

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTABILIDAD
VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON
CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND
COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO**

Por

WILMER JUNIOR URANGO ROMERO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de Maestría en Ciencias con Orientación
en Materiales de Construcción**

Agosto, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, LA ESTABILIDAD
VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON
CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND
COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO**

Por

WILMER JUNIOR URANGO ROMERO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de Maestría en Ciencias con Orientación
en Materiales de Construcción**

Agosto, 2025



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2025/SEPTIEMBRE/8

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO”**, que presenta el **ING. WILMER JUNIOR URANGO ROMERO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. LUCIO GUILLERMO LÓREZ YÉPEZ

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Presente. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO**”, que presenta el **ING. WILMER JUNIOR URANGO ROMERO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

“Alere Flammam Veritatis”

Ciudad Universitaria, a 8 de septiembre de 2025



DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx

Barranquilla, 09 de septiembre de 2025

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE

Estimado **Dr. Fajardo San Miguel**,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **"EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO"**, que presenta el **ING. WILMER JUNIOR URANGO ROMERO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento cuenta con la **calidad y nivel científico**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Cordialmente,



Margareth J. Dugarte Coll

Profesor Asociado

Coordinadora de Maestría y Doctorado

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad del Norte

Km. 5 Vía a Puerto Colombia

Área Metropolitana de Barranquilla

(T) 57 5 3509509 (3709)

(E) mdugarte@uninorte.edu.co



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE ☒ PROFESOR ☐

NOMBRE: WILMER JUNIOR URANGO ROMERO

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO ☐ TESIS ☒ PI ☐ OTRO ☐

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APDREZCAN EN LA TESIS IMPRESA,

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 29 de agosto de 2025

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spl.fic@uanl.mx

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Facultad de Ingeniería Civil

Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, LA ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ELABORADOS CON CEMENTOS DE BAJAS EMISIONES DE CARBONO Y CEMENTOS PORTLAND COMPUESTOS FABRICADOS EN MÉXICO”, realizada por el estudiante Wilmer Junior Urango Romero, con número de matrícula 2221427, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Materiales de Construcción.

Aprobación de la tesis

DR. LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ

Director de tesis / Presidente del Jurado

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Codirector de tesis / Secretario

DRA. MARGARETH DUGARTE COLL

Directora externa / Vocal

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, porque de una u otra forma siempre he sentido su presencia en mi vida.

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por apoyar la investigación no solo de los ciudadanos mexicanos, sino también del talento extranjero. Gracias por la beca con No. de CVU 13244230 que me permitió cursar mis estudios de posgrado.

A **Holcim México**, en especial al Ing. José Alfredo Rodríguez y a la Ing. Aymara Abril Clímaco, por el donativo de los cementantes y el acompañamiento en la investigación.

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León** y a la **Facultad de Ingeniería Civil**, por la beca académica otorgada para mis estudios de Maestría. A la **Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación**, por su invaluable apoyo administrativo desde mi llegada hasta la culminación de mi proceso de titulación.

A mi **Director de tesis, Dr. Lucio Guillermo López Yépez**, por enseñarme disciplina y constancia. Gracias, doctor, porque su “intensidad” semana a semana fue clave para que hoy este proyecto llegue a su fin.

A mi **Co-Director, Dr. Alejandro Durán Herrera**, por sus consejos, confianza y por impulsar mi potencial para participar en escenarios nacionales e internacionales.

Al **Dr. Gerardo Fajardo San Miguel**, Co-Director de esta tesis, por su asesoría y retroalimentación en el diseño de los ensayos de corrosión.

A mi **asesora externa y madre académica, la Dra. Margareth Dugarte Coll**, por despertar en mí la pasión por la tecnología del concreto y la durabilidad. Gracias por creer en mí antes de que yo mismo lo hiciera, por su apoyo académico, personal y profesional, por las incontables horas de asesoría y por la guía en los momentos de incertidumbre.

Al **Departamento de Tecnología del Concreto**, por el uso de instalaciones, equipo y apoyo económico. De manera especial agradezco a la Lic. Iliana Garza y la Lic. Magda Elizondo por su apoyo administrativo, al equipo técnico del laboratorio Ing. Alejandro Ávila, Ing. Hiram Martínez y al Sr. Beto por su ayuda en la logística, así como a los auxiliares Samantha, Heidy, Felipe y Axel por su colaboración en los ensayos. A mis

asistentes de investigación en 2024, Martín Alfaro, Jorge Alberto Valdez y Edgar Alejandro Cano, y en 2025, José Alejandro Bocanegra, Samuel Flores y Yosselin Rodríguez: sin ustedes no hubiera terminado la experimentación a tiempo.

Al Laboratorio de Innovación e Investigación en Materiales de Construcción (**LIIMC**), en especial al Dr. Gilbert Ortiz, la QFB. Silvia López, el Sr. Gumaro Tovar y Luis Mejía.

Al **Laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción** de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia), por ser mi segunda casa y brindarme todas las facilidades durante mi estancia académica en corrosión en diciembre de 2023.

A la **Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia**, en especial al Dr. Juan Manuel Lizarazo, la MSc. Leslie Nicole Hernández y el Ing. Nicolás Fuentes, por su apoyo durante mi estancia académica en diciembre de 2024.

A mis amigos de Tecno y compañeros de convenciones ACI, Ing. Olga Salinas e Ing. Jorge Xilotl. A la Ing. Aida Monserrat, por su apoyo en los ensayos de contracción química y autógena. Al Ing. Jorge Castro, por ser mi compañero de gym y de mezclas de concreto.

A Said López, Leslie Uribe, y Alex, mis primeros amigos en México, quienes me ayudaron en mi adaptación en Monterrey y siempre estuvieron dispuestos a tenderme la mano.

A mis amigos colombianos en México, el MSc. Kevin Rodríguez y el MSc. Julián Gutiérrez, quienes hicieron que mi tierra natal nunca se sintiera tan lejana.

A mis amigos de los cubículos: MSc. Diego Cavazos, MSc. Ángel Rojas, MSc. Antonio Torres, Ing. Paola Gándara, Ing. Niza García, Ing. Daniel Cadena, Ing. Miguel Pérez, Ing. Naomi Ibarra, Ing. Paul Gustavo, Ing. Víctor González, Ing. Ailed Casas, Ing. Anakaren Castro, Ing. Diego Minaya, Ing. Samuel Mares, Ing. María Fernanda Medrano, Ing. Mónica Suárez e Ing. Alexis Bustos. Gracias por acogerme como su representante, hacer más llevadera mi estancia en la maestría, brindarme apoyo académico, personal y emocional, y convertirse algunos en verdaderos amigos para la vida.

Finalmente, a mi familia y amigos de Colombia, así como a quienes encontré en el camino en México. Gracias por acompañarme en mis momentos más vulnerables, por entender mis silencios y quedarse no porque tuvieran que hacerlo, sino porque eligieron hacerlo.

DEDICATORIA

*A mi abuelo, **Abel González Pérez (Q.E.P.D.)**, trabajador incansable del campo colombiano, adelantado a su época y entregado siempre a su familia. Hoy tu recuerdo y tu sonrisa me acompañan en cada paso.*

*A mi abuela **Rosa Hoyos de González**, por ser esa flor en mi vida, por tu preocupación constante, tu cariño sincero y tus consejos llenos de sabiduría.*

*A mi abuela y mamá, **Nelly González Hoyos**, quien, además de criar a sus cinco hijos biológicos, me acogió como a uno más y me condujo siempre por el camino correcto. Este logro también es tuyo: por tus sacrificios, por tu fortaleza silenciosa y por renunciar tantas veces a tu propia felicidad para vernos felices a nosotros.*

*A mi abuelo y papá, **Fredis Romero Tuirán**, maestro de obra, de quien heredé gran parte de mis conocimientos técnicos en ingeniería civil.*

*A mi mamá, **Nerly Romero González**, quien, a pesar de no poder estar conmigo todos los días, encontraba la manera de expresarme su amor, a su forma y con el corazón.*

*A mi papá, **Wilmer Urango Morelos**, cuya ausencia marcó mi infancia, pero a quien en los últimos años he aprendido a comprender y perdonar.*

*A mis tías y a mi tío: **Nasly, Nehemías, Norelys y Nandry**, quienes en distintos momentos fueron padres, hermanos y amigos. Gracias por educarme y apoyarme.*

*A mis mejores amigos de Colombia: **Melissa Acosta, Óscar Anaya, L. Paola Ospina, Angie Urango y Yernis Villamil**, que a pesar de la distancia siempre fueron mis confidentes y mi refugio, escucharon mis angustias y compartieron mis risas.*

***A mí**, por los días en que nada parecía suficiente, por las sonrisas forzadas para no preocupar a los demás, por la valentía, la disciplina y la constancia.*

Este título lleva mi nombre, pero está construido con las lágrimas de mi familia y amigos al despedirme cuando partí a otro país, con los días de soledad en los que quise rendirme, con las veces que pensé que no lo lograría, con el apoyo de mis amistades que nunca me dejaron solo, y con las ganas inmensas que siempre tuve de salir adelante.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	i
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	xiii
Introducción	1
Justificación	7
Capítulo 1- Planteamiento del problema	10
1.1 Contexto del problema	10
1.2 Definición del problema.....	12
Capítulo 2- Hipótesis y objetivos	14
2.1 Hipótesis.....	14
2.2 Objetivos	14
2.2.1 <i>Objetivo general</i>	14
2.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
Capítulo 3- Revisión bibliográfica	16
3.1 Antecedentes	16
3.2 Marco teórico	34
3.2.1 <i>Cemento Portland Compuesto – CPC</i>	34
3.2.2 <i>Cementantes alternativos</i>	35
3.2.2.1 Cementos bajos en carbono.....	35
3.2.2.2 Cementos con bajo contenido de Clinker	36
3.2.3 <i>LC³ – Cemento de piedra caliza y arcilla calcinada</i>	36
3.2.3.1 Fabricación y producción del LC ³	38
3.2.3.2 Arcillas calcinadas	40
3.2.3.3 Reacciones de hidratación en LC ³	42

3.2.4	<i>Estabilidad volumétrica del concreto</i>	43
3.2.4.1	Retracción química	43
3.2.4.2	Retracción autógena	43
3.2.4.3	Retracción por secado	44
3.2.4.4	Factores que influyen en las retracciones.....	45
3.2.5	<i>Transporte de agentes agresivos en el concreto</i>	45
3.2.5.1	Agentes agresivos comunes	46
3.2.5.2	Mecanismos de transporte.....	46
3.2.6	<i>Corrosión de sistemas de concreto reforzado</i>	47
3.2.6.1	Mecanismo electroquímico de la corrosión	47
3.2.6.2	Corrosión inducida por cloruros.....	49
3.2.6.3	Umbral de corrosión.....	50
3.2.6.4	Técnicas para evaluar la corrosión.....	50
3.2.7	<i>Vida útil de estructuras de concreto reforzado</i>	51
3.2.7.1	Modelo de Vida Útil de Tuutti.....	52
3.2.7.2	Difusión de Cloruros en el Concreto.....	52
3.2.8	<i>Formation factor</i>	54
Capítulo 4– Metodología experimental		55
4.1	Etapa 1 – Diseño de mezcla y propiedades mecánicas	55
4.1.1	Caracterización de los materiales	55
4.1.2	Elaboración de mezclas de concreto.....	57
4.1.3	Propiedades mecánicas.....	58
4.2	Etapa 2 – Estabilidad volumétrica.....	59
4.2.1	Retracción química	60
4.2.2	Retracción autógena	61

4.2.3	<i>Retracción por secado</i>	62
4.3	Etapla 3 – Propiedades de transporte	63
4.3.1	<i>Resistividad eléctrica</i>	64
4.3.2	<i>Penetración rápida al ion cloro</i>	66
4.3.3	<i>Carbonatación acelerada</i>	66
4.3.4	<i>Formation factor</i>	68
4.3.4.1	Conductividad de la solución de poros	68
4.3.4.2	pH de la solución de poros	68
4.4	Etapla 4 – Monitoreo electroquímico de la corrosión	69
4.4.1	<i>Configuración de los especímenes</i>	69
4.4.2	<i>Medio de exposición acelerado</i>	71
4.4.3	<i>Monitoreo electroquímico</i>	71
4.5	Etapla 5 – Estimación de vida útil.....	74
4.5.1	<i>Corrosión inducida por carbonatación</i>	74
4.5.2	<i>Umbral de corrosión inducida por cloruros</i>	74
4.5.3	<i>Difusión de cloruros</i>	76
4.5.3.1	Coeficiente de difusión aparente.....	76
4.5.3.2	Capacidad de fijación de cloruros	78
Capítulo 5- Resultados y análisis		80
5.1	Diseño de mezcla y propiedades mecánicas	80
5.1.1	<i>Caracterización de los materiales</i>	80
5.1.1.1	Propiedades de los agregados.....	80
5.1.1.2	Composición química de los cementantes	82
5.1.1.3	Composición mineralógica de los cementantes	83
5.1.1.4	Distribución de tamaño de partícula de los cementantes	84

5.1.1.5	Densidad, tiempo de fraguado y consistencia normal.....	85
5.1.2	<i>Diseños de mezclas de concreto.....</i>	89
5.1.2.1	Elaboración de mezclas de prueba	89
5.1.2.2	Diseños definitivos para las mezclas de concreto	90
5.1.3	<i>Resistencia a la compresión.....</i>	93
5.1.3	<i>Módulo de elasticidad.....</i>	97
5.2	Estabilidad volumétrica.....	99
5.2.1	<i>Retracción química.....</i>	99
5.2.2	<i>Retracción autógena.....</i>	100
5.2.3	<i>Retracción por secado</i>	101
5.3	Propiedades de transporte	104
5.3.1	<i>Resistividad eléctrica bulk</i>	104
5.3.2	<i>Resistividad eléctrica superficial.....</i>	108
5.3.3	<i>Penetración rápida al ion cloro.....</i>	112
5.3.4	<i>Carbonatación acelerada.....</i>	114
5.3.5	<i>Formation factor.....</i>	117
5.3.5.1	pH de la solución de poros	117
5.3.5.2	Conductividad de la solución de poros	118
5.3.5.3	Cálculo del Formation Factor.....	118
5.4	Monitoreo electroquímico de la corrosión	120
5.4.1	<i>Potenciales de corrosión</i>	120
5.4.2	<i>Resistencia a la polarización lineal.....</i>	122
5.5	Modelos de vida útil.....	125
5.5.1	<i>Corrosión inducida por carbonatación</i>	125
5.5.2	<i>Corrosión inducida por cloruros.....</i>	129

5.5.2.1 Umbral de corrosión.....	129
5.5.2.2 Coeficiente de difusión de cloruros.....	138
5.5.2.3 Tiempo de iniciación de la corrosión.....	142
5.5.2.3 Análisis de fijación de cloruros.....	143
Análisis general de la investigación	148
Conclusiones	156
Recomendaciones	158
Referencias.....	160

Lista de figuras

Figura 1. Ilustración de las emisiones de cementos bajos en carbono en comparación al cemento portland ordinario. Fuente: Adaptado de (Boanada-Fuchs et al., 2024)..	8
Figura 2. Número de documentos publicados anualmente por diversas revistas científicas sobre cementos de bajo carbono. Fuente: Scopus.	17
Figura 3. Efectos del contenido de OPC sobre la retracción química. Fuente: Adaptado de (De Weerdt et al., 2011).	22
Figura 4. Efecto del contenido de polvo de caliza en la profundidad de carbonatación del concreto. Fuente: Adaptado de (Meddah et al., 2014).	22
Figura 5. Principales autores que investigan sobre la estabilidad volumétrica del LC ³ . Análisis bibliométrico utilizando la base de datos de Scopus. Fecha de consulta: agosto 2025.	23
Figura 6. Principales autores que investigan sobre la durabilidad del LC ³ como cementante. Análisis bibliométrico utilizando la base de datos de Scopus. Fecha de consulta: agosto 2025.	24
Figura 7. Evolución de la resistencia a la compresión a 28 días de los concretos LC ³ y resistencia a la compresión del OPC a 28 días como referencia. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).	25
Figura 8. Evolución de la resistencia a la tracción a 28 días de los concretos LC ³ . Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).	25
Figura 9. Módulo de elasticidad de concretos con CPO, FA:CV y LC3 como cementantes. Fuente: (Dhandapani et al., 2018)	26
Figura 10. Retracción química de pastas de cementante hasta los 170 días de evaluación.	27
Figura 11. Evolución de la retracción por secado en los concretos hasta los 100 días. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).	28
Figura 12. Evolución de la retracción autógena y total hasta 100 días. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).	28

