} tras 60 días (2.81 MPa frente a 2.63 MPa) sugiere que, aunque la adherencia media disminuye, los productos de corrosión aún proporcionan cierta fricción residual durante el deslizamiento final de la fibra.

En el caso de las fibras de alambre recocido, la Figura (Figura 3.22b) muestra valores de esfuerzo de adherencia promedio prácticamente constantes en las tres condiciones analizadas, con ligeras variaciones de 3.27 MPa en R a 3.19 MPa tras 60 días de exposición, mientras que el esfuerzo de unión equivalente se mantiene entre 4.4 y 4.05 MPa. Esta estabilidad refleja que la degradación por cloruros tuvo un efecto limitado sobre la adherencia, lo cual concuerda con la rotura de las fibras en todos los ensayos de pull-out. El hecho de que las fibras se fracturaran sin llegar a deslizarse completamente indica que la adherencia fibra-mortero superó la resistencia axial del acero, es decir, el fallo estuvo controlado por la tracción de la fibra y no por la pérdida de adherencia. Este comportamiento explica la forma plana y homogénea de la gráfica de esfuerzo de adherencia, donde no se observa una caída pronunciada tras el máximo, como sí ocurre en fibras que fallan por deslizamiento. En estos casos, el esfuerzo de adherencia representa el límite máximo de transferencia de carga alcanzado antes de la rotura, y no un proceso progresivo de degradación interfacial. De acuerdo con Yoo et al. (2020b), cuando la adherencia interfacial excede la resistencia del acero, la fibra se comporta como un refuerzo embebido rígido, capaz de transmitir las tensiones hasta la fractura sin pérdida de contacto con la matriz. Este fenómeno es típico de fibras lisas o rugosas sin recubrimiento, donde la fricción y el anclaje mecánico son dominantes sobre la unión química. En este estudio, la presencia de óxidos adherentes formados durante la degradación moderada pudo incluso contribuir a una mejor adherencia.

Las fibras de acero procedentes de neumáticos exhiben los mayores valores de τ_{avg} y τ_{eq} entre todas las fibras analizadas. En condición de referencia, alcanzan 10.10 MPa y 7.26 MPa respectivamente, y tras 30 días ambas magnitudes aumentan a 10.92 MPa y 8.04 MPa, lo que evidencia un efecto positivo inicial de la corrosión moderada. La ligera disminución posterior (10.32 MPa y 7.62 MPa a 60 días) confirma que, una vez superado cierto umbral, el deterioro de la superficie y la pérdida de sección efectiva empiezan a dominar el comportamiento. Esta evolución concuerda con lo descrito por (Abrishambaf et al., 2017) y Wang et al. (2023b), quienes observaron un incremento inicial de la adherencia en fibras con rugosidad inducida por corrosión y una caída posterior asociada al deterioro interfacial. En términos comparativos, estas fibras combinan alta resistencia mecánica y rugosidad, lo que explica su excelente capacidad de anclaje y su energía de pull-out superior.

Por último, las fibras Dramix 3D muestran los valores más altos de esfuerzo de adherencia promedio (≈ 13.4 MPa) pero las menores τ_{eq} (≈ 2.5 -3.0 MPa), lo que indica que, aunque la resistencia pico es elevada gracias al anclaje mecánico del gancho, la energía total disipada es comparativamente baja. Este comportamiento es característico de fibras con geometría en gancho: alcanzan una carga máxima elevada durante el enderezamiento, pero el área bajo la curva disminuye debido al desprendimiento abrupto una vez que el gancho se endereza completamente. Tras la exposición a cloruros, τ_{av} disminuye un 7-10%, reflejando una ligera pérdida de adherencia superficial, mientras que τ_{eq} se mantiene casi constante, lo que sugiere que el mecanismo de anclaje (gancho) sigue siendo dominante. Este tipo de respuesta coincide con los resultados de Marcos-Meson et al. (2020), quienes destacaron que las fibras con gancho conservan su resistencia residual incluso bajo corrosión moderada, ya que la fricción inducida por el contacto mecánico compensa la pérdida de adherencia en el gancho. En conjunto, los resultados confirman que la fuerza de adherencia promedio (τ_{av}) refleja adecuadamente la resistencia máxima de la interfaz, mientras que la fuerza de unión equivalente (τ_{eq}) proporciona una medida más completa de la capacidad de disipación de energía del sistema. La tendencia general muestra que la degradación por cloruros reduce gradualmente la adherencia química y la fricción efectiva en las fibras.

3.3.7 Comparación entre la resistencia a la tracción y el comportamiento de *pull-out*

La comparación entre los resultados de ensayos de tracción y de *pull-out* permite establecer una relación directa entre la resistencia mecánica de las fibras y su comportamiento adherente dentro de la matriz cementicia. En general, las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas en los ensayos de tracción muestran una mayor rigidez y resistencia máxima en comparación con las de los ensayos de *pull-out* (ver Figura 3.23), lo que confirma que la interfase fibra-mortero no logra transmitir completamente la capacidad resistente de la fibra. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Marcos-Meson et al. (2020) y Wang et al. (2023c), quienes indicaron que la pérdida de adherencia y la fricción no uniforme reducen la eficiencia del refuerzo, provocando fallos por deslizamiento antes de alcanzar la resistencia última de tracción.

Asimismo, se observa que el comportamiento de las fibras durante los ensayos de *pull-out* cambia significativamente al normalizar los resultados a esfuerzo (fuerza dividida entre el área transversal de la fibra), a diferencia de lo mostrado en la Figura 3.18. En términos absolutos, las fibras de alambre recocido registraron una de las mayores fuerzas de *pull-out* (>900 N); sin embargo, al expresarse como esfuerzo equivalente (eliminando la influencia del diámetro), se posicionan entre las más bajas (≈ 370 MPa).

Esto refleja su baja resistencia intrínseca y su mayor diámetro equivalente, lo que les permite desarrollar una gran fuerza de fricción, pero con un esfuerzo axial reducido.

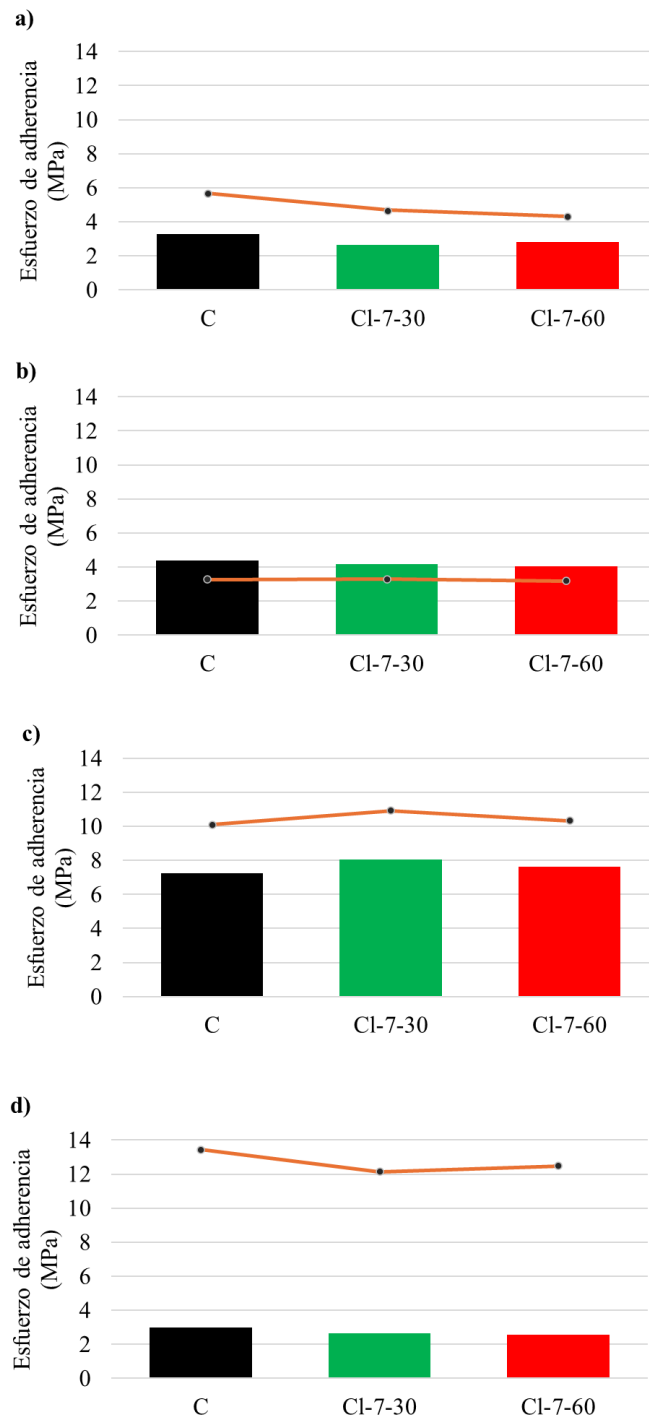


Figura 3.22. Esfuerzo de adherencia promedio (línea) y esfuerzo de unión equivalente (barras) de la unión fibra-matriz, a: fibras de alambre galvanizado, b: fibras de alambre recocido, c: fibras de acero de neumáticos, d: fibras Dramix 3D.

Por su parte, las fibras de alambre de neumáticos conservaron tanto una alta fuerza de *pull-out* (>1000 N) como un elevado esfuerzo normalizado ($\approx 800-900$ MPa), demostrando una transferencia de carga eficiente y una superficie altamente activa frente a la matriz cementicia. Las fibras galvanizadas se ubicaron en un rango intermedio, con

fuerzas moderadas y esfuerzos normalizados acordes, lo que es coherente con una adherencia estable pero parcialmente limitada por la presencia del recubrimiento de zinc. Finalmente, las fibras Dramix 3D, aunque no alcanzaron grandes fuerzas absolutas (<300 N), mostraron los mayores esfuerzos normalizados (>600 MPa), debido a su diámetro reducido (0.75 mm) y a la eficiencia del anclaje geométrico del gancho. Este resultado sugiere que una optimización geométrica y dimensional similar podría representar una vía prometedora para el desarrollo de fibras recicladas de alto rendimiento, capaces de maximizar la relación entre carga transferida y esfuerzo efectivo.

En promedio, el módulo elástico obtenido en los ensayos de tracción fue entre 200 y 250% mayor que el determinado a partir de las curvas de extracción, lo cual evidencia que la adherencia imperfecta entre fibra y matriz limita la rigidez del conjunto fibra-mortero. Asimismo, la tensión máxima alcanzada durante la tracción fue aproximadamente un 110% superior a la obtenida en los ensayos de *pull-out*, lo que sugiere que las fibras no desarrollan toda su capacidad resistente antes de deslizarse, confirmando que el modo de falla predominante en las muestras analizadas es el deslizamiento controlado por la degradación interfacial, y no la fractura del acero (excepto en las fibras de acero recocido). Esta observación coincide con lo reportado por Mujalli et al. (2022), quienes demostraron que, en concretos reforzados con fibras de acero, la extracción de la fibra constituye el modo de falla más frecuente cuando la adherencia es inferior a la resistencia última de la fibra.

En las fibras galvanizadas (Figura 3.23a), las curvas de tracción muestran solo ligeras variaciones en la resistencia máxima y la ductilidad tras la exposición a cloruros, lo que confirma su alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, en los ensayos de *pull-out*, el módulo de elasticidad y la energía acumulada fueron menores respecto a las curvas de tracción, reflejando que la adherencia fibra-mortero es el factor limitante y que el fallo se produce por deslizamiento. En cambio, las fibras de alambre recocido (Figura 3.23b) mostraron un comportamiento opuesto: el módulo de elasticidad fue mayor en los ensayos de *pull-out* que en los de tracción, lo que indica una adherencia más fuerte y una transferencia de carga más eficiente, hasta el punto de provocar la rotura de la fibra antes de su completa extracción. Este tipo de comportamiento es típico de aceros con superficies rugosas y sin recubrimiento, en los cuales la unión mecánica predomina sobre la unión química.

Por su parte, las fibras recicladas de alambre de neumáticos (Figura 3.23c) mostraron una notable reducción en la resistencia a la tracción tras la exposición a cloruros ($\approx 10\%$), aunque mantuvieron una ductilidad relativamente alta. No obstante, las curvas de *pull-out* evidencian una disminución menos notable y en el caso de C1-7-30 hubo un pequeño aumento de la fuerza máxima, lo que indica que la pérdida de adherencia y los cambios en la rugosidad superficial influyen más en la resistencia a la extracción que la resistencia intrínseca del acero. Este fenómeno refuerza la idea de que la resistencia a tracción de la fibra no es el parámetro determinante del comportamiento del compuesto, sino la calidad y estabilidad de la interfaz fibra-mortero, la cual se ve afectada por los productos de corrosión y la microfisuración local en presencia de cloruros.

En conjunto, los resultados demuestran que la eficiencia de refuerzo de las fibras depende no solo de su resistencia a tracción, sino también de la capacidad de adherencia de la interfaz. Las fibras industriales (galvanizadas y Dramix) mostraron un comportamiento dominado por el deslizamiento y una transferencia parcial de esfuerzo, mientras que las fibras recocidas y recicladas exhibieron una interacción más efectiva con la matriz, evidenciando una adherencia más fuerte y una mayor disipación de energía. Esta comparación resalta la importancia de equilibrar la resistencia del acero, la geometría

de la fibra y la estabilidad de la interfaz para optimizar el comportamiento mecánico del concreto reforzado frente a la degradación por cloruros.

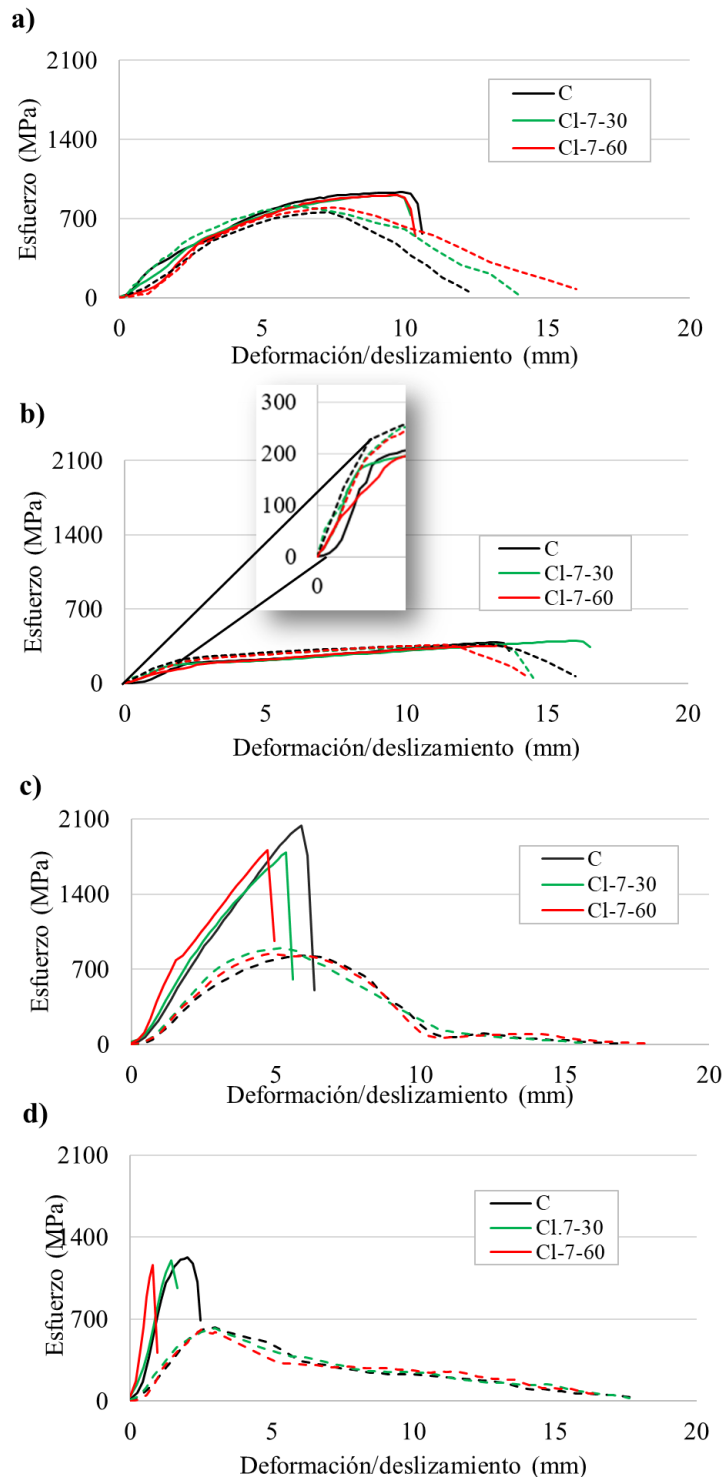


Figura 3.23. Gráfico comparativo de las fibras sometidas a ensayos de tracción uniaxial y de *pull-out*, a: fibras de alambre galvanizado, b: fibras de alambre recocido, c: fibras de acero de neumáticos, d: fibras Dramix 3D. Las líneas continuas corresponden a los ensayos de tracción y las líneas discontinuas a los ensayos de *pull-out*.

3.4 Discusión

La comprensión del comportamiento de adherencia de las fibras estudiadas bajo condiciones de exposición a cloruros exige un análisis integral que considere la evolución microestructural, la pérdida de masa, las variaciones de rugosidad y la respuesta mecánica obtenida en los ensayos de *pull-out* y de tracción. Estas variables permiten evaluar la interacción entre los mecanismos de corrosión y la eficiencia en la transferencia de esfuerzos a través de la interfaz fibra–mortero. En este epígrafe se discuten de forma comparativa los resultados obtenidos para los cuatro tipos de fibras analizadas, con el propósito de identificar las diferencias en su resistencia frente a la degradación y su efecto sobre la adherencia, así como de establecer las implicaciones que estos comportamientos podrían tener en el desempeño mecánico futuro de concretos reforzados con dichas fibras expuestos a ambientes con elevadas concentraciones de cloruros.

Los resultados indican que las fibras de acero de los neumáticos presentan la menor resistencia a la corrosión, con una pérdida de masa de hasta el 4.50% tras 60 días de exposición a una solución salina, mientras que las fibras Dramix solo se corroían un 0.46%. Sin embargo, las imágenes de microscopía digital muestran que la corrosión de estas últimas se produjo principalmente en el gancho, lo que, como se verá más adelante, afectó negativamente a la resistencia a la extracción. Además, el aumento de la rugosidad superficial fue mayor en las fibras con el mayor grado de corrosión, es decir, las fibras de alambre de los neumáticos (438%), comparable a lo observado por Yoo et al. (2020), quienes reportaron aumentos de rugosidad de hasta el 400% tras 8 semanas de inmersión en NaCl.

Las fibras de alambre galvanizado evidenciaron una alta resistencia a la corrosión, manifestada en las bajas pérdidas de masa registradas tras la exposición a soluciones salinas, con un valor máximo de apenas 0.46% después de 60 días. Este comportamiento confirma la efectividad del recubrimiento de zinc como protección catódica frente al ataque de cloruros. Los análisis microestructurales y los difractogramas de rayos X revelaron la formación de capas delgadas y compactas de óxidos e hidróxidos de zinc, principalmente ZnO y Zn(OH)₂, acompañadas de trazas de simonkolleita, las cuales actúan como una barrera pasiva que retarda la penetración de iones agresivos y limita el acceso de oxígeno disuelto a la superficie metálica.

Estas capas, de naturaleza adherente y escasamente porosa, se desarrollan típicamente en las primeras etapas de la corrosión del zinc en ambientes de cloruro, confiriendo una protección temporal efectiva mientras el metal base permanece intacto. Sin embargo, a diferencia de lo reportado por Yoo et al. (2020b), quienes observaron un incremento en la resistencia al *pull-out* de las fibras de acero a niveles moderados de corrosión entre 2 y 5%, debido al aumento de la rugosidad superficial, en las fibras galvanizadas de este estudio la resistencia al *pull-out* disminuyó ligeramente. Esta discrepancia puede atribuirse a la localización de la corrosión en las zonas de ondulación de las fibras, donde las deformaciones plásticas inducidas por el proceso de conformado en frío generan tensiones residuales y microfisuras en la capa de zinc. Dichas discontinuidades actúan como sitios preferenciales para la penetración de los iones cloruro, favoreciendo la corrosión localizada y reduciendo la capacidad portante de la fibra en las regiones más solicitadas durante el ensayo.

Las observaciones mediante microscopía digital confirmaron este fenómeno, evidenciando mayor acumulación de productos de corrosión en las zonas onduladas, mientras que las secciones rectas permanecieron prácticamente intactas. En consecuencia, aunque el grado de corrosión fue bajo, la degradación localizada afectó de manera significativa la continuidad estructural de la fibra y, por ende, su resistencia efectiva

durante el deslizamiento. Este efecto se tradujo en una ligera reducción de la fuerza máxima y del trabajo total de *pull-out* respecto a las muestras de referencia. En conjunto, los resultados sugieren que, en las fibras galvanizadas, la pérdida de adherencia no se debe a un deterioro químico generalizado, sino a procesos de corrosión localizada inducidos por deformación mecánica.

El comportamiento observado en los ensayos de *pull-out* de las fibras galvanizadas sugiere que, en concretos reforzados con este tipo de fibra, la resistencia inicial y la durabilidad frente a cloruros serían superiores a las de concretos con fibras sin recubrimiento, particularmente en exposiciones de corta duración o en zonas con baja permeabilidad. No obstante, el daño localizado en las ondulaciones observado en este estudio podría tener efectos importantes en el comportamiento estructural a largo plazo. La pérdida de continuidad del recubrimiento en dichas zonas, unida a la acumulación de productos de corrosión en los puntos de anclaje, puede provocar fisuración interna de la matriz cementicia y reducción progresiva del anclaje mecánico, especialmente bajo ciclos de humedad y secado. De acuerdo con lo señalado por Yoo et al. (2020) y Marcos-Meson et al. (2020), la disminución de la resistencia interfacial en las fibras galvanizadas se traduce en una reducción de la tenacidad postpico del concreto y en una menor capacidad de redistribución de esfuerzos una vez iniciada la fisuración.

Las fibras de alambre recocido experimentaron una degradación más severa que el resto de los tipos analizados, con pérdidas de masa de hasta 6.3% después de 60 días de exposición a la solución de NaCl. Los análisis SEM y XRD revelaron la formación de goethita, magnetita y ferrihidrita, evidenciando un proceso corrosivo avanzado en el que coexistieron fases cristalinas estables con productos amorfos de alta porosidad. Este sistema de óxidos es característico de aceros sin recubrimiento expuestos a ambientes de cloruro, donde la progresiva transformación de ferrihidrita en goethita y magnetita marca la transición hacia una corrosión más intensa y estructuralmente más agresiva.

En los ensayos de *pull-out*, todas las fibras recocidas fallaron por rotura antes del deslizamiento, indicando que la adherencia interfacial superó la resistencia axial del acero. Los valores de esfuerzo de adherencia promedio se mantuvieron prácticamente constantes, y la fuerza de unión equivalente se mantuvo alta y estable, lo que sugiere una transferencia completa de carga hasta la fractura, sin pérdida apreciable de adherencia. La forma de las curvas esfuerzo–deslizamiento fue consistente con un comportamiento controlado por tracción, sin fase postpico de deslizamiento, lo cual confirma la presencia de una interfaz muy resistente pero poco dúctil.

Este patrón concuerda con lo documentado por Yoo et al. (2020) y Mujalli et al. (2022), quienes observaron que, cuando la adherencia excede la resistencia a tracción del acero, el fallo se produce por fractura de la fibra, reduciendo la capacidad de disipar energía y la ductilidad del sistema. En términos de aplicación estructural, este comportamiento sugiere que los concretos reforzados con fibras recocidas presentarían una resistencia inicial elevada y una adherencia eficaz, favoreciendo la transferencia completa de carga entre matriz y refuerzo. Sin embargo, la falta de capacidad de deslizamiento y la tendencia al fallo frágil por rotura de la fibra limitarían su tenacidad y su capacidad de redistribuir esfuerzos después de la fisuración. En ambientes con alta concentración de cloruros, esta respuesta se vería agravada por la progresiva pérdida de sección metálica y el desarrollo de óxidos expansivos, que podrían inducir fisuración interna de la matriz y acelerar la pérdida de ductilidad del compuesto.

Las fibras de alambre de neumáticos mostraron un elevado grado de corrosión, con pérdidas de masa cercanas al 4.5% tras 60 días de exposición, acompañadas de un notable incremento de la rugosidad superficial ($\approx 438\%$). Este aumento de rugosidad, resultado de la formación inicial de fases amorfas como ferrihidrita y lepidocrocita,

mejoró temporalmente la resistencia al *pull-out* un 9.94%, la tenacidad un 4.49%. El esfuerzo de adherencia promedio un 14.56% y el esfuerzo de unión equivalente un 4.61% durante los primeros 30 días. Estas fases, de estructura fina y poco compacta, incrementan la fricción interfacial entre la superficie metálica y la matriz cementicia, favoreciendo la adherencia en etapas tempranas. Sin embargo, con el avance del proceso de degradación, dichas fases evolucionan hacia óxidos más cristalinos y densos, que tienden a fracturarse o desprenderse, reduciendo la rugosidad efectiva y, con ello, la resistencia interfacial.

Este fenómeno, de mejora inicial seguida de pérdida progresiva de adherencia, ha sido descrito por Frazão et al. (2015) y Yoo et al. (2020), quienes asociaron la transición microestructural de productos de corrosión frágiles a compactos con una disminución de la capacidad de anclaje de las fibras expuestas a cloruros. A diferencia de los demás tipos de fibra, las fibras de alambre de neumáticos no se deformaron significativamente durante el proceso de *pull-out* (apenas un 0.63% respecto a la longitud original), lo que indica que el fallo ocurrió en la matriz y no en la fibra. Mientras que las fibras galvanizadas, recocidas y Dramix mostraron deformaciones de entre 15% y 19%, asociadas al enderezamiento progresivo durante la extracción, las de neumáticos conservaron su geometría, provocando la ruptura de la matriz circundante para poder liberarse.

El análisis de las curvas carga–deslizamiento mostró una disminución pronunciada de la pendiente tras alcanzar la carga máxima, entre 6 y 10 mm de deslizamiento, lo que confirma la ruptura abrupta de la matriz y la ausencia de resistencia postpico. Este comportamiento contrasta con el de las fibras de acero galvanizado o las Dramix, donde el deslizamiento progresivo y la fricción residual prolongan la disipación de energía. En los ensayos de tracción, las fibras mostraron una reducción del 10–11% en la resistencia máxima y una disminución moderada de la ductilidad, lo que confirma que la degradación afectó tanto la superficie activa como la sección efectiva del acero. En términos de aplicación estructural, este tipo de fibra podría conferir a los concretos reforzados una alta capacidad de anclaje inicial y un aumento en la rigidez prefisura, pero una pérdida rápida de capacidad postpico, especialmente bajo ciclos de humectación y secado en ambientes de cloruro.

Las fibras Dramix 3D mostraron una degradación superficial limitada, evidenciando su elevada resistencia frente a los ambientes con cloruros. Sin embargo, la corrosión se concentró principalmente en el gancho, que constituye el elemento clave del mecanismo de anclaje mecánico. Este deterioro localizado se observó ya a los 30 días de exposición, manifestándose en una disminución moderada de la carga máxima y de la energía total disipada en los ensayos de *pull-out*. Dicha reducción se asocia a la pérdida parcial de la adherencia química en la zona del gancho, donde las tensiones de flexión local y la acción de los cloruros favorecen la formación de óxidos compactos y quebradizos (magnetita y goethita) que alteran la topografía y reducen la fricción efectiva con la matriz circundante.

A pesar de esta degradación puntual, las curvas de *pull-out* mantuvieron una respuesta estable y prolongada en la fase postpico, caracterizada por una fricción residual sostenida, atribuible al contacto continuo entre la fibra y la matriz durante el enderezamiento del gancho. Este comportamiento confirma que, aunque la adhesión química se ve afectada, el anclaje geométrico sigue siendo el principal responsable de la transferencia de carga. En el contexto del refuerzo de concretos, este comportamiento indica que las fibras Dramix 3D conservarían una adherencia y capacidad de anclaje elevadas incluso bajo exposición prolongada a cloruros, manteniendo la transferencia de carga y la resistencia postfisura del material compuesto. En conjunto, su desempeño demuestra que la geometría del gancho y la fricción interfacial residual son los principales factores que aseguran la estabilidad de la adherencia en condiciones agresivas,

posicionando a las fibras Dramix 3D como una de las opciones más eficientes para estructuras expuestas a medios con alta concentración de cloruros.

En síntesis, los resultados confirman que el comportamiento de las fibras frente a la degradación por cloruros depende del tipo de acero y de la naturaleza de la interfaz fibra-mortero. Las fibras galvanizadas y Dramix 3D mostraron buena estabilidad superficial y degradación limitada; las recocidas desarrollaron una adherencia tan alta que provocó su rotura, mientras que las fibras de neumáticos experimentaron una degradación más agresiva, con una fase inicial beneficiosa y un deterioro posterior. Estos resultados evidencian que la durabilidad y el desempeño mecánico del concreto reforzado con fibras de acero bajo ambientes clorados no dependen únicamente de la resistencia a tracción del acero, sino principalmente de la calidad y estabilidad de la interacción interfacial entre fibra y matriz, así como de la morfología superficial y de los productos de corrosión que evolucionan durante la exposición.

Además, las tres fibras obtenidas de materiales reciclados mostraron comportamientos diferenciados frente a la degradación por cloruros y a los ensayos mecánicos, pero todas evidenciaron un potencial estructural comparable al de las fibras industriales Dramix 3D, las cuales demostraron una mayor estabilidad frente a la corrosión, una resistencia a tracción más uniforme y un anclaje geométrico eficiente, lo que se traduciría en concretos con mejor respuesta postfisura y mayor durabilidad bajo exposición prolongada a cloruros. No obstante, los resultados obtenidos confirman que las fibras recicladas (en especial las de neumáticos y galvanizadas) representan alternativas técnicamente viables para aplicaciones estructurales moderadamente agresivas, ofreciendo un equilibrio entre resistencia, adherencia y sostenibilidad (Becerra-Pérez, 2025).

Capítulo IV. Influencia de la corrosión de las fibras degradadas en las propiedades mecánicas de los SFRCs

En el capítulo anterior de esta investigación, se fundamentó que el deterioro de las fibras de acero por corrosión (pérdida de masa, formación de productos de oxidación y cambios morfológicos) incide directamente sobre la capacidad de adherencia fibra-matriz y la integridad estructural del SFRC. Algunos estudios han demostrado que la adherencia entre fibra y matriz influye directamente en el comportamiento mecánico de los concretos reforzados. En estas investigaciones se ha demostrado que cuando la adherencia disminuye por causa de la corrosión, degradación superficial o daño interfacial se observan efectos negativos en la resistencia a flexión, la capacidad post-fisuración y, en menor medida, pero no despreciable, en algunas características de la compresión.

Por ejemplo, Overhage et al. (2024) compararon el comportamiento de *pull-out* de fibras recicladas con su rendimiento mecánico en pruebas de compresión y tracción en concretos reforzados. Aunque observaron que la influencia de las fibras en la resistencia de compresión fue relativamente poco significativa, notaron que las pérdidas en la adherencia tienen un efecto más pronunciado sobre la resistencia en tensión y flexión residual del material. Otro estudio relevante es el de Koschemann et al. (2025), donde analizaron el comportamiento de adherencia en concreto de alta resistencia. Encontraron que la resistencia a compresión del concreto aumenta casi linealmente con el aumento de la resistencia de la unión fibra-concreto, lo que sugiere que una interfaz deteriorada puede llevar también a una menor capacidad del material bajo compresión. Asimismo, en el estudio de Alnaki et al. (2013), se examina cómo diferentes grados de adherencia afectan el modo de falla y la capacidad de carga residual. Se evidencia que cuando la adherencia es baja, las fibras tienden a desprenderse antes de que ocurra la rotura por flexión completa, reduciendo la tenacidad flexural del concreto. Teniendo en cuenta estos resultados, es evidente que los efectos microscópicos en la adherencia fibra-concreto se traducen en cambios en el comportamiento macroscópico del concreto, los ensayos de compresión uniaxial y de flexión de tres puntos constituyen herramientas experimentales esenciales para determinar dichos cambios.

Las pruebas de compresión permiten evaluar cómo la degradación de las fibras afecta variables como el módulo de elasticidad, la resistencia máxima de compresión, la tenacidad y la resistencia residual. Aunque la contribución de las fibras a la resistencia máxima en concreto reforzado suele ser modesta, su presencia e interacción con la matriz influyen fuertemente en la capacidad post-fisuración. Por ejemplo, estudios recientes muestran que la adición de fibras mejora la tenacidad en compresión y facilita una transición menos brusca hacia el fallo completo (Jin et al., 2025). En el contexto de fibras corroídas, la prueba de compresión permite detectar reducciones en el módulo de elasticidad o en la deformación inducidas por la pérdida de capacidad de confinamiento local del refuerzo metálico (Chen et al., 2021b).

Por otra parte, las pruebas de flexión, particularmente las pruebas de tres puntos resultan adecuadas para estudiar la influencia de la degradación de fibras en el comportamiento post-fisuración, pues pone en evidencia la capacidad de la capacidad de las fibras para controlar la apertura de grietas y la transferencia de esfuerzos residuales dependiente de la adherencia fibra-matriz (Ke y Gao, 2025). En estudios recientes sobre SFRC corroído se ha confirmado que la corrosión puede causar pérdidas significativas (hasta 80%) en la resistencia máxima de flexión y en la tenacidad del material, al cambiar

el modo de falla de las fibras de rotura dúctil a rotura frágil, y al debilitar la rigidez de la sección antes del pico de carga (Fernandes y Neves, 2024). En conjunto, esta combinación de ensayos de flexión y compresión ofrece un marco apropiado para cuantificar la influencia de la degradación de las fibras en las propiedades mecánicas del SFRC. De esta forma, los resultados experimentales obtenidos en este capítulo permiten establecer vínculos cuantitativos entre los efectos microscópicos detectados en el capítulo anterior y los comportamientos estructurales medibles bajo condiciones de servicio.

En este contexto, el presente capítulo aborda la evaluación del comportamiento a compresión y a flexión de concretos reforzados con las fibras no convencionales de acero sometidas a degradación por cloruros. Las fibras utilizadas son las mismas que se estudiaron en el capítulo anterior (fabricadas en laboratorio a partir de alambre recocido, alambre galvanizado y alambre proveniente de neumáticos reciclados) y fueron previamente caracterizadas en términos de su morfología, composición química, pérdida de masa y adherencia mediante ensayos de *pull-out*. A partir de esta base, en este capítulo se analizan los efectos de la degradación de las fibras en las propiedades mecánicas del SFRC, comparando los resultados de compresión y flexión entre concretos reforzadas con fibras degradadas y no degradadas. Finalmente, se discuten las relaciones entre los parámetros de adherencia, la pérdida de masa y la respuesta estructural del material, con el fin de establecer vínculos cuantitativos entre la corrosión del refuerzo metálico y la disminución de la resistencia y ductilidad del concreto reforzado.

4.2 Descripción del programa experimental

Se realizaron ensayos de compresión y flexión en probetas de concreto reforzadas con fibras previamente degradadas en ambientes con cloruro. Cabe destacar que, en esta investigación, cada probeta de concreto ya sea reforzada con fibra o sin refuerzo, se denomina "probeta o espécimen"; un grupo de tres especímenes fabricados con el mismo tipo de fibra y degradadas durante el mismo tiempo se denomina "muestra", lo que significa que son tres réplicas del mismo ensayo de compresión. Una "muestra de control" se refiere a tres probetas fabricadas únicamente de concreto, es decir, sin utilizar fibras como refuerzo, y una "muestra de referencia" son tres probetas fabricadas con fibras no degradadas. El esfuerzo máximo de compresión/flexión, el módulo de elasticidad, la ductilidad, la tenacidad y la resistencia residual se determinaron utilizando la información de las curvas de esfuerzo-deformación.

4.2.1 Elaboración de las fibras y proceso de degradación acelerada de las fibras

Las fibras empleadas en esta etapa experimental fueron elaboradas siguiendo el mismo procedimiento descrito en el Capítulo III. Para su fabricación se utilizaron alambres de acero recocido, galvanizado y provenientes de neumáticos reciclados, los cuales fueron previamente ondulados y cortados mediante la máquina diseñada en el laboratorio para este propósito. El proceso de conformado permitió obtener fibras con las mismas dimensiones geométricas y características físicas presentadas en la Tabla 3.1, garantizando así la uniformidad en la geometría, longitud y relación de aspecto de los tres tipos de refuerzo utilizados. De igual manera, el proceso de degradación acelerada aplicado a las fibras antes de su incorporación al concreto fue idéntico al utilizado en el capítulo anterior. Las fibras fueron expuestas a soluciones de cloruro de sodio al 7% en masa, bajo condiciones controladas de inmersión y secado, con el objetivo de inducir distintos niveles de corrosión representativos de ambientes con presencia de iones cloruro. Este procedimiento permitió reproducir el deterioro superficial y la pérdida de

masa previamente caracterizados, asegurando la consistencia en el grado de degradación entre las diferentes series de ensayos.

4.2.2 Preparación de especímenes de concreto reforzado con fibras de acero

Como se ha visto, el desarrollo de la resistencia del concreto depende en gran medida de la composición mineralógica del clinker y del grado de hidratación de sus compuestos principales; este es un fenómeno bien documentado en diversos estudios (Persson, 1996; Wang et al., 2023c; Rathnarajan et al., 2024). Según Wang et al. (2023c), al estudiar el desarrollo temprano de la resistencia mecánica (compresión, flexión, tracción) en concretos modificados con aditivos, se constató que la evolución de la resistencia guarda estrecha relación con el desarrollo de productos hidratados y la reducción de porosidad, observada mediante técnicas microestructurales. Otro estudio mostró que en las primeras etapas el crecimiento de resistencia es rápido, pero luego la tasa de ganancia disminuye, pues la hidratación remanente se ralentiza al estar limitada por la difusión de agua hacia zonas no hidratadas (Mo et al., 2022).

Por tanto, en este estudio se utilizaron probetas de concreto todas curadas por 28 días y reforzadas con fibras de acero corroídas, lo que garantiza que las prestaciones mecánicas del concreto base (sin considerar la corrosión de las fibras) ya habrán alcanzado una porción significativa de su desarrollo estructural. Así, cualquier diferencia observada en las propiedades de compresión o flexión puede atribuirse legítimamente a los efectos de la corrosión de las fibras más que al envejecimiento del concreto en sí. Además, en esta etapa experimental se mantuvieron constantes las proporciones de los materiales y las condiciones de mezclado y curado utilizadas en el capítulo anterior, con el propósito de garantizar que las variaciones observadas en las propiedades mecánicas fueran atribuibles únicamente al estado de degradación de las fibras y a su contenido volumétrico en la mezcla.

Se elaboraron 54 probetas cúbicas de 70 mm de lado, según lo realizado por Marcos-Meson et al. (2021), de las cuales 27 se realizaron para cada tipo de fibra estudiada según el modelo factorial (diseño 2x3), dividiéndolas en nueve probetas de control (sin fibras), nueve con 0.5% de fibras y nueve con 1% de fibras por volumen. Se utilizó cemento Portland Cemex Extra-CPC 30R y un reductor de agua como superplastificante de alto desempeño. Además, se utilizó agregado fino natural con un tamaño máximo de 4.75 mm y agregado grueso con un tamaño máximo de 19 mm, según lo establecido en la norma ASTM C33 [29]. Se siguió la metodología y las cantidades de materiales propuestas Taqi et al. (2021); véase la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Cantidad de materiales utilizados en la elaboración de las probetas.

Componente	Cantidad
Cemento	410 kg/m ³
Agregado fino	760 kg/m ³
Agregado grueso	1040 kg/m ³
Agua	215 kg/m ³
Fibras	0.5 y 1% en volumen
Reducto de agua	1.7% por peso de cemento

Primero, se premezcló el agua y el superplastificante antes de iniciar el proceso. Los materiales secos, incluyendo cemento, arena y grava, se combinaron manualmente durante 3 minutos. Posteriormente, se añadió aproximadamente la mitad de la mezcla

líquida (agua y superplastificante) a los materiales secos. Una vez que los componentes secos se integraron completamente con la parte líquida, las fibras se incorporaron gradualmente en pequeñas cantidades, mientras que el resto de la mezcla se añadió de forma intermitente (ver Figura 4.1a). Se prestó especial atención a evitar la formación de aglomeraciones de fibras. A continuación, la mezcla se vertió en moldes cúbicos y rectangulares de acero, como se muestra en la Figura 4.1b, y se vibraron durante 3 minutos para extraer el máximo aire posible y lograr la mayor compactación posible de la mezcla. Posteriormente, se cubrieron con una película de plástico retráctil para que no perdieran humedad excesiva durante 24 horas. Posteriormente, las muestras se desmoldaron y se dejaron completamente sumergidas en agua corriente durante 28 días hasta su extracción y secado para el estudio (Figura 4.1c).



Figura 4.1. Elaboración y curado de las probetas de concreto, a) mezcla de materiales, b) moldes para darles forma y c) probetas sumergidas en agua de curado.

Se elaboraron tres probetas de cada tipo (flexión y compresión) como muestra control, el resto se elaboró con fibras degradadas durante 30 y 60 días en una solución de NaCl al 7% w/w. Las soluciones de NaCl se reemplazaron cada dos semanas a temperatura ambiente, siguiendo el método descrito por Marcos-Meson et al. (2020) y Ahn et al. (2012). Los detalles de las muestras y las soluciones utilizadas se presentan en la Tabla 4.2. En los recipientes indicados en la primera columna de la tabla, la nomenclatura utilizada fue la siguiente: el primer término se refiere al medio de degradación, C para las muestras control (sin fibras), R para las muestras de referencia (con fibras, pero sin precorrosión) y Cl para la degradación con cloruro (contenían fibras previamente degradadas). El segundo término indica el volumen de fibras (0.5% y 1%) y el tercero, el tiempo de degradación (30 o 60 días).

Tabla 4.2. Nomenclatura de los especímenes elaborados

ID	Contenido de fibras	Medio de	Tiempo de degradación
C	0	-	-
R-05	0.5	Fibras sin corrosión	0
Cl-05-30	0.5	7% w/w NaCl	30
Cl-05-60	0.5	7% w/w NaCl	60
R-1	1	Fibras sin degradación	0
Cl-1-30	1	7% w/w NaCl	30
Cl-1-60	1	7% w/w NaCl	60

4.2.3 Ensayos mecánicos

Los ensayos se realizaron en una máquina universal de 60 t de capacidad de la marca Galdabini (Figura 4.2), y las muestras se rompieron completamente, como se muestra en la imagen, de acuerdo con la norma. La máquina se controlaba manualmente, por lo que el ensayo se realizó de forma que la velocidad de carga disminuyera a medida que la muestra se acercaba a la rotura, según lo establecido en la norma EN 12390-3:2001 (2002). Se colocó un extensómetro en la parte inferior de la base deslizante de la máquina para medir la deformación longitudinal durante el ensayo hasta la destrucción completa del hormigón. La carga se midió mediante el propio controlador de la máquina. La respuesta completa de tensión-deformación se obtuvo uniendo ambos registros. La tensión se obtuvo dividiendo la carga de la máquina entre el área de la sección transversal del cubo. Se ensayaron al menos tres especímenes para formar la muestra, y los resultados promedio se presentan en este artículo.

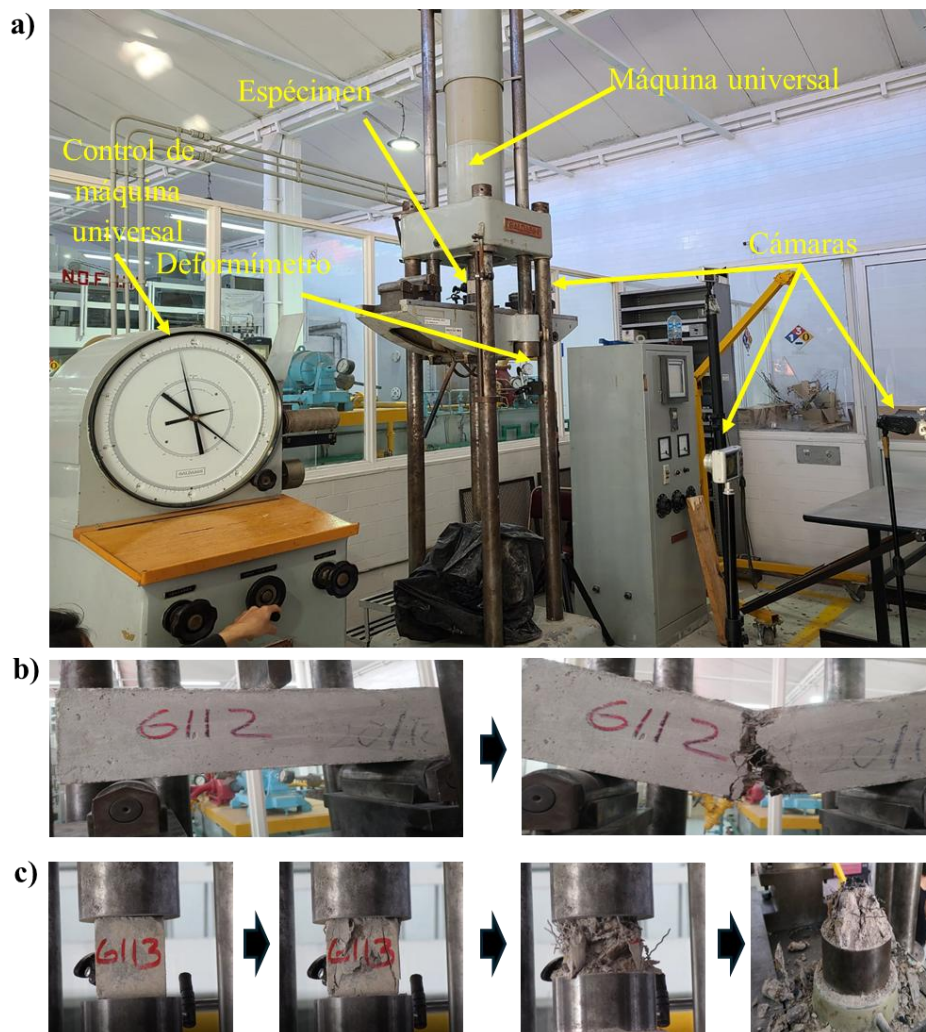


Figura 4.2. Ensayos mecánicos de flexión y de compresión, a: configuración utilizada para las pruebas mecánicas, b: imágenes de las pruebas de flexión y c: imágenes de las pruebas de compresión.

4.2.4 Cálculo de las propiedades mecánicas

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión uniaxial y de flexión en tres puntos, se determinaron las propiedades mecánicas que se analizan en este capítulo y que fueron definidas previamente en el Capítulo II. Para una mejor comprensión de cada una de estas propiedades y de su interpretación dentro del comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero, el lector puede remitirse a la Figura 2.3, donde se esquematiza la relación esfuerzo–deformación típica del concreto reforzado con fibras de acero y se señalan los principales parámetros estudiados.

4.2.4.1 Ensayos de compresión

En el caso de los ensayos de compresión, se determinó el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo de compresión, la tenacidad y la resistencia residual, parámetros que permiten evaluar la rigidez, la capacidad portante y el comportamiento pospico del material. La tensión máxima de compresión es la carga máxima que un material puede soportar a compresión antes de romperse, dividida por el área sobre la que actúa la carga. Matemáticamente, se expresa como en la Ecuación 4.1:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (4.1)$$

donde: σ_{max} es el esfuerzo máximo de compresión, F_{max} es la carga máxima y A es el área de la sección transversal del concreto. El módulo de elasticidad se calculó utilizando la norma NMX-C-128-1997ONNCCE mediante la Ecuación 4.2:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.00005} \quad (4.2)$$

donde: E es el módulo de elasticidad, S_1 es el esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria e_1 de 0.00005, S_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% del esfuerzo máximo y e_2 es la deformación unitaria correspondiente a la tensión S_2 .

Para el cálculo de la tenacidad, se utilizaron las curvas esfuerzo–deformación obtenidas experimentalmente. Esta elección se debe a que el área bajo la curva esfuerzo–deformación representa la energía específica absorbida por unidad de volumen del material, lo que permite una evaluación normalizada e independiente de la geometría o tamaño de las probetas. De acuerdo con lo planteado por Berrocal et al. (2017) y Marcos-Meson et al. (2021), la determinación de la tenacidad a partir de la relación esfuerzo–deformación permite caracterizar con mayor precisión la capacidad de disipación de energía y el comportamiento pospico del concreto reforzado con fibras de acero. El cálculo se realizó conforme a la Ecuación 3.3 de la sección 3.3.5. Finalmente, la resistencia residual se definió como la tensión cuando la deformación es tres veces mayor que la alcanzada bajo el esfuerzo máximo según el estudio de Ruiz et al. (2019).

4.2.4.2 Ensayos de flexión

A partir de los ensayos de flexión se obtuvieron la ductilidad, el esfuerzo máximo a flexión, la tenacidad y la resistencia residual, propiedades que describen la respuesta del SFRC bajo esfuerzos de compresión y tracción indirectos y su capacidad para mantener resistencia tras la fisuración. Las propiedades mecánicas se calcularon según la norma ASTM C1609M-12, (2012). El esfuerzo de flexión se calculó utilizando la Ecuación 4.3:

$$\sigma_{max} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.3)$$

donde: σ_{max} es el esfuerzo (MPa), P es la carga (N), L es la longitud entre apoyos (longitud del claro) (mm), b es el ancho de la probeta en la zona de la fractura, orientada para el ensayo (mm) y d es la altura de la probeta en la zona de la fractura, orientada para el ensayo (mm). La ductilidad se calculó mediante la Ecuación 4.4:

$$D = \frac{\delta_u}{\delta_p} \quad (4.4)$$

donde: D es la ductilidad, δ_u es la deflexión última, correspondiente al punto donde el esfuerzo residual descende a un porcentaje del 20% del esfuerzo máximo y δ_p es la deflexión en el esfuerzo máximo. Cabe destacar que, en los ensayos de flexión, a diferencia de los ensayos de compresión, no se determinó el módulo de elasticidad debido a que este parámetro presenta una variación poco significativa en este tipo de pruebas, especialmente en materiales compuestos como el concreto reforzado con fibras de acero. Por esta razón, el módulo de elasticidad obtenido a partir de la pendiente inicial de las curvas de flexión suele mostrar cambios imperceptibles entre las distintas condiciones de degradación, como se podrá ver más adelante. En consecuencia, la evaluación de la ductilidad resulta un indicador mucho más representativo del desempeño del material frente a flexión, pues cuantifica la capacidad de deformación, parámetro que está directamente relacionado con la función estructural de las fibras (Fernandes y Neves, 2024).

La tenacidad a la compresión, al igual que en las pruebas de *pull-out* y de compresión, se determinó a partir del área bajo la curva esfuerzo-deformación obtenida en los ensayos de flexión hasta cuando la tensión cae al 20% de σ_{max} dividida por la altura de la probeta, el cálculo se realizó utilizando la Ecuación 3.3 de la sección 3.3.5. Finalmente, la resistencia residual se tomó como los valores de tensión correspondientes a los valores de deflexión correspondientes a 1/600 y 1/150 de la longitud del claro. Estas propiedades constituyen los indicadores fundamentales para cuantificar la influencia de la degradación por cloruros en el desempeño mecánico del SFRC y permiten establecer comparaciones directas entre los distintos tipos de fibras, contenidos volumétricos y tiempos de degradación analizados en los apartados siguientes.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Ensayos mecánicos de compresión

Las curvas de carga-deformación mostradas en la Figura 4.3 y los datos de la Tabla 4.3 evidencian el efecto combinado del tipo de fibra, su contenido volumétrico y el nivel de degradación por cloruros sobre la respuesta mecánica a compresión del concreto reforzado. En todos los casos, el comportamiento se caracterizó por una fase elástica inicial, seguida por una etapa no lineal hasta alcanzar la carga máxima, y una región descendente asociada al colapso progresivo de la matriz. Se observa que todas las curvas correspondientes a las mezclas con refuerzo (R y Cl), en comparación con las muestras de control (C), exhibieron un incremento tanto en el módulo de elasticidad inicial como en la resistencia máxima a compresión, confirmando la acción conjunta del efecto de confinamiento y la distribución de tensiones generada por la presencia de las fibras de acero. El primero de estos mecanismos se origina porque las fibras actúan como elementos tridimensionales que restringen la expansión lateral del concreto durante la carga. Al limitar la deformación transversal, las fibras inducen un estado de esfuerzo multiaxial que retarda la formación de microfisuras y mejora la capacidad portante de la matriz cementicia (Ruiz et al., 2023). En segundo lugar, la redistribución de tensiones

ocurre cuando las fibras transfieren parte de las cargas desde las zonas más solicitadas hacia regiones adyacentes menos dañadas, reduciendo las concentraciones de esfuerzo y promoviendo un comportamiento más homogéneo y estable del material (Li y Stang, 1997).

- *Curvas de esfuerzo-deformación, esfuerzo máximo y módulo de elasticidad*

En las probetas reforzadas con fibras galvanizadas no corroídas (Figura 4.3 a y b), la resistencia máxima aumentó en 28.3% y 34.4% para contenidos volumétricos de 0.5% y 1.0%, respectivamente, en comparación con la muestra de control. Para las fibras de alambre recocido, el incremento fue de 22.2% y 34.6% (Figura 4.3 c y d), mientras que en las fibras de alambre de neumático se observó un aumento de 9.97% y 35.4% (Figura 4.3 e y f). Finalmente, las mezclas con fibras Dramix 3D registraron incrementos de 21.2% y 32.4%, respectivamente (Figura 4.3 g y h). De manera general, todas las fibras experimentales contribuyeron de forma efectiva al aumento de la resistencia a compresión, mostrando un comportamiento similar al de las fibras industriales. Es importante destacar que el incremento del volumen de fibras de 0.5% a 1.0% produjo, en promedio, un aumento adicional del 11% en la resistencia máxima y de forma similar, el módulo de elasticidad también mejoró con todas las fibras, respecto al control.

Las probetas reforzadas con fibras de acero galvanizado presentaron una mejora considerable, con módulos elásticos de 1.15 GPa para R-0.5 y 1.90 GPa para R-1, lo que equivale a incrementos del 32% y 118%, respectivamente. Estos resultados indican que la forma y las características superficiales de fibra de alambre galvanizado favorecen la adherencia fibra-matriz, incrementando la capacidad del concreto para resistir deformaciones en la etapa elástica. En el caso de las fibras Dramix, el módulo elástico aumentó de manera significativa, alcanzando 1.85 GPa en la mezcla R-0.5 y 1.11 GPa en la mezcla R-1, lo que representa incrementos aproximados del 113% y 28%, respectivamente, respecto al concreto sin refuerzo. Este comportamiento evidencia la elevada eficiencia mecánica de las fibras Dramix para mejorar la respuesta elástica del material. En el caso de las fibras de acero recocido, los valores obtenidos fueron de 1.10 GPa y 1.26 GPa para las mezclas R-0.5 y R-1, con aumentos del 26% y 45% respecto al control. Aunque los incrementos fueron más moderados, se mantiene una mejora consistente en la rigidez del compuesto, atribuible a la buena ductilidad y compatibilidad superficial del alambre recocido con la matriz cementicia. Por último, las fibras provenientes de neumáticos reciclados también mostraron un comportamiento superior al del concreto sin refuerzo, con módulos de 1.05 GPa y 1.25 GPa para las mezclas R-0.5 y R-1, lo que representa incrementos del 21% y 44%, respectivamente.

Si bien estos valores son inferiores a los alcanzados por las fibras industriales, evidencian que las fibras recicladas contribuyen positivamente al módulo elástico, reafirmando su potencial como refuerzo alternativo en aplicaciones estructurales. En conjunto, estos resultados demuestran que la incorporación de fibras metálicas, incluso de origen alternativo, mejora notablemente la rigidez inicial del concreto, siendo las fibras Dramix y galvanizadas las que mostraron el mayor efecto de refuerzo. Estos resultados coinciden con los reportados por Taqi et al. (2021) y Youssari et al. (2023), quienes observaron un incremento progresivo de la resistencia a compresión del SFRC con el aumento del contenido de fibras y la mejora de la adherencia interfacial. Ahora bien, como observó, las fibras mejoran estas propiedades en pruebas de compresión, y aunque la exposición de las fibras a soluciones de cloruro de sodio provocó algunas variaciones en el comportamiento mecánico, los resultados indican que la degradación por cloruros

tuvo un efecto limitado sobre el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo a compresión del SFRC.

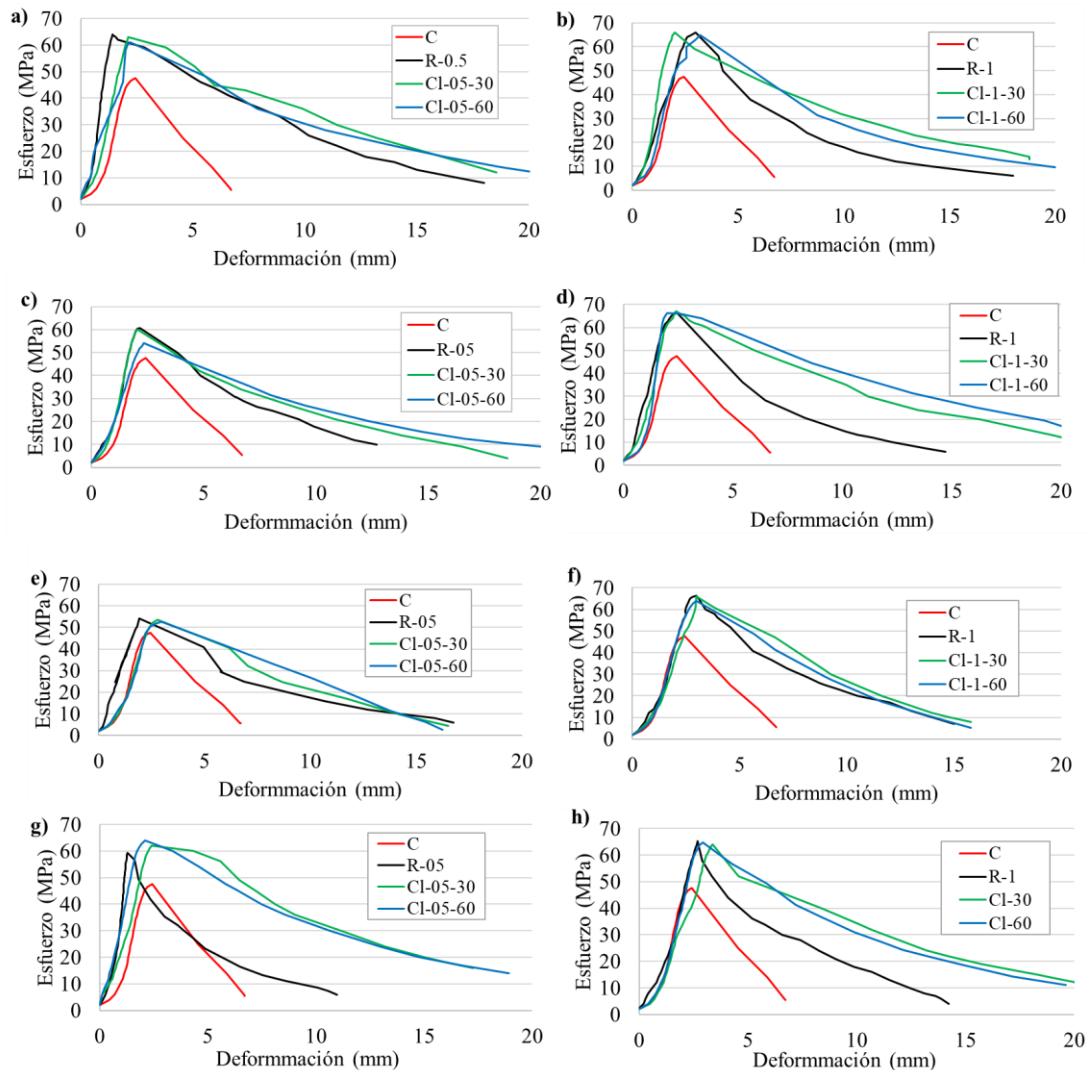


Figura 4.3. Curvas de esfuerzo vs. deformación obtenidas a partir de los ensayos de compresión, a y b: fibras de alambre galvanizado degradadas durante 30 y 60 días respectivamente, c y d: fibras de alambre recocido degradadas durante 30 y 60 días respectivamente, e y f: fibras de alambre de neumáticos degradadas durante 30 y 60 días respectivamente y g y h: fibras Dramix 3D degradadas durante 30 y 60 días respectivamente.

Este comportamiento concuerda con la literatura: en exposiciones de corto plazo, las variaciones en compresión suelen ser reducidas (del orden de unos puntos porcentuales) para mezclas con fibras de acero, con cambios típicos cercanos a -6% en módulo y -2% en resistencia, sin pérdida estructural relevante, según (Carrillo et al., 2015b). Asimismo, algunas revisiones concluyen que la corrosión de fibras rara vez altera de forma significativa la resistencia a compresión o el módulo mientras no exista fisuración generalizada inducida por la corrosión; el desempeño en compresión permanece dominado por la matriz no fisurada (Marcos-Meson et al., 2017). Incluso bajo escenarios conjuntos de carbonatación más cloruros, se han observado incrementos o estabilidad en la resistencia a compresión con fibras precorroídas, reforzando la baja

sensibilidad de estas propiedades frente a la corrosión moderada (Guo et al., 2022). La excepción en este estudio se observó en las probetas con alambre de neumáticos degradado 30 días, donde el módulo presentó una disminución notable frente a sus referencias; adicionalmente, el esfuerzo máximo mostró descenso en las probetas con acero recocido al 0.5% tras 30 días.

Tabla 4.3. Variación de las propiedades mecánicas en ensayos de compresión.