Figura 13. Indicadores de durabilidad de LC ³ . (Izquierda) Resistividad superficial a los 28, 56 y 90 días. (Derecha) RCPT - carga total que pasa a 28 días (rojo) y 90 días (azul). Fuente: Adaptado de Dhandapani et al. (2018)	30
Figura 14. Evolución de la velocidad de corrosión de cementantes LC ³ , LCF y OPC en diferentes ciclos de humectación y secado. Fuente: adaptado de (Ejbouh et al., 2023).	32
Figura 15. Perfiles de cloruro en las mezclas de concreto tras 56 días de exposición a una solución de cloruro, (a) Concreto M35 y (b) Concreto M50. Fuente: adaptado de (Pillai et al., 2019).....	33
Figura 16. Emisiones de CO ₂ asociadas a la composición del OPC y el LC ³ . Fuente: Adaptado de (Sharma et al., 2021).....	38
Figura 17. Proceso de calcinación y producción final del LC ³ . Elaboración propia. Fuente: Emmanuel et al. (2016).	39
Figura 18. Impacto relativo del potencial de calentamiento global de la producción de cemento en Cuba. Todos los escenarios. Fuente: adaptado de (Sánchez Berriel et al., 2016).	40
Figura 19. Estructura cristalina de las arcillas caoliníticas. Fuente: (Zunino, 2020).	41
Figura 20. Relación entre la retracción química y la retracción autógena. Fuente: Adaptado de (Helwig et al., 1999).....	44
Figura 21. Mecanismo electroquímico de la corrosión. Fuente: adaptado de (Bertollini et al., 2014).....	48
Figura 22. Representación esquemática de la curva de polarización anódica del acero en el concreto con diferentes contenidos de cloruros. Fuente: Adaptado de (Bertollini et al., 2014).....	50
Figura 23. Esquema de los tiempos de iniciación y propagación del modelo de vida útil propuesto por Tutti. Fuente: (Bertollini et al., 2014)	52
Figura 24. Esquema de las fases que abarca la metodología experimental para la evaluación de las propiedades mecánicas, estabilidad volumétrica y durabilidad de los cementos en estudio. Fuente: elaboración propia.....	55

Figura 25. Diagrama de la caracterización de las propiedades de los agregados y cementantes previo al diseño de mezclas de concreto. Fuente: elaboración propia.	57
Figura 26. Flujograma para la elaboración de los diseños de mezcla y la evaluación de las propiedades mecánicas. Fuente: elaboración propia.	57
Figura 27. Distribución de los ensayos realizados a los diseños de mezcla definitivos. Fuente: elaboración propia.	58
Figura 28. Esquema de los ensayos de retracciones realizados en la etapa 2. Fuente: elaboración propia.	60
Figura 29. Montaje experimental para el monitoreo de la contracción química. Fuente: elaboración propia.	61
Figura 30. Preparación y fabricación de especímenes para contracción autógena del concreto.	62
Figura 31. Montaje experimental de los especímenes y la conexión al sistema de adquisición de datos. Fuente: elaboración propia.	62
Figura 32. Prismas de concreto en cuarto con temperatura y humedad controlada, fabricados para evaluación de la contracción por secado.	63
Figura 33. Diagrama de los ensayos y tiempos de evaluación para el estudio de las propiedades de transporte. Fuente: elaboración propia.	64
Figura 34. Configuración experimental del ensayo de resistividad superficial. Fuente: elaboración propia.	65
Figura 35. Configuración experimental para las mediciones de resistividad bulk. Fuente: elaboración propia.	65
Figura 36. Esquema de la configuración experimental para el ensayo de penetración rápida al ion cloro. Fuente: elaboración propia.	66
Figura 37. Procedimiento de toma de datos para el ensayo de avance del frente de carbonatación. Fuente: elaboración propia.	67
Figura 38. Montaje experimental para la extracción de la solución de poros.	68
Figura 39. Configuración geométrica del espécimen para evaluación electroquímica de la corrosión inducida por cloruros.	69

Figura 40. Detalle del recubrimiento epóxico en los extremos de la barra anódica, dejando una zona central expuesta de 200 mm para el monitoreo del proceso corrosivo.	70
Figura 41. Esquema del circuito eléctrico utilizado para conectar los especímenes.	71
Figura 42. Esquemas para las mediciones de los potenciales de corrosión con el electrodo de calomel saturado. a) Potencial del ánodo, b) potencial del cátodo.....	72
Figura 43. Esquema de la celda de tres electrodos utilizada en las pruebas de EIS y LPR.	74
Figura 44. Espécimen para determinación de umbral de cloruros.	75
Figura 45. Configuración experimental para seguimiento electroquímico de os especímenes para la determinación del umbral de corrosión.	76
Figura 46. Preparación de muestras para ensayo de coeficiente de difusión de cloruros.	77
Figura 47. Sistema de titulación para estimación de contenido de cloruros.	77
Figura 48. Curva de gradación de la arena.	80
Figura 49. Curva de gradación de la grava	81
Figura 50. Difractograma de Rayos X de los cementantes en estudio.	83
Figura 51. Distribución de tamaño de partícula de los cementantes en estudio.	84
Figura 52. Consistencia normal determinada para cada tipo de cementante.	86
Figura 53. Resultados de los tiempos de fraguado inicial y final de las pastas cementantes.	86
Figura 54. Consistencia normal para fabricación de cubos de mortero.	87
Figura 55. Evolución de la resistencia a compresión en cubos de mortero a 3, 7, 28 y 90 días.	88
Figura 56. Elaboración de mezclas de prueba. a) Primera bachada con diseño de mezcla inicial. b) Quinta bachada con diseño ajustado y cumplimiento de revenimiento.	90
Figura 57. Relaciones agua/cementante y consumos de cementante utilizados para alcanzar las resistencias objetivo de 20, 40, 60 y 70 MPa en las mezclas de referencia.	91
Figura 58. Evolución de la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, evaluadas a distintas relaciones	

agua/cementante. A) Mezcla M20 ($a/cm = 0.82$) con resistencia objetivo de 20 MPa. B) Mezcla M40 ($a/cm = 0.50$). C) Mezcla M60 ($a/cm = 0.34$). D) Mezcla M70 ($a/cm = 0.28$).	96
Figura 59. Módulo de elasticidad estático a 56 días para las mezclas de concreto elaboradas con cementos C80, C60 y C50, evaluadas a diferentes relaciones agua/cementante ($a/cm = 0.82, 0.50, 0.34$ y 0.28).	99
Figura 60. Evolución de la retracción química de pastas elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, A) para una relación agua/cementante de 0.34 y B) para una relación agua/cementante de 0.28.	100
Figura 61. Evolución de la retracción autógena de los cementos C80, C60 y C50, A) para concretos una relación agua/cementante de 0.28 y B) para concretos una relación agua/cementante de 0.34.	101
Figura 62. Evolución de la retracción por secado de los cementos C80, C60 y C50, para concretos una relación agua/cementante de 0.34.	102
Figura 63. Evolución de la retracción por secado de los cementos C80, C60 y C50, para concretos una relación agua/cementante de 0.28.	103
Figura 64. Evolución de la resistividad eléctrica bulk de las mezclas de concreto elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, evaluadas a distintas relaciones agua/cementante. A) Mezcla M20 ($a/cm = 0.82$) con resistencia objetivo de 20 MPa. B) Mezcla M40 ($a/cm = 0.50$). C) Mezcla M60 ($a/cm = 0.34$). D) Mezcla M70 ($a/cm = 0.28$).	105
Figura 65. Evolución de la resistividad eléctrica superficial de las mezclas de concreto elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, evaluadas a distintas relaciones agua/cementante. A) Mezcla M20 ($a/cm = 0.82$) con resistencia objetivo de 20 MPa. B) Mezcla M40 ($a/cm = 0.50$). C) Mezcla M60 ($a/cm = 0.34$). D) Mezcla M70 ($a/cm = 0.28$).	110
Figura 66. Carga total que pasa durante el ensayo de RCPT para las mezclas de concreto M20 y M40.....	114
Figura 67. Evolución de la profundidad de carbonatación para el concreto M20 y M40.	116
Figura 68. pH de la solución de poros a 3 días y 120 días de las mezclas en estudio. ..	117

Figura 69. Conductividad de la solución de poros a 3 días y 120 días de las mezclas en estudio.	118
Figura 70. Determinación del formation factor (FF) para las mezclas en estudio.	119
Figura 71. Monitoreo del potencial de corrosión del ánodo para las probetas de concreto con configuración experimental de acuerdo con la ASTM G109.	120
Figura 72. Monitoreo del potencial de corrosión del cátodo para las probetas de concreto con configuración experimental de acuerdo con la ASTM G109.	121
Figura 73. Monitoreo de la resistencia a la polarización lineal del acero embebido en las mezclas de concreto en estudio.	123
Figura 74. Densidad de corriente de corrosión del acero embebido en las mezclas de concreto en estudio.	124
Figura 75. Coeficientes de difusión de CO ₂ de las mezclas en estudio para los tres tipos de cemento. A) Concreto M20 con relación a/cm 0.82. B) Concreto M40 con relación a/cm 0.5.	128
Figura 76. Evolución de la resistencia a la polarización lineal de los especímenes de umbral de corrosión.	129
Figura 77. Evolución de los potenciales de corrosión de los especímenes de umbral de corrosión.	130
Figura 78. Densidad de corriente de corrosión para los especímenes de umbral de corrosión.	131
Figura 79. Circuito equivalente para ajuste de datos de EIS.	132
Figura 80. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C80-0.5.	132
Figura 81. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C80-0.8.	133
Figura 82. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C60-0.5.	134
Figura 83. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C60-0.8.	135
Figura 84. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C50-0.5.	136

Figura 85. Resultados de umbral de corrosión para las mezclas en estudio.	138
Figura 86. Ajuste de los perfiles de difusión de las mezclas en estudio.	139
Figura 87. Coeficientes de difusión de cloruros de las mezclas en estudio.	140
Figura 88. Concentración de cloruros en la superficie para las mezclas en estudio.	141
Figura 89. Tiempo de iniciación de la corrosión inducida por cloruros.	142
Figura 90. Determinación de cloruros totales, libres y fijados para todas las mezclas en estudio.	144
Figura 91. Cálculo de las isotermas de fijación de cloruros.	145
Figura 92. Isotermas de Langmuir para las mezclas en estudio.....	146
Figura 93. Determinación de cloruros límite de las mezclas en estudio.	147

Lista de tablas

Tabla 1. Componentes de los cementos CPO y CPC. Adaptado de NMX-C-414 (2014)	34
Tabla 2. Criterios de evaluación de potenciales de corrosión (ASTM C876)	72
Tabla 3. Propiedades del agregado fino	80
Tabla 4. Propiedades del agregado grueso	81
Tabla 5. Composición química de los materiales cementantes	82
Tabla 6. Propiedades físicas de los cementantes	85
Tabla 7. Resultados de consistencia normal y coeficiente de variación para tres réplicas	85
Tabla 8. Precisión y sesgo de los resultados de resistencia a la compresión en cubos de mortero a 3, 7, 28 y 90 días	88
Tabla 9. Proporciones de mezcla para concretos M20 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno	92
Tabla 10. Proporciones de mezcla para concretos M40 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno	92
Tabla 11. Proporciones de mezcla para concretos M60 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno	92
Tabla 12. Proporciones de mezcla para concretos M80 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno	93
Tabla 13. Precisión y sesgo de los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas M20 y M40 con los tres tipos de cemento en estudio	94
Tabla 14. Precisión y sesgo de los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas M60 y M70 con los tres tipos de cemento en estudio	94
Tabla 15. Resultados de módulo de elasticidad para las mezclas de concreto en estudio	98
Tabla 16. Límites para la resistividad eléctrica bulk de acuerdo con NMX C-514	104
Tabla 17. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M20	106

Tabla 18. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M40	106
Tabla 19. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M60	107
Tabla 20. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M70	107
Tabla 21. Límites para la resistividad eléctrica superficial de acuerdo con AASHTO T 358	108
Tabla 22. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M20	110
Tabla 23. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M40	111
Tabla 24. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M60	111
Tabla 25. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M70	112
Tabla 26. Penetrabilidad del Ion Cloro basado en la carga que pasa. Fuente: ASTM C1202-19.....	113
Tabla 27. Resultados y análisis de precisión y sesgo del ensayo de RCPT para las mezclas de concreto M20 y M40.	113
Tabla 28. Resultados y análisis de precisión y sesgo de la carbonatación acelerada.....	115
Tabla 29. Coeficientes de difusión de CO ₂ para ambiente acelerado, 4% CO ₂	125
Tabla 30. Coeficientes de difusión de CO ₂ para ambiente natural – 0.09% CO ₂	126
Tabla 31. Coeficientes de difusión de CO ₂ para ambiente natural – 0.04% CO ₂	127
Tabla 32. Tiempo de iniciación de la corrosión inducida por carbonatación	128
Tabla 33. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C80-0.5	133
Tabla 34. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C80-0.8	133
Tabla 35. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C60-0.5	134
Tabla 36. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C60-0.8	135
Tabla 37. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C50-0.5	136

Introducción

La industria de la construcción ha experimentado a lo largo de los años transformaciones significativas en respuesta a la creciente necesidad de edificaciones más sostenibles, duraderas y eficientes. En este panorama, el cemento, uno de los materiales más utilizados en el mundo, está en el centro de atención por su considerable huella ambiental. De acuerdo con diversos estudios, la producción de cemento Portland, que es la variedad más utilizada, es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono (WBCSD, 2018; World Economic Forum, 2024b). Frente a este desafío, la industria y la comunidad científica han trabajado conjuntamente en la búsqueda de alternativas eficientes y de bajo carbono.

La hoja de ruta de la *Global Cement and Concrete Association* (GCCA, 2023) establece estrategias para que la industria cementera alcance emisiones netas cero en 2050, destacando el ahorro en la producción de clinker y en el uso de cementos y aglutinantes por medio de factores como el uso de materiales cementantes suplementarios (MCS), la eficiencia térmica y el uso de combustibles alternativos. Alternativas a los cementos portland como los MCS, permiten reemplazar parte del clinker, reduciendo así las emisiones de CO₂ asociadas con su producción. La implementación de estas estrategias no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede mejorar las propiedades del cemento y ofrecer beneficios económicos y de desempeño en la construcción, ya que el uso de materiales cementantes suplementarios refina la microestructura, reduce la permeabilidad y aumenta la durabilidad del concreto frente a agentes agresivos (Ndahirwa et al., 2022).