Muestras	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Tenacidad (MJ/m³)	Resistencia residual (MPa)
Control	47.50	0.91	2.33	5.71
Alambre galvanizado				
R-05	64.00	1.15	6.86	36.40
Cl-0.5-30	63.00	1.21	6.88	38.70
Cl-0.5-60	61.00	1.12	6.83	36.50
R-1	66.10	1.90	5.84	38.90
Cl-1-30	66.07	1.36	6.70	36.80
Cl-1-60	65.00	1.24	6.65	27.60
Alambre recocido				
R-05	60.70	1.10	5.20	29.80
Cl-0.5-30	60.06	1.17	5.32	27.90
Cl-0.5-60	54.10	1.09	5.21	29.40
R-1	66.70	1.26	5.43	29.10
Cl-1-30	67.00	1.33	6.08	33.20
Cl-1-60	66.20	1.28	6.08	24.70
Alambre de neumáticos				
R-05	54.10	1.05	4.54	27.30
Cl-0.5-30	53.70	0.98	4.56	26.40
Cl-0.5-60	52.55	1.02	4.60	26.10
R-1	66.40	1.25	5.91	29.70
Cl-1-30	66.00	1.23	5.96	31.80
Cl-1-60	63.90	1.18	5.99	29.50
Dramix 3D				
R-05	59.40	1.85	3.54	30.30
Cl-0.5-30	62.10	1.54	6.04	44.89
Cl-0.5-60	64.07	2.02	6.10	45.53
R-1	65.40	1.11	4.50	24.73
Cl-1-30	64.10	1.03	6.12	33.90
Cl-1-60	64.70	1.10	6.11	35.44

- *Tenacidad y resistencia residual*

En comparación con la mezcla de control, las muestras reforzadas con fibras mostraron incrementos significativos tanto en la tenacidad a la compresión como en la resistencia residual, evidenciando la contribución de las fibras en la capacidad de absorción de energía y en la resistencia post-fisuración del concreto. Estos incrementos fueron consistentes en todos los tipos de fibra, aunque con magnitudes variables según el material y el volumen de refuerzo empleado. En términos generales, al incorporar un 0.5% de fibras, la tenacidad aumentó entre 45% y 130% respecto al control, mientras que la resistencia residual se incrementó entre 370% y 540%, siendo los mayores valores observados en las mezclas con alambre galvanizado y fibras Dramix 3D. Este comportamiento indica que incluso una baja fracción volumétrica de fibras es suficiente para mejorar sustancialmente la capacidad del concreto de disipar energía y mantener la integridad estructural después de alcanzar la carga máxima. Al aumentar el contenido de refuerzo al 1%, las mejoras fueron aún más notorias: la tenacidad se elevó hasta un rango de 150% a 160% y la resistencia residual se mantuvo entre 320% y 580% mayores que en el concreto sin fibras.

Las fibras galvanizadas y recocidas ofrecieron un desempeño más equilibrado entre ambas propiedades, mientras que las fibras de neumáticos mostraron un efecto dependiente del volumen, ya que con un contenido de 0.5% de fibras la tenacidad disminuyó aproximadamente un 16%, lo que indica que a bajas dosificaciones las fibras reducen su efectividad como refuerzo, además algunos estudios han reportado que los residuos de caucho adheridos a la fibra reducen la interacción fibra-matriz al ser un material blando entre dos más duros (Zeybek et al., 2022). Por el contrario, al aumentar el volumen de fibras al 1% se alcanzó una mejora significativa de la tenacidad, lo que sugiere que existe un umbral mínimo de dosificación para que las fibras recicladas de neumáticos puedan desplegar su efecto puente-fisuras de forma eficaz.

Como se puede observar, a diferencia del esfuerzo máximo y del módulo de elasticidad, cuyos valores están dominados principalmente por la resistencia de la matriz cementicia y la rigidez elástica del sistema, las propiedades de tenacidad y resistencia residual están controladas por el mecanismo de transferencia de esfuerzos entre las fibras y la matriz. Después del punto de fisuración, las fibras asumen progresivamente la carga, funcionando como puentes que restringen la apertura de grietas y prolongan la capacidad de carga del material. Por ello, los efectos de la incorporación de fibras se manifiestan con mayor claridad en estas propiedades que en la rigidez o la resistencia inicial.

Diversos autores han documentado esta tendencia. Taqi et al. (2021) y Marcos-Meson et al. (2021) demostraron que la principal contribución de las fibras de acero al comportamiento del SFRC ocurre en la fase pospico, donde la adherencia y el anclaje mecánico determinan la energía disipada durante la tracción o compresión. En el caso de las fibras alternativas, estudios recientes confirman que la mejora de la tenacidad y del comportamiento post-fisura se relaciona estrechamente con la adherencia interfacial y con la calidad del anclaje superficial, factores que explican las diferencias observadas entre los distintos tipos de refuerzo (Zia et al., 2022).

En síntesis, los resultados obtenidos en esta investigación reafirman que, si bien las fibras metálicas no modifican significativamente la rigidez ni la resistencia máxima del concreto, sí generan una mejora sustancial en su capacidad de disipar energía y mantener resistencia tras la fisuración, lo que constituye el principal beneficio mecánico del concreto reforzado con fibras de acero. Ahora bien, la exposición a cloruros produjo variaciones diferenciadas en la tenacidad y en la resistencia residual de los concretos reforzados con los distintos tipos de fibras metálicas, evidenciando una clara dependencia

del tipo de acero y del contenido volumétrico. A diferencia del esfuerzo máximo o del módulo elástico, ambas propiedades son más sensibles a los mecanismos de adherencia y fricción en la interfaz fibra–matriz, por lo que reflejan con mayor precisión el efecto de la corrosión sobre la respuesta pospico del material.

En las probetas con alambre galvanizado, la corrosión apenas afectó el comportamiento pospico. Con 0.5% de fibras, la tenacidad se mantuvo prácticamente constante con variaciones inferiores al 1%, mientras que la resistencia residual aumentó entre un 6 y 8% tras 30 y 60 días de exposición. A 1% de contenido de fibras, los incrementos fueron más notorios, con un aumento de hasta un 15% en la tenacidad y un 10% en la resistencia residual. Estos resultados confirman la eficacia del recubrimiento de zinc, que no solo protege el acero frente a la penetración de cloruros, sino que también favorece la formación de productos de corrosión adherentes que mejoran la fricción interfacial.

El alambre recocido mostró una respuesta más variable, aunque sin pérdidas significativas de desempeño. A 0.5% de fibras, la tenacidad aumentó ligeramente ($\approx 2\%$) y la resistencia residual un 6-9%, mientras que con 1% de refuerzo se registró un incremento del 12% en tenacidad y hasta un 25% en resistencia residual después de 60 días. Esto sugiere que una corrosión leve puede aumentar la rugosidad superficial de las fibras y mejorar la fricción en la interfaz, siempre que el deterioro no sea suficiente para comprometer el anclaje. Resultados análogos fueron reportados por Nguyen et al. (2018) y (Bui et al., 2021), quienes destacaron que la corrosión uniforme en aceros sin recubrimiento puede aumentar la adherencia inicial y retrasar el deslizamiento en el régimen pospico.

En el caso del acero proveniente de neumáticos reciclados, la influencia de la corrosión fue mínima. Con 0.5% de fibras, la tenacidad y la resistencia residual aumentaron entre un 1 y un 7%, y con 1% los incrementos fueron apenas superiores al 5%. Este comportamiento puede atribuirse a la geometría irregular y a la rugosidad inherente del alambre de neumáticos. Investigaciones recientes de Zia et al. (2022) demostraron que la formación controlada de productos de corrosión sobre este tipo de fibras puede incrementar la energía disipada y la capacidad de anclaje, debido al efecto de microbloqueo en la interfaz fibra–matriz.

Por su parte, las fibras Dramix 3D presentaron el mayor incremento de desempeño tras la exposición. Con 0.5% de fibras, la tenacidad aumentó en más del 70% y la resistencia residual cerca del 50% respecto a la referencia, mientras que con 1% las mejoras alcanzaron el 36 y 40%, respectivamente. Estos resultados evidencian que una corrosión leve puede generar un aumento significativo en la rugosidad y en la fricción mecánica de las fibras con ganchos terminales, reforzando su capacidad de anclaje y la transferencia de esfuerzos. Este comportamiento ha sido también descrito por Berrocal et al. (2017) y Taqi et al. (2021), quienes observaron incrementos en la energía absorbida y en la adherencia de fibras de alta resistencia sometidas a corrosión superficial controlada.

En términos generales, la corrosión controlada no afectó negativamente el comportamiento pospico del concreto; por el contrario, en la mayoría de los casos generó un efecto beneficioso sobre la tenacidad y la resistencia residual, debido al aumento de la fricción y del anclaje mecánico en la interfaz. Las fibras galvanizadas y Dramix demostraron la mayor estabilidad frente a la degradación, mientras que las de acero recocido y de neumáticos mostraron una respuesta más dependiente de las condiciones de exposición y del volumen de refuerzo.

- *Análisis comparativo entre las fibras*

Las fibras de alambre galvanizado y Dramix 3D mostraron el mejor desempeño integral, combinando altos valores de esfuerzo máximo, rigidez y tenacidad. Bajo condiciones no corrosivas, ambas lograron incrementos superiores al 30% en la resistencia máxima respecto al concreto de control, mientras que el módulo de elasticidad alcanzó aumentos del orden del 100%, evidenciando una mejora sustancial en la rigidez inicial del material. La tenacidad también presentó mejoras notables, superando en más del 150% los valores de la mezcla sin fibras. Este comportamiento se atribuye a la morfología superficial de ambos tipos de fibra: el recubrimiento galvanizado aporta una capa protectora y adherente que mejora la fricción en la interfaz, mientras que la geometría con extremos en forma de ganchos de las fibras Dramix incrementa la capacidad de anclaje y la disipación de energía durante la deformación.

Por su parte, las fibras de acero recocido mostraron un comportamiento intermedio, con incrementos moderados pero consistentes en todas las propiedades mecánicas. La resistencia máxima y el módulo de elasticidad aumentaron en torno al 30-45% respecto al control, mientras que la tenacidad y la resistencia residual mejoraron entre 120% y 450%. La buena compatibilidad entre la superficie del acero recocido y la matriz cementicia, junto con su elevada ductilidad, favorece una interacción estable entre fibra y pasta, permitiendo una transferencia de esfuerzos más gradual y una respuesta postpico estable. Además, la exposición a cloruros no generó pérdidas significativas, e incluso se observaron incrementos leves de hasta un 25% en la resistencia residual después de 60 días, debido al aumento de la rugosidad por corrosión leve, un fenómeno documentado por Nguyen et al. (2018) y Bui et al. (2021), quienes demostraron que una oxidación controlada puede mejorar la adherencia por fricción y retardar el deslizamiento de las fibras.

Las fibras de alambre de neumáticos reciclados mostraron el desempeño más variable, con mejoras menos pronunciadas que las anteriores. En condiciones no corrosivas, el aumento de la resistencia y rigidez fue menor al 40%, aunque la tenacidad se incrementó hasta en 95% al duplicar la dosificación de fibra. A 0.5%, en cambio, la tenacidad disminuyó ligeramente, lo que sugiere una menor efectividad a bajas fracciones volumétricas, atribuible a la dispersión irregular y a la presencia de residuos poliméricos que interfieren con la adherencia mecánica. No obstante, estas fibras mostraron una estabilidad destacable frente a la corrosión: los valores de tenacidad y resistencia residual se mantuvieron o aumentaron levemente tras la exposición a cloruros, lo que refuerza su potencial como alternativa sostenible de refuerzo metálico.

Comparativamente, las fibras Dramix 3D y galvanizadas fueron las de mejor desempeño, no solo por sus mayores valores de tenacidad y resistencia residual, sino también por su estabilidad frente a la corrosión, que en ciertos casos resultó beneficiosa. En cambio, las fibras recocidas y de neumáticos mostraron una respuesta más dependiente de las condiciones de exposición, aunque sin deterioro significativo, manteniendo un comportamiento estructural adecuado para aplicaciones en ambientes moderadamente agresivos.

4.3.2 Ensayos mecánicos de flexión

- *Curvas de esfuerzo-deformación, esfuerzo máximo y ductilidad*

Los resultados de los ensayos de flexión se muestran en la Figura 4.4 y la Tabla 4.4. Se observa que la incorporación de fibras incrementa el esfuerzo máximo de flexión respecto a la muestra de control. Las probetas aumentaron su resistencia a la compresión

en un 6 a 12% aproximadamente. Para un volumen de refuerzo del 0.5%, las fibras galvanizadas alcanzaron valores de esfuerzo máximo de 3.06 MPa (Figura 4.4a), similares a la muestra de control, pero con incrementos importantes en ductilidad (20.8 frente a 8.96). En contraste, el alambre recocido (3.16 MPa) presentó un comportamiento equilibrado, ligeramente superior al galvanizado, pero con una ductilidad más moderada (10.1) (Figura 4.4c). Las fibras Dramix lograron el mejor comportamiento a 0.5%, alcanzando 3.46 MPa y la ductilidad más alta de todo el estudio (31), lo que confirma su mayor eficacia mecánica asociada a su geometría de anclaje (Figura 4.4g).

Por su parte, las fibras de alambre de neumáticos mostraron el desempeño más bajo (2.46 MPa y 7.1 de ductilidad), reflejando que a bajas dosificaciones su aporte estructural es limitado (Figura 4.4e), este comportamiento fue similar al observado en las pruebas de compresión, donde, si bien la resistencia de este tipo de probetas no fue menor al control si estuvo por debajo del promedio de las demás fibras en alrededor de un 8% (ver Figura 4.3e). Esto se debe a que este tipo de alambre suele presentar contaminación superficial por partículas de caucho, este recubrimiento parcial es una fase blanda que dificulta el contacto efectivo entre la superficie metálica y la pasta cementicia, reduciendo así la calidad de la zona de transición interfacial (ITZ). De acuerdo con estudios previos, el caucho residual puede inhibir localmente la hidratación, aumentar la porosidad en la ITZ y generar microdefectos que disminuyen la capacidad portante inicial del material compuesto (Segre y Joekes, 2000; Thomas et al., 2016).

Al aumentar el contenido de fibras al 1%, el esfuerzo máximo mejora en todos los tipos de refuerzo, pero con magnitudes distintas. Las fibras galvanizadas mostraron un incremento evidente (3.79 MPa) (Figura 4.4b), seguido del alambre recocido (3.40 MPa) (Figura 4.4d) y del acero de neumáticos (3.90 MPa) (Figura 4.4f), que a este volumen logró un comportamiento significativamente superior comparado con su desempeño cuando se utilizó 0.5% de fibras. Este resultado es consistente con lo observado en las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos de compresión, donde las fibras de neumáticos requirieron mayor volumen para aumentar las propiedades del concreto. Por su parte, las fibras Dramix alcanzaron el mayor esfuerzo máximo (5.67 MPa), más de un 65% por encima del concreto sin refuerzo, reafirmando su notable desempeño estructural (Figura 4.4h).

En términos de ductilidad, el incremento al pasar de 0.5% a 1% fue más moderado. En las fibras galvanizadas, la ductilidad aumentó desde 20.8 hasta 26.2, mientras que en el acero recocido se mantuvo alrededor de valores cercanos a 10. En el caso de las fibras de neumáticos, la ductilidad prácticamente no varió (7.1 a 6.96), lo que indica que este tipo de fibra incrementa el esfuerzo máximo, pero no modifica significativamente la capacidad de deformación del sistema. Las fibras Dramix mostraron un descenso notable en ductilidad al pasar de 31 a 9.96, lo que se explica por un aumento significativo del esfuerzo de flexión, pero un aumento moderado de la deflexión, tal como se observa en las curvas experimentales.

Los resultados de los ensayos de flexión permiten establecer tendencias claras respecto a daño por corrosión en las fibras el esfuerzo máximo y la ductilidad del SFRC. En las fibras galvanizadas, la corrosión redujo gradualmente tanto el esfuerzo máximo como la ductilidad. Para 0.5%, la exposición de 60 días produjo una disminución del 16% en la ductilidad respecto a R-05 y un descenso moderado en el esfuerzo máximo. Cuando se incrementó la cantidad de fibras a 1%, la ductilidad experimentó una reducción más pronunciada, del orden del 44% respecto a la muestra sin degradar, mientras que el esfuerzo máximo descendió apenas 7%. Esto confirma que la degradación por cloruros afecta principalmente la respuesta pospico, y en menor medida la resistencia máxima inicial.

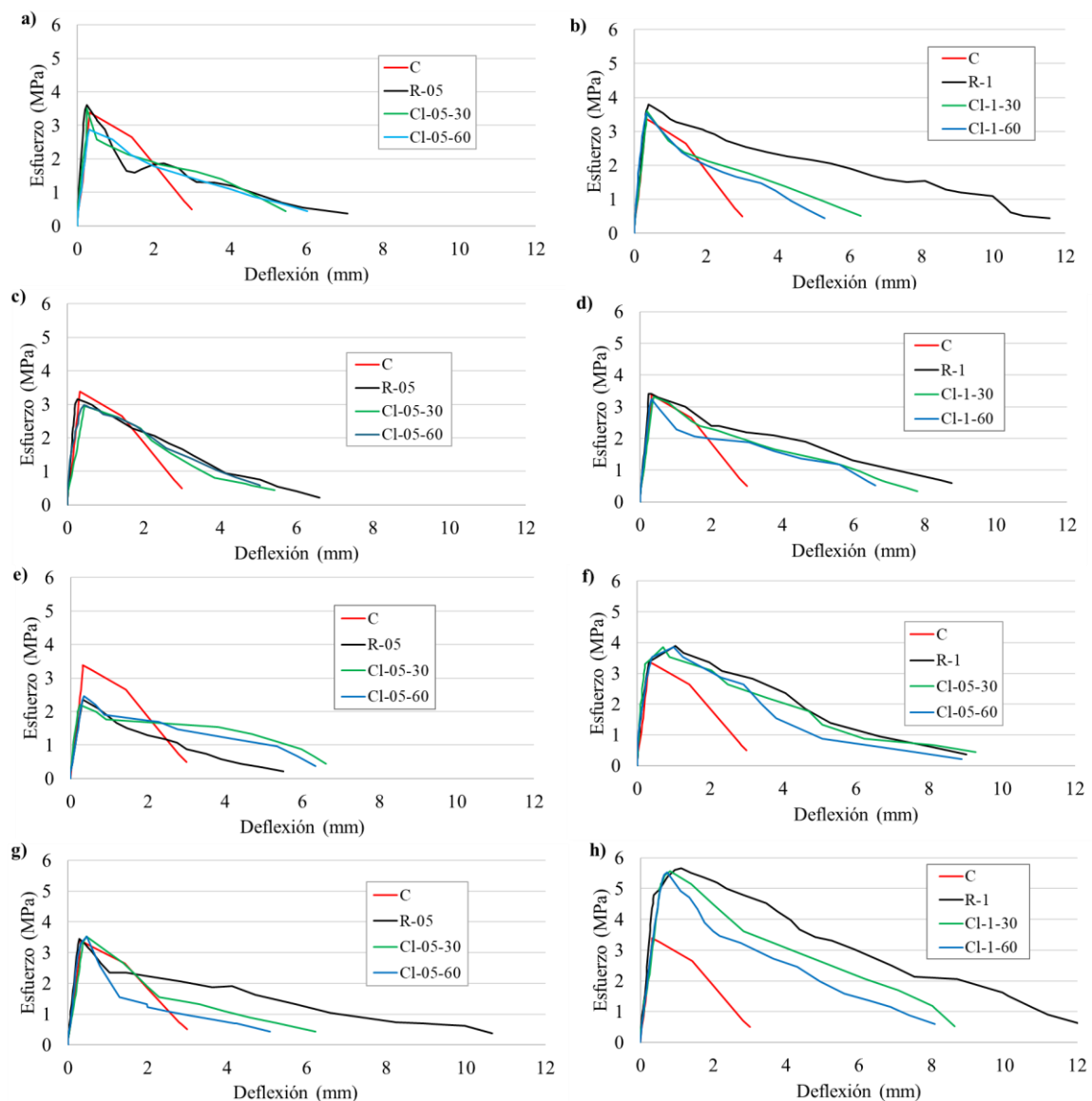


Figura 4.4. Curvas de esfuerzo vs. Deflexión obtenidas a partir de los ensayos de flexión, a y b: fibras de alambre galvanizado degradadas durante 30 y 60 días respectivamente, c y d: fibras de alambre recocido degradadas durante 30 y 60 días respectivamente, e y f: fibras de alambre de neumáticos degradadas durante 30 y 60 días respectivamente y g y h: fibras Dramix 3D degradadas durante 30 y 60 días respectivamente.

Las fibras de alambre recocido mostraron un deterioro moderado pero consistente. Para 0.5%, la ductilidad disminuyó de 10.1 a 8.3 tras 60 días, mientras que el esfuerzo máximo descendió cerca de un 9% respecto a R-05. Para 1% de fibras, la ductilidad disminuyó de 9.7 a 8.4 tras 60 días, con una reducción de aproximadamente 5% en el esfuerzo máximo. Estos resultados reflejan la mayor vulnerabilidad del acero sin recubrimiento a la corrosión superficial, que afecta progresivamente la fricción y la adherencia interfacial. El alambre de neumáticos exhibió la mayor sensibilidad a los cloruros para el caso de 0.5%, donde la ductilidad cayó de 7.1 a 6.1 tras 60 días y el esfuerzo máximo disminuyó un 7%. No obstante, al emplear 1% de refuerzo, la ductilidad disminuyó de 6.96 a 6.7 y el esfuerzo máximo cayó menos del 5%. Esto evidencia que, pese a la influencia negativa del caucho adherido, un mayor volumen de fibras permite

compensar parcialmente el deterioro individual ocasionado por la corrosión. Finalmente, las fibras Dramix 3D demostraron la mayor estabilidad frente a los cloruros en términos de esfuerzo máximo, con reducciones inferiores al 3% aún después de 60 días para el caso de 1%. No obstante, la ductilidad fue la propiedad más afectada, especialmente en 0.5%, donde disminuyó de 31 a 9 tras 60 días. Para 1% de refuerzo, la ductilidad mostró una reducción mucho menor, pasando de 9.96 a 9.56.

Tabla 4.4. Variación de las propiedades mecánicas en ensayos de flexión.

Muestras	Esfuerzo	Ductilidad	Tenacidad	Resistencia residual
Control	3.38	8.96	0.066	1.84
Alambre galvanizado				
R-05	3.06	20.8	0.088	1.83
Cl-0.5-30	3.5	19.8	0.082	1.89
Cl-0.5-60	2.87	18.21	0.084	1.78
R-1	3.79	26.2	0.963	3.01
Cl-1-30	3.61	16.89	0.108	2.15
Cl-1-60	3.53	14.76	0.093	2.00
Alambre recocido				
R-05	3.16	10.1	0.694	2.17
Cl-0.5-30	2.94	9.5	0.583	2.16
Cl-0.5-60	2.87	8.3	0.542	1.78
R-1	3.4	9.7	0.621	2.40
Cl-1-30	3.31	9.2	0.634	2.30
Cl-1-60	3.24	8.4	0.582	1.99
Alambre de neumáticos				
R-05	2.46	7.1	0.386	1.73
Cl-0.5-30	2.35	6.4	0.312	1.29
Cl-0.5-60	2.28	6.1	0.295	1.18
R-1	3.9	6.96	1.099	3.36
Cl-1-30	3.78	6.85	1.072	3.28
Cl-1-60	3.71	6.7	0.998	3.11
Dramix 3D				
R-05	3.46	31	0.224	2.24
Cl-0.5-30	3.53	10.6	0.096	1.90
Cl-0.5-60	3.53	9.01	0.062	1.23
R-1	5.67	9.96	0.548	4.95
Cl-1-30	5.56	9.95	0.279	4.49
Cl-1-60	5.53	9.56	0.217	3.62

Este comportamiento indica que la degradación por cloruros afecta principalmente la fase pospico cuando la dosificación es baja, pero pierde relevancia cuando el volumen de fibras proporciona un entramado suficientemente denso para mantener la capacidad de deformación. En conjunto, los resultados evidencian que la degradación por cloruros afecta de manera más severa a la ductilidad que al esfuerzo máximo, y que el impacto de la corrosión depende tanto del tipo de fibra como de su volumen. Las fibras Dramix y las galvanizadas mantienen la mayor estabilidad mecánica, mientras que las fibras recicladas,

especialmente las de neumáticos, requieren dosificaciones superiores a 0.5% para evitar pérdidas significativas de desempeño.

- *Tenacidad y resistencia residual*

En cuanto a la variación de la tenacidad y la resistencia residual de los SFRCs, la incorporación del 0.5% y 1% de fibras produjo incrementos relevantes respecto a la muestra de control, aunque la magnitud de esta mejora dependió fuertemente del tipo de fibra. Con 0.5% de alambre galvanizado, la tenacidad aumentó cerca de un 33% y la resistencia residual se mantuvo próxima al valor del control, mientras que al usar 1% ambas propiedades experimentaron incrementos sustanciales, alcanzando mejoras del orden de 1400% en tenacidad y más del 60% en resistencia residual. En el caso del alambre recocido, tanto el 0.5% como el 1% generaron aumentos muy significativos en la tenacidad, entre 840% y 950%, con incrementos moderados de la resistencia residual (entre 18% y 30% superiores al control), mostrando un comportamiento más estable e independiente del volumen utilizado.

Las fibras de neumáticos presentaron una respuesta menos eficiente en bajas dosificaciones: con 0.5% de fibras la tenacidad aumentó en torno al 480%, pero la resistencia residual incluso disminuyó ligeramente respecto al control. Sin embargo, al emplear 1% se observó una mejora notable, con más de 1500% de incremento en la tenacidad y alrededor del 80% en la resistencia residual, evidenciando que estas fibras requieren una dosificación mínima elevada para manifestar un efecto reforzante significativo. Las fibras Dramix 3D mostraron la mayor eficiencia. Con 0.5% las mejoras fueron moderadas, aunque consistentes, mientras que con 1% la tenacidad y la resistencia residual aumentaron de forma sobresaliente, alcanzando 730% y 169% por encima del control, respectivamente, superando ampliamente a las fibras recicladas y confirmando su elevado desempeño mecánico en la fase pospico.

En conjunto, los resultados evidencian que todas las fibras mejoran significativamente la capacidad del material para disipar energía y mantener resistencia tras la fisuración, aunque el grado de mejora depende tanto del tipo de acero como del volumen de refuerzo, siendo las fibras Dramix y galvanizadas las más efectivas y las fibras de neumáticos las más dependientes de la dosificación empleada. Sin embargo, el efecto de la degradación por cloruros produjo reducciones claras en la tenacidad y en la resistencia residual de todas las fibras, con una tendencia consistente. En el alambre galvanizado, la disminución de la tenacidad a 0.5% fue mínima, del 2 a 4%, mientras que con 1% las reducciones oscilaron entre 10 y 14%. La resistencia residual presentó pérdidas entre 1 y 3% para 0.5%, pero alcanzó reducciones cercanas al 7% con 1% de fibras. Esto confirma que, aunque el recubrimiento de zinc mitiga el ataque, volúmenes altos incrementan la superficie corroída y acentúan la pérdida de anclaje.

El alambre recocido mostró reducciones más marcadas. Con 0.5% de fibras, la tenacidad cayó entre 10 y 22% y la resistencia residual entre 1 y 18%. Al incrementar el volumen a 1%, las pérdidas aumentaron: la tenacidad se redujo entre 11 y 16% y la resistencia residual hasta 21%, evidenciando que el acero sin recubrimiento es más susceptible a la degradación y a su vez esto genera pérdida en las propiedades mecánicas. En las fibras de neumáticos, las reducciones fueron significativas a 0.5%, con pérdidas de 19 a 24% en tenacidad y 25 a 32% en resistencia residual. Con 1%, el deterioro permaneció, aunque menos severo, con disminuciones del 7 al 9% en tenacidad y del 6 al 8% en resistencia residual. Esto confirma que estas fibras requieren mayores volúmenes para compensar la pérdida de adherencia asociada al alambre reciclado.

Finalmente, las fibras Dramix presentaron la mayor sensibilidad a la corrosión en bajas dosificaciones: a 0.5%, la tenacidad disminuyó entre 57 y 72% y la resistencia residual entre 15 y 45%. Con 1%, las pérdidas fueron menores, pero aún relevantes, con reducciones de 22 a 40% en tenacidad y de 9 a 27% en resistencia residual. Esto se asocia al deterioro del anclaje mecánico de los ganchos. En conjunto, los resultados demuestran que la degradación afecta más intensamente a las mezclas con mayor fracción volumétrica de fibras, puesto que el aumento de área expuesta incrementa la formación de productos de corrosión y acelera la pérdida de adherencia. Además, los efectos son más severos en fibras sin recubrimiento (recocido y neumáticos), aunque también en las fibras industriales.

- *Análisis comparativo de las fibras*

El análisis comparativo del comportamiento a flexión evidencia diferencias marcadas entre fibras industriales y recicladas, tanto en su capacidad de refuerzo como en su respuesta frente a la degradación por cloruros. En estado no degradado, las fibras Dramix 3D mostraron el mejor desempeño, alcanzando los mayores valores de esfuerzo máximo y ductilidad, gracias a la contribución del anclaje mecánico de sus ganchos. Las fibras galvanizadas también incrementaron de forma consistente el esfuerzo máximo y, especialmente, la ductilidad, mostrando una respuesta estable y efectiva. El alambre recocido presentó mejoras moderadas pero constantes, ubicándose en un nivel intermedio de eficiencia. En cambio, las fibras de neumáticos exhibieron el comportamiento más limitado con 0.5%, debido a la presencia de residuos de caucho adherido que reducen la calidad de la adherencia fibra-matriz.

Sin embargo, cuando la dosificación se incrementó al 1%, el esfuerzo máximo superó incluso al de algunas fibras industriales, evidenciando que su eficacia depende fuertemente del volumen de fibras incorporado, estos resultados son congruentes con los encontrados en la bibliografía (Centonze et al., 2012; Zia et al., 2022). Las propiedades pospico (tenacidad y resistencia residual) mostraron diferencias aún más claras entre fibras, con 0.5%, el alambre galvanizado presentó incrementos moderados en tenacidad, el acero recocido aumentos superiores al 800%, y las fibras de neumáticos cerca del 480%, aunque con reducciones o estabilidad en la resistencia residual. Al incrementar el volumen al 1%, todas las fibras aumentaron de forma notable su contribución a la resistencia pospico, destacando las fibras Dramix y las fibras de alambre de neumáticos, que alcanzaron mejoras superiores al 1500% en tenacidad.

Respecto al efecto de la degradación por cloruros, el esfuerzo máximo fue la propiedad menos afectada en la mayoría de los casos, lo cual coincide con estudios previos que indican que la resistencia inicial bajo flexión depende principalmente de la matriz cementicia y no del estado superficial de las fibras (Marcos-Meson et al., 2020; Fernandes y Neves, 2024). Por el contrario, la ductilidad mostró mayor dependencia de la corrosión del refuerzo: en las fibras galvanizadas, la reducción osciló entre 5 y 44%; en el acero recocido, entre 6 y 17%; en fibras de neumáticos, entre 14 y 15% (con mayor impacto a bajas dosificaciones); y en fibras Dramix, la pérdida alcanzó casi 70% a 0.5.

De forma similar, la degradación afectó las propiedades residuales de los concretos, las pérdidas oscilaron entre 2 y 14% en galvanizado, 10 a 22% en recocido, 19 a 32% en neumáticos; mientras que Dramix presentó las mayores pérdidas relativas. En conjunto, los resultados demuestran que las fibras industriales ofrecen la mayor capacidad de refuerzo y la mayor estabilidad frente a la corrosión. Sin embargo, las fibras recicladas pueden alcanzar desempeños comparables cuando se emplean en volúmenes adecuados,

mostrando un alto potencial como alternativa sostenible para aplicaciones donde se requiera principalmente energía absorbida y capacidad pospico.

4.4 Discusión

4.4.1 Correlaciones entre parámetros de degradación y desempeño mecánico

El análisis conjunto de los resultados de adherencia fibra–matriz del Capítulo III y del comportamiento mecánico del SFRC de este capítulo permite establecer relaciones entre la degradación superficial de las fibras, la pérdida de masa, el aumento de rugosidad y la variación del desempeño bajo compresión y flexión. En términos generales, los efectos de la corrosión se manifestaron de forma más marcada en las propiedades pospico (tenacidad, ductilidad y resistencia residual), mientras que el esfuerzo máximo, tanto en compresión como en flexión, mostró una sensibilidad considerablemente menor.

Los parámetros de degradación caracterizados en el Capítulo III muestran tendencias bien definidas. Las fibras de alambre galvanizado presentaron el menor grado de corrosión (0.28–0.66%), seguidas de las Dramix 3D (1.56–3.18%), mientras que las fibras recicladas de neumáticos y el alambre recocido mostraron las pérdidas más elevadas (3.45–5.35% y 4.50–6.30%, respectivamente). Este orden jerárquico coincide con el incremento de rugosidad superficial, lo cual indica que las fibras sin recubrimiento experimentaron un deterioro más profundo y una mayor heterogeneidad topográfica. Las observaciones mediante SEM/EDS confirman estas diferencias: el galvanizado mantuvo buena integridad superficial; las fibras Dramix mostraron ataque localizado alrededor de los ganchos; mientras que el acero recocido y las fibras de neumáticos presentaron picaduras, cavidades y pérdida visible de sección.

Estas variaciones microestructurales permiten explicar el comportamiento mecánico registrado en este capítulo. En compresión, todas las fibras —incluso las recicladas— mejoraron la resistencia y el módulo elástico respecto al concreto sin refuerzo. Sin embargo, la degradación por cloruros produjo reducciones moderadas solo cuando el deterioro superficial fue significativo. Esto se debe a que la contribución de las fibras en compresión está más relacionada con el confinamiento y redistribución de tensiones que con la integridad de la superficie metálica. Por ello, las pérdidas de capacidad en compresión fueron siempre inferiores al 10% incluso para fibras altamente degradadas.

En los ensayos de flexión, en cambio, la influencia de la corrosión fue más evidente. La ductilidad y la tenacidad dependen directamente de la adherencia fibra–matriz y de la capacidad de las fibras para mantener el puenteo a lo largo de la apertura de fisuras. En este sentido, las fibras galvanizadas y Dramix presentaron reducciones moderadas, consecuencia de un deterioro superficial relativamente limitado. En contraste, las fibras de neumáticos y las fibras recocidas mostraron disminuciones más severas en ductilidad y resistencia residual, especialmente cuando se utilizó 0.5% en volumen, condición donde cada fibra individual desempeña un papel crítico en la transferencia de esfuerzos a través de las fisuras.

La comparación entre fibras industriales y recicladas revela tendencias importantes. Las fibras Dramix 3D mantuvieron el mejor desempeño tanto antes como después de la degradación, debido al anclaje mecánico de sus ganchos y a su elevada relación de aspecto. Le siguieron las fibras galvanizadas, donde el recubrimiento de zinc actuó como barrera protectora y limitó el deterioro de la adherencia. Por el contrario, las fibras recicladas fueron más sensibles al ataque por cloruros debido a la ausencia de recubrimientos o tratamientos superficiales. Sin embargo, cuando se emplearon al 1% en

volumen, tanto las fibras de neumáticos como el recocido mostraron reducciones relativamente moderadas en las propiedades pospico, lo que confirma el efecto compensatorio del mayor número de fibras en el control de la fisuración. Este comportamiento es consistente con trabajos de Abrishambaf et al. (2017) y Overhage et al. (2024), donde se reporta que las fibras recicladas presentan un desempeño aceptable siempre que se utilicen en dosificaciones elevadas y que se garantice una adecuada calidad de la interfaz.

Los resultados demuestran que los parámetros microestructurales evaluados en el Capítulo III (grado de corrosión, rugosidad, pérdida de integridad superficial y presencia de productos de corrosión) explican de manera directa la evolución del comportamiento mecánico reportado en este capítulo. La corrosión afecta principalmente la fase pospico del concreto reforzado con fibras, mientras que su impacto en la resistencia máxima es limitado. Las fibras industriales muestran una mayor estabilidad frente a la degradación, pero las fibras recicladas pueden alcanzar niveles de desempeño comparables cuando se emplean en contenidos volumétricos adecuados. En conjunto, estos hallazgos permiten concluir que la degradación por cloruros modifica la adherencia fibra-matriz de forma dependiente del tipo de fibra y del volumen utilizado, afectando sobre todo las propiedades ligadas a la apertura de fisuras y al puenteo residual. De este modo, la integración de los resultados obtenidos en los Capítulos III y IV evidencia cómo los mecanismos de corrosión identificados a nivel microestructural controlan la eficiencia del refuerzo metálico en el comportamiento estructural del SFRC.

4.4.2 Comparación con estudios previos

La comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los estudios reportados en la literatura permite contextualizar el comportamiento de los concretos reforzados con fibras sometidos a degradación por cloruros y evaluar el desempeño relativo de las fibras industriales y recicladas empleadas. De forma general, los resultados coinciden con la tendencia ampliamente documentada de que la corrosión de fibras metálicas tiene un efecto limitado sobre las propiedades controladas por la matriz cementicia, como la resistencia máxima en compresión y flexión, mientras que ejerce una influencia mucho más marcada en las propiedades asociadas al comportamiento pospico, tales como la ductilidad, la tenacidad y la resistencia residual.

En consonancia con lo reportado por Berrocal et al. (2017) y Marcos-Meson et al. (2020), la resistencia máxima del SFRC se mantuvo prácticamente estable incluso después de 60 días de exposición a cloruros, con reducciones menores al 10% en la mayoría de los casos. Estos autores señalan que, en la etapa previa a la fisuración, la transferencia de esfuerzos está dominada por la matriz, por lo que la pérdida de sección o la corrosión superficial de las fibras no modifica sustancialmente la capacidad resistente inicial, siempre que la degradación no sea severa ni genere fisuras internas relevantes. Este mismo patrón se observó en las fibras galvanizadas, recocidas y de neumáticos, e incluso en las fibras Dramix, donde las disminuciones en esfuerzo máximo fueron mínimas aun en las condiciones más agresivas.

En cambio, las propiedades dependientes de la adherencia y del anclaje mecánico entre fibra y matriz mostraron una sensibilidad coherente con lo indicado en la bibliografía especializada. Investigaciones como las de Nguyen et al. (2018), Bui et al. (2021) y Zia et al. (2022) han señalado que la corrosión superficial modifica la rugosidad, la fricción interfacial y el comportamiento de deslizamiento, lo que puede resultar en incrementos moderados cuando la corrosión es uniforme o superficial, pero produce pérdidas significativas cuando el ataque progresa y reduce la eficacia estructural de las fibras. Los resultados del presente trabajo se alinean con estas observaciones: pequeñas

mejoras iniciales en tenacidad para ciertos casos (por ejemplo, galvanizado 0.5% y recocido 0.5%) fueron reemplazadas por pérdidas progresivas en exposiciones más largas o en volúmenes de fibras mayores, donde la acumulación de productos de corrosión redujo la calidad del anclaje y aceleró el deslizamiento pospico.

En el caso de las fibras alternativas, los resultados coinciden con las tendencias observadas en estudios previos sobre fibras recicladas. Centonze et al. (2012) y Leone et al. (2018) destacan que el alambre de neumáticos presenta una variabilidad geométrica considerable y frecuentemente contiene residuos de caucho adherido, lo que reduce la calidad de la zona de transición interfacial y limita su capacidad inicial de transferencia de esfuerzos. En esta investigación, el desempeño inferior del refuerzo de neumáticos en 0.5% coincide con estas observaciones, mientras que el notable incremento en su capacidad de refuerzo al emplear 1% es coherente con los reportes que señalan que este tipo de fibra requiere mayores densidades para desarrollar un mecanismo de puenteo eficaz. Asimismo, los efectos negativos de la corrosión sobre las fibras recicladas concuerdan con los resultados de Singh et al. (2021), quienes identifican una mayor sensibilidad del acero reciclado debido a su menor homogeneidad superficial y a la presencia de residuos no metálicos.

Por otro lado, el desempeño sobresaliente de las fibras Dramix, tanto en estado no degradado como tras la exposición a cloruros, guarda relación con estudios como el de Taqi et al. (2021), donde se evidencia que las fibras con ganchos terminales presentan la mayor resistencia a la pérdida de anclaje y la mayor capacidad de redistribución de esfuerzos tras la fisuración. Aunque en este trabajo la ductilidad de las probetas con 0.5% de Dramix disminuyó significativamente tras 60 días, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado en la literatura cuando se evalúan condiciones de corrosión acelerada y pérdida parcial de la integridad superficial del gancho. Además, al emplear 1% de fibras, la disminución de las propiedades pospico fue notablemente menor, un comportamiento también registrado por Berrocal et al. (2017), quienes describen que la densidad del entramado fibroso tiene un efecto mitigador frente a la degradación local.

Capítulo V. Evaluación de la resistencia mecánica de SFRCs expuestos a cloruros durante 12 meses

5.1 Introducción

La durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero expuesto a medios que contienen iones cloruro ha adquirido un creciente interés científico en los últimos años. La literatura reciente muestra un aumento significativo en la cantidad y diversidad de estudios dedicados a este tema; no obstante, la amplia variabilidad experimental (incluyendo el tipo y geometría de las fibras, su volumen de incorporación, la concentración de cloruros, los métodos y tiempos de exposición, así como las relaciones agua/cemento y las especificaciones de los materiales constituyentes) dificulta establecer criterios unificados sobre el modo en que la degradación por cloruros afecta la resistencia mecánica y la durabilidad de los SFRCs (Becerra et al., 2023; Paul et al., 2020).

Por ejemplo, Tai et al. (2024) observaron que en SFRC sometidos durante 360 días a un entorno combinado de carbonatación y cloruros, la resistencia a la compresión aumentó de manera apreciable, atribuyendo este comportamiento a la densificación progresiva del C-S-H y al efecto protector de la carbonatación sobre la matriz, que retrasó la degradación interfacial fibra-concreto. De forma similar, Marcos-Meson et al. (2021) analizaron concretos no fisurados expuestos a cloruros por periodos de hasta dos años y concluyeron que las variaciones en compresión y flexión eran mínimas o estadísticamente insignificantes, aun en presencia de concentraciones moderadas de cloruros. En estos materiales, las fibras conservaron su integridad y la interfaz fibra-matriz mostró escaso deterioro, lo que sugiere que la corrosión inicial no siempre es suficiente para comprometer las propiedades estructurales del SFRC.

Sin embargo, otros estudios han demostrado que el concreto reforzado con fibras de acero puede experimentar una disminución significativa de su resistencia cuando se encuentra sometido a ambientes ricos en cloruros. En su revisión experimental, Marcos-Meson et al. (2017) identificaron que la penetración de cloruros puede deteriorar la matriz cementicia en la región próxima a la fibra y comprometer la zona interfacial, generando una reducción apreciable de la capacidad compresiva, especialmente en concretos de mayor permeabilidad. Resultados concordantes fueron reportados por Yang et al. (2025), quienes estudiaron el comportamiento del SFRC ante la acción combinada de cloruros y corrientes parásitas, mostrando una degradación mecánica acumulativa y una disminución notable de la capacidad de carga asociada a la corrosión localizada de las fibras y al deterioro progresivo de la matriz. Incluso en condiciones de exposición menos agresivas, los cloruros pueden inducir reducciones medibles en la resistencia a la compresión del SFRC.

Por su parte, Carrillo et al. (2015) evaluaron probetas expuestas a soluciones salinas y observaron una disminución del 2% en la resistencia a compresión, además de una reducción del módulo de elasticidad del 6%, lo que confirma que la interacción química entre cloruros y la matriz cementicia debilita el confinamiento local que proporcionan las fibras. Por otro lado, Liu et al. (2025) demostraron que la degradación inducida por cloruros, aun bajo esquemas de exposición moderados, provoca un deterioro en la adherencia fibra-matriz y puede manifestarse posteriormente en pérdidas de desempeño a compresión. Estos resultados contradictorios ponen en evidencia la necesidad de investigaciones que analicen los mecanismos físico-químicos involucrados

y su impacto en las propiedades mecánicas del SFRC, especialmente cuando las fibras utilizadas son provenientes de materiales reciclados, como lo es el caso de este estudio.

5.1.1 Procesos fisicoquímicos de degradación del SFRC

- *Hidratación del cemento*

La hidratación del cemento, aunque no es un proceso degradativo, si es un elemento para tener en cuenta en este estudio, ya que es un proceso que ocurre mayormente en los primeros días tras el colado, puede continuar significativamente más allá de los 28 días, siempre que existan reactivos sin hidratar y acceso suficiente de agua o solución acuosa. Por ejemplo, Li et al. (2023) documentaron que en materiales cementicios con relación agua/cemento baja persisten partículas de cemento no hidratadas incluso tras un año, lo cual permite que al remojar o mantenerse en ambientes saturados se inicie una rehidratación o continuación de la hidratación que incrementa la resistencia, reduce la porosidad y mejora la conectividad del gel de C-S-H. En este sentido, la inmersión prolongada en agua o en medios salinos favorece la difusión del agua de poro hacia zonas internamente secas o parcialmente hidratadas, promoviendo el consumo de reactantes residuales y la generación adicional de productos de hidratación, lo que refuerza la matriz y modifica la microestructura.

Cuando los concretos están inmersos en soluciones de cloruro, la dinámica puede cambiar, pero igualmente la hidratación continúa bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, Kuzielová et al. (2024) analizaron pastas de cemento que tras siete días de hidratación inicial se expusieron a soluciones de NaCl y geotérmicas. Los resultados de termogravimetría (TGA) y difracción de rayos X demostraron diferencias en la cantidad de productos hidratados según el medio de exposición, sugiriendo que la presencia de cloruros u iones asociados afecta la evolución de la hidratación tardía pero no la detiene por completo. Además, la adsorción de cloruros en las fases hidratadas influye en el equilibrio del poro solución y, de forma indirecta, en la activación de rehidratación de partículas de cemento remanentes (Sun et al., 2024).

Desde la perspectiva de durabilidad y propiedades mecánicas, la continuación de la hidratación mediante inmersión prolongada es crítica porque permite aumentar la rigidez de la matriz, reducir los poros y mejorar la resistencia a la compresión. No obstante, cuando la exposición es en solución de cloruro, el beneficio de hidratación tardía puede verse contrarrestado por la degradación, que puede inhibir ciertas reacciones, alterar la composición del gel de C-S-H (por ejemplo, aumentando la relación Ca/Si), aumentar la lixiviación de iones Ca^{2+} y favorecer mecanismos de daño adicionales Sun et al. (2024).

- *Cinética de la hidratación del cemento*

Los estudios revisados evidencian que los efectos de la exposición acuosa y salina sobre la hidratación del cemento son dependientes del tiempo y de la concentración de cloruros. Ouyang et al. (2022) y Liu et al. (2023) demostraron que, durante las primeras horas o días, los cloruros pueden acelerar la hidratación inicial al favorecer la nucleación de los productos C-S-H y CH, reduciendo los tiempos de fraguado y elevando la liberación de calor. En particular, Liu et al. (2023) registraron que el máximo de calor de hidratación se alcanzó aproximadamente a las 19 h, evidenciando una cinética más rápida en pastas con hasta 2% de Cl^- , mientras que concentraciones mayores tendieron a inhibir el proceso. En edades posteriores, estudios como el de Ruslan et al. (2024) y Manquehual et al. (2023) demuestran que la interacción prolongada con agua o soluciones salinas

puede mantener la hidratación secundaria más allá de los 28 días, mediante la reactivación de partículas no hidratadas y la difusión continua de agua hacia los poros capilares. Este proceso contribuye inicialmente a la densificación de la matriz cementicia y a un incremento transitorio de la resistencia a la compresión. Sin embargo, a medida que la exposición se prolonga, desde las primeras semanas hasta varios meses o años, como en el caso del hormigón proyectado (*shotcrete*) analizado por Manquehual et al. (2023), comienzan a predominar los procesos de descalcificación del C-S-H, lixiviación de portlandita y penetración de cloruros, los cuales alteran la microestructura, aumentan la porosidad y reducen la rigidez del material.

En consecuencia, la literatura sugiere que la exposición prolongada en agua o soluciones de cloruro genera una respuesta bifásica en las propiedades del concreto: una primera etapa de ganancia de resistencia asociada a la continuidad de la hidratación, seguida de una etapa de pérdida progresiva vinculada a los mecanismos de degradación físico-química. Esta tendencia coincide con la hipótesis planteada en el presente trabajo, donde las probetas de SFRC expuestas durante 12 meses a medios acuosos y salinos podrían experimentar un aumento inicial de resistencia (por hidratación y refinamiento de poros), seguido de una disminución gradual debido a la corrosión de las fibras, la fisuración interfacial y la alteración del equilibrio químico del sistema fibra-matriz (ver Figura 5.3).

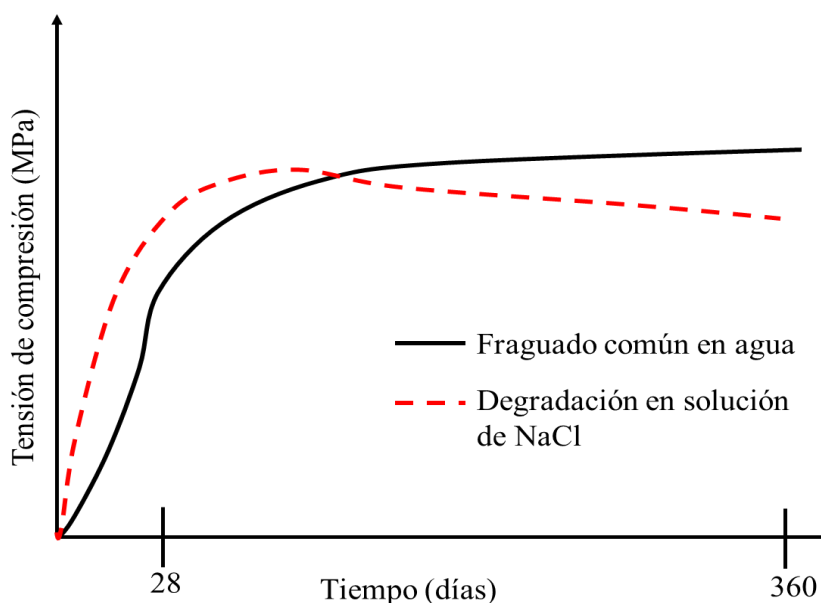


Figura 5.1. Aumento de la resistencia del concreto vs. tiempo de degradación. Figura de elaboración propia.

- *Microfisuración interna a causa de la penetración de cloruros*

Existen varios procesos que se deben tener en cuenta a la hora de estudiar la degradación de los SFRCs cuando se degradan en ambientes de cloruros durante largos períodos de tiempo. Uno de estos procesos es la microfisuración interna inducida por la expansión de los productos de corrosión. Cuando las fibras metálicas comienzan a corroerse, los óxidos de hierro generados (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y FeOOH) presentan un volumen específico entre 2 y 6 veces mayor que el del hierro metálico original (Berrocal et al., 2017). Esta expansión produce tensiones circunferenciales de tracción en la matriz cementicia adyacente, generando un patrón característico de fisuras radiales y microgrietas en la interfaz fibra-matriz (ver Figura).

Dichas fisuras no solo facilitan la difusión de cloruros y oxígeno, amplificando la corrosión, sino que también provocan una pérdida progresiva de confinamiento y reducen la rigidez efectiva del concreto. Estudios recientes confirman que este mecanismo de daño se manifiesta incluso antes de que exista pérdida apreciable de sección metálica de la fibra, afectando la capacidad de transferencia de esfuerzos y el comportamiento postelástico del concreto (Liu et al., 2025). En el contexto del presente trabajo, este fenómeno resulta de particular interés, ya que la combinación de ciclos húmedo–seco, diferentes concentraciones de cloruros y volúmenes de fibra puede intensificar la expansión de los productos de corrosión, generando microfisuración que se traduce en una reducción de la resistencia a la compresión del SFRC a lo largo del tiempo.

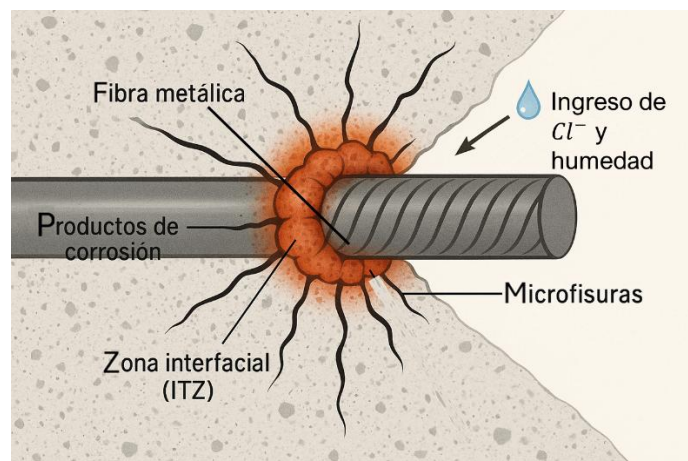


Figura 5.2. Microfisuración en la zona interfacial del SFRC asociada a la corrosión inducida por cloruros. Figura de elaboración propia.

- *Lixiviación*

Otro mecanismo relevante de degradación que debe considerarse en el análisis de la durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero es la lixiviación y disolución del hidróxido de calcio desde la matriz cementicia. Durante los ciclos de inmersión y secado, el agua o la solución salina pueden movilizar iones Ca^{2+} al disolver parcialmente la portlandita, lo que conduce a un aumento de la porosidad efectiva en el concreto, deteriorando la cohesión interna del material (Carde et al., 1997). Estudios recientes demuestran que la estabilidad de la portlandita en sistemas expuestos a soluciones iónicas complejas es limitada: por ejemplo, algunos estudios indican que en cementos con menor contenido de portlandita la lixiviación e interacción con la fase C – S – H provocan un aumento de micropermeabilidad y pérdida de rigidez mecánica (Boudache et al., 2023).

Según Manquehual et al. (2023), en hormigón proyectado reforzado con fibras de acero sometido a condiciones prolongadas de exposición al agua, la lixiviación de calcio se traduce en una reducción significativa del contenido de portlandita, acompañada de un incremento en la porosidad total y una disminución en la densidad aparente del material. Este deterioro microestructural reduce la capacidad de confinamiento de la matriz sobre las fibras metálicas, comprometiendo tanto la transferencia de esfuerzos compresivos como la estabilidad de la interfaz fibra–matriz. Además, trabajos sobre la solubilidad de la portlandita muestran que su disolución aumenta en presencia de iones como Cl^- o Na^+ en solución, lo cual confirma la vulnerabilidad del concreto en ambientes salinos (Glasser et al., 2005).

De forma complementaria, Ruslan et al. (2024) evidencian que los concretos expuestos a medios agresivos experimentan una descalcificación progresiva del gel C–S–

H, generando un aumento de la micropermeabilidad y una reducción sustancial en la resistencia mecánica. Los autores demostraron que la lixiviación altera la relación Ca/Si del C-S-H, provocando su transformación hacia fases de menor cohesión y, por tanto, menor capacidad para resistir esfuerzos de compresión. Esta evolución microestructural se traduce en una pérdida de la resistencia a la compresión conforme avanza la exposición, especialmente en ambientes de alta humedad o con presencia de cloruros. Además, el estudio destaca que la reducción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ afecta la alcalinidad del sistema, debilitando la capa pasiva de las fibras metálicas y promoviendo la corrosión localizada, lo que acentúa el deterioro de las propiedades mecánicas del material.

Otros estudios encontraron daños por corrosión limitados a los primeros 5 a 10 mm de la sección transversal del material. Este deterioro, localizado principalmente en la zona periférica, resultó en una afectación mínima de las propiedades mecánicas del SFRC, tanto en condiciones de inmersión continua (Roque et al., 2009), como en ciclos de inmersión y secado (Shah, 1985). No obstante, algunos resultados evidencian que el deterioro de la matriz de concreto, provocado por procesos como la lixiviación de sus componentes, puede comprometer la integridad estructural del material en igual o mayor medida que la corrosión de las fibras de acero, al debilitar la cohesión interna y facilitar la penetración de agentes agresivos (Hagelia, 2011).

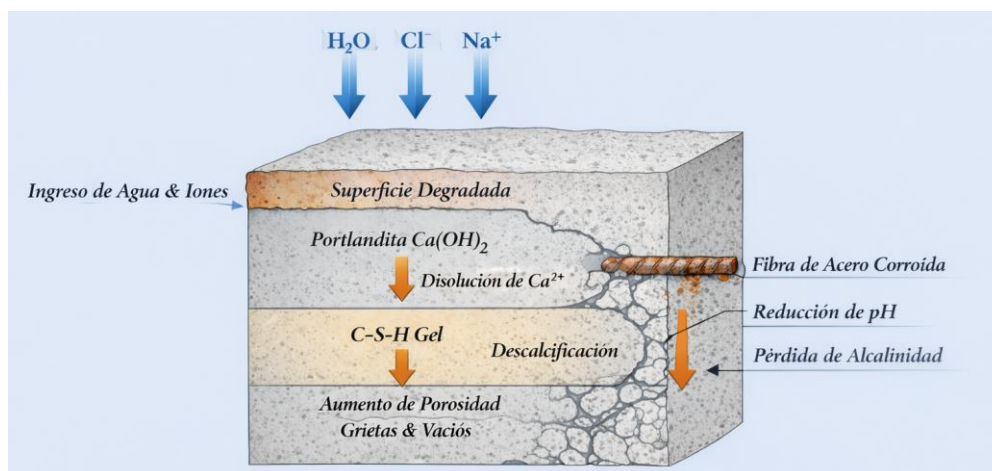


Figura 5.3. Lixiviación de la portlandita del concreto. Figura de elaboración propia.

En el contexto de este estudio, la lixiviación de portlandita puede ocurrir tanto en probetas sumergidas en agua control como en soluciones salinas durante los ciclos de mojado-secado, generando una degradación temprana de la matriz que, de manera sinérgica con la corrosión de las fibras y la pérdida de adherencia, contribuye a la disminución de la resistencia a la compresión del SFRC. Integrar este mecanismo en el análisis permite explicar posibles pérdidas mecánicas a compresión observadas incluso en ambientes considerados como “menos agresivos” y justifica la necesidad de controlar la calidad de la matriz (por ejemplo, mediante la relación agua/cemento) como variable experimental crítica. En consecuencia, se observa una disminución de la resistencia a la compresión atribuible a la pérdida de continuidad y rigidez del esqueleto cementicio, efecto que se intensifica cuando coexisten mecanismos de degradación adicionales como la corrosión de las fibras.

- *Disminución de pH en el concreto*

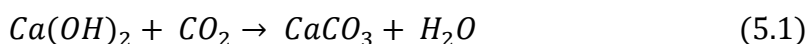
La alteración del pH en la zona interfacial fibra–matriz representa un mecanismo de degradación menos evidente, pero de gran relevancia en el comportamiento a largo plazo del concreto reforzado con fibras de acero. Cuando la fibra metálica, o cualquier refuerzo, comienza a perder la protección pasiva, ya sea por penetración de cloruros, carbonatación u otros iones agresivos, se genera una zona local con descenso de pH que favorece la activación de procesos de corrosión, disolución del hidróxido de calcio, consumo de iones OH^- y debilitamiento del sistema matriz-fibra. Diversos autores indican que las mezclas cementicias presentan un pH inicial típico entre 12 y 13.8, condición que garantiza la pasivación del acero; sin embargo, este pH puede reducirse significativamente mediante carbonatación, lixiviación o agresión química, comprometiendo la integridad del sistema (Yousuf et al., 2020).

Por ejemplo, en un estudio sobre concreto expuesto a un medio ácido (HCl) se documentó que, con la duración de la corrosión, el módulo elástico y la resistencia a compresión disminuyeron de forma notable, asociándose esta pérdida a la ruptura del ambiente alcalino y a la aceleración de la fisuración interna (Cheng et al., 2022). De modo similar, investigaciones recientes sobre concreto reforzado con fibras en ambientes ácidos o con alta concentración de cloruros demuestran que el pH local puede descender hasta valores en los que el acero pierde la capa pasiva, se inicia la corrosión localizada y se produce expansión de productos de corrosión, lo cual provoca microfisuración, pérdida de adherencia en la interfaz y, en consecuencia, caída de la tenacidad a la compresión (Yousari et al., 2023).

En el contexto del sistema fibra-matriz, la disminución del pH local debilita la cohesión entre la fibra y la matriz pues, al perderse la alcalinidad, la estabilidad del C–S–H y de la portlandita se ve comprometida, lo que reduce la rigidez del contacto interfacial y la capacidad de la matriz de transferir esfuerzos. Este proceso conduce a una reducción del confinamiento local que las fibras proporcionan y, por ende, a un descenso de la resistencia a la compresión del SFRC. En consecuencia, aunque la fibra siga presente físicamente, su eficiencia estructural se ve reducida. Integrar este mecanismo en el análisis de durabilidad permite explicar efectos de degradación mecánica que no dependen únicamente de la pérdida de sección del refuerzo o del volumen de corrosión, sino de la alteración química del entorno de la fibra.

- *Penetración de la carbonatación*

La carbonatación es un proceso fisicoquímico mediante el cual el dióxido de carbono (CO_2) presente en el ambiente penetra en el concreto y reacciona con los productos alcalinos de la hidratación del cemento, principalmente la portlandita y, en menor medida, el gel de cílice. Esta reacción conduce a la formación de carbonato de calcio y provoca una disminución progresiva del pH de la matriz cementicia, desde valores típicamente superiores a 12.5 hasta valores cercanos a 8–9 en zonas carbonatadas (Papadakis et al., 1991). La reacción representativa del proceso está representada por la Ecuación 5.1:



La reducción de la alcalinidad asociada a la carbonatación tiene implicaciones directas sobre la durabilidad del concreto, ya que elimina la capa pasiva que protege a los elementos metálicos embebidos, facilitando el inicio de procesos corrosivos. En el caso del concreto reforzado con fibras de acero, este fenómeno resulta particularmente relevante, debido a la elevada relación superficie–volumen de las fibras y a su distribución

tridimensional, lo que incrementa la probabilidad de interacción entre zonas carbonatadas y refuerzo metálico (Luo et al., 2022).

En el contexto del presente estudio, la evaluación de la carbonatación es necesaria para discriminar si los cambios observados en las propiedades mecánicas del SFRC tras la exposición a cloruros se deben exclusivamente a la corrosión inducida por Cl^- o si existe una acción combinada con procesos de esta naturaleza. Aunque en ambientes marinos la degradación suele estar dominada por el ingreso de cloruros, diversos estudios han demostrado que la carbonatación puede coexistir con la penetración de Cl^- , especialmente en concretos con relaciones agua/cemento elevadas, alta porosidad o sometidos a ciclos de humectación y secado, como los empleados en este trabajo (El Inaty et al., 2023).

Diversos estudios han demostrado que la carbonatación puede afectar negativamente la resistencia a compresión del concreto, especialmente cuando el proceso provoca descalcificación del gel C-S-H. Papadakis et al. (1991) demostraron que la carbonatación progresiva induce cambios microestructurales significativos, asociados a la reducción del contenido de $Ca(OH)_2$ y a la alteración del C-S-H, lo que puede traducirse en una disminución de la resistencia mecánica, particularmente en concretos con elevada relación agua/cemento y mayor porosidad. Estos autores mostraron que, si bien puede observarse una aparente densificación inicial por la formación de $CaCO_3$, en etapas avanzadas predomina el deterioro mecánico del material. Por lo tanto, la determinación experimental de la penetración de la carbonatación en este estudio permite confirmar si este mecanismo debe considerarse dentro del análisis de degradación del SFRC o, por el contrario, si su influencia es secundaria frente a los procesos dominantes asociados a la acción de los cloruros.