Las cenizas volantes de las centrales eléctricas de carbón y la escoria granulada de alto horno de la producción de acero son reconocidas por mejorar la resistencia y durabilidad a edades tardías del cemento. No obstante, aunque actualmente estos materiales se encuentran disponibles en diversos países de América Latina, su suministro depende directamente de la actividad de otras industrias, por lo que puede ser limitado o variable en el tiempo (Amran et al., 2021; Kumar et al., 2021; Rafieizonooz et al., 2022; Subathra Devi et al., 2020). En este sentido, materiales como la piedra caliza y la arcilla destacan

Introducción

por su abundancia en la corteza terrestre y por su potencial como fuentes de materiales cementantes suplementarios. La piedra caliza, en particular, es ampliamente utilizada en la producción de cementos mezclados, puesto que mejora la distribución granulométrica, rellena espacios entre partículas, incrementa la densidad de empaquetamiento, estimula la hidratación temprana del cemento Portland y estabiliza la ettringita mediante la formación de monocarboaluminato (Panesar & Zhang, 2020; Zeng et al., 2022). Estas características refuerzan el valor de los MCS como una opción clave para la producción de cementos sostenibles.

A nivel global, el Cemento de Caliza y Arcilla Calcinada (LC³, por sus siglas en inglés) ha surgido como una solución prometedora entre las alternativas de cementos bajos en carbono en desarrollo. Este tipo de cemento, resultado de la combinación de caliza, arcilla calcinada y yeso, ofrece un cementante con propiedades comparables o incluso superiores al cemento Portland tradicional (Scrivener, Martirena, et al., 2018). Más allá de sus atributos técnicos, el LC³ se distingue como una opción más sostenible al permitir una reducción significativa en las emisiones de CO₂. Esto se logra mediante el uso de una menor cantidad de clínker, lo que a su vez reduce las emisiones asociadas con la descomposición del carbonato de calcio presente en la caliza.

Sin embargo, la adopción del LC³ no solo se basa en su capacidad para reducir emisiones, sino también en su desempeño en aplicaciones prácticas, su viabilidad económica y su adaptabilidad a diferentes contextos geográficos y productivos (Kanagaraj et al., 2024). En México, un país con una rica diversidad geológica y una tradición cementera consolidada, el LC³ representa una oportunidad única, ya que la abundancia de caliza y la amplia disponibilidad de arcillas aptas para su calcinación ofrecen condiciones privilegiadas para su implementación a gran escala (Krishnan et al., 2019; Mañosa et al., 2024). Sin embargo, se presentan desafíos que deben abordarse, como la adaptación de las arcillas locales al proceso de producción de LC³ y el estudio de su comportamiento, desempeño y durabilidad en diferentes aplicaciones de proyectos de infraestructura.

Con relación a los tipos de cementos disponibles en el mercado mexicano, el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), en sus especificaciones para cementantes hidráulicos, incluye el Cemento

Introducción

Portland Compuesto (CPC). Este tipo de cementante es obtenido mediante la combinación de Clinker, sulfato de calcio y una variedad de materiales suplementarios, como escoria de alto horno, ceniza volante, caliza, puzolana natural o humo de sílice (NMX-C-414, 2014). Esta diversificación de los cementos disponibles en el mercado, con opciones como el CPC que incluye adiciones minerales, representa un paso importante hacia la sostenibilidad en la industria de la construcción, puesto que fomenta el uso de materiales que reducen parcialmente la dependencia del Clinker. La industria de la construcción ha experimentado a lo largo de los años transformaciones significativas en respuesta a la creciente necesidad de edificaciones más sostenibles, duraderas y eficientes. En este panorama, el cemento, uno de los materiales más utilizados en el mundo, está en el centro de atención por su considerable huella ambiental. De acuerdo con diversos estudios, la producción de cemento Portland, que es la variedad más utilizada, es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono (WBCSD, 2018; World Economic Forum, 2024b). Frente a este desafío, la industria y la comunidad científica han trabajado conjuntamente en la búsqueda de alternativas eficientes y de bajo carbono.

La hoja de ruta de la *Global Cement and Concrete Association* (GCCA, 2023) establece estrategias para que la industria cementera alcance emisiones netas cero en 2050, destacando el ahorro en la producción de clinker y en el uso de cementos y aglutinantes por medio de factores como el uso de materiales cementantes suplementarios (MCS), la eficiencia térmica y el uso de combustibles alternativos. Alternativas a los cementos portland como los MCS, permiten reemplazar parte del clinker, reduciendo así las emisiones de CO₂ asociadas con su producción. La implementación de estas estrategias no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede mejorar las propiedades del cemento y ofrecer beneficios económicos y de desempeño en la construcción, ya que el uso de materiales cementantes suplementarios refina la microestructura, reduce la permeabilidad y aumenta la durabilidad del concreto frente a agentes agresivos (Ndahirwa et al., 2022).

Las cenizas volantes de las centrales eléctricas de carbón y la escoria granulada de alto horno de la producción de acero son reconocidas por mejorar la resistencia y durabilidad

a edades tardías del cemento. No obstante, aunque actualmente estos materiales se encuentran disponibles en diversos países de América Latina, su suministro depende directamente de la actividad de otras industrias, por lo que puede ser limitado o variable en el tiempo (Amran et al., 2021; Kumar et al., 2021; Rafieizonooz et al., 2022; Subathra Devi et al., 2020). En este sentido, materiales como la piedra caliza y la arcilla destacan por su abundancia en la corteza terrestre y por su potencial como fuentes de materiales cementantes suplementarios. La piedra caliza, en particular, es ampliamente utilizada en la producción de cementos mezclados, puesto que mejora la distribución granulométrica, rellena espacios entre partículas, incrementa la densidad de empaquetamiento, estimula la hidratación temprana del cemento Portland y estabiliza la ettringita mediante la formación de monocarboaluminato (Panesar & Zhang, 2020; Zeng et al., 2022). Estas características refuerzan el valor de los MCS como una opción clave para la producción de cementos sostenibles.

A nivel global, el Cemento de Caliza y Arcilla Calcinada (LC³, por sus siglas en inglés) ha surgido como una solución prometedora entre las alternativas de cementos bajos en carbono en desarrollo. Este tipo de cemento, resultado de la combinación de caliza, arcilla calcinada y yeso, ofrece un cementante con propiedades comparables o incluso superiores al cemento Portland tradicional (Scrivener, Martirena, et al., 2018). Más allá de sus atributos técnicos, el LC³ se distingue como una opción más sostenible al permitir una reducción significativa en las emisiones de CO₂. Esto se logra mediante el uso de una menor cantidad de clínker, lo que a su vez reduce las emisiones asociadas con la descomposición del carbonato de calcio presente en la caliza.

Sin embargo, la adopción del LC³ no solo se basa en su capacidad para reducir emisiones, sino también en su desempeño en aplicaciones prácticas, su viabilidad económica y su adaptabilidad a diferentes contextos geográficos y productivos (Kanagaraj et al., 2024). En México, un país con una rica diversidad geológica y una tradición cementera consolidada, el LC³ representa una oportunidad única, ya que la abundancia de caliza y la amplia disponibilidad de arcillas aptas para su calcinación ofrecen condiciones privilegiadas para su implementación a gran escala (Krishnan et al., 2019; Mañosa et al., 2024). Sin embargo, se presentan desafíos que deben abordarse, como la adaptación de

Introducción

las arcillas locales al proceso de producción de LC³ y el estudio de su comportamiento, desempeño y durabilidad en diferentes aplicaciones de proyectos de infraestructura.

Con relación a los tipos de cementos disponibles en el mercado mexicano, el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), en sus especificaciones para cementantes hidráulicos, incluye el Cemento Portland Compuesto (CPC). Este tipo de cementante es obtenido mediante la combinación de Clinker, sulfato de calcio y una variedad de materiales suplementarios, como escoria de alto horno, ceniza volante, caliza, puzolana natural o humo de sílice (NMX-C-414, 2014). Esta diversificación de los cementos disponibles en el mercado, con opciones como el CPC que incluye adiciones minerales, representa un paso importante hacia la sostenibilidad en la industria de la construcción, puesto que fomenta el uso de materiales que reducen parcialmente la dependencia del Clinker.

Además de su composición, los Cementos Portland Compuestos (CPC) se clasifican en el mercado nacional según su clase resistente, lo cual indica la resistencia característica a compresión del concreto elaborado con ellos a los 28 días. Las clases resistentes más comunes son 30 y 40, correspondientes a resistencias de 30 MPa y 40 MPa, respectivamente. Esta clasificación, establecida por la NMX-C-414-ONNCE, (2014), permite orientar su uso en función de las exigencias estructurales y ha facilitado la incorporación de nuevas formulaciones cementantes dentro del marco normativo vigente.

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo evaluar el desempeño de dos tipos de CPC con diferentes contenidos de clinker. Se consideró como referencia un cemento convencional de clase resistente 40, con un contenido de clinker cercano al 80 %. Este será comparado con dos alternativas de menor huella de carbono, ambas de clase resistente 30: una con aproximadamente 60 % de clinker y otra basada en el sistema LC³, con cerca del 50 % de clinker. El análisis se centrará en propiedades clave como la estabilidad volumétrica y la durabilidad, criterios fundamentales para validar su incorporación en el mercado y su aplicación en obras de infraestructura.

Este documento se encuentra estructurado en cinco capítulos. En el Capítulo 1, se presenta el planteamiento del problema, partiendo del contexto general hasta la delimitación puntual del mismo. El **Capítulo 2** aborda el ámbito de la investigación, en el que se

Introducción

definen la hipótesis y los objetivos, tanto generales como específicos. En el **Capítulo 3**, se desarrolla la revisión bibliográfica, que integra los antecedentes y el marco teórico, abarcando temas clave como el Cemento Portland Compuesto, los cementos bajos en carbono, el sistema LC³, la estabilidad volumétrica, la durabilidad del concreto y los mecanismos de corrosión. El **Capítulo 4** describe la metodología experimental empleada, dividida en etapas que incluyen el diseño de mezclas, la evaluación de la estabilidad volumétrica, las propiedades de transporte y los ensayos de corrosión. Finalmente, el **Capítulo 5** presenta los resultados obtenidos en cada una de estas etapas, sirviendo de base para el análisis comparativo de los cementos evaluados y las conclusiones del estudio.

Justificación

El uso sostenible de recursos y la reducción del impacto ambiental en la construcción son imperativos actuales. En este contexto, los cementos con bajo contenido de clínker surgen como una alternativa viable y sostenible al cemento Portland ordinario o CPO. Evaluar las propiedades de cementos de bajas emisiones de carbono es crucial para su incorporación en proyectos de infraestructura, puesto que, según el Foro Económico Mundial, estos cementos pueden reducir las emisiones de CO₂ del sector hasta en un 70%, apoyando el crecimiento urbano sin los altos costos de tecnologías como la captura de carbono (World Economic Forum, 2024a).

En la Figura 1 se ilustra la importancia de incorporar cementos bajos en carbono como estrategia para minimizar el impacto ambiental de la industria de la construcción. El LC³, por ejemplo, emite solo 43 kg de CO₂ por cada 100 kg de cemento, considerablemente menos que los 75 kg de CO₂ emitidos por el Cemento Portland Ordinario (Boanada-Fuchs et al., 2024). En este contexto, en la construcción de un edificio que requiere 100.000 kg de cemento, el uso de CPO generaría 75.000 kg de CO₂, mientras que con LC³ las emisiones se reducirían a 43.000 kg, logrando una disminución de 32.000 kg de CO₂. Esta significativa reducción no solo favorece el desarrollo urbano sostenible, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático, reduciendo la huella de carbono del sector de la construcción.

Al adoptar cementos con bajo contenido de clínker no solo se apuesta por la sostenibilidad, sino que también se abre una ventana para investigar y optimizar sus propiedades. En particular, estudiar la influencia de la reducción del clínker como componente principal del cemento en niveles del 60% y 50% permitirá comprender la durabilidad y la estabilidad volumétrica en concretos diseñados para distintos rangos de resistencia. En este trabajo se plantea una evaluación comparativa entre cementos bajos en carbono del tipo CPC 30 (con 50 y 60% de clínker) y un cemento de referencia de mayor contenido de clínker, el CPC 40 (con aproximadamente 80% de clínker). La elección del CPC 40 representa un punto de referencia de alto clínker frente al cual contrastar el desempeño de las alternativas de menor impacto ambiental.

Justificación

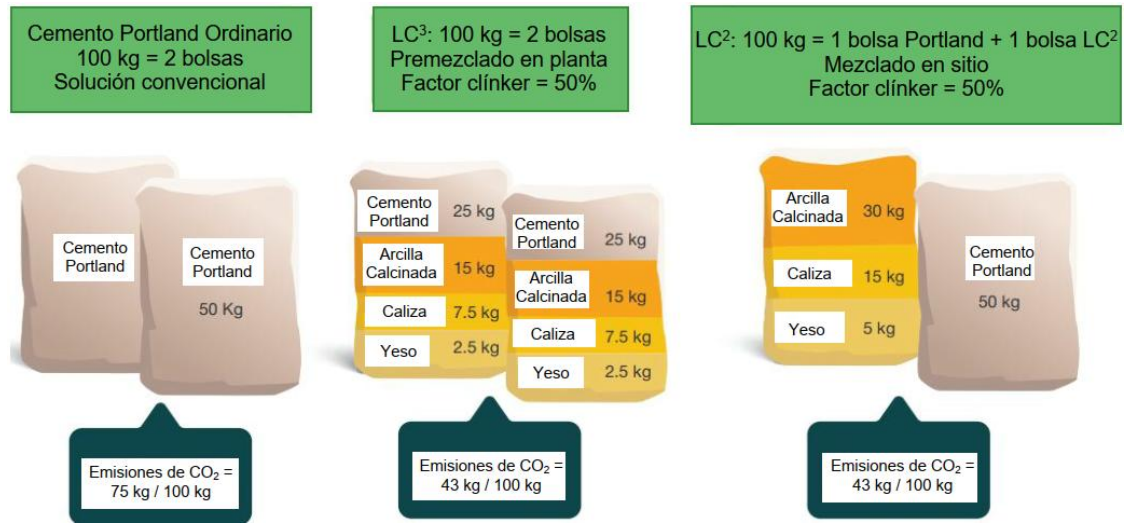


Figura 1. Ilustración de las emisiones de cementos bajos en carbono en comparación al cemento portland ordinario. Fuente: Adaptado de (Boanada-Fuchs et al., 2024)

En términos del alcance de este estudio, tanto los fabricantes actuales de cemento como aquellos que planean ingresar al mercado en el futuro con cementos bajos en carbono obtendrán valiosos conocimientos sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de los CPC con diferentes contenidos de clinker, así como su capacidad para prolongar la vida útil de una estructura. Por otro lado, los constructores podrán identificar parámetros específicos de control de calidad para las obras que utilicen estos nuevos productos producidos en México como cementante.

La originalidad de esta investigación reside en su enfoque, en el escenario donde se desarrolla y en la comparación con el CPC 40R con 80% de Clinker como cemento comercial. Si bien los cementos bajos en carbono se están abriendo camino como tecnología emergente a nivel mundial, en México aún está en una fase temprana de adopción. De hecho, de las 37 plantas de cemento en el territorio nacional, solo una ha incursionado en una fórmula específica para un cemento que reduce las emisiones hasta en un 50% (HOLCIM, 2023). Asimismo, este estudio aporta un nivel de análisis poco habitual en trabajos de tesis, pues la matriz experimental no se limita a la contracción autógena, sino que también considera la contracción por secado y la contracción química. Además, amplía su alcance al evaluar la durabilidad y la resistencia a la corrosión de estructuras de concreto reforzado, lo que subraya la relevancia potencial de estos cementos con bajo contenido de clinker en infraestructuras expuestas a ambientes adversos.

Justificación

A corto y mediano plazo, esta investigación facilitará la adaptación y optimización de mezclas con CPC40R y CPC30R en la industria de la construcción mexicana. Además, al sentar bases sólidas sobre sus propiedades y beneficios, impulsará la adopción en el país de nuevas tecnologías bajas en carbono como el sistema de producción de cemento LC³.