5.2 Descripción del programa experimental

5.2.1 Elaboración y curado de especímenes de SFRC

- *Muestras para la determinación de la penetración de Cl^- y de la carbonatación en exposición durante 12 meses*

Para la elaboración de los especímenes utilizados para determinar la penetración de cloruros y de la profundidad de la carbonatación se siguió la misma metodología de dosificación, mezclado, incorporación de fibras y curado descrita en la sección anterior, empleándose igualmente las mismas cantidades de materiales indicadas previamente. De esta manera, se garantizó la consistencia experimental y la comparabilidad de los resultados con los obtenidos en los ensayos mecánicos y químicos desarrollados en el presente capítulo. No obstante, con el fin de adecuar los especímenes a los procedimientos de caracterización de la penetración de cloruros y de la carbonatación, se empleó una geometría diferente, elaborándose especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura (ver Figura 5.5 a y b). Esta configuración permitió disponer de un volumen de material suficiente para la extracción de muestras por capas y la evaluación de perfiles de degradación en función de la profundidad.

En este conjunto de especímenes, las variables experimentales consideradas fueron el volumen de fibras, con valores de 0.5% y 1%, y la relación agua/cemento, establecida en 0.6 y 0.8, con el objetivo de analizar la influencia de la porosidad de la matriz cementicia y del contenido de refuerzo sobre los procesos de transporte y degradación química. Para cada combinación de variables se elaboraron especímenes utilizando los distintos tipos de fibra evaluados en el estudio. En total, se confeccionaron

16 especímenes cilíndricos, correspondientes a cuatro especímenes por cada tipo de fibra, lo que permitió disponer de material suficiente para la realización de los ensayos de penetración de cloruros y de carbonatación, asegurando la representatividad de los resultados obtenidos.



Figura 5.4. Elaboración (a) y curado (b) de los especímenes utilizados para medir la penetración de Cl^- y la carbonatación.

- *Muestras de compresión degradadas durante 12 meses*

La metodología empleada para la elaboración y el curado de los especímenes cúbicos (70 x 70 mm) degradados durante 1 año y luego evaluados mediante pruebas de compresión, fue exactamente la misma que la utilizada en el capítulo anterior para la fabricación de los concretos reforzados con fibras de acero previamente degradadas. En consecuencia, el procedimiento de mezclado, incorporación de fibras, moldeo, compactación y curado inicial de los especímenes se realizó siguiendo de manera estricta la metodología descrita en la Sección 4.2.2, garantizando así la consistencia experimental y la comparabilidad directa de los resultados obtenidos en ambos capítulos. De igual forma, las dosificaciones y cantidades de materiales empleadas en la elaboración de los SFRCs se mantuvieron sin modificaciones respecto a las utilizadas previamente, y se presentan de manera detallada en la Tabla 4.1.

Esta decisión metodológica permitió aislar el efecto de la exposición prolongada a los ambientes degradativos sobre el comportamiento mecánico del material, evitando la introducción de variaciones asociadas a cambios en la composición del concreto. En total, se confeccionaron 72 especímenes cúbicos de SFRC, distribuidos en 18 especímenes por cada tipo de fibra estudiado (ver Figura 5.4). Para cada tipo de fibra se consideraron dos contenidos volumétricos de refuerzo, 0.5% y 1%, y tres condiciones de exposición correspondientes a 0%, 3.5% y 7% de cloruros, elaborándose tres réplicas por cada combinación de variables. Esta configuración experimental permitió asegurar la repetibilidad de los ensayos y obtener resultados estadísticamente representativos del comportamiento del SFRC bajo las distintas condiciones evaluadas.

5.2.2 Condiciones de degradación durante 12 meses

Los especímenes cilíndricos destinados a la evaluación de la penetración de cloruros y de la profundidad de carbonatación fueron sometidos a un único medio degradativo, consistente en una solución acuosa de cloruro de sodio con una concentración de Cl^- del 7%. La selección de esta concentración respondió a su carácter representativo de una condición severa de exposición, adecuada para acelerar los procesos de transporte iónico y degradación química en el concreto, y permitir la identificación clara de los mecanismos dominantes en un periodo de tiempo controlado.



Figura 5.5. Especímenes de compresión elaborados y cumplida la etapa de curado.

La exposición de las muestras se realizó bajo condiciones ambientales de laboratorio, manteniéndose el contacto directo entre el concreto y la solución salina durante 7 días y 7 días más de secado. Este esquema de exposición permitió favorecer la penetración de los iones cloruro desde la superficie hacia el interior del material, así como evaluar de manera simultánea la posible interacción entre la degradación inducida por cloruros y otros procesos químicos, como la pérdida de alcalinidad y la carbonatación. El uso de un único medio degradativo con alta concentración de cloruros permitió aislar el efecto combinado de la concentración de Cl^- , el volumen de fibras y la relación agua/cemento sobre la profundidad de penetración de cloruros y el avance de la carbonatación, reduciendo la dispersión experimental asociada a la variación de las condiciones de exposición. De este modo, los resultados obtenidos pueden interpretarse de forma comparativa entre las distintas formulaciones de concreto evaluadas.

Adicionalmente, es importante señalar que los especímenes destinados a la evaluación de la resistencia a compresión fueron sometidos a tres medios degradativos distintos, a saber: agua, solución de cloruro de sodio al 3.5% y solución de cloruro de sodio al 7%. La exposición en agua se utilizó con el propósito de analizar si la rehidratación prolongada del concreto podía conducir a un incremento de la resistencia mecánica, asociado a la continuidad de las reacciones de hidratación del cemento más allá de los 28 días, sin la presencia de la degradación por cloruros. Por su parte, la solución de NaCl al 3.5% fue seleccionada por corresponder aproximadamente a la concentración de cloruros presente en el agua de mar, considerándose como el medio más representativo de condiciones reales de servicio en ambientes marinos (De Weerd et al., 2019). Finalmente, la solución con una concentración de Cl^- del 7% se empleó como un medio de corrosión acelerada, con el fin de intensificar los procesos de transporte iónico y degradación química del sistema fibra–matriz en un periodo de tiempo controlado.

En todos los casos, tanto para los especímenes cúbicos destinados a ensayos de compresión como para los especímenes cilíndricos utilizados en la determinación de la penetración de cloruros y la carbonatación, la exposición se realizó mediante ciclos de mojado y secado, con el objetivo de reproducir de manera más realista las condiciones ambientales a las que se encuentran sometidas las estructuras de concreto en servicio. Este esquema de exposición favorece la penetración de cloruros, la movilización de especies iónicas y la activación de procesos corrosivos, permitiendo una evaluación más representativa de la degradación del SFRC bajo condiciones controladas de laboratorio.

5.2.3 Medición de la penetración de Cl^- y la penetración de la carbonatación

La penetración de cloruros en los especímenes de concreto se realizó mediante dos metodologías complementarias: un método cualitativo basado en la aplicación de nitrato de plata ($AgNO_3$) sobre secciones transversales del concreto, y un método cuantitativo para la obtención del perfil de concentración de Cl^- en función de la profundidad, basado en la titulación argentométrica por el método de Mohr. El empleo combinado de ambos procedimientos permitió caracterizar tanto la profundidad aparente de ingreso de cloruros como su distribución a lo largo del espesor del material.

Para la evaluación cualitativa de la penetración de cloruros se utilizó el método colorimétrico con nitrato de plata. Este método consiste en rociar una solución de $AgNO_3$ a una concentración de 0.2 mol/L sobre una sección transversal de concreto recién cortada, lo que da lugar a la formación de zonas con diferente coloración debido a reacciones de precipitación. Las mediciones se hicieron a los 4, 5, 6 y 12 meses de exposición en los concretos degradados en soluciones de Cl^- al 7%. En presencia de iones cloruro, el nitrato de plata reacciona formando cloruro de plata ($AgCl$), de color blanco, mientras que en las zonas libres de cloruros el Ag^+ reacciona con los hidróxidos alcalinos del concreto, generando una coloración marrón. Como resultado, se observa un límite de cambio de color claramente definido, donde la zona blanca se asocia con la región afectada por la penetración de cloruros, y la zona marrón corresponde al concreto no contaminado. Las reacciones químicas involucradas en este método se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Reacciones químicas en el método $AgNO_3$.

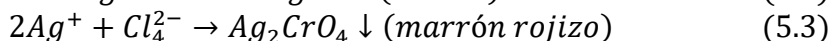
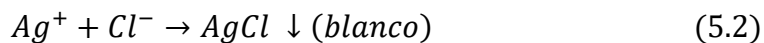
Reacciones químicas en la zona con cloruro	Reacciones químicas en la zona sin cloruro
$Ag + Cl^- \rightarrow AgCl$ (blanco)	$Ag + OH^- \rightarrow AgOH \rightarrow Ag_2O$ (marrón)
$Ag + OH^- \rightarrow AgOH \rightarrow Ag_2O$	

Las secciones de concreto fueron obtenidas mediante cortes transversales realizados cada 10 mm a partir de la superficie expuesta según Luo et al. (2022), utilizando un disco adecuado para el corte de concreto, tal como se muestra en la Figura 5.6 a y b. Tras el corte, la solución de $AgNO_3$ fue aplicada de manera uniforme sobre la superficie hasta la aparición nítida de las tonalidades características. La distancia desde la superficie expuesta hasta el límite de cambio de color fue medida en distintos puntos, considerándose dicha distancia como la profundidad de penetración de cloruros para cada punto de medición. Los valores obtenidos fueron promediados para cada sección y posteriormente para cada combinación experimental.

Con el objetivo de establecer de manera cuantitativa el perfil de concentración de cloruros en función de la profundidad, se aplicó el método de Mohr mediante titulación argentométrica. Esto se realizó teniendo en cuenta las normas C1152/C1152M-04 (2012) y T 260-21 (2021). Para ello, se extrajo polvo de concreto a profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 mm empleando un taladro equipado con una barrena de punta de tungsteno de 10 mm de diámetro, procurando evitar la contaminación entre capas y descartando el polvo superficial inicial (Figura 5.6 c). De cada profundidad se tomaron 0.8 g de polvo seco, de los cuales, aproximadamente 0.1351 g correspondían a cemento, de acuerdo con la dosificación de la mezcla utilizada.

Cada muestra de polvo fue colocada en un recipiente hermético y disuelta en 10 ml de agua desionizada, siendo posteriormente agitada durante 30 minutos y dejada en

reposo por 60 minutos, con el fin de favorecer la disolución completa de los iones cloruro presentes. Tras este periodo, se extrajeron 6 ml del sobrenadante para su análisis mediante titulación con una solución de AgNO_3 con una concentración de 0.1 mol/L, utilizando cromato de potasio (K_2CrO_4) como indicador. El punto final de la titulación se identificó por la aparición de una coloración marrón rojiza, asociada a la formación de cromato de plata (Ag_2CrO_4). Las reacciones químicas involucradas en este método se muestran en las Ecuaciones 5.2 y 5.3:



A partir del volumen de AgNO_3 consumido, se calcularon estequiométricamente los moles de Cl^- presentes en la alícuota analizada, los cuales fueron extrapolados al volumen total de la solución. Finalmente, la concentración de cloruros se expresó como porcentaje de Cl^- respecto a la masa de cemento contenida en la muestra, repitiéndose el procedimiento para cada profundidad con el fin de construir el perfil de concentración de cloruros a lo largo del espesor del concreto. La evaluación de la penetración de la carbonatación se realizó sobre secciones de concreto obtenidas de manera análoga a las utilizadas para el ensayo de penetración de cloruros. Sobre las superficies de corte se aplicó una solución alcohólica de fenolftaleína al 1%. La ausencia de coloración indica zonas carbonatadas, mientras que la coloración morada característica evidencia regiones del concreto que conservaban una alcalinidad elevada y, por tanto, no habían sido afectadas por la carbonatación.

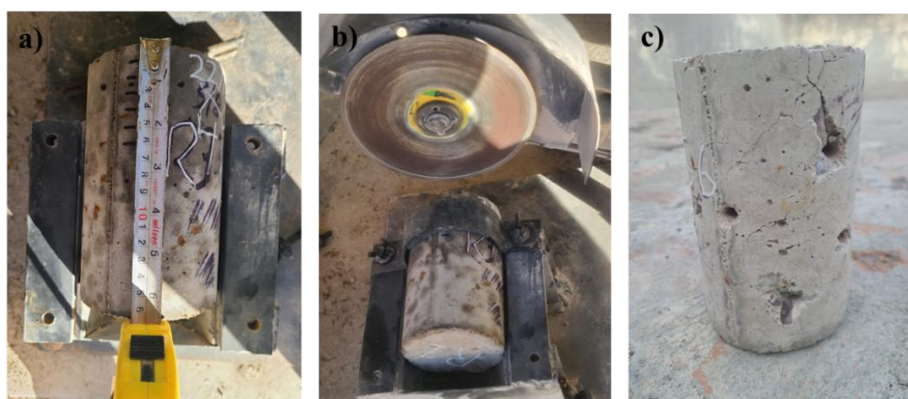


Figura 5.6. Corte y perforación del concreto para medir la penetración de Cl^- (a y b) y de la carbonatación (c).

5.2.4 Determinación de lixiviación en el proceso de degradación

La lixiviación asociada a la degradación del concreto se evaluó mediante el seguimiento de la extracción de calcio hacia el medio de exposición, así como por cambios en la alcalinidad del sistema concreto solución y por la cuantificación del contenido de Ca en la matriz cementante. Para ello, se emplearon tres medios degradativos: agua común, solución de NaCl al 3% y solución de NaCl al 7%, manteniendo los especímenes en inmersión durante 12 meses, es decir, en las mismas condiciones que se degradaron los especímenes de penetración de Cl^- y los de compresión. Las soluciones no fueron renovadas durante el periodo de exposición, con el fin de permitir la acumulación de especies lixiviadas y representar condiciones de interacción continua concreto medio.

La lixiviación se cuantificó mediante tres métodos complementarios:

1. Determinación de *Ca* en las soluciones degradativas mediante espectroscopía de absorción atómica. Al término de los 12 meses, se obtuvieron muestras del líquido de exposición y se determinó la concentración de *Ca* disuelto mediante espectroscopía de absorción atómica. Los resultados se interpretaron por comparación entre un control (agua común) y los tres medios degradativos evaluados, atribuyendo el aumento de *Ca* en solución a la disolución y migración de compuestos ricos en *Ca* desde la matriz cementante.

2. Para identificar la disminución relativa del contenido de calcio dentro del concreto, se realizaron análisis microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de energía dispersiva de rayos X en secciones representativas de la matriz cementante, comparando especímenes expuestos a los distintos medios degradativos respecto a especímenes de referencia no degradados. Las muestras de corte de concreto reforzado con fibras de acero se colocaron previamente en un desecador con el fin de mantenerlas libres de humedad. Posteriormente, cada muestra fue montada sobre un cilindro de aluminio utilizando cinta adhesiva de grafito por ambos lados, con el objetivo de asegurar su correcta fijación y evitar daños durante la manipulación. El montaje sobre grafito permitió además mejorar la conductividad superficial de la muestra y garantizar su estabilidad durante la observación.

Una vez montadas, las muestras fueron recubiertas con una capa conductora de oro mediante un recubridor Denton Vacuum Desk II, aplicando un tiempo de deposición aproximado de 150 s, lo que generó un espesor cercano a 100 Å. Este recubrimiento se realizó para reducir los efectos de carga eléctrica superficial asociados a materiales no conductores y obtener imágenes de mejor calidad. Las observaciones se llevaron a cabo en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5900LV, operando en cámara de vacío. El análisis químico se efectuó utilizando un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X acoplado al SEM, empleando un potencial de aceleración de 20 kV, una distancia de trabajo $WD = 10$ mm y un *spotsize* de 52, trabajando con electrones retrodispersados.

El análisis EDS se realizó mediante métodos puntuales, lineales y de mapeo, seleccionando siete sitios de interés en cada muestra, representativos de distintas zonas del interior del concreto. Cada sitio fue analizado a aumentos de 230X, 1500X y 3000X, con un tiempo de adquisición de 150 s, con el fin de obtener espectros con adecuada resolución estadística. A partir de estos análisis se obtuvo información cualitativa y cuantitativa, expresada como porcentaje en peso atómico de los elementos presentes, así como mapas de distribución elemental. La comparación de los resultados obtenidos en especímenes degradados respecto a los de referencia permitió evaluar la reducción relativa del contenido de *Ca* en la matriz cementante, asociándola a procesos de descalcificación y lixiviación inducidos por la exposición prolongada a los medios degradativos.

3. Seguimiento de la alcalinidad del sistema mediante pH. El pH de cada medio degradativo se midió directamente en la solución de exposición realizando dos mediciones en cada caso, utilizando un potenciómetro calibrado a temperatura ambiente, con lecturas realizadas al final del periodo de 12 meses y comparándolas con mediciones realizadas al agua común. De manera complementaria, con el objetivo de evaluar la evolución del ambiente alcalino del concreto tras la exposición prolongada a soluciones con cloruros, se determinó el perfil de pH en función de la profundidad mediante un procedimiento basado en la extracción de polvo del concreto y su posterior análisis en suspensión acuosa. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios de durabilidad del concreto para identificar procesos de lixiviación, descalcificación y pérdida de alcalinidad asociados a la degradación química del material.

Una vez finalizado el periodo de exposición de las probetas a los medios de degradación (agua y soluciones de $NaCl$), las muestras fueron secadas superficialmente y se procedió a la extracción de polvo del concreto mediante perforación controlada. La obtención del polvo se realizó a profundidades comprendidas entre 10 y 50 mm desde la superficie expuesta, utilizando incrementos de 10 mm. Esta discretización permite capturar gradientes químicos representativos del transporte de iones y de la alteración progresiva de la matriz cementicia, tal como se recomienda en estudios de perfiles químicos en concretos expuestos a ambientes agresivos.

Para evitar contaminación cruzada entre capas, el equipo de perforación fue limpiado exhaustivamente entre cada extracción, y el polvo correspondiente a cada profundidad fue recolectado y almacenado en recipientes herméticos previamente identificados. El polvo obtenido fue tamizado para eliminar partículas gruesas y asegurar una muestra representativa de la matriz cementicia. La determinación del pH se realizó mediante la preparación de una suspensión acuosa empleando agua desionizada, con una relación sólido-líquido de 8 g de polvo por 10 ml de agua. Esta proporción se seleccionó por ser consistente con metodologías reportadas en la literatura para la evaluación del pH del concreto pulverizado.

Una vez preparada la suspensión, las muestras fueron sometidas a agitación mecánica durante 30 min, con el fin de favorecer la disolución parcial de hidróxidos alcalinos, principalmente $Ca(OH)_2$, $NaOH$ y KOH , y alcanzar un equilibrio químico representativo entre el sólido y la fase líquida. Posteriormente, las suspensiones se dejaron en reposo durante 60 min para permitir la sedimentación parcial de las partículas sólidas y estabilizar el pH de la solución. Este tiempo combinado de agitación y reposo ha sido reportado como adecuado para obtener mediciones reproducibles y representativas del pH en estudios de degradación química del concreto.

El pH de cada suspensión fue medido utilizando un potenciómetro calibrado con soluciones patrón de pH 7, 10 y 12, a temperatura ambiente. La medición se realizó introduciendo el electrodo directamente en la fase líquida sobrenadante, evitando la perturbación del sedimento. Para cada profundidad se realizaron al menos dos mediciones independientes, verificando la repetibilidad de los resultados. La obtención del perfil de pH en función de la profundidad permite identificar zonas afectadas por lixiviación de portlandita y descalcificación del gel $C-S-H$, procesos que se manifiestan mediante una reducción progresiva del pH desde la superficie hacia el interior del concreto. En el contexto del presente estudio, este análisis resulta particularmente relevante para correlacionar la pérdida de alcalinidad con la penetración de cloruros, la activación de procesos corrosivos en las fibras de acero y la evolución de las propiedades mecánicas del SFRC tras 12 meses de exposición.

5.2.5 Ensayos mecánicos de compresión y cálculo de las propiedades mecánicas

Luego de transcurridos los 12 meses de degradación discontinua de las muestras de las muestras de SFRC, cada espécimen fue evaluado de manera individual mediante un ensayo de compresión hasta su total ruptura. Los ensayos mecánicos de compresión realizados en esta etapa del estudio se llevaron a cabo siguiendo procedimientos idénticos a los descritos en la Sección 4.2.3, empleando la misma normativa, metodología experimental y criterios de control. La configuración del ensayo, así como la instrumentación utilizada, fue la misma previamente definida y se ilustra en la Figura 4.2.

De igual manera, el cálculo de las propiedades mecánicas se efectuó conforme a lo establecido en la Sección 4.2.4.1, utilizando las mismas ecuaciones, definiciones y

procedimientos de análisis. Las propiedades determinadas incluyeron el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo, la tenacidad y la resistencia residual, lo que permitió una comparación directa y consistente entre los especímenes de referencia y aquellos sometidos a los distintos medios de degradación. Esta estrategia metodológica garantiza que las variaciones observadas en el comportamiento mecánico se atribuyan exclusivamente a los efectos del proceso de degradación y no a cambios en el procedimiento experimental o en el método de análisis.

5.2.6 Estimación de la resistencia residual a flexión

Como se demostró a lo largo de la investigación, el estudio de la influencia de la degradación por cloruros sobre la resistencia a flexión del SFRC es de primordial importancia, dado que este parámetro gobierna el comportamiento pospico y la capacidad de disipación de energía del material. No obstante, debido a limitaciones asociadas al tamaño y a la geometría de las probetas empleadas en los ensayos de flexión, no fue posible someterlas a un proceso de degradación por cloruros durante 12 meses, tal como se realizó con los especímenes de compresión. Considerando lo anterior, y dado que se identificó a la resistencia residual como una de las propiedades mecánicas más relevantes y sensibles al daño inducido por la degradación, se optó por estimar la resistencia residual a flexión a partir de la resistencia residual obtenida en compresión, estableciendo así un enfoque indirecto que permite evaluar el efecto de la degradación por Cl^- sobre el comportamiento postfisuración del SFRC.

El empleo de un enfoque indirecto para la estimación de la resistencia residual a flexión se justifica a partir de la similitud de los mecanismos resistentes que gobiernan el comportamiento pospico del concreto reforzado con fibras de acero. Una vez que la matriz cementicia ha fisurado, tanto en compresión como en flexión, la capacidad portante residual está controlada principalmente por la transferencia de esfuerzos a través de las fibras, la interacción mecánica en la interfaz fibra–matriz y la energía disipada durante el deslizamiento y anclaje de las fibras. Este enfoque es consistente con la relación propuesta por Ruiz et al. (2019), quienes establecen una correlación entre parámetros residuales de compresión y flexión en SFRC.

El procedimiento seguido se describe a continuación:

1. Definición de los valores de referencia a flexión. Para cada tipo de fibra y fracción volumétrica analizada, se consideraron como valores de referencia las resistencias residuales a flexión determinadas experimentalmente en condición sin degradación. En este estudio, dichas resistencias se expresaron como $fD600_{ref}$ y $fD150_{ref}$, correspondientes a dos niveles de deflexión representativos del comportamiento postfisuración del concreto.

2. Determinación de la resistencia residual a compresión. Para las mismas mezclas de concreto, se emplearon los resultados de los ensayos de compresión realizados tras 12 meses de exposición a los medios degradativos. A partir de las curvas esfuerzo–deformación obtenidas experimentalmente, se determinó la resistencia residual a compresión R , definida como la tensión correspondiente a una deformación unitaria igual a tres veces la deformación asociada al esfuerzo máximo ($3\epsilon_{pico}$). Este criterio es análogo al utilizado por Ruiz et al. (2019) para caracterizar la capacidad residual pospico en compresión del SFRC.

3. Cálculo del factor de variación pospico en compresión. Para cada condición de exposición, se calculó un factor adimensional k_R que cuantifica el efecto de la degradación sobre la capacidad residual del material mediante la Ecuación 5.4:

$$k_R = \frac{R_{deg}}{R_{ref}} \quad (5.4)$$

donde R_{ref} corresponde a la resistencia residual a compresión del concreto reforzado con fibras en condición sin degradación y R_{deg} a la resistencia residual tras la exposición al medio con cloruros.

4. Estimación de las resistencias residuales a flexión en condición degradada. Bajo la hipótesis de que la degradación por cloruros afecta de forma proporcional los mecanismos responsables del comportamiento postfisuración, las resistencias residuales a flexión en condición degradada se estimaron mediante la aplicación del factor k_R a los valores de referencia mediante las Ecuaciones 5.5 y 5.6. Este procedimiento permite transferir el efecto de la degradación observado en compresión al comportamiento residual en flexión, manteniendo constantes el tipo de fibra y su fracción volumétrica, en concordancia con el enfoque propuesto por Ruiz et al. (2019).

$$fD600_{deg} = k_R * fD600_{ref} \quad (5.5)$$

$$fD150_{deg} = k_R * fD150_{ref} \quad (5.6)$$

5.3 Resultados

5.3.1 Penetración de Cl^- y penetración de la carbonatación

Los resultados obtenidos de la evaluación cualitativa de la penetración de Cl^- indican que, a los 4 meses de exposición, se observó una penetración aproximada de 12 mm, evidenciando un ingreso temprano de cloruros desde la superficie expuesta hacia el interior del concreto. Posteriormente, a los 5 meses, la profundidad afectada aumentó hasta 15 mm, mientras que a los 6 meses se registró una penetración cercana a 16 mm, lo que sugiere una progresión continua del frente de cloruros, aunque con una tendencia a la reducción en la velocidad de avance conforme aumenta la profundidad. Al cumplirse los 12 meses de exposición, se detectó la presencia de cloruros en toda la sección transversal del concreto, sin una zona claramente libre de Cl^- , como se aprecia en la Figura 5.7. Este resultado indica que el tiempo de exposición fue suficiente para que los cloruros alcanzaran el núcleo del material.

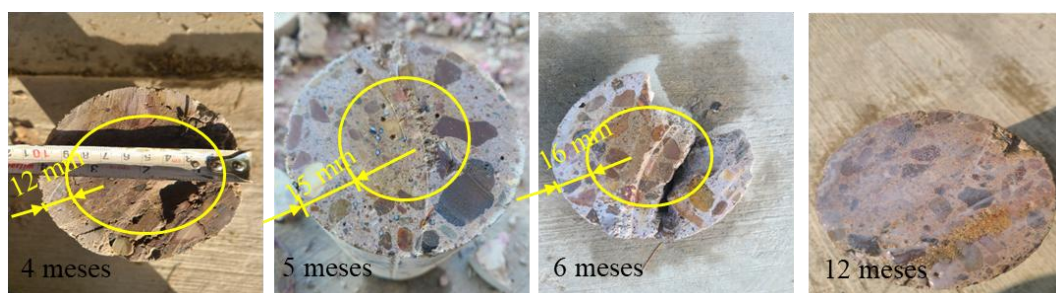


Figura 5.7. Evolución temporal de la penetración de iones cloruro en el concreto determinada mediante el método colorimétrico con nitrato de plata.

La evolución observada puede atribuirse a la combinación de mecanismos de difusión, absorción capilar y transporte facilitado por la microestructura porosa, los cuales se ven favorecidos por la exposición prolongada y por la posible degradación progresiva de la matriz. Del análisis cuantitativo de la penetración de Cl^- se obtuvo el perfil de concentraciones mostrado en la Figura 5.8. El perfil de concentración de cloruros en función de la profundidad, expresado como porcentaje de Cl^- por masa de cemento,

muestra una distribución claramente decreciente desde la superficie expuesta hacia el interior del concreto. En la zona más cercana a la superficie, a una profundidad aproximada de 10 mm, se registran concentraciones elevadas, del orden de 4.0 a 4.7%, lo que indica una acumulación significativa de cloruros libres en las capas externas del material.

A 20 mm de profundidad, la concentración de Cl^- disminuye de forma notable hasta valores cercanos a 1.7–2.2%, evidenciando la atenuación progresiva del contenido de cloruros conforme aumenta la distancia respecto a la superficie expuesta. Esta tendencia se acentúa a 30 mm, donde las concentraciones se reducen a valores inferiores a 1%, y continúa a 40 mm, con contenidos del orden de 0.1–0.3%. Finalmente, a 50 mm de profundidad, la concentración de Cl^- es prácticamente nula. Este comportamiento es consistente con un mecanismo de transporte dominado por difusión, en el que el gradiente de concentración impulsa el ingreso de cloruros desde el medio externo hacia el interior del concreto, siendo progresivamente limitado por la microestructura de la matriz cementante y por la capacidad de fijación química de los productos de hidratación. La distribución cuantitativa observada guarda una relación directa con el análisis cualitativo realizado mediante el método colorimétrico con nitrato de plata. En dicho análisis se identificó un frente de penetración de cloruros de aproximadamente 12 mm a los 4 meses, 15 mm a los 5 meses y 16 mm a los 6 meses, lo cual coincide con las zonas donde el perfil cuantitativo presenta concentraciones elevadas y claramente detectables de Cl^- .

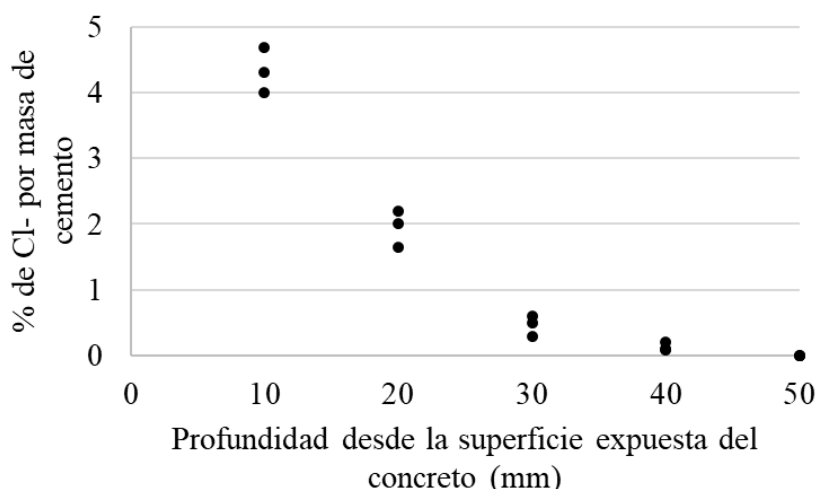


Figura 5.8. Perfil de penetración de cloruro luego de 360 días de degradación.

Asimismo, la presencia de cloruros en toda la sección transversal del concreto a los 12 meses, evidenciada cualitativamente, se ve respaldada por el perfil cuantitativo, que muestra concentraciones distintas de cero incluso a profundidades elevadas, aunque en niveles significativamente menores. La concordancia entre ambos enfoques refuerza la validez de los resultados y evidencia que, si bien la penetración total de cloruros ocurre a largo plazo, su impacto es más severo en las capas superficiales, donde se alcanzan concentraciones potencialmente críticas para la despasivación y corrosión de las fibras de acero. Por otra parte, los resultados obtenidos indican que las variables estudiadas no fueron determinantes en la penetración de iones cloruro bajo las condiciones de exposición evaluadas. En particular, la variación de la relación agua/cemento, del volumen de fibras y del tipo de fibra de acero no produjo cambios significativos en los perfiles de concentración de Cl^- ni en la profundidad del frente de penetración.

La similitud observada entre los perfiles sugiere que el transporte de cloruros estuvo gobernado principalmente por la matriz cementante y el tiempo de exposición,

más que por las características del refuerzo fibroso. Asimismo, el contenido y la naturaleza de las fibras no modificaron de manera apreciable la conectividad de la red porosa ni los mecanismos dominantes de ingreso de cloruros, lo que explica la ausencia de diferencias relevantes entre las distintas configuraciones analizadas. En cuanto a la penetración de la carbonatación, bajo las condiciones de exposición evaluadas en este estudio, no se observaron signos claros de este proceso en los especímenes analizados, tal como se aprecia en la Figura 5.9. La ausencia de un frente de carbonatación detectable indica que el pH interno del concreto se mantuvo en valores elevados a lo largo de la sección transversal, conservándose el entorno alcalino característico de la matriz cementante.

Este comportamiento sugiere que, para el tiempo de exposición y los medios degradativos considerados, la carbonatación no constituyó un mecanismo dominante de degradación, a diferencia de la penetración de cloruros. En consecuencia, los efectos observados sobre la durabilidad y el desempeño del concreto reforzado con fibras de acero pueden atribuirse principalmente a la acción de los cloruros y a los procesos asociados, como la lixiviación y la corrosión de las fibras. La ausencia de carbonatación resulta relevante para la investigación, ya que permite aislar el efecto de los cloruros y analizar su influencia de manera más clara, sin la interferencia de una reducción significativa del pH por reacción con CO_2 . Asimismo, estos resultados indican que, en ambientes similares a los estudiados, la degradación del concreto reforzado con fibras de acero estaría controlada principalmente por mecanismos de transporte iónico y no por procesos de carbonatación, al menos en etapas tempranas e intermedias de exposición.



Figura 5.9. Evolución temporal de la penetración de la carbonatación en el concreto determinada mediante el método colorimétrico con fenolftaleína.

5.3.2 Lixiviación del concreto luego de 12 meses de exposición

- *Variación de la concentración de calcio en el concreto*

La Tabla 5.2 muestra los resultados del análisis EDS realizado en distintos puntos del interior del concreto reforzado con fibras de acero expuesto durante 12 meses a una solución de NaCl al 7%, comparados con un espécimen de control no degradado. Los puntos 1 a 6 corresponden a mediciones efectuadas en diferentes zonas de la matriz cementante y de la interfase fibra matriz. El espécimen de control presenta un contenido de Ca del 26.03%, valor característico de una matriz cementante no degradada, donde la presencia de portlandita y fases ricas en calcio es significativa. En contraste, los especímenes degradados muestran una reducción marcada y heterogénea del contenido de Ca, con valores que oscilan entre 0.45% y 16.81%, dependiendo de la zona analizada.

Los valores más bajos de Ca, correspondientes a los puntos 1 y 2 (0.45% y 0.64%, respectivamente), indican una descalcificación severa de la matriz, consistente con procesos avanzados de lixiviación. Estas zonas coinciden con regiones donde el contenido de Fe es elevado, lo que sugiere proximidad a fibras de acero y posible coexistencia de productos de corrosión, los cuales pueden modificar localmente la composición química detectada. En los puntos 3 a 6, aunque el contenido de Ca es mayor que en los puntos más críticos, se mantiene significativamente por debajo del valor del control, evidenciando una pérdida generalizada de calcio en el concreto expuesto. Esta variabilidad espacial confirma que la lixiviación no ocurre de manera uniforme, sino que está influenciada por la microestructura local, la conectividad de poros y la interacción con las fibras de acero. La disminución del contenido de Ca detectada por EDS constituye una evidencia microestructural directa de lixiviación. Estos resultados confirman que, tras 12 meses de exposición, la descalcificación de la matriz cementante es un fenómeno activo y relevante, con implicaciones directas sobre la durabilidad y el desempeño mecánico del concreto reforzado con fibras de acero.

Tabla 5.2. Composición elemental (% en peso atómico) obtenida por SEM-EDS del SFRC expuesto a solución de NaCl al 7% durante 12 meses, N/I: elemento no identificado en el punto analizado.

Elementos,% PA	1	2	3	4	5	6	Control
Carbono	5.09	12.54	6.37	N/I	6.06	7.97	8.32
Boro	N/I	23.67	36.89	5.44	N/I	N/I	49.48
Oxígeno	31.12	15.58	N/I	N/I	11.71	17.66	N/I
Sodio	N/I	1.84	N/I	N/I	2.17	N/I	5.7
Cloro	3.64	N/I	1.67	N/I	N/I	0.96	0.78
Aluminio	N/I	N/I	1.13	N/I	N/I	2.22	2.91
Silicio	N/I	N/I	2.35	N/I	N/I	7.48	4.46
Calcio	0.45	0.64	16.81	3.64	5.13	10.15	26.03
Manganeso	0.43	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I
Hierro	58.87	45.75	34.78	90.92	74.93	53.56	2.32
Cobalto	0.4	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I

5.3.2.2 Variación del calcio en el medio degradativo

Por otra parte, el gráfico de la Figura 5.10 muestra una evolución temporal del calcio lixiviado hacia la solución en los tres medios evaluados, con un incremento progresivo de la concentración de Ca conforme aumenta el tiempo de exposición. En todos los casos se observa una cinética no lineal, caracterizada por un aumento más pronunciado durante los primeros meses y una tendencia a la desaceleración hacia los 12 meses, comportamiento típico de procesos de lixiviación controlados por disolución de portlandita y establecimiento gradual de equilibrio químico.

La solución de NaCl al 7% presenta las mayores concentraciones de Ca en todo el periodo, seguida por la solución de NaCl al 3.5%, mientras que el agua común muestra los valores más bajos. Esta jerarquía indica que la presencia y concentración de cloruros intensifican la lixiviación del calcio, favoreciendo la disolución continua de fases ricas en Ca y su migración hacia el medio externo. A los 12 meses, las concentraciones alcanzadas son del orden de ≈ 800 mg/L para NaCl 7%, ≈ 700 mg/L para NaCl 3.5% y ≈ 550 mg/L

para agua común, valores plenamente consistentes con los rangos reportados en la literatura para exposiciones prolongadas sin renovación de solución.

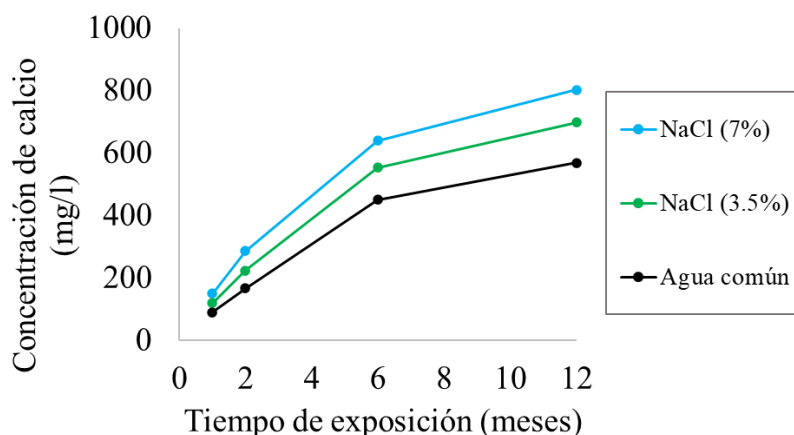


Figura 5.10. Evolución temporal de la concentración de calcio en solución durante el proceso de degradación del concreto durante 12 meses.

En su estudio Cheng et al. (2013) observaron que la concentración de Ca en la solución aumenta de manera significativa durante las primeras etapas de exposición y tiende posteriormente a estabilizarse, comportamiento asociado a la disolución progresiva de portlandita y al establecimiento de un equilibrio químico entre la matriz cementante y el medio externo. De forma consistente, Carde y Francois (1997) demostraron que la lixiviación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ conduce a una disminución gradual del contenido de calcio en la matriz cementante, acompañada por una modificación de las propiedades físicas y mecánicas del material, particularmente bajo exposiciones prolongadas. Además, B. Gérard et al. (2002) confirmaron que la lixiviación de calcio es un fenómeno gobernado por mecanismos de transporte y disolución, cuya intensidad depende del entorno químico y del tiempo de exposición, pudiendo alcanzar valores cuasi estacionarios en condiciones de inmersión prolongada.

En conjunto, estas investigaciones respaldan la tendencia observada en el presente estudio y confirman que la lixiviación de calcio constituye un mecanismo relevante de degradación del concreto bajo exposición prolongada a medios acuosos, con implicaciones directas sobre la durabilidad del material. En conjunto, el comportamiento observado en gráfico valida experimentalmente la ocurrencia de lixiviación en el presente estudio y se alinea de manera sólida con la bibliografía existente. Además, los resultados obtenidos por SEM-EDS, donde se evidenció una disminución del contenido de Ca en la matriz cementante respalda la conclusión de que la lixiviación constituye un mecanismo relevante de degradación tras 12 meses de exposición, particularmente en ambientes con altas concentraciones de cloruros.

- *Variación de la alcalinidad en el concreto y en el medio degradativo*

La Figura 5.11 muestra la variación del pH tanto en el interior del concreto como en el medio degradativo durante 12 meses de exposición. En la Figura 5.11a se observa que el pH interno del concreto disminuye progresivamente con el tiempo, siendo esta reducción más pronunciada en la zona más cercana a la superficie expuesta, a 5 mm de profundidad. En esta región, el pH desciende desde valores cercanos a 13 hasta 11 al finalizar el periodo de exposición, mientras que a 10 mm de profundidad la reducción es más moderada y el pH se mantiene por encima de 12.5. Este comportamiento evidencia

la existencia de un gradiente alcalino en el concreto, asociado a la lixiviación progresiva de hidróxidos desde la matriz cementante hacia el exterior. La mayor caída de pH en la zona superficial indica un consumo preferencial de la reserva alcalina, atribuible a la disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y a la descalcificación parcial del gel C – S – H, mientras que el núcleo del concreto conserva una mayor estabilidad química debido a la menor exposición directa al medio agresivo.

Por su parte, la Figura 5.11b muestra que el pH de la solución de NaCl al 7% en contacto con el concreto aumenta de forma continua, pasando de un valor inicial de 8.93 hasta 10.25 al cabo de 12 meses. Este incremento confirma que el concreto actúa como una fuente de alcalinidad para el medio degradativo, producto de la lixiviación de especies alcalinas, principalmente iones hidroxilo y calcio, desde la matriz cementante hacia la solución circundante. El hecho de que el medio no haya sido renovado favorece la acumulación progresiva de estas especies y explica la tendencia ascendente del pH. El análisis conjunto de ambos resultados pone de manifiesto un mecanismo acoplado de degradación química, en el cual la pérdida de alcalinidad en el interior del concreto ocurre simultáneamente con el aumento de la alcalinidad del medio externo. Este fenómeno es característico de procesos de lixiviación y resulta coherente con la disminución del contenido de calcio en la matriz observada mediante SEM-EDS y con el incremento de la concentración de *Ca* medido en la solución degradativa. En consecuencia, los resultados confirman que, bajo las condiciones estudiadas, la lixiviación desempeña un papel relevante en la evolución química del concreto y en la modificación de su entorno, con implicaciones directas para la durabilidad del material a largo plazo.

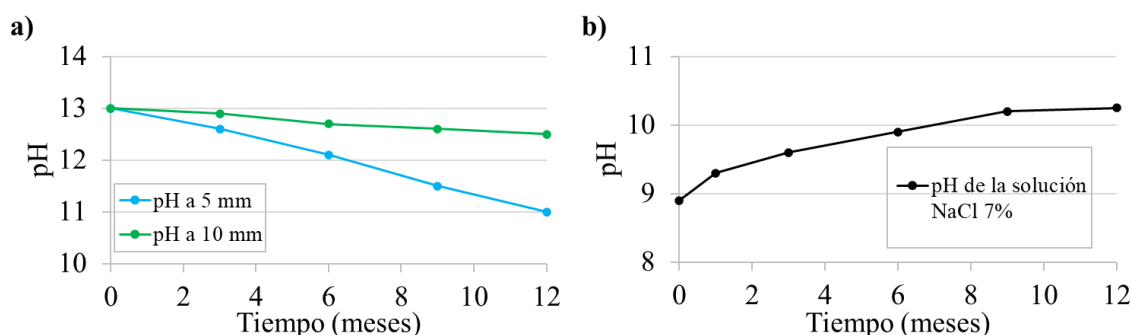


Figura 5.11. Variación temporal del pH, a: del concreto y b: de la solución de NaCl al 7% en contacto con el concreto durante 12 meses.

5.3.3 Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

Las micrografías presentadas en la Figura 5.12 corresponden a una fibra de alambre galvanizado embebida en la matriz de concreto tras 12 meses de exposición a un medio con cloruros al 7%. En la Figura 5.12a se identifica claramente la interfaz fibra–concreto, donde se observan zonas de desconchado y microfisuración en la zona de transición interfacial. Estas discontinuidades son indicativas de un deterioro progresivo de la adherencia mecánica y química entre la fibra y la matriz. A mayor aumento, las imágenes evidencian la presencia de productos de reacción que rellenan parcialmente poros y microfisuras adyacentes a la fibra (Figura 5.12c). La Figura 5.12e revela la presencia de O, Fe y Cl, los cuales se sabe a partir del análisis EDS que tienen concentraciones atómicas de O = 54.77%, Fe = 29.68% y Cl = 2.89%, lo que permite asociar estos productos a oxihidróxidos de hierro formados como resultado de procesos de corrosión inducidos por cloruros. La relación atómica O/Fe $\approx$ 1.85 es consistente con

fases de hierro hidratadas, mientras que la detección de cloro sugiere su incorporación o adsorción en la estructura cristalina de dichos compuestos.

En este contexto, el producto de corrosión más probable es la akaganeíta (β -FeOOH), un oxihidróxido de hierro cuya formación está estrechamente vinculada a ambientes ricos en Cl^- y que se caracteriza por su capacidad de retener cloruros en su estructura (Cornell y Schwertmann, 2003). La presencia de esta fase es particularmente relevante desde el punto de vista mecánico, ya que su crecimiento volumétrico puede generar tensiones locales, promover la microfisuración de la matriz circundante y acelerar el deterioro de la zona de transición interfacial. En conjunto, estas evidencias microestructurales confirman que, además del daño en la matriz cementicia, la corrosión de la fibra galvanizada y la degradación de la interfaz fibra–concreto desempeñan un papel clave en las propiedades mecánicas del concreto.

Por otra parte, las micrografías SEM de la Figura 5.13 corresponden a la matriz de concreto, donde se evidencian cambios microestructurales consistentes con procesos de degradación química. En la Figura 5.13a se identifican microporos y microgrietas distribuidos en la pasta de cemento. Estas discontinuidades pueden asociarse a procesos de lixiviación de portlandita y a la descalcificación progresiva del gel $C-S-H$, los cuales incrementan la porosidad y reducen la cohesión interna de la matriz. La presencia de microgrietas facilita además la conectividad de poros, favoreciendo el transporte de cloruros hacia el interior del concreto y acelerando los mecanismos de deterioro (Carde y Francois, 1997).

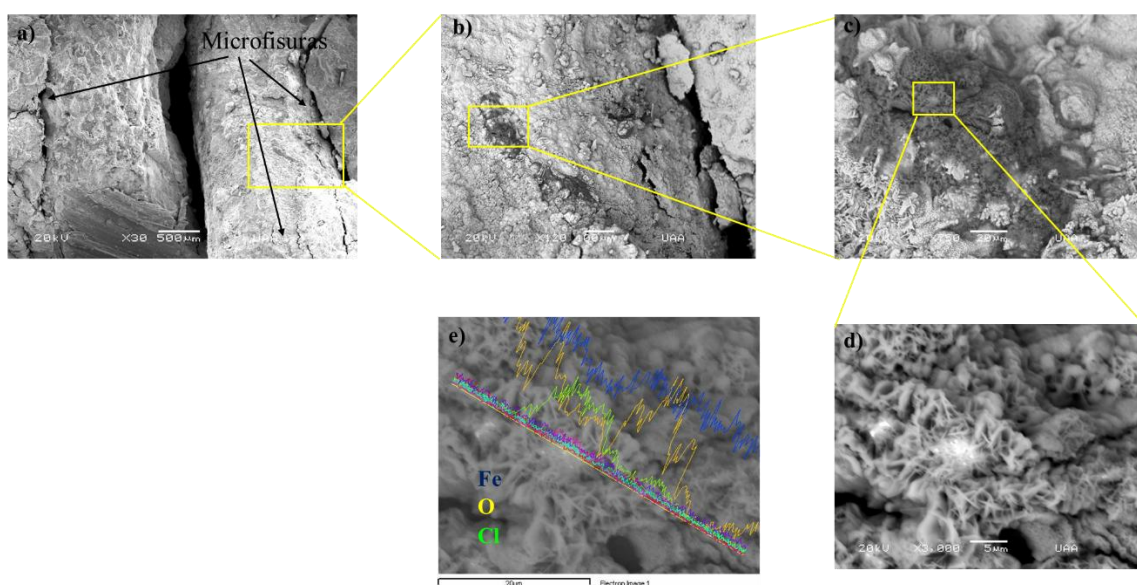


Figura 5.12. Microestructura de la interfaz fibra–concreto tras 12 meses de exposición a cloruros.

En las Figura 5.13b y c se observa que varios de estos microporos se encuentran rellenos parcialmente por fases cristalinas de morfología fibrosa, esta es la forma típica de la etringita (sulfoaluminato cálcico hidratado, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) la cual se forma por reacciones tardías entre sulfatos disponibles y fases aluminato del cemento en condiciones de elevada humedad. La formación de etringita en espacios confinados genera presiones expansivas locales, lo que contribuye a la propagación de microgrietas preexistentes y al debilitamiento progresivo de la matriz cementicia (Collepardi, 2003). El análisis EDS en línea mostrado en la Figura 5.13d confirma la presencia dominante de

Ca, Si y O, característicos de la pasta de cemento hidratada, junto con señales de Na, atribuibles al medio degradativo basado en NaCl.

La coexistencia de estos elementos en zonas con formaciones cristalinas filamentosas refuerza la hipótesis de formación de etringita y de alteración química por lixiviación donde la pérdida de calcio conduce a una disminución de la relación Ca/Si del gel $C - S - H$. Estos procesos reducen la densidad y rigidez de la matriz, lo que se traduce en una disminución de las propiedades mecánicas (Taylor, 1998). En conjunto, la evidencia obtenida mediante SEM-EDS demuestra que la degradación del concreto no se limita a la corrosión de los refuerzos, sino que involucra un deterioro significativo de la matriz cementicia, caracterizado por aumento de porosidad, microfisuración y formación de productos expansivos.

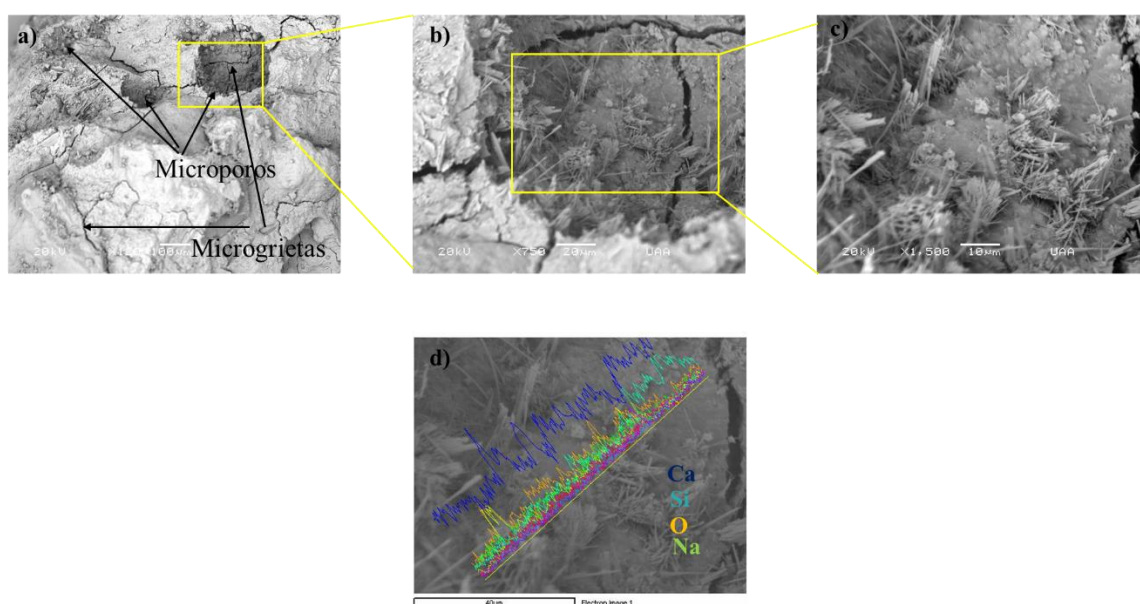


Figura 5.13. Microestructura del concreto tras 12 meses de exposición a cloruros.

5.3.3 Variación de las propiedades mecánicas de compresión

En conjunto, los resultados de compresión mostrados en la Figura 5.14 y la Tabla 5.3 confirman que la exposición durante 12 meses a ciclos de mojado y secado en medios con cloruros produjo un deterioro preferente de la matriz cementicia, reflejado principalmente en la disminución del esfuerzo máximo, mientras que la respuesta post pico se mantuvo activa en los concretos con fibras, lo que evidencia que el mecanismo de transferencia de esfuerzos a través de las fibras continuó gobernando la etapa residual aún luego de la degradación. La muestra de control (Figura 5.14 a) presentó la caída más evidente del esfuerzo máximo, alcanzando reducciones cercanas a 34% en el medio con mayor concentración de Cl^- , lo que es consistente con un material sin mecanismos de transferencia de carga post fisuración. Por el contrario, en los concretos reforzados con fibras (Figura 5.14 b, c, d y e) la disminución del pico fue sistemática, pero moderada, con disminuciones de alrededor del 14% al 28%, y más severa conforme fue mayor la concentración de cloruros. Esta disminución del pico máximo de carga puede atribuirse a la alteración de productos de hidratación y procesos de lixiviación, que reducen la capacidad resistente de la matriz.

El módulo de elasticidad mostró una respuesta más dispersa que el esfuerzo máximo, lo cual es esperable debido a que esta propiedad está dominada por la rigidez

inicial del concreto. Aun así, se observa un patrón relevante: en los concretos con fibras recicladas (Figura 5.14 b, c y d) esta propiedad tendió a disminuir de forma apreciable tras la degradación, con caídas de 9% a 35%, lo que sugiere un incremento de deformabilidad a causa de la degradación. En contraste, el concreto con fibras industriales Dramix 3D (Figura 5.14 e) mantuvo el módulo prácticamente constante (variaciones cercanas a 1%), lo que indica una mayor estabilidad de la rigidez inicial del compuesto, ya sea por una matriz con menor susceptibilidad al daño o por una interacción fibra matriz más robusta en la etapa previa al pico. Este contraste es importante porque sugiere que, mientras el esfuerzo máximo se reduce en todos los casos, la degradación puede afectar de manera distinta la rigidez inicial dependiendo del tipo de refuerzo.

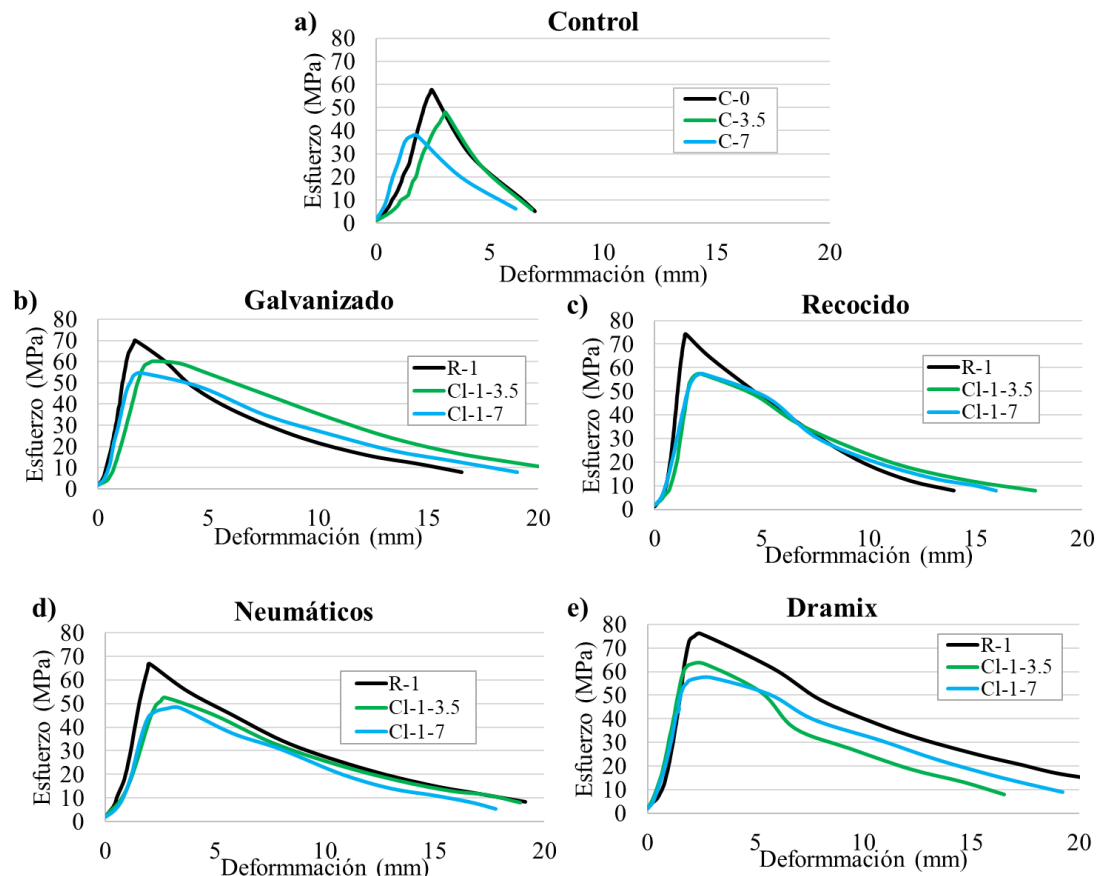


Figura 5.14. Curvas de esfuerzo vs. deformación obtenidas a partir de los ensayos de compresión, a y b: fibras de alambre galvanizado degradadas durante 30 y 60 días respectivamente, c y d: fibras de alambre recocido degradadas durante 30 y 60 días respectivamente, e y f: fibras de alambre de neumáticos degradadas durante 30 y 60 días respectivamente y g y h: fibras Dramix 3D degradadas durante 30 y 60 días respectivamente.

Respecto a la tenacidad, los resultados muestran que esta propiedad es significativamente más resiliente que el esfuerzo máximo en los concretos con fibras, lo cual es coherente con que la tenacidad incorpora la contribución del post pico, gobernada por el mecanismo de anclaje de las fibras. En las fibras recicladas, particularmente en el alambre galvanizado (Figura 5.14 b) y el alambre recocido (Figura 5.14 c), la tenacidad se mantuvo prácticamente invariable tras la degradación, con reducciones del orden de 1% a 2%, incluso en el medio con mayor concentración de cloruros; esto sugiere que, aunque la matriz perdió capacidad al pico, el sistema conservó una respuesta post

fisuración estable, capaz de seguir disipando energía de manera comparable a la condición de referencia.

En el caso de fibras de alambre de neumáticos (Figura 5.14 d), la tenacidad mostró disminuciones moderadas, aproximadamente de 9% a 13%, lo que puede asociarse a una reducción más marcada de la adherencia fibra-concreto, debido a la presencia de restos de neumáticos en las superficie de las fibras. En los SFRC reforzados con fibras industriales (Figura 5.14 e), aunque se observaron los valores absolutos de tenacidad más altos en condición de referencia, la degradación produjo reducciones más perceptibles, del orden de 17% a 26%, lo que indica que, si bien el material conserva una capacidad residual relevante, su potencial de disipación de energía disminuye luego d la degradación.

Este hallazgo no contradice el buen desempeño de estas fibras, sino que sugiere que, en el marco específico del programa experimental utilizado, ciertas fibras recicladas presentan una capacidad notable para preservar la capacidad de trabajo del concreto bajo exposición prolongada. La resistencia residual aporta la evidencia más directa del comportamiento post pico y permite separar el daño en la matriz del aporte del refuerzo. En términos absolutos, la resistencia residual tendió a disminuir en la mayoría de los casos al aumentar la concentración de Cl^- del medio, con pérdidas típicas de 27% a 49% en fibras recicladas y de 31% a 38% en las fibras Dramix (Ver Tabla 5.3), siendo especialmente crítica la condición de fibras de neumáticos cuando la concentración de Cl^- fue de 7%.

Sin embargo, aún con estas reducciones, la presencia de fibras mantuvo valores residuales claramente superiores a los del concreto sin fibras, lo cual confirma que la degradación no eliminó el mecanismo de transferencia post fisuración, sino que principalmente redujo la capacidad del sistema por degradación de la matriz y, en algunos casos, por debilitamiento de la interfaz fibra matriz. Un aspecto clave que respalda esta interpretación es que, en ciertas combinaciones, la fracción residual respecto al esfuerzo máximo puede mantenerse o incluso aumentar, lo cual implica que la caída del pico fue relativamente más rápida que la pérdida de capacidad residual.

Este comportamiento se observa con mayor claridad en el alambre galvanizado, donde la relación $\sigma_{res}/\sigma_{m\acute{a}x}$ incrementó un 20% tras la degradación, lo que significa que, aun cuando el pico disminuyó, la resistencia post pico permaneció relativamente más estable, reforzando la idea de que el daño principal se concentró en la matriz y que el sistema de fibras siguió controlando la respuesta posterior a la fisuración. En términos comparativos, estos resultados permiten concluir que las fibras recicladas no solo mantienen un desempeño post pico significativo tras 12 meses de exposición a cloruros, sino que, dependiendo del tipo, pueden exhibir una estabilidad residual competitiva frente a fibras industriales, lo cual resulta especialmente relevante para esta investigación, ya que respalda el potencial de las fibras alternativas en aplicaciones donde el desempeño residual y la durabilidad bajo ambientes con cloruros son criterios determinantes.

5.3.4 Resistencia residual de flexión estimada

Los resultados mostrados en la Tabla 5.4 muestra las resistencias residuales a flexión calculadas a partir de las resistencias residuales a compresión calculadas a partir del procedimiento mostrado en la subsección 5.2.6. En términos generales, los datos muestran que la degradación por cloruros conduce a una disminución sistemática de la resistencia residual a flexión del SFRC, siendo este efecto claramente más severo a deflexiones elevadas ($fD150$) que a deflexiones moderadas ($fD600$). En términos porcentuales, las pérdidas típicas se sitúan en rangos aproximados del 0–40% para

f_{D600} y del 30–60% para f_{D150} , lo que pone de manifiesto una afectación progresiva del comportamiento postfisuración tardío. De manera general, los SFRCs mantienen una capacidad residual significativa a deflexiones moderadas, incluso tras la exposición a cloruros, mientras que a deflexiones mayores la degradación del medio induce una reducción marcada de la capacidad portante, asociada a un deterioro acumulado de la matriz y de la interacción fibra–concreto.

Tabla 5.3. Propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras bajo diferentes condiciones de exposición a cloruros luego de 12 meses de degradación.