Capítulo 1- Planteamiento del problema

Este capítulo presenta el contexto ambiental y tecnológico que impulsa la transición hacia cementos con bajo contenido de clínker, así como la problemática asociada a su desempeño en condiciones reales. Se define el enfoque de investigación centrado en la evaluación de estabilidad volumétrica y durabilidad de tres tipos de cementos diferenciados por su contenido de clínker, con especial atención en la tecnología LC³ y su aplicación con materiales disponibles en el contexto mexicano.

1.1 Contexto del problema

Según el informe de la *International Energy Agency* sobre las emisiones de CO₂, en 2022, las emisiones globales de CO₂ derivadas de la energía experimentaron un aumento del 0.9%, equivalente a 321 Mt, alcanzando un récord de 36.8 Gt. De ese total, 423 Mt provinieron de la combustión de energía (IEA, 2023). En este contexto, el *World Business Council for Sustainable Development* - WBCSD (2018) señala que el sector cementero se destaca como el tercer mayor consumidor industrial de energía a nivel mundial, siendo el responsable del 7% del consumo energético y posicionándose como el segundo mayor emisor de CO₂, contribuyendo con aproximadamente el 7% de las emisiones globales.

El cemento es un componente esencial en la producción de concreto, material ampliamente utilizado en la edificación de viviendas, escuelas, hospitales e infraestructuras, componentes vitales para el bienestar social y económico de una región. Sin embargo, la fabricación de una tonelada de cemento puede resultar en la emisión de entre 0.6 y 0.9 toneladas de CO₂, dependiendo del contenido de clínker y otros factores del proceso (Tkachenko et al., 2023). Por lo tanto, la industria del cemento juega un papel importante en la reducción de la contaminación y el desarrollo sostenible.

En línea con los objetivos de desarrollo sostenible, que promueven la acción climática, ciudades sostenibles y un consumo y producción responsable (United Nations, 2023), la industria del cemento enfrenta el desafío de transitar hacia una economía baja en carbono y alcanzar la neutralidad climática para 2050. Entre las estrategias más destacadas para lograrlo se encuentran: la sustitución parcial del clínker con materiales cementantes suplementarios; la innovación en los procesos de producción desde el punto de vista

energético, mediante la optimización del consumo de combustibles fósiles, la incorporación de combustibles alternativos y el uso de fuentes renovables; así como la adopción de cementos de bajas emisiones de carbono, tales como el Cemento de Caliza y Arcilla Calcinada (LC³).

En el contexto mexicano, una de las vías más relevantes para reducir el impacto ambiental del cemento ha sido el desarrollo y comercialización de Cementos Portland Compuestos (CPC), los cuales incorporan adiciones minerales como escoria granulada de alto horno, puzolanas naturales o artificiales, y cenizas volantes. Recientemente, también se ha comenzado a introducir en el mercado nacional una nueva generación de cementos con bajo contenido de clínker, diseñados específicamente para reducir su huella de carbono, ya sea mediante procesos de coprocesamiento de residuos como combustibles alternativos en hornos cementeros, formulaciones híbridas que combinan clínker con materiales cementantes suplementarios de diversa naturaleza (caliza, arcillas calcinadas, puzolanas naturales o artificiales) o tecnologías de producción que optimizan el consumo energético y las emisiones asociadas al clínker (HOLCIM, 2023).

Pese al avance tecnológico, el desempeño de estos nuevos cementos con bajo contenido de clínker aún no ha sido plenamente evaluado en condiciones representativas del entorno constructivo mexicano. En este contexto, dichas condiciones aluden a la producción de concretos de bajas y altas resistencias elaborados con cementos CPC 30 y CPC 40, así como al desempeño de mezclas producidas con materias primas locales de México, lo que resulta especialmente relevante considerando que algunos de los estudios previos sobre cementos de bajo clínker —como los relacionados con LC³— se han desarrollado utilizando arcillas y calizas provenientes de otras regiones del mundo (Avet et al., 2019; Krishnan et al., 2019; Nguyen et al., 2022; Pillai et al., 2019; Zunino, 2020). Por tanto, se vuelve necesario realizar investigaciones que permitan comparar su comportamiento frente a cementos de alto clínker como el CPC 40, utilizando materiales locales y métodos de diseño de mezclas acordes con las necesidades del sector. Esta evaluación integral es clave para determinar su viabilidad técnica y desempeño, así como su potencial de implementación en el mercado.

1.2 Definición del problema

A nivel global, el consumo per cápita de cemento varía significativamente entre regiones. Mientras que en Europa y Asia se registran promedios anuales de entre 400 y 500 kg por habitante, en América Latina y el Caribe esta cifra se reduce a aproximadamente 250 kg (Villagrán-Zaccardi et al., 2022). Esta diferencia no necesariamente implica una reducción futura en el consumo de cemento en Europa, sino que refleja el hecho de que se trata de regiones con infraestructura ya consolidada, donde la demanda tiende a estabilizarse. En contraste, en América Latina y el Caribe el proceso de urbanización y el desarrollo de nuevos proyectos de infraestructura sugieren un crecimiento más pronunciado en la demanda de cemento en los próximos años.

En respuesta a los desafíos ambientales que enfrenta la industria cementera, en México se ha comenzado a introducir una nueva generación de cementos con bajo contenido de clínker. Para este trabajo de investigación se seleccionaron productos con reducciones significativas en su proporción de clínker, llegando al 60% e incluso al 50%. Esta tendencia constituye un avance hacia la descarbonización del sector; no obstante, la disminución de clínker también puede afectar propiedades clave del concreto, lo que hace necesario evaluar con mayor rigor su comportamiento (Black, 2016; H. Zhang et al., 2023).

Con este propósito, la investigación se centra en tres cementos representativos: un cemento convencional con aproximadamente 80% de clínker, un segundo con 60% y un tercero con 50%, correspondiente al sistema LC³. Aunque este último se perfila como una de las alternativas con mayor potencial ambiental, aún existen vacíos de conocimiento relacionados con su desempeño, particularmente en aspectos como la estabilidad volumétrica y la corrosión (Ben Haha et al., 2023b; Nguyen et al., 2022; Spragg et al., 2023).

La incorporación de estos cementos en el mercado mexicano abre un espacio estratégico de análisis, ya que sus propiedades dependen no solo del nivel de clínker, sino también de las adiciones minerales utilizadas y de los materiales locales empleados en su producción (Avet & Scrivener, 2018; Blouch et al., 2023; Zolfagharnasab et al., 2021). En este contexto, resulta especialmente relevante estudiar cementos tipo CPC 30, incluyendo el

Capítulo 1- Planteamiento del problema

LC³ elaborado a partir de arcillas calcinadas mexicanas, cuya presencia en el mercado nacional es todavía limitada y en proceso de consolidación. Por ello, este trabajo propone una evaluación experimental comparativa del desempeño de concretos fabricados con los tres tipos de cemento mencionados.

Capítulo 2- Hipótesis y objetivos

Este capítulo establece el marco que sustenta la presente investigación. Se expone la justificación del estudio, destacando la necesidad de reducir las emisiones de carbono mediante el uso de cementos con bajo contenido de clínker. Se plantea la importancia de evaluar su desempeño en concretos, especialmente en lo relacionado con la estabilidad volumétrica y la durabilidad. Además, se establece la hipótesis de trabajo y se formulan los objetivos generales y específicos que guían el desarrollo de la investigación.

2.1 Hipótesis

Manteniendo fija la relación agua/cementante, los cementos con bajo contenido de clínker (aproximadamente 60% y 50%), como alternativa de bajo carbono frente al CPC 40R (80% de clínker), permitirán la producción de concretos con desempeño superior en estabilidad volumétrica y mayor durabilidad en comparación con los concretos actualmente empleados en la industria de la construcción en México.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Determinar el desempeño de concretos con cementos de bajo contenido de clínker (60% y 50%) como alternativa de sostenibilidad mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas, estabilidad volumétrica y durabilidad, en comparación con el cemento de 80% de clínker como referencia.

2.2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar las propiedades mecánicas de concretos elaborados con cementos que contienen 50%, 60% y 80% de clínker, mediante ensayos de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión, para el análisis del desempeño de los sistemas de bajo contenido de clínker en relación con un concreto con alto contenido de clínker diseñado para alcanzar resistencias objetivo de 20, 40, 60 y 70 MPa.
2. Valorar la estabilidad volumétrica de concretos elaborados con cementos que contienen 50%, 60% y 80% de clínker, mediante ensayos de retracción química,

autógena y por secado, con el propósito de conocer el efecto de la reducción del contenido de clínker sobre las deformaciones volumétricas del concreto.

3. Valorar el efecto de agentes agresivos ambientales en concretos elaborados con cementos que contienen 50%, 60% y 80% de clínker, a través de ensayos de transporte de iones cloro, resistividad eléctrica y carbonatación, para la evaluación del comportamiento de cada agente y su incidencia en el deterioro de concretos con estos tipos de cemento.
4. Analizar el efecto de la exposición a cloruros sobre la corrosión del acero de refuerzo embebido en concretos fabricados con cementos que contienen 50%, 60% y 80% de clínker, utilizando técnicas electroquímicas como el potencial de corrosión y la resistencia a la polarización lineal, para la identificación de diferencias en las tasas de corrosión y en el comportamiento electroquímico del acero.
5. Estimar la vida útil de elementos de concreto reforzado elaborados con cementos de 50%, 60% y 80% de clínker, a través de parámetros como la velocidad de carbonatación, el umbral de cloruros, el coeficiente de difusión de cloruros y el Factor de forma (formation factor), con el propósito de comprender la influencia del contenido de clínker en la durabilidad a largo plazo de las estructuras.

Capítulo 3- Revisión bibliográfica

Este capítulo presenta una revisión del conocimiento científico relacionado con los cementos de bajo contenido de clínker, con énfasis en el cemento LC³. Se compone de dos secciones principales: antecedentes y marco teórico. En la primera, se analizan las investigaciones más relevantes e influyentes sobre estabilidad volumétrica y durabilidad del LC³, identificadas mediante un análisis bibliométrico. En la segunda, se abordan los fundamentos técnicos que sustentan el estudio, incluyendo conceptos clave sobre propiedades mecánicas, mecanismos de deterioro, transporte de iones, técnicas de evaluación electroquímica y parámetros como el formation factor. Esta revisión sirve como base para el planteamiento metodológico y experimental de la investigación.

3.1 Antecedentes

En los últimos años, ha habido un notable aumento en la investigación y desarrollo de cementos bajos en carbono, impulsado por la necesidad urgente de reducir las emisiones de CO₂ en la industria de la construcción (Véase Figura 2). El cemento Portland se produce a partir de clínker obtenido por la calcinación de material calcáreo y arcilloso, un proceso que libera grandes cantidades de CO₂ (Sousa & Bogas, 2021). Como alternativa, se han desarrollado nuevos cementos cuya composición difiere de la del Portland tradicional, ya sea mediante el uso de adiciones minerales (Kapeluszna et al., 2021), la formulación de cementos con menor proporción de clínker (Antunes et al., 2022), o la implementación de sistemas de materiales activados alcalinamente (Pol Segura et al., 2023). La creciente cantidad de publicaciones científicas y proyectos de investigación en este campo refleja el compromiso de la comunidad científica y de la industria para enfrentar los desafíos del cambio climático mediante la innovación en materiales de construcción.

El cemento con bajo contenido de Clinker ha emergido como un material de construcción sostenible, destacando la escoria de alto horno (GGBFS) como un componente clave. La escoria granulada de alto horno (GGBFS) se obtiene como subproducto de la fabricación de hierro en altos hornos, cuando la ganga y los fundentes se funden y, al enfriarse rápidamente con agua, se vitrifican formando un material de naturaleza amorfa. Este subproducto, tras ser molido finamente, puede emplearse como componente clave en

cementos con bajo contenido de clinker, dado su carácter hidráulico latente. Aunque la GGBFS reacciona lentamente con el agua, su hidratación puede acelerarse en presencia de activadores como la portlandita liberada durante la hidratación del cemento Portland. Su reactividad depende de factores como la finura, grado de cristalinidad, composición química, nivel de reemplazo y naturaleza del activador utilizado (Black, 2016). En particular, materiales más finos, con mayor superficie específica, tienden a desarrollar una reactividad más rápida.

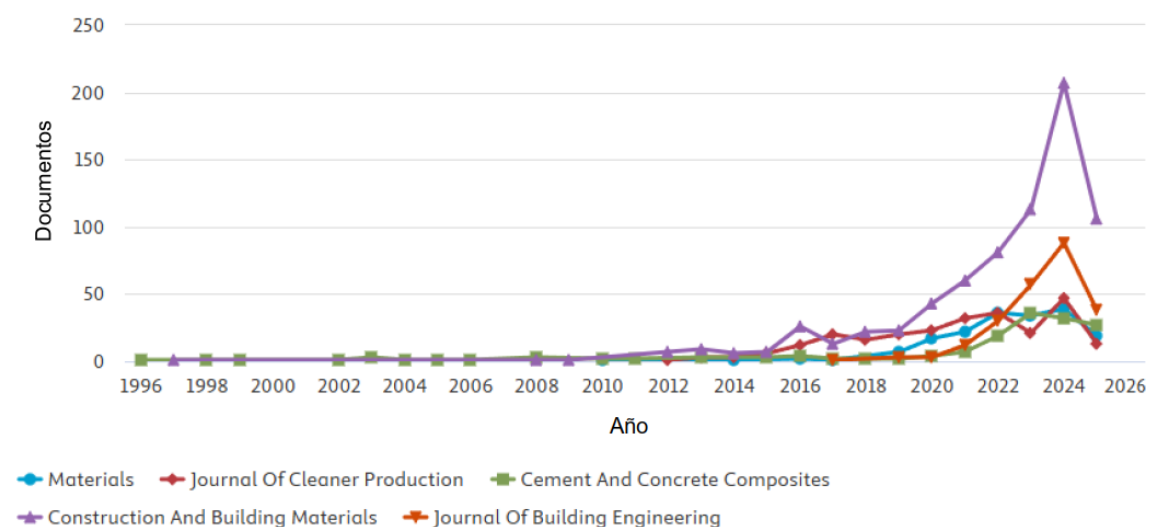


Figura 2. Número de documentos publicados anualmente por diversas revistas científicas sobre cementos de bajo carbono. Fuente: Scopus.

El reemplazo de Clinker con GGBFS puede mejorar la trabajabilidad del concreto gracias a las superficies lisas de las partículas de GGBFS, aunque no afecta significativamente el sangrado y la segregación. Sin embargo, los tiempos de fraguado pueden verse afectados; los tiempos de fraguado final se retrasan debido a la menor reactividad de las escorias en comparación con el clinker, especialmente a bajas temperaturas y altos niveles de reemplazo (Black, 2016; Pan et al., 2020). Los tiempos de fraguado inicial pueden variar, siendo retrasados, inalterados o incluso acortados dependiendo del nivel de reemplazo.

De acuerdo con Black (2016) el desarrollo de la resistencia en los cementos con escoria es más gradual que en los sistemas con cemento tipo I debido a la menor reactividad de la escoria. Sin embargo, típicamente, para los 28 días, los cementos con escoria han desarrollado resistencias comparables a los sistemas equivalentes de cemento

convencional, y a plazos más largos, pueden exhibir resistencias superiores. La finura de la escoria también impacta en el desarrollo de la resistencia a compresión, con escorias más finas contribuyendo más significativamente a la resistencia en edades tempranas (Ben Haha et al., 2023a).

La hidratación de la escoria dentro de las mezclas de cemento modifica la microestructura de la pasta endurecida, pasando de una morfología de C-S-H fibrilar a una en láminas, y reduciendo la porosidad capilar, lo que disminuye la permeabilidad (Ben Haha et al., 2023a; Black, 2016). Esto ayuda a prevenir la entrada de especies agresivas, mejorando potencialmente la durabilidad del concreto. Sin embargo, durante la hidratación de la escoria, la portlandita se consume, lo que domina sobre la reducción de la permeabilidad, resultando en una menor resistencia a la carbonatación en muchos sistemas de cemento con escoria comparados con sistemas equivalentes de cemento ordinario.