Muestras	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo E (GPa)	Tenacidad (MJ/m ³)	Resistencia residual (MPa)
Control				
R-1	57.56	1.64	2.32	-
Cl-1-3.5	48.05	2.35	1.98	-
Cl-1-7	38.04	0.96	1.78	-
Alambre galvanizado				
R-1	70.07	1.54	6.78	43.84
Cl-1-3.5	60.06	1.01	6.65	45.04
Cl-1-7	54.72	1.23	6.71	42.66
Alambre recocido				
R-1	74.08	1.87	5.67	52.02
Cl-1-3.5	57.39	1.68	5.56	37.72
Cl-1-7	57.39	1.71	5.58	36.19
Alambre de neumáticos				
R-1	66.73	1.62	6.86	44.07
Cl-1-3.5	52.72	1.06	6.21	31.85
Cl-1-7	48.05	1.05	5.95	22.27
Dramix 3D				
R-1	76.08	1.67	7.78	52.21
Cl-1-3.5	63.4	1.65	6.45	32.48
Cl-1-7	57.39	1.65	5.76	36.26

Este patrón indica que la durabilidad frente a cloruros impacta con mayor intensidad los mecanismos resistentes activados en estados avanzados de fisuración. Asimismo, aunque los valores absolutos de resistencia residual varían según el tipo de refuerzo, el comportamiento relativo frente a la degradación es coherente en todos los casos, confirmando que la acción prolongada de cloruros afecta de manera general al desempeño residual del SFRC. En conjunto, los resultados evidencian que la resistencia residual es el parámetro más sensible a la degradación, y que la presencia de fibras permite conservar capacidad resistente tras la fisuración, aun cuando la resistencia residual disminuye respecto a la referencia.

Tabla 5.4. Resistencia residual de flexión calculada a partir de la resistencia residual de compresión.

	Resistencia residual calculada	
	fD600	fD150
Alambre galvanizado		
R-1	3.72	3.01
Cl-1-3.5	3.82	3.09
Cl-1-7	3.62	2.93
Alambre recocido		
R-1	3.26	2.30
Cl-1-3.5	2.30	1.09
Cl-1-7	2.20	0.96
Alambre de neumáticos		
R-1	3.84	3.33
Cl-1-3.5	3.02	2.29
Cl-1-7	2.37	1.48
Dramix 3D		
R-1	5.63	5.24
Cl-1-3.5	3.49	3.25
Cl-1-7	3.90	3.64

Conclusiones

- La degradación del SFRC en ambientes con cloruros debe entenderse como un fenómeno acoplado que involucra transporte iónico, alteración química de la matriz e interacción fibra matriz. Aunque la corrosión de fibras comparte las etapas de iniciación y propagación reportadas para el refuerzo convencional, el SFRC presenta particularidades relevantes, principalmente por la escala del refuerzo y la distribución discreta de las fibras, lo que modifica la forma de manifestarse el daño y su efecto estructural.

- El análisis bibliográfico y estadístico de la literatura confirmó que la durabilidad mecánica del SFRC expuesto a cloruros depende principalmente de la interacción entre el volumen de fibras y el tiempo de exposición. El contenido de fibras actúa como el factor compensador dominante al sostener la capacidad postfisuración y la disipación de energía, mientras que la prolongación de la exposición incrementa el deterioro de la matriz y la degradación de la interfaz fibra matriz. La concentración de cloruros muestra tendencias negativas, pero su influencia no es uniforme, ya que depende del nivel de deterioro alcanzado y del tipo de ensayo.

- Los ensayos de adherencia en morteros demostraron que la degradación por cloruros afecta de forma directa la respuesta de extracción al modificar las condiciones interfaciales. La resistencia a la tracción de las fibras disminuye con la corrosión, pero dentro de los grados estudiados la pérdida de sección transversal no fue el parámetro determinante del desempeño de extracción, el cual estuvo gobernado principalmente por las condiciones superficiales y la naturaleza de los productos de corrosión en contacto con la matriz. Esto explica la presencia de respuestas no monótonas en fibras recicladas, donde una corrosión moderada puede aumentar la fricción efectiva y posteriormente reducirla cuando se desarrollan capas frágiles y poco adherentes.

- El programa experimental de comportamiento mecánico confirmó que las propiedades máximas en compresión y flexión están controladas mayoritariamente por la matriz cementicia, por lo que son relativamente menos sensibles a estados tempranos de corrosión de fibras. En contraste, las propiedades post pico, particularmente la tenacidad y la resistencia residual, son las más representativas de la contribución de las fibras y, por tanto, las más sensibles a cambios en la interfaz fibra matriz inducidos por la degradación.

- A escala de 12 meses, se verificó una penetración progresiva de cloruros hasta alcanzar la sección completa, con concentraciones más críticas en la región superficial. Bajo estas condiciones no se detectó carbonatación, por lo que la evolución de la alcalinidad respondió principalmente a lixiviación y a procesos asociados al ingreso de cloruros. En consecuencia, el estudio permitió aislar de forma clara el efecto de Cl^- como mecanismo dominante en el periodo evaluado.

- Se confirmó experimentalmente la lixiviación como mecanismo activo y relevante, mediante evidencia convergente: disminución marcada del contenido relativo de Ca en la matriz por SEM-EDS, incremento del Ca en las soluciones con el tiempo y evolución acoplada del pH, con pérdida de alcalinidad interna y aumento de alcalinidad del medio por acumulación de especies lixiviadas. Este deterioro químico explica la reducción de rigidez efectiva de la matriz y contribuye de manera directa a la disminución de la resistencia máxima a compresión tras 12 meses de exposición.

- La degradación por cloruros produjo disminuciones del esfuerzo máximo a compresión, más severas en el concreto sin fibras y moderadas en los concretos con

fibras. Aun cuando la resistencia residual disminuyó en la mayoría de los casos al aumentar la concentración de Cl^- , los concretos con fibras conservaron una capacidad post pico significativamente superior a la del control. En varios casos, la fracción residual respecto al esfuerzo máximo se mantuvo o aumentó, lo que indica que el deterioro afectó con mayor intensidad la matriz que la capacidad del refuerzo para transferir esfuerzos en el estado fisurado.

- La caracterización microestructural sustentó los mecanismos anteriores: se identificaron discontinuidades interfaciales y productos compatibles con oxihidróxidos de hierro asociados a ambientes de cloruros, así como señales de incremento de porosidad, microgrietas y fases secundarias en cavidades dentro de la pasta, coherentes con descalcificación y procesos de lixiviación. Esta evidencia respalda que la pérdida de resistencia máxima se explica principalmente por degradación de la matriz y debilitamiento local de la interfaz fibra matriz, más que por una pérdida masiva de sección del refuerzo.

- La estimación de resistencias residuales a flexión mostró que la degradación impacta con mayor severidad la respuesta residual a deflexiones elevadas en comparación con deflexiones moderadas, lo que confirma que el daño acumulado se manifiesta con mayor claridad en estados postfisuración avanzados, donde la integridad de la interfaz y la estabilidad del anclaje mecánico son más exigidas.

- En términos de viabilidad tecnológica, se confirmó que las fibras no convencionales evaluadas pueden proporcionar mejoras significativas en el desempeño mecánico del concreto, especialmente en el régimen postfisuración, alcanzando en varios escenarios respuestas competitivas respecto a fibras industriales. Por tanto, estas fibras presentan potencial para sustituir total o parcialmente refuerzo convencional o fibras comerciales, siempre que el criterio de diseño priorice capacidad residual, disipación de energía y desempeño bajo exposición a cloruros, y que se controle la variabilidad geométrica y superficial propia del material reciclado.

- Respecto a las fibras de alambre de neumáticos, su alta resistencia a tracción constituye una ventaja del material base; sin embargo, el aporte estructural del compuesto depende de la activación interfacial y del modo de falla gobernante. Los resultados indican que la respuesta está fuertemente condicionada por fricción y adherencia, por lo que su evaluación futura es particularmente pertinente en matrices de mayor desempeño o en concretos con requerimientos elevados de capacidad residual, donde la interacción fibra matriz pueda aprovechar mejor el potencial resistente del acero.

Recomendaciones y futuras líneas de investigación

- Los grados de corrosión y los tiempos de exposición, aunque fueron representativos para identificar mecanismos de degradación, siguen siendo acotados frente a condiciones de servicio prolongadas. Se recomienda ampliar los períodos de exposición o considerar condiciones de degradación más severas (como el uso de electricidad para acelerar el proceso corrosivo) incorporando adicionalmente variaciones de orientación, distribución y profundidad efectiva de embebido, para consolidar modelos predictivos robustos de degradación y desempeño residual.

- Se recomienda extender los estudios hacia condiciones de concreto fisurado. Los experimentos de degradación y los ensayos mecánicos se realizaron en especímenes sin daño previo; sin embargo, en estructuras reales la presencia de fisuras favorece la penetración de cloruros. Se recomienda evaluar el comportamiento mecánico y la degradación de concretos reforzados con fibras no convencionales en elementos previamente agrietados o sometidos a cargas de servicio, con el fin de comprender la interacción entre corrosión, apertura de grietas y pérdida de propiedades mecánicas.

- Es importante desarrollar modelos predictivos de degradación y desempeño mecánico. Con base en los resultados experimentales obtenidos, se sugiere avanzar hacia modelos analíticos o numéricos que permitan predecir la evolución de la degradación de las fibras y su influencia en las propiedades mecánicas del SFRC expuesto a cloruros, considerando variables como tiempo de exposición, grado de corrosión, adherencia fibra-concreto y propiedades del material.

- Analizar la influencia de las propiedades de transporte del concreto es fundamental para entender el proceso degradativo. La penetración de cloruros está fuertemente asociada a parámetros como permeabilidad, difusión y absorción capilar. Se recomienda complementar futuros estudios con la medición de estas propiedades, con el objetivo de relacionar la durabilidad del sistema fibra-concreto con la microestructura y la capacidad de transporte del concreto.

- Otro objetivo de futuras investigaciones sería evaluar el efecto del contenido de aire y de la microestructura del concreto. El contenido de aire ocluido y la distribución de poros pueden influir en los mecanismos de ingreso de cloruros y en la cinética de corrosión de las fibras. Se propone estudiar cómo variaciones en el contenido de aire y la relación agua/cemento afectan el proceso degradativo y el desempeño mecánico residual.

Estas líneas de investigación permitirán profundizar en la comprensión del proceso degradativo y en la aplicabilidad estructural de las fibras no convencionales, así como avanzar hacia herramientas predictivas para su uso en el diseño y evaluación de concretos reforzados con fibras de acero.

Bibliografía

- Abbas, S., Soliman, A. M., y Nehdi, M. L. (2014). Mechanical Performance of Reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Lining Segments: A Case Study. *ACI Materials Journal*, 111(5), 501–510. <https://doi.org/10.14359/51687101>.
- Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Bahurudeen, A., Jyothsna, G., Sofi, A., Shanmugam, V., y Thomas, B. S. (2023). A Comprehensive Review on the Use of Natural Fibers in Cement/Geopolymer Concrete: A Step Towards Sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02244>.
- Abdallah, S., Fan, M., y Zhou, X. (2017). Pull-Out Behaviour of Hooked End Steel Fibres Embedded in Ultra-High-Performance Mortar With Various W/B Ratios. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 301–313. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0193-8>.
- Abdallah, S., y Rees, D. W. A. (2019). Analysis of Pull-Out Behaviour of Straight and Hooked End Steel Fibres. *Engineering*, 11(6), 332–341. <https://doi.org/10.4236/eng.2019.116025>.
- Abrishambaf, A., Barros, J. A. O., Cunha, V. M. C. F., y Frazão, C. (2017). Time Dependent Behaviour of Fibre Pull-Out in Self-Compacting Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 77, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.004>.
- Aceros CREA. (2024). Conoce Qué es el Alambre Recocido, para Qué Sirve y Dónde se Utiliza. <https://laminas.com.mx/aceros-corrugados/alambre-recocido/>
- ACI 544.1R96. (1996). State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete.
- ACI 544.5R-10. (2010). Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. American Concrete Institute.
- Afroz, M., Venkatesan, S., y Patnaikuni, I. (2019). Effects of Hybrid Fibers on the Development of High Volume Fly Ash Cement Composite. *Construction and Building Materials*, 215, 984–997. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.083>.
- Ahmed, A., Abubakr, P., y Salih, A. (2023). Efficient Models to Evaluate the Effect of C3S, C2S, C3A, and C4AF Contents on the Long-Term Compressive Strength of Cement Paste. *Structures*, 47, 1459–1475. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.114>.
- Ahn, T. H., Kim, D. J., y Kang, S. H. (2012). Crack Self-Healing Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites Under Various Environmental Conditions. *Earth and Space*, 143-164. <https://doi.org/10.1061/9780784412190.068>.
- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., y Maffezzoli, A. (2009). Use of Steel Fibres Recovered From Waste Tyres as Reinforcement in Concrete: Pull-out Behaviour, Compressive and Flexural Strength. *Waste Management*, 29(6), 1960–1970. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>.
- Akduman, S. (2025). A Parametric Study on Determining the Corrosion Initiation and Propagation Times Crack Self-Healing Behavior of High-Performance Fiber of Reinforced Concrete Structures Using Different Methods. *Buildings*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/buildings15050666>.
- Alizade, E., Alaei, F. J., Zabihi, S., Alizade, E., Alaei, F. J., y Zabihi, S. (2016). Effect of Steel Fiber Corrosion on Mechanical properties of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 17(2), 147-158.
- Alnaki, A. A., Wegian, F. M., Abdalghaffar, M. A., Alotaibi, F. A., Al-Temeemi, A. S. A., y Alkhamis, M. T. (2013). Behavior of High-Performance Pull-out Bond

- Strength of Fibers Reinforced Concrete Structures. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7(1), 93-100.
- Alobaidi, S., Al-Obaidi, S., He, S., Schlangen, E., y Ferrara, L. (2023). Effect of Matrix Self-Healing on the Bond-Slip Behavior of Micro Steel Fibers in Ultra High-Performance Concrete. *Materials and Structures*, 56(161). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2841443/v1>.
- Altun, F., Haktanir, T., y Ari, K. (2007). Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams. *Construction and Building Materials*, 21(3), 654–661. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.006>.
- Anbazzhakan, A., Sarangapani, C., y Palanisamy, S. (2025). Effect of Corrosion Inhibitors on Bond Strength of Reinforced Concrete Under Various Exposure Conditions. *Revista Materia*, 30, e20240888. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0888>.
- Angst, U. M., Elsener, B., Larsen, C. K., y Vennesland, Ø. (2011). Chloride Induced Reinforcement Corrosion: Electrochemical Monitoring of Initiation Stage and Chloride Threshold Values. *Corrosion Science*, 53(4), 1451–1464. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.025>.
- Ann, K. Y., y Song, H. W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 49(11), 4113–4133. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007>.
- Naaman, A. E. (1985). Fiber Reinforcement for Concrete. *Concrete International*, 7(3), 21–25.
- Antunes, R. A., Ichikawa, R. U., Martinez, L. G., y Costa, I. (2014). Characterization of Corrosion Products on Carbon Steel Exposed to Natural Weathering and to Accelerated Corrosion Tests. *International Journal of Corrosion*, 2014, ID 419570. <https://doi.org/10.1155/2014/419570>.
- ASTM C1557-14. (2014). Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. www.astm.org.
- ASTM C1609M-12. (2012). Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-12.
- Bai, M., Niu, D. T., y Wu, X. (2009). Experiment Study on the Chloride Penetration of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Advanced Materials Research*, 79–82, 1771–1774. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.1771>.
- Bajić, P., Leporace-Guimil, B., Andrade, C., Tošić, N., y de la Fuente, A. (2025). Chloride-Induced Corrosion Effects on the Structural Performance of Concrete with Rebar and Fibres: A Review. *Applied Sciences*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/app15126457>.
- Balouch, S. U., Forth, J. P., y Granju, J. L. (2010). Surface Corrosion of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.001>.
- Banthia, N., y Foy, C. (1989). Marine Curing of Steel Fiber Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(2), 86–96. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1989\)1:2\(86\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1989)1:2(86)).
- Becerra, O., Meza, A., y Salinas, R. (2023). Influence of Experimental Variables on the Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) in Chloride Degradation Experiments: Bibliographic Review and Statistical Analysis. *Revista Alconpat*, 13(2), 143–157. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>.
- Becerra-Pérez, O., Meza-de Luna, A., Mendoza-Castillo, D. I., y Moreno-Virgen, M. R. (2025). Impact of chloride corrosion on the pull-out resistance of recycled steel fiber

- in cement mortars. *Structural Engineering and Mechanics*, 96(5), 397-410. <https://doi.org/10.12989/sem.2025.96.5.397>.
- Behbahani, H., Nematollahi, B., Behbahani, H. P., y Farasatpour, M. (2011). Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering*, July 9-12, Shah Alam, Malaysia.
- Bekaert. (2021). Bekaert Dramix® Steel Fibers Reduce Carbon Footprint of Construction Industry. <https://construction.bekaert.com/us/es/flooring/resources/technical-documents>.
- Bernard, E. S. (2004). Durability of Cracked Fibre Reinforced shotcrete. *Shotcrete: More Engineering Developments*, 59–66. <https://doi.org/10.1201/9780203023389.ch6>.
- Bernard, E. S. (2015). Age-Dependent Changes in Post-Crack Performance of Fibre Reinforced Shotcrete Linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.05.006>.
- Berrocal, C. G., Fernandez, I., Lundgren, K., y Löfgren, I. (2017). Corrosion-Induced Cracking and Bond Behaviour of Corroded Reinforcement Bars in SFRC. *Composites Part B: Engineering*, 113, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.020>.
- Berrocal, C. G., Löfgren, I., Lundgren, K., y Tang, L. (2015). Corrosion Initiation in Cracked Fibre Reinforced Concrete: Influence of Crack Width, Fibre Type and Loading Conditions. *Corrosion Science*, 98, 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.05.021>.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K., Löfgren, I., y Karin, L. (2013). Influence of Steel Fibres on Corrosion of Reinforcement in Concrete in Chloride Environments: A Review. *Fibre Concrete*, 12–13. <https://www.researchgate.net/publication/257140331>.
- Biswas, W. K., Zhang, X., Matters, C., y Maboud, M. (2024). Techno-Eco-Efficiency Assessment of Using Recycled Steel Fibre in Concrete. *Sustainability*, 16(9), 3717. <https://doi.org/10.3390/su16093717>.
- Boudache, S., Loukili, A., Izoret, L., y Rozière, E. (2023). Investigating the Role Played by Portlandite and C-A-S-H in the Degradation Response of Pozzolanic and Slag Cements to External Sulphate Attack. *Journal of Building Engineering*, 67, 106053. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106053>.
- C1152/C1152M-04. (2012). Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1152_C1152M-04R12E01.
- Carde, C., y Francois, R. (1997). Effect of the Leaching of Calcium Hydroxide from Cement Paste on Mechanical and Physical Properties. *Cement and Concrete Research*, 27(4), 539-550. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00042-2).
- Carrillo, J., Pulido, J. C., y Chaparro, W. A. (2015). Effect of Chloride Ion on the Compressive Mechanical Properties of RC-65/35-BN Steel Fiber Reinforced Concrete. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 149–171. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.7075>.
- Carrillo, J., Lizarazo-Marriaga, J., y Lamus, F. (2020). Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Either Industrial or Recycled Fibers from Waste Tires. *Fibers and Polymers*, 21(9), 2055–2067. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1076-1>.
- Carrillo, J., Pulido, J. C., y Aperador, W. (2017). Flexural Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Corrosive Environments. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 59–72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200005>.

- Carde, C., Escandeillas, G., y Francois R. (1997). Use of Ammonium Nitrate Solution to Simulate and Accelerate the Leaching of Cement Hydrates. *Magazine of Concrete Research*, 49, 295301. <https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.181.295>.
- Centonze, G., Leone, M., y Aiello, M. A. (2012). Steel Fibers from Waste Tires as Reinforcement in Concrete: A Mechanical Characterization. *Construction and Building Materials*, 36, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088>.
- Chen, H., Zhou, X., Li, Q., He, R., y Huang, X. (2021a). Dynamic Compressive Strength Tests of Corroded SFRC Exposed to Drying–Wetting Cycles With a 37 mm Diameter SHPB. *Materials*, 14(9), 2267. <https://doi.org/10.3390/ma14092267>.
- Chen, J., Wang, J., He, R., Shu, H., y Fu, C. (2021b). Experimental Study on Effective Chloride Diffusion Coefficient of Cement Mortar by Different Electrical Accelerated Measurements. *Crystals*, 11(3), 240. <https://doi.org/10.3390/cryst11030240>.
- Cheng, A., Chao, S. J., y Lin, W. T. (2013). Effects of Leaching Behavior of Calcium Ions on Compression and Durability of Cement-Based Materials with Mineral Admixtures. *Materials*, 6(5), 1851–1872. <https://doi.org/10.3390/ma6051851>.
- Cheng, L., Shi, L., Yi, L., y Zhao, W. (2022). Study on Mechanical Properties and Constitutive Relationship of Concrete Corroded by Hydrochloric Acid under Cyclic Load. *Sustainability*, 14(22), 14692. <https://doi.org/10.3390/su142214692>.
- CNR-DT 204/2006. (2006). Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures. National Research Council Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction.
- Collepardi, M. (2003). A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 401–407. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00080-X).
- Cornell, R. M., y Schwertmann, U. (2003). *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses* (2nd ed.) John Wiley & Sons, 664.
- Dauberschmidt, C. (2006). Investigations on the Corrosion Mechanisms of Steel Fibres in Concrete Containing Chlorides. Doctoral Thesis. RWTH Aachen University. RWTH Aachen University Publications. https://publications.rwth-aachen.de/record/61553/files/Dauberschmidt_Christoph.pdf.
- de Carvalho, P. P. M., y de Melo L. R. (2025). Test Methods for the Post-cracking Behavior of the FRC in Tension: A State-of-the-Art Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00702-y>.
- de Luna, A. M., Alonso-Guzman, E. M., y Bonilla-Petriciolet, A. (2024). Experimental Study of Innovative FRC Dome-Shaped Structures with Industrial, Recycled, and Alternative Reinforcing under Compressive Load. *Ingeniería e Investigación*, 44(1). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.105266>.
- de Luna, A. M., Montserrat, L., López, M., Chávez Valdivia, F., Gerardo, R., Reyes, M., Alexis, A., y López, E. (2019). Experimental Evaluation of Galvanized and Annealed Wires to Produce Hooked Fibers as Reinforcement of Concrete Under Flexion. *Pistas Educativas*, 41(133).
- de Luna, A. M., y Shaikh, F. U. A. (2020). Anisotropy and Bond Behaviour of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Fibre as Concrete Reinforcement. *Construction and Building Materials*, 265, 120331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>.
- de Luna, A. M., (2015). Optimización del Concreto Reforzado con Fibras de Acero y Polipropileno en Pisos Industriales, Basado en Análisis Experimental y Numérico. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

- De Weerd, K., Lothenbach, B., y Geiker, M. R. (2019). Comparing Chloride Ingress from Seawater and NaCl Solution in Portland Cement Mortar. *Cement and Concrete Research*, 115, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.014>.
- Dhaiveegan, P., Elangovan, N., Nishimura, T., y Rajendran, N. (2016). Weathering Steel in Industrial-Marine-Urban Environment: Field Study. *Materials Transactions*, 57(2), 148–155. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2015345>.
- Dong, H., Zhou, Y., y Zhuang, N. (2020). Study on Corrosion Characteristics of Concrete-Filled CFRP-Steel Tube Piles under Hygrothermal Environment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 4849038. <https://doi.org/10.1155/2020/4849038>.
- El Inaty, F., Marchetti, M., Quiertant, M., y Omikrine Metalssi, O. (2023). Chemical Mechanisms Involved in the Coupled Attack of Sulfate and Chloride Ions on Low-Carbon Cementitious Materials: An In-Depth Study. *Applied Sciences*, 13(21), 11729. <https://doi.org/10.3390/app132111729>
- Emon, M. A. B., Manzur, T., y Sharif, M. S. (2017). Suitability of Locally Manufactured Galvanized Iron (GI) Wire Fiber as Reinforcing Fiber in Brick Chip Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.003>.
- EN 1239-3. (2019). Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens.
- EN 14651. (2005). Test Method for Metallic Fibered Concrete - Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual).
- Fauzan, F., Al Jauhari, Z., Anas Ismail, F., y Sandi, R. (2017). The Influence of Steel Fibers Extracted From Waste Tyre on Properties of Concrete Containing Fly Ash. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Tecnology*, 7(6), 2232–2236. <https://doi.org/10.18517/IJASEIT.7.6.3522>.
- Fernandes, M., y Neves, R. (2024). Assessment of Fiber Corrosion Influence in the Flexural Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Applied Sciences*, 14(13), 5611. <https://doi.org/10.3390/app14135611>.
- Ferreira, M., Oliveira M. H., Neto, A. F. L., Tapajós, L., Nascimento, A., y Freire, M. (2018). Influência da Ancoragem na Resistência à Flexão de Vigas Reforçadas com Mantas de PRFC. *Revista ALCONPAT*, 9(1), 30–47. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>.
- FHWA-HRT-12-067. (2012). Literature Review of Chloride Threshold Values for Grouted Post-Tensioned Tendons. Summary Report. <http://www.fhwa.dot.gov/research/>.
- Fode, T. A., Chande Jande, Y. A., y Kivevele, T. (2023). Effects of Different Supplementary Cementitious Materials on Durability and Mechanical Properties of Cement Composite – Comprehensive Review. *Heliyon*, 9(7). e17924. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17924>.
- Frazão, C., Barros, J., Camões, A., Alves, A. C., y Rocha, L. (2015). Corrosion Effects on Pull-Out Behavior of Hooked Steel Fibers in Self-Compacting Concrete. *Cement and Concrete Research*, 79, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.005>.
- Frazão, C., Díaz, B., Barros, J., Bogas, J. A., y Toptan, F. (2019). An Experimental Study on the Corrosion Susceptibility of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 96, 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.011>.

- Frazão, C. M. V., Barros, J. A. B., y Bogas, J. A. (2019). Durability of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete in Chloride Environment. *Fibers*, 7(12), 111. <https://doi.org/10.3390/fib7120111>.
- GAVIONEMEX. (2025). Fibras de Acero. <https://www.gavionemex.com/fibras-acero>.
- Gelfi, M., Solazzi, L., y Poli, S. (2017). Influence of the Manufacturing Process on Defects in the Galvanized Coating of High Carbon Steel Wires. *Materials*, 10(3), 264. <https://doi.org/10.3390/ma10030264>.
- Gérard, B., Le Bellego, C., y Bernard, O. (2002). Simplified Modelling of Calcium Leaching of Concrete in Various Environments. *Materials and Structures*, 35(10), 632–640. <https://doi.org/10.1007/BF02480356>.
- Glasser, F. P., Pedersen, J., Goldthorpe, K., y Atkins, M. (2005). Solubility Reactions of Cement Components with NaCl Solutions: I. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and C-S-H. *Advances in Cement Research*, 17(2), 57-64. <https://doi.org/10.1680/adcr.2005.17.2.57>.
- Grand View Research. (2025). Steel Fiber Market (2025 - 2030) Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Hooked, Deformed, Straight), By Application (Slabs & Flooring, Pavements & Tunneling, Precast), By Region, And Segment Forecasts. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/steel-fiber-market>.
- Granju, J. L., y Balouch, S. U. (2005). Corrosion of Steel Fibre Reinforced Concrete from the Cracks. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 572–577. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>.
- Grzbowski, M., y SurendraP. S., (1990). Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 87(2), 138–148. <https://doi.org/10.14359/1951>.
- Gul, M. (2014). Study of Modulus of Elasticity of Steel Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 3(4), 304-309.
- Guo, J., Yang, W., Xu, C., Peng, B., Lin, J., y Qian, Y. (2021). Performance Degradation of Subsea Shield Tunnel Segment Accounting for Concrete Strength Loss and Steel Bar Corrosion. *Shock and Vibration*, 2021(1), 5022711. <https://doi.org/10.1155/2021/5022711>.
- Guo, X., Li, H., y Wang, S. (2022). Effects of Pre-Corroded Steel Fibers on Mechanical Properties and Interface Bond Behavior of Ultra-High-Performance Concrete-Normal Concrete. *Construction and Building Materials*, 356, 129234. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129234>.
- Hagelia, P. (2011). Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels. Doctoral Thesis. <https://resolver.tudelft.nl/uuid:d64b8ff8-8d68-4eea-a320-73148e9f1b15>.
- Hassanvand, P., Rezaie, F., y Kioumars, M. (2023). Experimental Investigation of the Effect of Steel Fibers on the Flexural Behavior of Corroded Prestressed Reinforced Concrete Beams. *Materials*, 16(4), 1629. <https://doi.org/10.3390/ma16041629>.
- Horňáková, M., y Lehner, P. (2022). Analysis of Measured Parameters in Relation to the Amount of Fibre in Lightweight Red Ceramic Waste Aggregate Concrete. *Mathematics*, 10(2), 229. <https://doi.org/10.3390/math10020229>.
- Horszczaruk, E. K. (2009). Hydro-Abrasive Erosion of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *Wear*, 267(1–4), 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.010>.
- Hou, L., Peng, Y., Xu, R., Zhang, X., Huang, T., y Chen, D. (2021). Corrosion Behavior and Flexural Performance of Reinforced SFRC Beams Under Sustained Loading and Chloride Attack. *Engineering Structures*, 242, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112553>.

- INDEXBOX. (2025). World - Ready-Mixed Concrete - Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights. <https://www.indexbox.io/blog/ready-mixed-concrete-and-factory-made-mortar-world-market-overview-2024-2/>.
- Jin, A. H., Woo, J. S., Yun, H. Do, Kim, S. W., Park, W. S., y Choi, W. C. (2025). Influence of Concrete Strength and Fiber Properties on Residual Flexural Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 489, 142366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142366>.
- 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(3), 127–136.
- Kafaji, S., y Azzawi, R. (2023). Performance Comparison of Steel Fiber Reinforced Concrete and Conventional Reinforced Concrete Cast-in-Place Half-Scale Concrete Bridge Decks Under Bending. *Advances in Bridge Engineering*, 4(23). <https://doi.org/10.1186/s43251-023-00103-3>.
- Kaur, G., Singh, S. P., y Kaushik, S. K. (2014). Flexural Performance of Fibrous Concrete with Cement Additions. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 167(1), 14–25. <https://doi.org/10.1680/coma.12.00008>.
- Ke, S., y Gao, Z. (2025). Experimental and Numerical Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete (SFRHC) Beams. *Scientific Reports*, 15(1), 18338. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02220-7>.
- Koo, D.-H., Kim, J. S., Kim, S. H., y Suh, S. W. (2023). Evaluation of Flexural Toughness of Concrete Reinforced with High-Performance Steel Fiber. *Materials*, 16(20), 6623. <https://doi.org/10.3390/ma16206623>.
- Koschemann, M., Curbach, M., y Marx, S. (2025). Bond Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Under High-Cycle Fatigue Pull-Out Loading. *International Journal of Fatigue*, 198, 108944. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.108944>.
- Kragh, A. K., Carlsen, M. E., Marcos-Meson, V., Fischer, G., y Michel, A. (2019). The Influence of Concrete Maturity on the Pull-Out Behaviour of Steel Fibres at Early-Ages. *Proceedings of the Fib Symposium 2019*, 471-478.
- Kuzielová, E., Compeľová, K., Peciar, P., Buňová, L., Kureková, V., y Másilko, J. (2024). Effect of Cement Paste and Saline Solution Composition on Chemical and Physical Binding of Chlorides. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 19693-19707. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13899-7>.
- Kyösti Tuutti. (1982). Corrosion of steel in concrete. Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- Leung, C. K. Y., y Hou, D. (2015). Numerical Simulation of Chloride-Induced Corrosion Initiation in Reinforced Concrete Structures with Cracks. *Brittle Matrix Composites* 10, 2012, 91-100. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001057](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001057).
- Li, H., Li, B., Jin, R., Li, S., y Yu, J. G. (2018). Effects of Sustained Loading and Corrosion on the Performance of Reinforced Concrete Beams. *Construction and Building Materials*, 169, 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.199>.
- Li, L., Wang, Y., An, M., Yu, P., y Hou, X. (2023). The Influence of Rehydration on the Properties of Portland Cement-Based Materials with Low Water/Binder Ratios: A Review of Existing Research. *Materials* 16(3), 970. <https://doi.org/10.3390/ma16030970>.
- Li, V. C., y Stang, H. (1997). Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites. *Advanced Cement Based Materials*, 6(1), 1-20. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)90001-8](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)90001-8).