En lo relacionado con la penetración de cloruros en el concreto reforzado, la estructura de poros más fina de las pastas de cemento con escoria, que reduce la permeabilidad, es beneficiosa para resistir el ingreso de estos iones. Los cementos con escoria han demostrado mejorar la resistencia debido a la composición química del GGBFS, donde el contenido elevado de aluminato en la escoria fija los cloruros como sal de Friedel dentro de la matriz de cemento endurecido (Ben Haha et al., 2023a). Al igual que con el ataque de cloruros, la sustitución de Clinker con GGBFS mejora la resistencia al ataque de sulfatos debido a las siguientes razones explicadas por Black (2016):

- Dilución del Clinker: menores contenidos de C_3A y C_3S resultan en menos hidratos de aluminato y portlandita para reaccionar con los sulfatos.
- Consumo de portlandita durante la hidratación del Clinker: menos portlandita disponible para formar yeso o proporcionar calcio para formar ettringita.
- Menor permeabilidad: los sistemas mezclados usualmente exhiben una estructura de poros más fina, reduciendo la permeabilidad y mejorando así la resistencia.

La ceniza volante (CV), también conocida como ceniza de combustible pulverizado o PFA en el Reino Unido, es un subproducto de la combustión de carbón pulverizado en plantas de energía térmica. Esta ceniza está compuesta por partículas finas que son expulsadas del horno junto con los gases de combustión, y se recolectan mediante precipitadores

electrostáticos u otros equipos de filtración de partículas. La ceniza que cae al fondo del horno se denomina ceniza de fondo. La ceniza volante típicamente constituye alrededor del 85% de las cenizas producidas, mientras que la ceniza de fondo representa el 15% restante. En 2011, la producción global de productos de combustión del carbón fue de 780 Mt, de los cuales aproximadamente 660 Mt eran ceniza volante.

Al igual que la escoria de alto horno, la ceniza volante afecta las propiedades del concreto tanto en etapas tempranas como tardías, incluyendo, trabajabilidad, tiempo de fraguado, desarrollo de la resistencia y durabilidad. Los efectos precisos dependen de la ceniza volante en cuestión, ya que factores como la composición química y mineralógica, el contenido de carbón y la finura de las partículas pueden influir en el desempeño (Antunes et al., 2022). Típicamente, la cohesión mejora con la adición de ceniza volante debido a la ligera carga negativa en la superficie de los minerales aluminosilicatos, lo que mantiene la dispersión de las partículas en la pasta de cemento en estado fresco (Ben Haha et al., 2023a; Black, 2016). Este efecto contribuye al aumento comúnmente observado en la trabajabilidad de las mezclas de cemento y ceniza volante.

Un factor mayor en la mejora de la trabajabilidad del concreto es la naturaleza esférica de las partículas de ceniza volante, que actúan como lubricante. Se estima que un reemplazo del 10% del cemento con ceniza volante tiene un efecto equivalente en la compactación a aumentar el contenido de agua en un 3-4%. Sin embargo, algunas cenizas muy finas o con un alto contenido de carbón no quemado pueden disminuir la trabajabilidad. Asimismo, la composición de la ceniza volante puede afectar significativamente los tiempos de fraguado; en general, se acepta que las cenizas de Clase F retrasan el fraguado (Antunes et al., 2022; Black, 2016). Otro beneficio considerable del uso de ceniza volante en concreto es la reducción marcada en la generación de calor, en comparación con la generación de calor en etapas tempranas estimada en un 15-30% de la del cemento Portland. Esto ha demostrado ser particularmente beneficioso para el concreto masivo, y la primera aplicación de concreto con ceniza volante en el Reino Unido fue para tales propósitos durante la construcción de las presas Lednock, Clatworthy y Lubreoch en la década de 1950 (Black, 2016).

La presencia de ceniza volante en una mezcla de concreto también afecta el desarrollo de la resistencia. Las cenizas de Clase C, debido a su mayor contenido de calcio, pueden contribuir parcialmente a la hidratación temprana y, por tanto, no afectan significativamente el desarrollo inicial de la resistencia. En cambio, las cenizas de Clase F, con bajo contenido de calcio y mayor proporción de sílice y alúmina, participan principalmente en reacciones puzolánicas que se manifiestan a largo plazo (Ben Haha et al., 2023a; Black, 2016). Esta reacción, al ser más lenta que las reacciones de hidratación del Clinker de cemento, conduce a menores resistencias en etapas tempranas, pero a resistencias mayores en etapas tardías.

En lo relacionado a la durabilidad, al igual que en los sistemas mencionados anteriormente, el consumo de portlandita en la reacción puzolánica para producir C-S-H, con una reducción asociada en la porosidad y permeabilidad, presenta una doble faceta respecto a la resistencia a la carbonatación. Numerosos estudios (Antunes et al., 2022; Ben Haha et al., 2023a; Black, 2016) han mostrado que la resistencia a la carbonatación de las mezclas de cemento y ceniza volante es menor que la de las mezclas de cemento puro. Al igual que las mezclas de cemento y GGBFS, la estructura de poros más fina de las mezclas de cemento y ceniza volante reduce la permeabilidad y, por lo tanto, ayuda a resistir el ingreso de iones cloruro. Además, el alto contenido de alúmina de muchas cenizas volantes aumenta la capacidad de fijación de cloruros, de modo que los iones cloruro pueden ser fijados como sal de Friedel (Black, 2016). Sin embargo, la tasa reducida de hidratación en comparación con la escoria significa que, al igual que con la carbonatación y la resistencia, la mejora del rendimiento de las mezclas de cemento y ceniza volante depende de un curado prolongado.

La resistencia de las mezclas de cemento y CV al ataque de sulfatos es mixta, con algunos sistemas mostrando mejor rendimiento con la adición de CV y otros mostrando rendimiento disminuido. Las mejoras generalmente se deben a las menores permeabilidades provocadas por la reacción puzolánica. Sin embargo, los aumentos en los contenidos de aluminio y hierro de la CV pueden causar problemas debido a la implicación de estos elementos en la formación de ettringita (Antunes et al., 2022; Black, 2016). Dado

que se requiere una fuente de calcio para la formación de ettringita, el contenido de calcio de la CV parece ser importante.

El polvo de caliza (LS) es ampliamente utilizado en cementos de bajo contenido de clínker debido a su disponibilidad y bajo costo. Su efecto en la retracción del concreto depende de su tamaño de partícula y del contenido de LS en la mezcla, así como de la interacción con otros materiales cementantes suplementarios ricos en alúmina (Black, 2016). La presencia de LS favorece la formación de carboaluminatos de calcio y otros productos de hidratación adicionales, lo que aumenta el volumen total de productos respecto al cemento sin caliza. Este aumento de volumen puede inducir un incremento de la retracción química del concreto, dependiendo de la finura de las partículas de LS (Black, 2016; D. Wang et al., 2018).

De acuerdo con De Weerd et al. (2011), durante la hidratación, la pasta de cemento ejerce una contracción química, ya que el volumen de los productos de hidratación es menor que el volumen de los reactivos. Como se observa en la Figura 3, El OPC-LS y el OPC-FA-LS tienen una contracción química ligeramente superior que sus equivalentes sin caliza, el OPC y el OPC-FA, lo que indica que, cuando hay caliza presente, se forman más productos de hidratación o, alternativamente, se forman hidratos con un volumen que varía en relación con los reactivos que los hidratos habituales.

Cuando las partículas de LS son finas, pueden actuar como sitios de nucleación, promoviendo la hidratación del cemento y aumentando la cantidad de productos hidratados, lo que puede incrementar la retracción autógena. Por el contrario, si el tamaño de las partículas de LS es similar o mayor que el del cemento, su incorporación ejerce principalmente un efecto de dilución: aumenta el espacio entre las partículas de cemento, reduce las tensiones capilares y disminuye la retracción autógena del concreto (Bentz et al., 2011). De esta manera, el efecto del LS sobre la contracción y retracción del concreto depende de un balance entre la generación de nuevos productos de hidratación y la dilución física que introduce en la matriz.

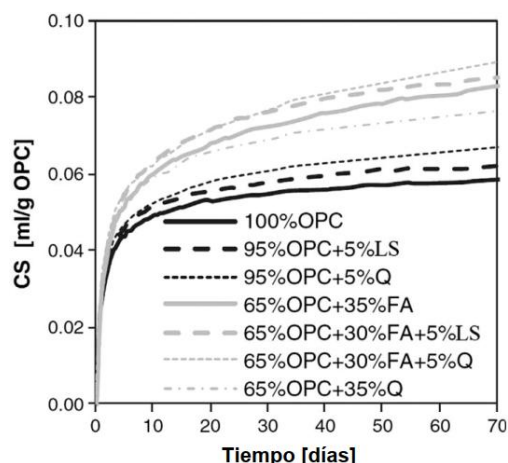


Figura 3. Efectos del contenido de OPC sobre la retracción química. Fuente: Adaptado de (De Weerd et al., 2011).

La incorporación de LS (finura de Blaine: $638 \text{ m}^2/\text{kg}$) para reemplazar del 0 al 45% en peso de cemento resultó en un aumento significativo de la profundidad de carbonatación del concreto, como se detalla en la Figura 4. Este incremento en la profundidad de carbonatación se debe principalmente a dos efectos del LS: en primer lugar, el efecto de dilución, que implica una reducción en la cantidad de cemento disponible para reaccionar con el dióxido de carbono; en segundo lugar, efectos químicos, donde el LS puede consumir hidróxido de calcio (CH) durante la reacción con la fase de aluminato presente en el cemento (Meddah et al., 2014). Estos procesos combinados contribuyen a una mayor exposición del concreto al CO_2 presente en el ambiente, aumentando así la profundidad de carbonatación observada en las pruebas experimentales.

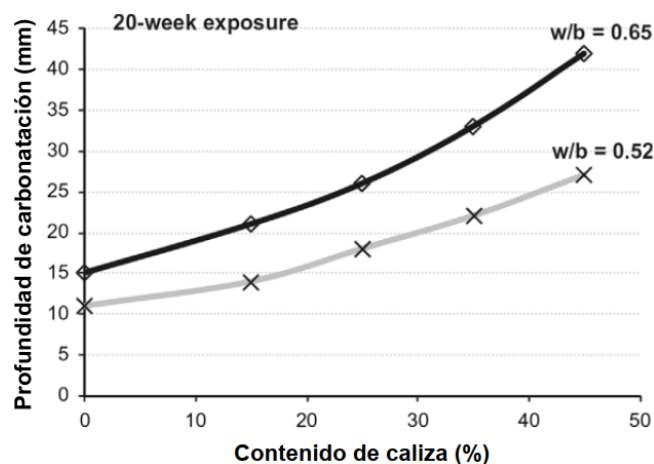


Figura 4. Efecto del contenido de polvo de caliza en la profundidad de carbonatación del concreto. Fuente: Adaptado de (Meddah et al., 2014).

Uno de los principales cementos bajos en carbono conocidos actualmente es el LC³, el cual por sus siglas en inglés es un cemento que resulta de la combinación de bajo contenido de clinker, arcillas calcinadas y piedra caliza triturada. El estudio de las arcillas calcinadas como puzolanas tomó impulso en 2004, gracias a colaboraciones entre la Profesora Karen Scrivener de la EPFL en Suiza y el Profesor Fernando Martirena de la UCLV en Cuba. Como resultado de este intercambio, en 2005 surgió un proyecto financiado por la *Swiss National Science Foundation* y la *Swiss Agency of Development and Cooperation* (EPFL, 2023). Hasta 2008, este proyecto se dedicó a investigar las aplicaciones potenciales de estas arcillas en la producción de cementos. La iniciativa no solo se centró en la innovación de materiales, sino también en evaluar su impacto ambiental y determinar su factibilidad económica en la producción industrial.

Posteriormente, entre 2009 y 2012, un segundo proyecto enfocó sus esfuerzos en cementos con mezcla ternaria de arcilla calcinada y caliza, resultando en el LC³ tal y como se le conoce actualmente (EPFL, 2023). Desde ese entonces, la tecnología LC³ ha sido validada, mostrando no solo su rentabilidad económica sino también su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ en el sector cementero. Este avance ha capturado la atención de investigadores a nivel mundial, quienes han profundizado en las propiedades y aplicaciones del LC³.

Con el fin de identificar las investigaciones más relevantes sobre el desempeño del cemento LC³, se realizó un análisis bibliométrico utilizando la base de datos Scopus y la herramienta VOSviewer. Este análisis permitió reconocer a los autores más citados, las revistas con mayor impacto y los enfoques predominantes en torno a la estabilidad volumétrica (véase Figura 5) y la durabilidad (véase Figura 6) de este nuevo tipo de cemento. A partir de estos criterios, se seleccionaron los artículos más representativos, los cuales se describen a continuación.

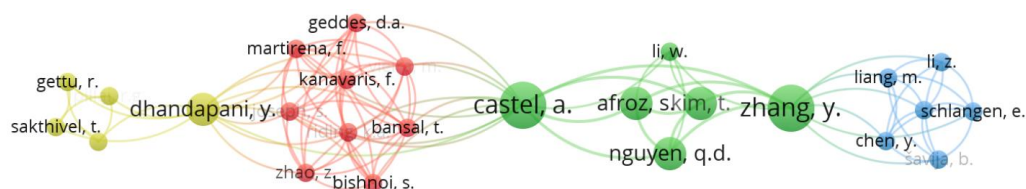


Figura 5. Principales autores que investigan sobre la estabilidad volumétrica del LC³. Análisis bibliométrico utilizando la base de datos de Scopus. Fecha de consulta: agosto 2025.

Las investigaciones sobre el cemento LC³ destacan su notable capacidad de reducción de emisiones en comparación con el CPO. El LC³ permite disminuir el uso de clínker hasta en un 50%. Materiales adicionales, como la piedra caliza triturada y el yeso, no contribuyen con emisiones de CO₂ al proceso, y la calcinación de la arcilla demanda un 20% menos de energía térmica. Esto se traduce en una disminución de emisiones cercana al 40% (Sharma et al., 2021). Es crucial entender que la mayor parte de las emisiones en la producción de cemento provienen de la descomposición de la piedra caliza durante la clinkerización, y no del calentamiento a 1450°C. En este proceso, el carbonato de calcio (CaCO₃) en la piedra caliza se descompone en óxido de calcio (CaO) y CO₂.

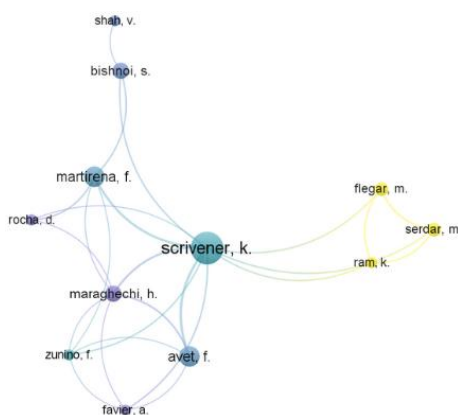


Figura 6. Principales autores que investigan sobre la durabilidad del LC³ como cementante. Análisis bibliométrico utilizando la base de datos de Scopus. Fecha de consulta: agosto 2025.

Un análisis económico del LC³ en la India consideró aspectos como la disponibilidad de arcilla y los costes relacionados con su procesamiento, calcinación, transporte y el clínker. La rentabilidad de LC³, en comparación con OPC y CPC, también se ve influenciada por la disponibilidad y calidad de las cenizas volantes. Por ende, la factibilidad comercial del LC³ se ve determinada por la ubicación de la fábrica y la tecnología aplicada (Joseph et al., 2016). En este contexto, se evidenció la competitividad económica del LC³ frente al OPC y CPC basado en ceniza volante en la mayoría de los escenarios. Esto concuerda con un estudio para el mercado cubano (Sánchez Berriel et al., 2016), que resaltó las ventajas económicas del LC³ en la reducción de costos asociados a la producción de cemento.

Desde el punto de vista técnico, la Figura 7 ilustra que el LC³ posee una resistencia a la compresión similar o incluso superior al OPC tras 28 días de curado, corroborando lo estipulado por Avet et al. (2019).

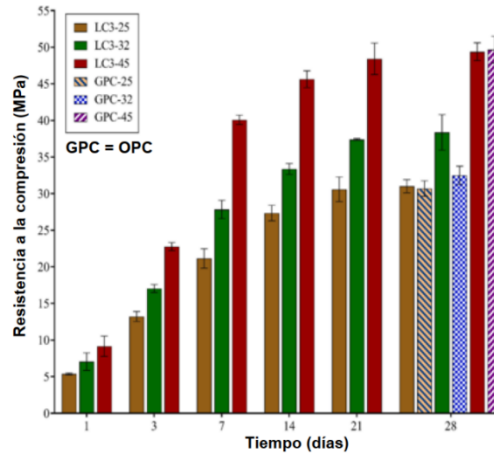


Figura 7. Evolución de la resistencia a la compresión a 28 días de los concretos LC³ y resistencia a la compresión del OPC a 28 días como referencia. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).

En el estudio en mención, se observó un notable incremento en la resistencia a compresión del concreto con LC³ desde el primer día hasta el séptimo. Si bien a los 3 días la ganancia de resistencia aún no resulta significativa, a los 7 días esta alcanzó más del 70% de la registrada a los 28 días, lo que indica un desarrollo de resistencia comparable al de concretos convencionales a edades tempranas. Por su parte, la Figura 8 refleja el crecimiento en la resistencia a la tracción del concreto LC³ durante el mismo período, mostrando un patrón de desarrollo similar entre ambas resistencias, donde el 70% se alcanza al séptimo día.

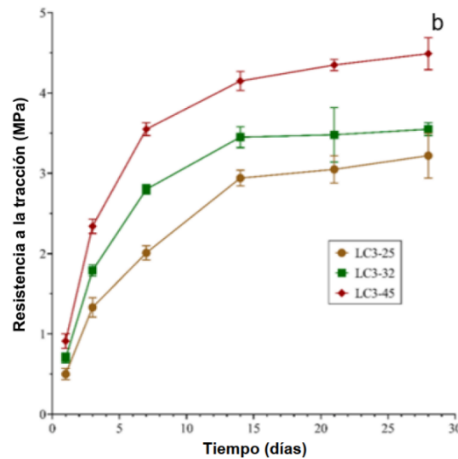


Figura 8. Evolución de la resistencia a la tracción a 28 días de los concretos LC³. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).

En estudios previos sobre el módulo de elasticidad de concretos con LC³, Dhandapani et al. (2018) evaluó especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura siguiendo la norma ASTM C469, utilizando una máquina de compresión de 3000 kN con precisión de $\pm 1\%$. Para la determinación del módulo elástico, los especímenes se cargaron hasta el 40% de su resistencia a compresión en tres ciclos, y la pendiente de la curva carga-desplazamiento en el tercer ciclo se registró como el módulo de elasticidad estático. Como lo indica la Figura 9, los resultados indicaron que el módulo de elasticidad de los concretos con LC³ fue comparable al de mezclas fabricadas con otros sistemas cementantes convencionales, lo que sugiere que los concretos con LC³ pueden ofrecer características mecánicas similares y ser aptos para aplicaciones estructurales.

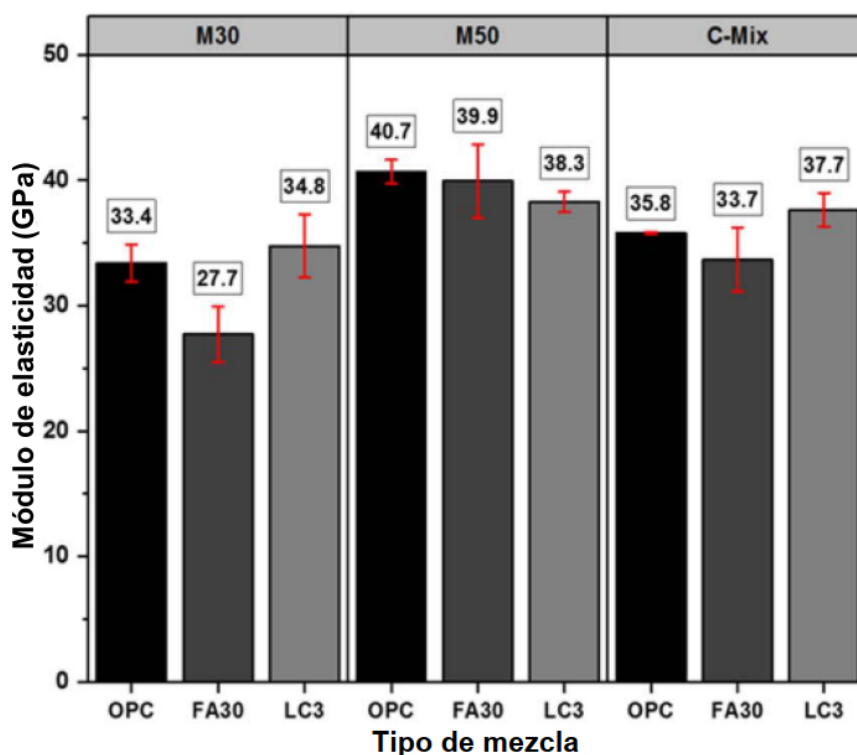


Figura 9. Módulo de elasticidad de concretos con CPO, FA:CV y LC3 como cementantes.

Fuente: (Dhandapani et al., 2018)

En lo que respecta a la estabilidad volumétrica, en estudios sobre retracción química, Afroz, Zhang, et al. (2023) evaluaron pastas con diferentes contenidos de ligante hasta 170 días. En la Figura 10 se evidencia que la mezcla de control se estabilizó después de aproximadamente 50 días. Por su parte, la pasta 30F, con 30% de ceniza volante, mostró la contracción química más baja durante los primeros 20 días, incrementándose

posteriormente a un ritmo lento, lo que evidencia un comportamiento puzolánico tardío; hacia los 84 días, su retracción química parecía superar la del control. En contraste, la pasta 44L, con 44% de reemplazo que combina arcilla calcinada y caliza (LC^3), experimentó un aumento más rápido de la contracción química en los primeros 20 días, alcanzando a estabilizarse a esa edad y presentando la contracción química más baja al final del período de medición. Estos resultados destacan que la naturaleza y proporción de los cementantes alternativos influyen significativamente en la evolución temporal de la retracción química, con LC^3 mostrando un comportamiento inicial más rápido pero menor retracción a largo plazo en comparación con mezclas con ceniza volante.

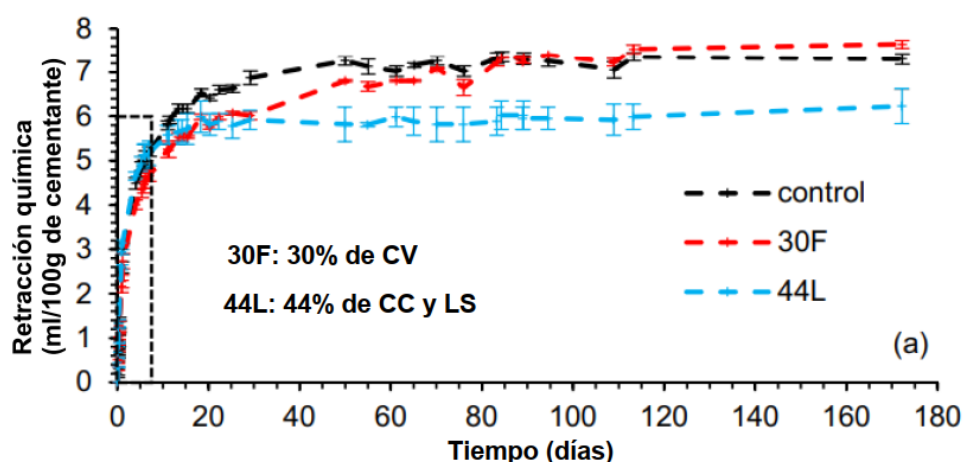


Figura 10. Retracción química de pastas de cementante hasta los 170 días de evaluación.

En cuanto a la retracción por secado, Nguyen et al. (2022) evaluó prismas de concreto sumergidos durante 7 días en agua con cal y posteriormente expuestos a condiciones de secado. Se observó que, en edades tempranas, los concretos LC^3 mostraron deformaciones por retracción por secado ligeramente superiores en comparación con concretos convencionales de similar resistencia; por ejemplo, las mezclas de 45 MPa presentaron mayores retracciones iniciales hasta los 40 días. Sin embargo, a edades mayores, las diferencias entre LC^3 y los concretos convencionales se estabilizaron, alcanzando valores comparables a los 90–100 días. Estos resultados sugieren que, para concretos de igual resistencia, tanto la retracción total como la retracción por secado dependen principalmente de la relación agua/cementante más que de la composición del cemento, confirmando que los materiales LC^3 pueden presentar un desempeño similar al de los sistemas cementantes tradicionales en cuanto a retracción por secado a largo plazo.

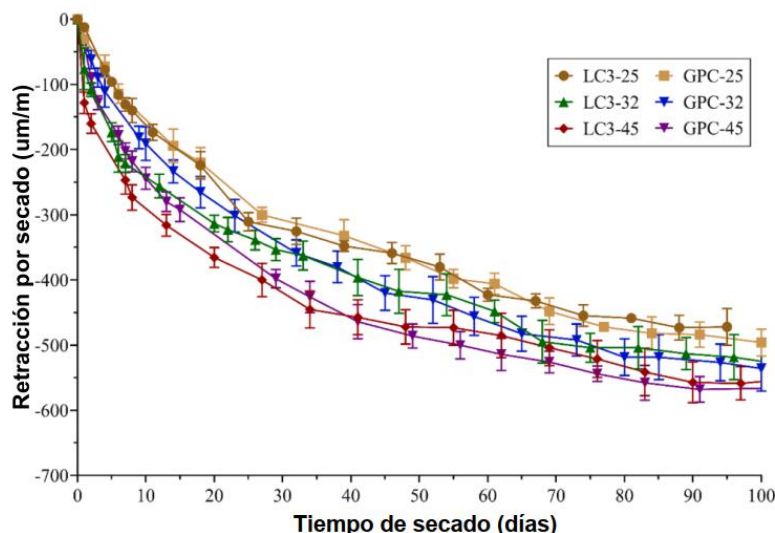


Figura 11. Evolución de la retracción por secado en los concretos hasta los 100 días. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).

Por otra parte, la Figura 12 ilustra que los concretos basados en LC³ presentan retracciones autógenas hasta tres veces mayor en comparación a aquellos con OPC.

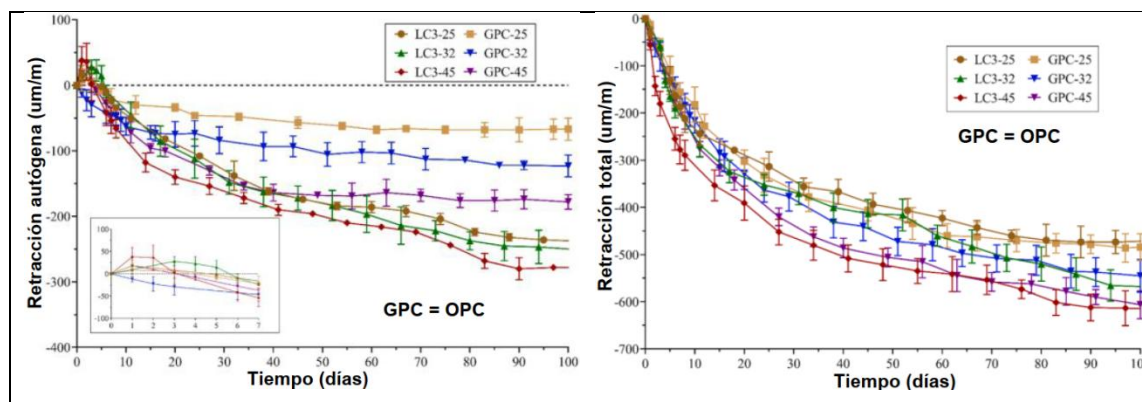


Figura 12. Evolución de la retracción autógena y total hasta 100 días. Fuente: Adaptado de Nguyen et al. (2022).

Algunas investigaciones (Nguyen et al., 2022), sostienen que esta particularidad se debe al refinamiento en la estructura de poros provocado por la incorporación de arcilla calcinada y piedra caliza. Dhandapani et al. (2018) llegaron a conclusiones parecidas y sugieren que este comportamiento puede explicarse por el proceso de hidratación prolongado del LC³. Las interacciones continuas entre el cemento, la arcilla calcinada y la piedra caliza a nivel microestructural derivan en una retracción autógena a largo plazo.

Sin embargo, ambos grupos de investigadores coinciden en que el mecanismo subyacente a la retracción de los concretos LC³ en etapas tempranas aún no ha sido establecido completamente. Por consiguiente, resulta fundamental abordar en futuras investigaciones las diversas formas de retracción presentes en el LC³.

El fenómeno de la retracción autógena es un aspecto que se destaca como uno de los temas menos explorados según la literatura existente (G. Y. Zhang et al., 2023). La necesidad de una comprensión más profunda se fundamenta en la importancia de conocer los distintos grados de retracción que puede experimentar el concreto con LC³ para diferentes niveles de resistencia y optimizar las propiedades del este cemento para su aplicación en la construcción. Garantizar la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de las estructuras construidas con este material innovador subraya la importancia de abordar este vacío de conocimiento y avanzar en la comprensión de los mecanismos subyacentes de la retracción autógena del LC³.

En relación con las propiedades de transporte y durabilidad, la Figura 13 muestra que los concretos basados en LC³ presentan una resistividad destacada. Esta característica surge del refinamiento en la estructura porosa del material, la cual está intrínsecamente ligada al método de trituración y calcinación de las arcillas. Dhandapani et al. (2018) señalan que los elementos estructurales fabricados con LC³ poseen una resistencia a la corrosión sobresaliente. Este comportamiento puede entenderse considerando que la resistividad es inversamente proporcional a la conductividad: altas resistividades denotan bajas conductividades y, consecuentemente, menores riesgos de corrosión. En este sentido, los resultados del RCPT para LC³ lo categorizan con una carga "Insignificante". Esta prestación se atribuye principalmente a la estructura porosa refinada presente en el LC³. Adicionalmente, la arcilla calcinada es rica en aluminatos reactivos que favorecen la retención de cloruros, y por ello, la naturaleza y composición química de la arcilla juegan un papel crucial en determinar estas propiedades.