- Li, W., Shumuye, E. D., Shiyang, T., Wang, Z., y Zerfu, K. (2022). Eco-Friendly Fibre Reinforced Geopolymer Concrete: A Critical Review on the Microstructure and Long-Term Durability Properties. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00894. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00894>.
- Liu, J., Wei, L., Cui, Q., Shu, H., Peng, W., Gong, H., Xue, Y., y Han, M. (2025). Chloride Corrosion Resistance of Steel Fiber-Reinforced Concrete and Its Application in Subsea Tunnel Linings. *Coatings*, 15(2), 235. <https://doi.org/10.3390/coatings15020235>.
- Liu, W., Du, H., Li, Y., Yi, P., Luo, Y., Tang, L., y Xing, F. (2023). Effects of Chloride Content on Early Hydration Performance of Cement Pastes. *Materials Today Communications*, 35, 106257. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2023.106257>.
- Long, G., Xie, Y., Luo, Z., Qu, L., Zhou, J. L., y Li, W. (2020). Deterioration Mechanism of Steam-Cured Concrete Subjected to Coupled Environmental Acid and Drying Action. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1(5). <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00001-2>.
- Lu, Y., Hu, S., Liang, Z., Zhu, M., Wang, Z., Wang, X., Liang, Y., Dang, Z., y Shi, Z. (2020). Incorporation of Pb(II) Into Hematite During Ferrihydrite Transformation. *Environmental Science: Nano*, 7(3), 829–841. <https://doi.org/10.1039/c9en01355e>.
- Luo, Z., Yang, X., Ji, H., y Zhang, C. (2022). Carbonation Model and Prediction of Polyvinyl Alcohol Fiber Concrete with Fiber Length and Content Effects. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(9). <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00503-1>.
- Maaruf, A., y Abba S. I. (2017). Self-Compacting Concrete-A Review. *En International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 6(8). <https://www.researchgate.net/publication/324943169>.
- Maia, J. S., Serafini, R., Mineiro, M. L. R., Batista, A. M., y Agra, R. R. (2025). Influence of Test Configuration on the Bond–Slip Behavior of Hooked-End Steel Fibers in Concrete: Quantity, Inclination, and Spacing. *Buildings*, 15(6), 868. <https://doi.org/10.3390/buildings15060868>.
- Mangat, P. S., y Gurusamy, K. (1987a). Chloride Diffusion in Steel Fibre Reinforced Marine Concrete. *Cement and Concrete Research*, 17(3), 385-396. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90002-0).
- Mangat, P. S., y Gurusamy, K. (1987b). Permissible Crack Widths in Steel Fibre Reinforced Marine Concrete. *Materials and Structures*, 20, 338-347.
- Manhabosco, S. M., Manhabosco, T. M., Geoffroy, N., Vignal, V., Dick, L. F. P. (2018). Corrosion behaviour of galvanized steel studied by electrochemical microprobes applied on low-angle cross sections. *Corrosion Science*, 140, 379-387. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.05.026>.
- Manquehual, C. J., Jakobsen, P. D., Holter, K. G., De Weerdt, K., y Bruland, A. (2023). Investigation of Leaching in Steel Fiber-Reinforced Shotcrete Exposed to Fresh and Saline Groundwater in a Subsea Road Tunnel. *Cement and Concrete Research*, 163, 107011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107011>.
- Manso-Morato, J., Hurtado-Alonso, N., Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., y Ortega-López, V. (2024). Fiber-Reinforced Concrete and its Life Cycle Assessment: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 94, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110062>.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., y 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., y Michel, A. (2020). Mechanical Performance and Corrosion Damage of Steel Fibre Reinforced Concrete – A Multiscale Modelling Approach. *Construction and Building Materials*, 234, 117847. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117847>.
- Marcos-Meson, V., Fischer, G., Solgaard, A., Edvardsen, C., y Michel, A. (2021). Mechanical performance of steel fibre reinforced concrete exposed to wet–dry cycles of chlorides and carbon dioxide. *Materials*, 14(10), 2642. <https://doi.org/10.3390/ma14102642>.
- Marcos-Meson, V., Geiker, M., Fischer, G., Solgaard, A., Jakobsen, U. H., Danner, T., Edvardsen, C., Skovhus, T. L., y Michel, A. (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>.
- Marcos-Meson, V., Michel, A., Solgaard, A., Fischer, G., Edvardsen, C., y Skovhus, T. L. (2017). Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review. En *Cement and Concrete Research*, 103, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.016>.
- Marcos-Meson, V., Solgaard, A., Fischer, G., Edvardsen, C., y Michel, A. (2020). Pull-Out Behaviour of Hooked-End Steel Fibres in Cracked Concrete Exposed to Wet-Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide – Mechanical Performance. *Construction and Building Materials*, 240, 117764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117764>.
- Masoero, E., Cusatis, G., y Di Luzio, G. (2018). C–S–H Gel Densification: The Impact of the Nanoscale on Self-Desiccation and Sorption Isotherms. *Cement and Concrete Research*, 109, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.014>.
- McMahon, M. E., Santucci, R. J., y Scully, J. R. (2019). Advanced Chemical Stability Diagrams to Predict the Formation of Complex Zinc Compounds in a Chloride Environment. *RSC Advances*, 9(35), 19905–19916. <https://doi.org/10.1039/c9ra00228f>.
- Merlo, V., Marchese, L., Gastaldi, D., Boccaleri, E., Canonico, F., y Paul, G. (2023). Investigating the Hydration of C3A in the Combined Presence of Anhydrite and Limestone Using Solid-State NMR, XRD and TG Techniques. *Construction and Building Materials*, 378, 131028. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131028>.
- Meson, V. M. (2019). Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete in Corrosive Environments, Doctoral Thesis. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.
- Meza, A., Pujadas, P., López-Carreño, R. D., Meza, L. M., y Pardo-Bosch, F. (2021). Mechanical Optimization of Concrete with Recycled Pet Fibres Based on a Statistical-Experimental Study. *Materials*, 14(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma14020240>.
- Meza, A., y Siddique, S. (2019). Effect of Aspect Ratio and Dosage on the Flexural Response of FRC with Recycled Fiber. *Construction and Building Materials*, 213(1), 286–291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>.
- Meza-De Luna, A., Benjamín, R., Ortiz, S., Chávez Valdivia, F., Cortes, R. R., y Morales Martínez, S. P. (2023). Alambres de Acero Locales para Producir SFRC: Estudio Experimental a Flexión. *Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 27(3).

- Meza-de Luna, A., Moreno-Virgen, R., Herrera-Montoya, L. I., Alvarado- Laguna, A., Gallegos-Sánchez, D., y Esquivel-López, J. de J. (2018). Dispositivo para Producir Fibras Rizadas para Reforzar el Concreto. *Conciencia Tecnológica*, 56, 19-25.
- Michel, A., Solgaard, A. O. S., Pease, B. J., Geiker, M. R., Stang, H., y 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. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.019>.
- Mo, Z., Han, Y., Jiang, L., Wang, J., y Gao, X. (2022). Strength Properties and Hydration of Ultra-High-Performance Concrete Incorporating Calcined Clay and Limestone with Steam Curing Regimes. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e016558. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01658>.
- Monazami, M., y Gupta, R. (2022). Effect of Curing Age on Pull-Out Response of Carbon, Steel, and Synthetic Fiber Embedded in Cementitious Mortar Matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004426](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004426).
- Moussard, M., Garibaldi, P., y Curbach, M. (2018). The Invention of Reinforced Concrete (1848-1906). *Fib Symposium, Maastrichts Expositie en Congres Centrum*, 2785–2794. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_316.
- Mujalli, M. A., Dirar, S., Mushtaha, E., Hussien, A., y Maksoud, A. (2022). Evaluation of the Tensile Characteristics and Bond Behaviour of Steel Fibre-Reinforced Concrete: An Overview. *Fibers* 10(12), 104. <https://doi.org/10.3390/fib10120104>.
- Nasrazadani, S., y Raman, A. (1993). Formation and Transformation of Magnetite (Fe₃O₄) on Steel Surfaces Under Continuous and Cyclic Water Fog Testing. *Corrosion*, 49(4), 294-300. <https://doi.org/10.5006/1.3316052>.
- N·CMT·2·03·001/04. (2004). Características de los Materiales., *Acero de Refuerzo para Conceto Hidráulico*.
- Nguyen, W., Duncan, J. F., Jen, G., y Ostertag, C. P. (2018). Influence of Matrix Cracking and Hybrid Fiber Reinforcement on the Corrosion Initiation and Propagation Behaviors of Reinforced Concrete. *Corrosion Science*, 140, 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.004>.
- NMX-C-128-1997ONNCCE. (1997). Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson.
- Nordström, E. (2005). Durability of Sprayed Concrete Steel Fibre Corrosion in Cracks. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering. Luleå, Sweden.
- Obeidah, A., Nasreddine, W., Harajli, M., y Nassif, H. (2025). Assessment of Ductility Measures of Prestressed Concrete Flexural Members: Application to Hybrid Steel–FRP Systems. *Journal of Composites for Construction*, 29(1). <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4890>.
- Oh, T., Na, Y. K., Kang, M. C., Pyo, S., y Yoo, D. Y. (2025). Hydration and Fiber Bonding Properties of Ultra-High-Performance Concrete Supplemented with Calcium Hydroxide. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(4), 290. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01350-w>.
- Ouyang, S., Huang, Y., Wu, L., Yin, W., Yang, X., Wang, J., Wang, G., Li, J., y Lei, Y. (2022). Effects of Chlorides on Setting Time, Hydration Heat and Hydration Products of Fresh Slurry of Cemented Paste Backfill. *Case Studies in Construction Materials*, 17(1), e01462. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01462>.
- Overhage, V., Heins, K., Kimm, M., Ryu, G. S., You, Y. J., Kim, H. Y., y Gries, T. (2024). Investigation of Pull-Out and Mechanical Performance of Fibre Reinforced

- Concrete with Recycled Carbon Fibres. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 57(8), 184. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02453-4>.
- Pajak, M., Krystek, M., Zakrzewski, M., y Domski, J. (2021). Laboratory Investigation and Numerical Modelling of Concrete Reinforced with Recycled Steel Fibers. *Materials*, 14(8), 1828. <https://doi.org/10.3390/ma14081828>.
- Panel y Acanalados Monterrey. (2024). Usos y Ventajas del Alambre Galvanizado. <https://alambre.com.mx/articulos/usos-y-ventajas-del-alambre-galvanizado/>.
- Paul, S. C., van Zijl, G. P. A. G., y Šavija, B. (2020). Effect of Fibers on Durability of Concrete: A practical Review. *Materials*, 13(20), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ma13204562>.
- Persson, B. (1996). Hydration and Strength of High-Performance Concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 3(3-4), 107-123. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90043-7](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90043-7).
- Polyakova, M., y Stolyarov, A. (2021). Automobile Tires' High-Carbon Steel Wire. *Encyclopedia*, 1(3), 859–870. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030066>.
- Praseetha, N. S., Kaythry, P., y Sangeetha, P. (2025). A Review of Strength and Durability Testing and Artificial Intelligence Prediction Methods for Various Fiber-Reinforced Concretes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 34(7), e70036. <https://doi.org/10.1002/tal.70036>.
- Pushkar, S., y Ribakov, Y. (2020). Life-Cycle Assessment of Strengthening Pre-Stressed Normal-Strength Concrete Beams with Different Steel-Fibered Concrete Layers. *Sustainability*, 12(19), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12197958>.
- Quiroz-Portillo, D., Rosales-Candelas, I., Soto-Bernal, J. J., González-Mota, R., y Vázquez, G. V. (2023). Study of the Hydration Mechanism of Portland Cement with Raman Spectroscopy Applying CO₂ Laser Radiation. *Journal of Spectroscopy*, 2023(1), 1-7. <https://doi.org/10.1155/2023/9911266>.
- Raman, A., Nasrazadani, S., y Sharma, L. (1989). Morphology of Rust Phases Formed on Weathering Steels in Various Laboratory Corrosion Tests. *Metallography*, 22(1), 79-96. [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(89\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0026-0800(89)90024-4).
- Rao, K. S., Rakesh Kumar, S., Laxmi, A., y Associate, N. (2013). Comparison of Performance of Standard Concrete and Fibre Reinforced Standard Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *American Journal of Engineering Research*, 2(3), 20-26.
- Rathnarajan, S., Cendrowski, K., Sibera, D., y Sikora, P. (2024). Comprehensive Evaluation of Early-Age Hydration and Compressive Strength Development in Seawater-Mixed Binary and Ternary Cementitious Systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24(2), 121. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00932-7>
- Raupach M., Dauberschmidt C., y Eichler T. (2004). Corrosion Behaviour of Steel Fibres in Concrete Containing Chlorides. *European Corrosion Conference, Long Term Prediction and Modelling of Corrosion*, 12–15.
- Ricardo M. Carranza, Gustavo Duffo, y Silvia Farina. (2010). Nada Es Para Siempre. Química de la degradación de los materiales (1^{ra} ed.). Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 180.
- Rivera-Corral L. O. (2016). Evaluación del Estado de Degradación de Diversos Tipos de Varilla de Acero Utilizadas como Refuerzo en Concretos Carbonatados y Contaminados con Cloruros. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Romualdi, J. P., y Batson, G. B. (1963). Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 89(3), 147–168.

- Roque, R., Kim, N., Kim, B., y Lopp, G. (2009). Durability of Fiber-Reinforced Concrete in Florida Environments. Report. University of Florida. Dept. of Civil and Coastal Engineering, <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/16910>.
- Ruiz, G., de la Rosa, Á., y Poveda, E. (2019). Relationship Between Residual Flexural Strength and Compression Strength in Steel-Fiber Reinforced Concrete Within the New Eurocode 2 Regulatory Framework. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103(9), 102310. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102310>.
- Ruiz, G., de la Rosa, Á., Poveda, E., Zanon, R., Schäfer, M., y Wolf, S. (2023). Compressive Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete in Annex L of New Eurocode 2. *Hormigón y Acero*, 74(299–300), 187–198. <https://doi.org/10.33586/hya.2022.3092>.
- Ruslan, I., Farid, S., Rashit, K., y Evgeny, K. (2024). The Influence of the Aggressive Medium upon the Degradation of Concrete Structures: Numerical Model of Research. *Buildings*, 14(6), 1762. <https://doi.org/10.3390/buildings14061762>.
- Salcedo, L. O. G., y Will, A. (2017). Exploring Artificial Neural Networks to Estimate Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1), 19-41.
- Shah S. P., y Skarendahl A. (1985). *Steel Fiber Concrete*. Elsevier Applied Science Publishers, 526.
- Segre, N., y Joeques, I. (2000). Use of Tire Rubber Particles as Addition to Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1421-1425. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00373-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00373-2).
- Shirani, S., Cuesta, A., Morales-Cantero, A., De la Torre, A. G., Olbinado, M. P., y Aranda, M. A. G. (2021). Influence of Curing temperature on belite cement hydration: A comparative study with Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 147(16), 106499. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106499>.
- Song, Z., Li, S., y Yu, Q. (2023). Chloride Induced Mechanical Degradation of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: Insights from Corrosion Evolution Paths. *Construction and Building Materials*, 395(2), 132329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132329>.
- Stefanoni, M., Angst, U., y Elsener, B. (2018). Corrosion Rate of Carbon Steel in Carbonated Concrete – A critical Review. *Cement and Concrete Research*, 103(12), 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>.
- Yousuf, S., Shafiq, P., y Ibrahim, Z. (2020). The pH of Cement-based Materials: A Review. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 35(5), 908–924. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2337-y>.
- Sun, M., Sun, C., Liu, X., Pan, Z., Duan, J., y Hou, B. (2024). Effect of Chloride Binding Behavior of Cement Hydration Products on Chloride Critical Value of Steel Corrosion in the Presence of Na⁺ and Ca²⁺. *Journal of Building Engineering*, 94, 109985. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109985>.
- Sverdrup, H. U., y Olafsdottir, A. H. (2023). Dynamical Modelling of the Cement Production and Supply System, Assessing Climate Impacts of Different Future Scenarios. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(3), 191. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06183-1>.
- T 260-21. (2021). Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials.
- Tai, Y., Yang, L., Gao, D., Kang, K., Cao, Z., y Zhao, P. (2024). Properties Evolution and Deterioration Mechanism of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Under the Coupling Effect of Carbonation and Chloride Attack. *Journal of Building Engineering*, 95(4), 110275. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110275>.

- Tang, J., Gao, C., Li, Y., Xu, J., Huang, J., Xu, D., Hu, Z., Han, F., y Liu, J. (2024). A Review on Multi-Scale Toughening and Regulating Methods for Modern Concrete: From Toughening Theory to Practical Engineering Application. *Research*, 7(9), 0518. <https://doi.org/10.34133/research.0518>.
- Tang, K., y Wilkinson, S. (2020). Corrosion Resistance of Electrified Railway Tunnels Made of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 230, 117006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117006>.
- Taqi, F. Y., Mashrei, M. A., y Oleiwi, H. M. (2021). Experimental Study on the Effect of Corrosion on Shear Strength of Fibre-Reinforced Concrete Beams. *Structures*, 33(2), 2317–2333. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.006>.
- Taylor, H. F. W. (1998). *Cement Chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford Ltd, 480.
- Thomas, B. S., Gupta, R. C., y Panicker, V. J. (2016). Recycling of Waste Tire Rubber as Aggregate in Concrete: Durability-Related Performance. *Journal of Cleaner Production*, 112(1), 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Doctoral Thesis. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Sweden.
- Tzimas, E., y Papadimitriou, G. (2001). Cracking Mechanisms in High Temperature Hot-Dip Galvanized Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 145(1-3), 176-185. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01323-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01323-8).
- Vagelis G. Papadakis, Costas G. Vayenas, y Michel N. Fardis. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*, 88(4), 363-373. <https://doi.org/10.14359/1863>.
- Bui, L. V. H., Jongvivatsakul, P., Limpaninlach, P., Stitmannathum, B., Nguyen, T. T., y Nguyen, T. P. (2021). Simulation of Shear Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams Flexurally Repaired with Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Structures*, 34, 1545–1559. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.087>.
- Vera, R., Guerrero, F., Delgado, D., y Araya, R. (2013). Atmospheric Corrosion of Galvanized Steel and Precipitation Runoff from Zinc in a Marine Environment. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 24(3), 449–458. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130060>.
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Parthiban, D., Jakimiuk, A., Bayat, H., Podlasek, A., Vaverková, M. D., y Koda, E. (2022). A Comprehensive Analysis of the Use of SFRC in Structures and Its Current State of Development in the Construction Industry. *Materials* 15(19), 7012. <https://doi.org/10.3390/ma15197012>.
- Wallinder, I. O., y Leygraf, C. (2017). A Critical Review on Corrosion and Runoff from Zinc and Zinc-based Alloys in Atmospheric Environments. *Corrosion*, 73(9), 1060-1077. <https://doi.org/10.5006/2458>.
- Wang, J., Xue, C., Zhang, Y., Li, Q., Han, Y., y Qiao, H. (2023a). Study of Early-Age Hydration, Mechanical Properties Development, and Microstructure Evolution of Manufactured Sand Concrete Mixed with Granite Stone Powder. *Materials*, 16(13), 4857. <https://doi.org/10.3390/ma16134857>.
- Wang, L., Chen, C., Liu, R., Zhu, P., Liu, H., Jiang, H., y Yu, J. (2024). Chloride Corrosion Process of Concrete with Different Water–Binder Ratios under Variable Temperature Drying–Wetting Cycles. *Materials*, 17(10), 2263. <https://doi.org/10.3390/ma17102263>.
- Wang, X., Fan, F., Lai, J., y Xie, Y. (2021). Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review of Its Material Properties and Usage in Tunnel Lining. *Structures* 34(5), 1080–1098. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.086>.
- Wang, X., Liu, Y., y Liu, S. (2023b). Effect of Chloride-Induced Corrosion on Bond Performance of Various Steel Fibers in Cracked SFRC. *Cement and Concrete*

- Composites, 140, 105113.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105113>.
- Wang, X., Liu, Y., y Yoo, D. Y. (2023c). Combined Corrosion and Inclination Effects on Pullout Behavior of Various Steel Fibers Under Wet-Dry Cycle Deterioration. *Cement and Concrete Composites*, 142, 105229.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105229>.
- Wang, Y., Jin, H., Demartino, C., Chen, W., y Yu, Y. (2022). Mechanical Properties of SFRC: Database Construction and Model Prediction. *Case Studies in Construction Materials*, 17(7), e01484. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01484>.
- Wang, H., Wang, F., Xu1, Z., y Jin, L. (2008). Composition Control of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ Inclusions in Tire Cord Steel-a Thermodynamic Analysis. *Steel Research International*, 79(1), 25-30. <https://doi.org/10.1002/srin.200806312>.
- Wu, K., Chen, F., Lin, J., Zhao, J., y Zheng, H. (2021). Experimental Study on the Interfacial Bond Strength and Energy Dissipation Capacity of Steel and Steel Fibre Reinforced Concrete (SSFRC) structures. *Engineering Structures*, 235(3), 112094.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112094>.
- Xu, Z., Wu, C., Yu, M., Ran, Q., y Liu, L. (2025). Dynamic Compressive Behavior and Energy Absorption of SFRC. *Journal of Building Engineering*, 106, 112554.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112554>.
- Yang, L., Wang, C., You, P., Li, Z., Li, Y., Sun, G., y Gao, D. (2025). Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Suffered from the Coupling Effect of Stray Current and Chloride Ion. *Journal of Building Engineering*, 112, 113876.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.113876>.
- Yang, L., Zhang, Z., Gao, D., Tang, J., Chang, H., y Liu, G. (2022). Mechanical Property Evolution and Chloride Transport of Steel Fiber-Reinforced Concrete Exposed to Simulated Marine Environments. *Materials and Structures*, 55(4), 130.
<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01806-7>.
- Yoo, D. Y., Gim, J. Y., y Chun, B. (2020a). Effects of Rust Layer and Corrosion Degree on the Pullout Behavior of Steel Fibers from Ultra-High-Performance Concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3632–3648.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.101>.
- Yoo, D. Y., Gim, J. Y., y Chun, B. (2020b). Effects of Rust Layer and Corrosion Degree on the Pull-Out Behavior of Steel Fibers from Ultra-High-Performance Concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3632–3648.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.101>.
- Yoo, D. Y., Shin, W., Chun, B., y Banthia, N. (2020c). 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.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>.
- Yoo, J. S., Kim, G. Il, y Kim, J. G. (2023). Effect of Frequency and Ratio of Wet/Dry Stages in Cyclic Corrosion Tests on Localized Corrosion of Complex-Phase High-Strength Steel. *Materials*, 16(23). <https://doi.org/10.3390/ma16237329>.
- Youssari, F. Z., Taleb, O., y Benosman, A. S. (2023). Towards Understanding the Behavior of Fiber-Reinforced Concrete in Aggressive Environments: Acid Attacks and Leaching. *Construction and Building Materials*, 368, 130444.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130444>.
- Zeybek, Ö., Özkılıç, Y. O., Çelik, A. İ., Deifalla, A. F., Ahmad, M., y Sabri, M. M. (2022). Performance Evaluation of Fiber-Reinforced Concrete Produced with Steel Fibers Extracted from Waste Tire. *Frontiers in Materials*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1057128>.

- Zhang L., Wang R., Luan Y., y Tong H. (2024). Molecular Dynamics Study on Bonding Behaviors of γ -FeOOH/CSH Interface Under Aggressive Conditions. *Applied Surface Science*, 680, 161342. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161342>.
- Zhang, P., Kang, L., Wang, J., Guo, J., Hu, S., y Ling, Y. (2020). Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature-A Review. *Applied Sciences* 10(7), 2324. <https://doi.org/10.3390/app10072324>.
- Zhang, P., Wang, C., Wu, C., Guo, Y., Li, Y., y Guo, J. (2022). A Review on the Properties of Concrete Reinforced with Recycled Steel Fiber from Waste Tires. *Reviews on Advanced Materials Science* 61(1), 276–291. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0029>.
- Zia, A., Pu, Z., Holly, I., Umar, T., Tariq, M. A. U. R., y Sufian, M. (2022). A Comprehensive Review of Incorporating Steel Fibers of Waste Tires in Cement Composites and Its Applications. *Materials* 15(21), 7420. <https://doi.org/10.3390/ma15217420>.

Anexos

Artículo 1. Influence of experimental variables on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in chloride degradation experiments: bibliographic review and statistical analysis.



Revista ALCONPAT

www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835

Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

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

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

*Contact author: alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx
DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.641>

Received: 04/10/2023 | Received in revised form: 15/04/2023 | Accepted: 23/04/2023 | Published: 01/05/2023

ABSTRACT

This research aims to evaluate the effect of experimental variables in the study of chloride degradation of steel fiber reinforced concretes (SFRCs). The information was collected from different literary sources to be treated through Taguchi's experimental design and regression analysis. The results show that the most influential factors in the degradation of SFRCs by chloride are the load during degradation and the crack width, 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.

Cite as: Becerra, O., Meza, A., Salinas, R. (2023). "Influence of experimental variables on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in chloride degradation experiments: bibliographic review and statistical analysis", 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.

Contribution of each author

In this work, the author Osler Becerra Pérez contributed to the search and compilation of information, with the statistical analysis of said information in around 50%, the discussion of the results in 40%, and the preparation of the draft of the article. The author Alejandro Meza de Luna contributed to the direction and management of the investigation, the discussion of the results 40%, the revision and adjustments of the article 80%, and the functions of the corresponding author. The author Rogelio Salinas contributed to the statistical analysis of all the information found by 50%, the discussion of the results by 20%, and the review and adjustments of the article by 20%.

Creative Commons License

Copyright 2023 by the authors. This work is an Open-Access article published under the terms and conditions of an International Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussions and subsequent corrections to the publication

Any dispute, including the replies of the authors, will be published in the first issue of 2024 provided that the information is received before the closing of the third issue of 2023.

Revista ALCONPAT, Volume 13, Issue 2 (May – August 2023): 143 – 157

© 2023 ALCONPAT Internacional

143

Artículo 2. Impact of chloride corrosion on the pull-out resistance of recycled steel fiber in cement mortars.

Structural Engineering and Mechanics, Vol. 96, No. 5 (2025) 397-410
<https://doi.org/10.12989/sem.2025.96.5.397>

397

Impact of chloride corrosion on the pull-out resistance of recycled steel fiber in cement mortars

Oslerly Becerra-Pérez^{1a}, Alejandro Meza-de Luna^{a*}, Didilia Ileana Mendoza-Castillo^{2b}
and M.R. Moreno-Virgen^{2c}

¹Department of Metal-Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos Ote. 1801, Bona Gens, 20256, Aguascalientes, Aguascalientes, México

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos Ote. 1801, Bona Gens, 20256, Aguascalientes, Aguascalientes, México

(Received January 18, 2025, Revised October 21, 2025, Accepted October 22, 2025)

Abstract. The study examined the pull-out behavior of crimped recycled fibers made from annealed and galvanized steel wires and compared it with commercial Dramix 4D fibers. These fibers were degraded in tap water and sodium chloride (NaCl) solutions with 3.5% and 7% concentrations. The objective was to evaluate how chloride-induced degradation affects the interfacial bond and mechanical performance of recycled steel fibers embedded in cement mortar. Unlike previous studies focused on commercial fibers, this work introduces recycled crimped fibers. It integrates pull-out, tensile, and compressive testing with SEM-EDS analysis to correlate corrosion with mechanical response. A total of 105 specimens were tested to determine maximum pull-out stress and toughness. Degradation tests were performed for 30 and 60 days, during which the compressive strength of mortars and the tensile strength of degraded fibers were also measured. Surface characterization was conducted by digital microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS). Annealed steel fibers showed the lowest corrosion resistance (8% mass loss), while galvanized fibers exhibited the highest (0.67%). After 30 days, chloride exposure caused slight mortar hardening and increased interfacial friction, raising pull-out forces for Dramix ($\approx 40\%$) and galvanized fibers ($\approx 7.5\%$). After 60 days, matrix weakening reduced adhesion and pull-out resistance, while the annealed steel fibers failed by rupture due to their high bond strength, with ductility decreasing up to 12.3%.

Keywords: crimped recycled fibers; degradation by water and chloride; mechanical properties; pull-out and compression; Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)

1. Introduction

Since the 19th century, steel bars have been the primary reinforcement material in concrete structures, a practice that continues today as numerous concrete structures are still built worldwide using this material. Many of these structures, however, deteriorate over time due to human and climatic factors, which shortens their service life (Kozak & Bonopera, 2015). Several investigations have indicated that corrosion is the primary degradation mechanism of reinforced concrete structures exposed to marine environments or deicing salts (Berrocal *et al.* 2015, Paul *et al.* 2020). Corrosion decreases the cross-section of the steel reinforcement, which negatively influences the concrete's mechanical characteristics (Berrocal *et al.* 2015).

The utilization of steel fiber reinforced concrete presents

a highly effective solution for combating the detrimental effects of corrosion instigated by chemical processes within harsh environmental conditions (Li *et al.* 2022a). The enhanced resistance of fibers to corrosion is attributed to their short length, which prevents the formation of large anode and cathode regions. The creation of an interfacial layer on the fiber's surface that prevents corrosion is facilitated by lower vacuum conditions, unlike the concrete reinforced with steel bars, where large void zones are present (Berrocal *et al.* 2013, Li *et al.* 2022b).

Despite its high chloride resistance, several studies report that SFRC loses mechanical performance when chloride ions penetrate the matrix, corroding the fibers and inducing cracks by expansion of corrosion products (Becerra *et al.* 2023, Song *et al.* 2023). Chen *et al.* (2021) reported that the dynamic load of SFRC was affected after exposure to wet-dry cycles of a sodium chloride (NaCl) solution. According to Abbas *et al.* (2014), the penetration of chloride in tunnel walls causes the corrosion of the reinforcement, thus reducing its load capacity.

The excellent performance of steel fibers as concrete reinforcement has led to a rapid increase in demand. The global market was valued at USD 2.44 billion in 2024 and is expected to reach USD 3.19 billion by 2030, with a growth rate above 5% (Grand View Research 2025). This trend is driven by their use in infrastructure, pavements,

*Corresponding author, Professor
E-mail: alejandroml@aguascalientes.tecnm.mx

^aPh.D. Student
E-mail: r22153075@aguascalientes.tecnm.mx

^bProfessor
E-mail: didi_men@hotmail.com

^cProfessor
E-mail: ma_rosario.mv@aguascalientes.tecnm.mx