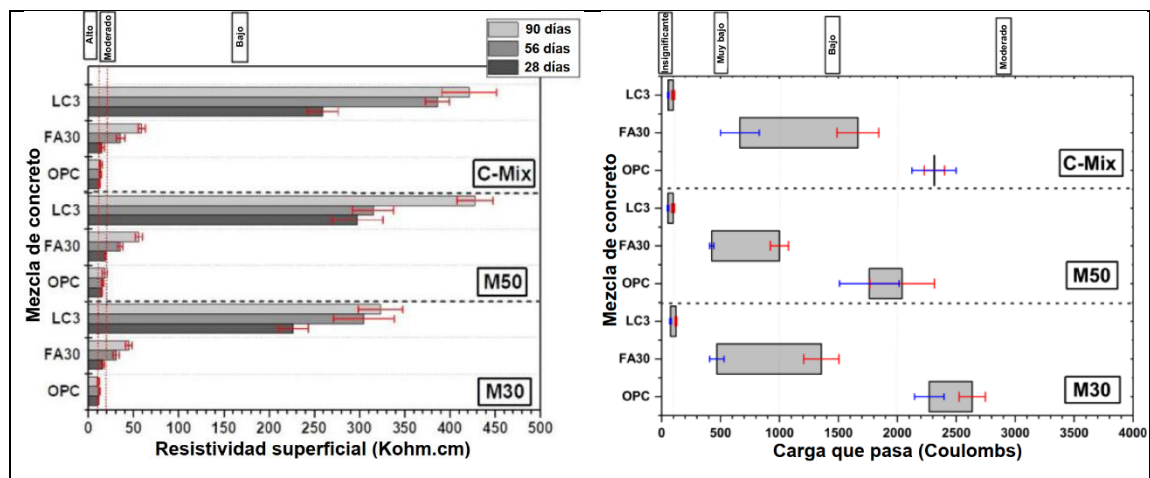


Figura 13. Indicadores de durabilidad de LC³. (Izquierda) Resistividad superficial a los 28, 56 y 90 días. (Derecha) RCPT - carga total que pasa a 28 días (rojo) y 90 días (azul). Fuente:

Adaptado de Dhandapani et al. (2018)

El análisis bibliométrico reveló que, en sistemas de concreto reforzado con este tipo de cemento, la corrosión es uno de los aspectos menos investigados, en comparación con temas como el análisis del ciclo de vida o propiedades mecánicas. Ya no se considera necesario profundizar en la reacción álcali-sílice, ya que se ha constatado que esta problemática no afecta a los concretos con este cemento, incluso cuando contienen agregados con sílice reactiva. Esta característica se debe a la baja concentración de álcalis en la matriz cementante (Nguyen et al., 2020). Las principales investigaciones de durabilidad en concretos con LC³ abordan la exposición a ambientes ricos en cloruros y sulfatos (Ejbouh et al., 2023), la fijación de cloruros y carbonatación (Bahman-Zadeh et al., 2022), difusión de cloruros y modelado de vida útil (Pillai et al., 2019).

En un estudio (Bahman-Zadeh et al., 2022), se observó que en muestras de concreto con LC³, la carbonatación fue más pronunciada que en las muestras de OPC, principalmente debido a la reducción del contenido de portlandita, que disminuye la capacidad del concreto para neutralizar el CO₂, junto con cambios en la estructura de poros y la permeabilidad que no compensan completamente la menor cantidad de portlandita. Sin embargo, aunque las pastas LC³ son más vulnerables a la carbonatación que la mezcla de control, esta vulnerabilidad disminuye con un mayor contenido de caolinita. Lo anterior resalta la necesidad de comprender los factores que contribuyen a la carbonatación en concretos con LC³ y optimizar su durabilidad.

La penetración de cloruros en concretos con este tipo de cemento se ha analizado mediante la elaboración de perfiles de cloruros y la proyección de modelos de vida útil. En general, se ha registrado una prolongación en la vida útil prevista para sistemas con LC³ como cementante (Pillai et al., 2019). No obstante, investigaciones sobre el umbral de cloruros indican que el OPC tiene un valor medio más alto de Cl_{th} (0.44% en peso del cemento) debido a su alta alcalinidad y al efecto de amortiguación del $Ca(OH)_2$. En sistemas mixtos como ceniza volante y LC³, la alcalinidad disminuye debido al consumo de $Ca(OH)_2$ en reacciones puzolánicas, lo que resulta en valores de umbral más bajos (Pillai et al., 2019). Estas reacciones puzolánicas, si bien reducen el Cl_{th} , también incrementan la resistencia iónica y disminuyen la movilidad del cloruro.

La alcalinidad de la solución de poros en el concreto desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la pasividad del acero de refuerzo. En el caso del concreto que utiliza LC³ como aglomerante, a causa de la presencia de arcillas calcinadas se observa un pH ligeramente inferior (aproximadamente 13.2) en comparación con el concreto Portland ordinario (alrededor de 13.8), lo que podría afectar la alcalinidad y como resultado la capacidad de proteger al acero frente a la corrosión (Ram et al., 2022). La presencia de cloruros podría ser más crítica en un entorno con un pH ligeramente más bajo. Teniendo en cuenta que la alcalinidad del LC³ debería ser adecuada para prevenir la corrosión, es esencial abordar cómo la combinación de cloruros y un pH ligeramente inferior podría influir en la estabilidad química del acero embebido.

El empleo de técnicas electroquímicas ha permitido evaluar la durabilidad de concretos elaborados con cementos bajos en carbono como el LC³. Ejbouh et al. (2023) reporta que, bajo ciclos de exposición agresiva a ambientes ricos en cloruros y sulfatos, el concreto con LC³ presentó una tasa de corrosión significativamente menor en comparación con cementos Portland ordinarios (OPC) y mezclas con filler calizo (LCF). Los resultados ilustrados en la Figura 14 indican que al final del experimento, el LC³ mostró una reducción de la velocidad de corrosión aproximadamente tres y veintiséis veces respecto al LCF y al OPC, respectivamente, manteniéndose por más tiempo en zonas de baja corrosión. Este desempeño superior se atribuye al efecto combinado de las reacciones del sistema ternario LC³: (i) el consumo de $Ca(OH)_2$ por la reacción puzolánica entre la arcilla

calcinada y el clinker, lo cual disminuye la conductividad del sistema y limita la formación de fases expansivas; (ii) la sinergia entre arcilla calcinada y piedra caliza, que promueve la formación de carboaluminatos y una microestructura más densa; y (iii) el efecto de relleno derivado de la interacción entre caliza y clinker, que refina la porosidad. Además, la tecnología LC³ presenta una doble capacidad de fijación de cloruros, tanto química en las fases AFm como física en el gel C-A-S-H, lo que contribuye a obstaculizar el transporte iónico y mejora notablemente la resistencia a la corrosión (Antoni et al., 2012).

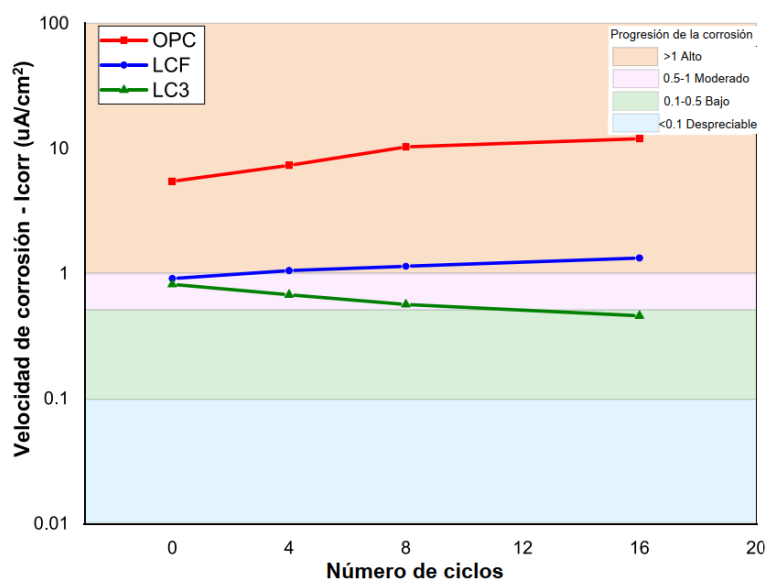


Figura 14. Evolución de la velocidad de corrosión de cementantes LC³, LCF y OPC en diferentes ciclos de humectación y secado. Fuente: adaptado de (Ejbouh et al., 2023).

En cuanto a la difusión de cloruros, se ha observado que los concretos elaborados con OPC presentan mayores tasas de ingreso en comparación con aquellos fabricados con ceniza volante (PFA) y LC³. Pillai et al. (2019) reporta que, en ensayos de difusión bulk, los perfiles de cloruros de las mezclas con OPC de resistencias objetivo de 35 y 50 MPa, difieren notablemente de los obtenidos en mezclas con PFA y LC³, lo cual se atribuye a la microestructura menos porosa y a la mayor resistencia iónica de estos últimos. Las diferencias en la concentración de cloruros en superficie están principalmente gobernadas por la porosidad cercana a la superficie del concreto; en este sentido, la Figura 15 muestra que las mezclas LC3-1S, LC3-1P, LC3-2 y PFA-1 exhibieron menor porosidad y tamaños de poro más finos, resultando en menores concentraciones superficiales pese a la misma exposición. En los concretos M35, tanto LC3-1P como LC3-1S registraron bajas

concentraciones de cloruros, mientras que, en los concretos M50, la mezcla OPC-2 mostró una mayor penetración de cloruros en comparación con PFA-2 y LC3-2, que alcanzaron desempeños similares en términos de resistencia frente a la difusión de cloruros.

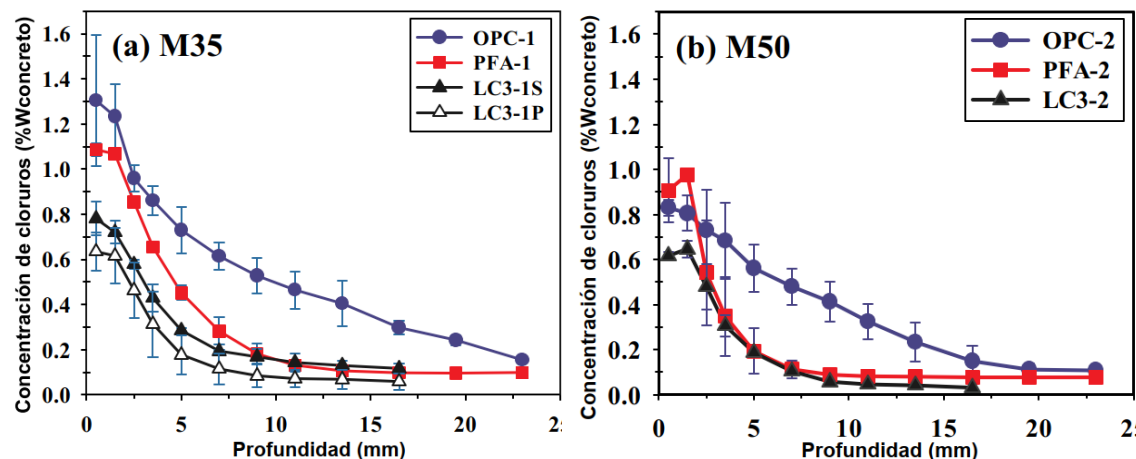


Figura 15. Perfiles de cloruro en las mezclas de concreto tras 56 días de exposición a una solución de cloruro, (a) Concreto M35 y (b) Concreto M50. Fuente: adaptado de (Pillai et al., 2019)

Aunque se ha evidenciado una buena durabilidad a corto plazo del LC³, publicaciones recientes (Barbhuiya et al., 2023) afirman que se requiere una investigación más exhaustiva para evaluar su capacidad para enfrentar factores como el ataque de cloruros. Asimismo, estudios a largo plazo del concreto con LC³ en condiciones reales pueden ofrecer una comprensión más completa de su durabilidad a lo largo del tiempo.

En cuanto a otros tipos de cementos portland compuestos, la durabilidad sistemas con cementos como el CPC30R ha sido estudiada con diversos enfoques y metodologías, por varios investigadores. Fajardo et al. (2009) evaluaron el comportamiento de corrosión de barras de acero embebidas en morteros basados en puzolanas naturales, utilizando cemento Portland Compuesto (CPC30R). Los especímenes con CPC30R mostraron un potencial de corrosión cercano a -100 mV frente a SCE (electrodo de calomel saturado) durante los primeros 35 días, indicativo de una baja probabilidad de corrosión. Sin embargo, después de 40 días, el potencial de corrosión se volvió más negativo, alcanzando cerca de -600 mV, lo que indica un incremento en la probabilidad de corrosión. En términos de velocidad de corrosión, los especímenes con CPC30R tuvieron valores de i_{corr} inferiores a $0.1 \mu A/cm^2$ al inicio, pero estos valores aumentaron a más de $1.0 \mu A/cm^2$

después de 40 días, llegando a $3.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a los 90 días, situándose en una zona de alta velocidad de corrosión.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de continuar investigando para optimizar la formulación y las estrategias de protección de concretos con diferentes tipos de cementos portland compuestos como el CPC30R y CPC40R propuestos en este estudio. Además, el LC³ está emergiendo como una tecnología de interés para investigadores del ámbito del cemento y concreto. Si bien ofrece ventajas en la reducción de emisiones, mejora de propiedades mecánicas y mitigación de problemáticas como la reacción álcali-sílice, aún hay aspectos en estudio, como la estabilidad volumétrica y la durabilidad. Para avanzar en la aplicación de este cemento y lograr que ofrezca beneficios tangibles frente a otras alternativas, se debe investigar a fondo estas propiedades. Además, la capacidad del concreto con LC³ para resistir agentes agresivos y la corrosión dependen, en gran medida, de la composición mineral de las arcillas y los procesos de calcinación y trituración. En un contexto como el de México, donde la producción de este cemento con arcillas locales está en sus inicios, resulta imprescindible realizar una evaluación del cemento producido para adaptar y optimizar la producción de LC³ a diferentes condiciones y reducir la dependencia a otros materiales.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Cemento Portland Compuesto – CPC

En la Tabla 1 se muestra la distribución en masa de los materiales que pueden ser usados para la fabricación de CPCs en comparación con el CPO de acuerdo con el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación de México.

Tabla 1. Componentes de los cementos CPO y CPC. Adaptado de NMX-C-414 (2014)

		Componentes (% en masa)					
Tipo	Denominación	Clínter	Principales			Caliza	Minoritarios
		Portland +	Escoria	Materiales	Humo		
		Sulfato de	granulada de	puzolánicos	de sílice		
		calcio	alto horno				
CPO	Cemento Portland Ordinario	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5

CPC	Cemento Portland Compuesto	50 - 94	6 - 35	6 - 35	1 - 10	6 - 35	0 - 5
-----	-------------------------------	---------	--------	--------	--------	--------	-------

Según la especificación para cementantes hidráulicos NMX-C-414 (2014), el Cemento Portland Compuesto se define como un tipo de cemento que resulta de la combinación de Clinker portland, sulfato de calcio, y una variedad de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. Este proceso de integración tiene como resultado un cemento con propiedades que lo distinguen en la industria de la construcción, proponiendo diferentes clases resistentes. La inclusión de estos materiales adicionales no solo modifica las características del cemento, sino que también puede mejorar su rendimiento en términos de resistencia, durabilidad y trabajabilidad.

3.2.2 Cementantes alternativos

Un cementante alternativo se define como un material que presenta la capacidad de reaccionar con el agua. Esta reacción genera una masa endurecida que puede emplearse como aglutinante en concreto o mortero. En contraste con los aglutinantes convencionales con alto contenido de clínker, el cementante alternativo ofrece una alternativa eficiente y sostenible para satisfacer las demandas de la construcción contemporánea (Gartner et.al, 2018). En definitiva, la adopción de cementantes alternativos como la escoria granulada de alto horno, la ceniza volante, la arcilla calcinada, entre otros, no solo puede mejorar las propiedades del concreto, sino que también puede ofrecer beneficios ambientales, tales como la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento Portland.

3.2.2.1 Cementos bajos en carbono

Es un tipo de cemento que logra reducir las emisiones de carbono provenientes de su producción en más de un 30% (Makul, 2021). Este tipo de cemento se produce mediante un proceso que minimiza la emisión de dióxido de carbono (CO₂), optimizando tanto los materiales utilizados como el tipo de combustible empleado y los procedimientos seguidos en la fabricación.

Una de las estrategias clave para producir cemento bajo en carbono es disminuir la cantidad de cemento "puro" en una mezcla de cemento determinada, reemplazándolo con

cementantes alternativos que tienen una capacidad similar para actuar como agente ligante y unir todos los componentes de la mezcla (Makul, 2021).

3.2.2.2 Cementos con bajo contenido de Clinker

El cemento de bajo contenido de clinker es aquel en el que la cantidad de clinker, el principal componente del cemento tradicional se reduce significativamente y se sustituye parcialmente con materiales cementantes suplementarios (MCS) o rellenos (Boscaro et al., 2021). No existe un umbral universalmente aceptado para considerar que un cemento es de bajo contenido de clinker. Sin embargo, de acuerdo con investigaciones recientes sobre sostenibilidad, se considera que un cemento es de bajo contenido de clinker cuando su reemplazo con materiales cementantes suplementarios supera el 35-40% (Boscaro et al., 2021; Cosoli et al., 2021; Doussang et al., 2023; Gowri & Abdul Rahim, 2024; Li et al., 2024).

Dentro de los cementos con bajo contenido de clinker se destacan aquellos que incorporan cementantes alternativos, como el LC³, que combina arcilla calcinada y piedra caliza, y tiene el potencial de reducir las emisiones de CO₂ en la producción de cemento.

3.2.3 LC³ – Cemento de piedra caliza y arcilla calcinada

Teniendo en cuenta los conceptos expuestos en la sección anterior, el LC³ se puede definir como un *cemento bajo en carbono* que se caracteriza por su *bajo contenido de clinker*, alcanzado mediante la sustitución de hasta un 50% por *cementantes alternativos*, como arcilla calcinada y piedra caliza triturada. Esta combinación permite reducir significativamente las emisiones de CO₂ en su producción, típicamente en torno al 50%, a la vez que aprovecha materias primas más abundantes y de menor costo, ofreciendo una alternativa sostenible frente al cemento Portland tradicional.

De acuerdo con Scrivener, Martirena, et al. (2018) Scrivener, el LC³ se compone principalmente de clinker, arcilla calcinada, caliza y yeso, aunque las proporciones exactas dependen de las características de las materias primas disponibles y de la optimización del desempeño del material. El clinker se utiliza en una menor proporción en comparación con el cemento Portland ordinario, típicamente en torno al 50%. La arcilla que se emplea debe ser rica en caolinita, ya que es esta fase mineralógica la que al calcinarse se

transforma en metacaolín y desarrolla propiedades puzolánicas (Krishnan et al., 2019). Aunque entre mayor sea la pureza mejor es el desempeño del material, investigaciones recientes han demostrado que es posible formular cementos LC³ con arcillas de moderada o incluso baja pureza, llegando a utilizarse materias primas con contenidos de caolinita cercanos al 40% o incluso menores (Blouch et al., 2023), lo que amplía la aplicabilidad del sistema en regiones donde las arcillas altamente puras son escasas. En cuanto a la caliza, esta se añade finamente molida, con un tamaño de partícula cercano a los 2 mm antes de la molienda conjunta; aproximadamente un 20% de su contenido participa activamente en las reacciones puzolánicas, mientras que el 80% restante cumple una función de relleno (efecto filler), contribuyendo a mejorar la densificación de la matriz (Kanagaraj et al., 2024). El yeso, por su parte, se incorpora usualmente en proporciones que oscilan entre un 3 y un 5% del total, aunque su dosificación final debe determinarse experimentalmente. Este ajuste se realiza a través de ensayos de calorimetría isotérmica, técnica que permite analizar la evolución del calor liberado durante la hidratación del cemento, proporcionando información fundamental sobre el tiempo de fraguado, la intensidad de las reacciones y la interacción entre las fases, lo que resulta esencial para definir la cantidad óptima necesaria (Emmanuel et al., 2016).

En términos de los tamaños de partícula previo a la molienda, se recomienda que el clínker presente un tamaño de alrededor de 3 mm, la arcilla calcinada se encuentre en un rango de 0.1–1 mm (ajustando este valor según el tipo específico de arcilla, ya que el grado de dehidroxilación alcanzado en la calcinación depende de dicha característica), la caliza se mantenga en tamaños cercanos a los 2 mm y el yeso alrededor de 2 mm (Emmanuel et al., 2016). Con respecto a las proporciones, los valores comúnmente reportados en la bibliografía y representados en la Figura 16 —aproximadamente 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de caliza y 5% de yeso— son considerados típicos, pero no estrictamente fijos. Es importante subrayar que existe cierto margen de variación (aunque reducido), pues la formulación final depende en gran medida de las propiedades particulares de las materias primas disponibles, su reactividad y las condiciones de procesamiento.

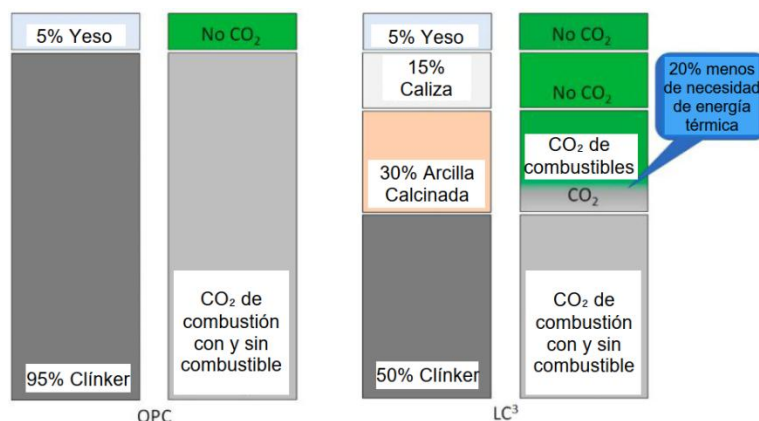


Figura 16. Emisiones de CO₂ asociadas a la composición del OPC y el LC³. Fuente: Adaptado de (Sharma et al., 2021).

3.2.3.1 Fabricación y producción del LC³

El proceso de fabricación y producción del LC³ es una combinación de técnicas tradicionales de producción de cemento y algunas adaptaciones específicas para incorporar la arcilla calcinada y la caliza. Según Emmanuel et al. (2016) el proceso general de producción incluye las etapas de i) Selección de materias primas, que incluye a las arcillas, el Clínker, la piedra caliza y el yeso. ii) Caracterización de materias primas: el Clínker, la caliza y el yeso pueden caracterizarse a través del FRX y DRX para conocer sobre su microestructura y poder combinarlos para generar el LC³. Además, si hay diferentes fuentes de arcilla, se deberían caracterizar con DRX, FRX y TGA para conocer el contenido de caolinita y el potencial de calcinación que pueden tener. iii) Calcinación de la arcilla. iv) Inter molienda de materias primas. v) Molienda final.

El proceso detallado de las etapas iii, iv y v se explica en la Figura 17, la cual resume de manera gráfica la fabricación y producción del LC³.

El proceso de caracterización de las materias primas para la producción de LC³ es fundamental para garantizar la calidad y desempeño del producto final. En el caso del clínker, se emplean técnicas como FRX y DRX principalmente como ensayos de control, con el fin de corroborar la composición química y mineralógica de la fuente utilizada. De acuerdo con Avet & Scrivener (2018), el contenido de fases C₃S y C₃A resulta determinante, puesto que se requiere un alto grado de hidratación del clínker para potenciar el efecto filler de las adiciones y favorecer la formación de productos de

hidratación. En el caso de la caliza, la caracterización busca conocer su origen mineralógico y su distribución granulométrica, ya que estos parámetros inciden directamente en su capacidad de generar productos adicionales de hidratación (como carboaluminatos) y en su desempeño como material de relleno. El yeso, por su parte, se caracteriza para determinar su composición, dado que esta condiciona los porcentajes de adición necesarios para controlar el tiempo de fraguado, regulando la velocidad de hidratación de las fases del clinker.

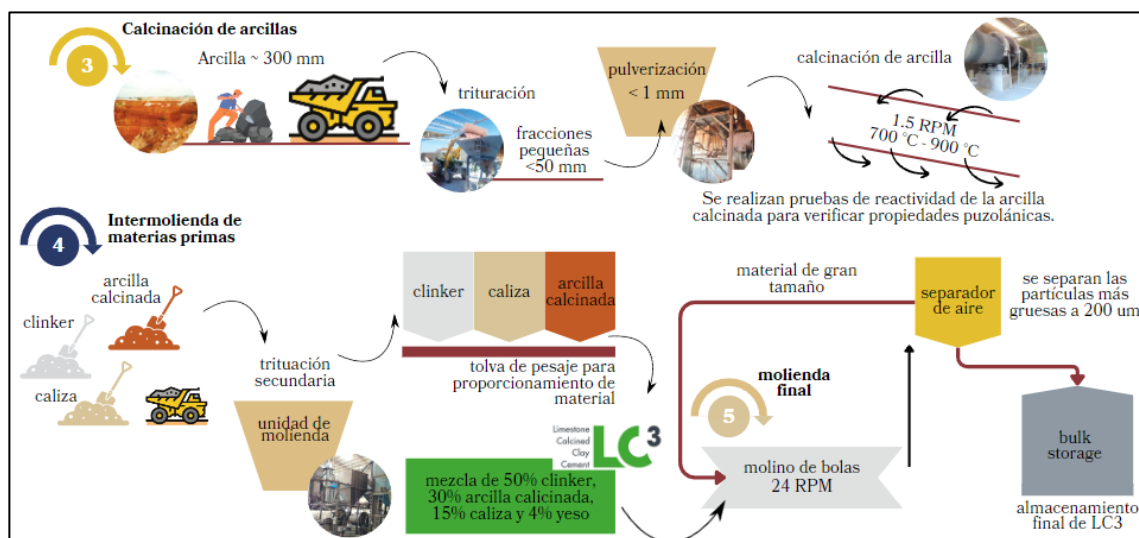


Figura 17. Proceso de calcinación y producción final del LC³. Elaboración propia. Fuente: Emmanuel et al. (2016).

En cuanto a las arcillas, la caracterización mediante FRX es esencial para asegurar que presenten contenidos predominantes de SiO₂ (40–65%) y Al₂O₃ (25–40%), parámetros que garantizan un buen potencial puzolánico tras la calcinación (Emmanuel et al., 2016). El análisis por DRX permite identificar la presencia de caolinita antes de la calcinación y posteriormente verificar la desaparición de dicho pico, lo que confirma la deshidroxilación y, por ende, la activación de la arcilla. El TGA complementa este estudio al cuantificar la pérdida de masa asociada a la eliminación de grupos hidroxilo, ofreciendo así una validación adicional del grado de activación alcanzado (Hanein et al., 2021).

Respecto al proceso de calcinación de la arcilla, sí se generan emisiones de CO₂, pero estas provienen únicamente de la combustión del combustible empleado y no de la descomposición de carbonatos como ocurre en la clinkerización tradicional. Esto significa

que se evita la liberación del CO₂ asociado a la descarbonatación de la caliza. Además, el proceso de calcinación de la arcilla requiere temperaturas más bajas, lo que se traduce en una reducción aproximada del 20% en la demanda de energía térmica respecto a la producción de clínker (Scrivener, Martirena, et al., 2018). La Figura 18 muestra las emisiones de CO₂ producidas para diferentes tipos de CPO, CPC y LC³ junto con las diferentes tecnologías de calcinación. La magnitud de las emisiones depende de la tecnología empleada, pudiendo realizarse en hornos rotatorios húmedos largos (pilot en la gráfica), calcinadores adaptados (Ind) o calcinadores de tipo flash (BAT), estos últimos con mayores eficiencias energéticas.

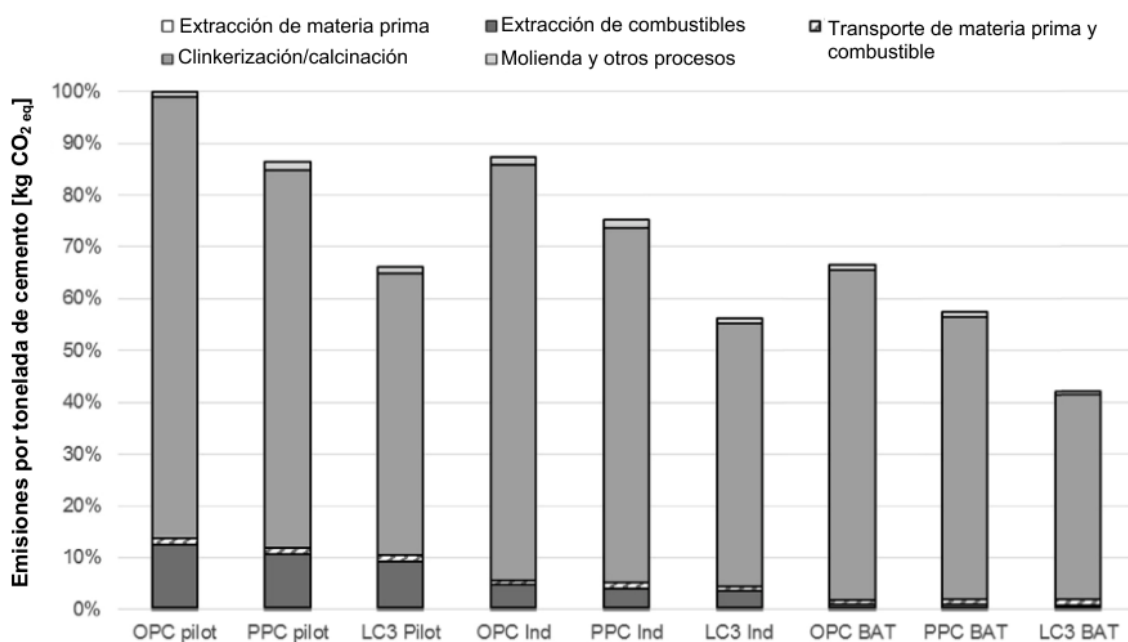


Figura 18. Impacto relativo del potencial de calentamiento global de la producción de cemento en Cuba. Todos los escenarios. Fuente: adaptado de (Sánchez Berriel et al., 2016).

3.2.3.2 Arcillas calcinadas

Las arcillas calcinadas han emergido como un material suplementario clave en la industria de la construcción debido a su alta reactividad puzolánica y su impacto positivo en la sostenibilidad del cemento. Entre las arcillas calcinadas, las arcillas caoliníticas han demostrado un desempeño superior gracias a su composición rica en alúmina y sílice, así como a los cambios estructurales inducidos por la calcinación (Alujas et al., 2015; Hanein et al., 2021).

Las arcillas caoliníticas pertenecen al grupo de los filosilicatos y están formadas principalmente por la caolinita, un mineral de tipo 1:1 compuesto por capas alternas de tetraedros de sílice (SiO_4) y octaedros de alúmina (AlO_6) como lo ilustra la Figura 19 (Sabir et al., 2001; Zunino, 2020). Esta estructura confiere a la caolinita una alta estabilidad en condiciones ambientales normales. Sin embargo, bajo calentamiento, la estructura experimenta transformaciones significativas que favorecen su reactividad.

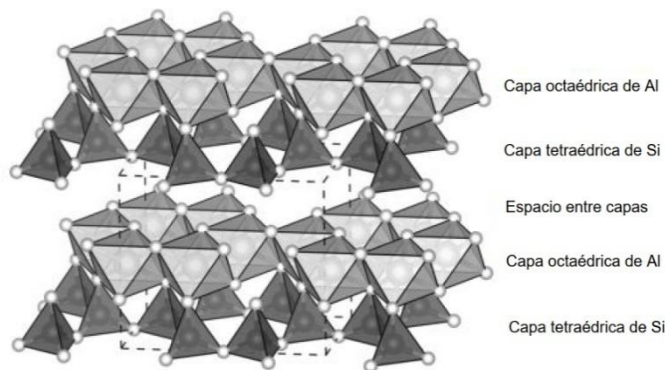


Figura 19. Estructura cristalina de las arcillas caoliníticas. Fuente: (Zunino, 2020).

Los filosilicatos pueden clasificarse según la disposición de sus capas y la naturaleza de sus enlaces interlaminares. En el caso de la caolinita, la interacción entre las capas es relativamente débil, facilitando la eliminación de los grupos hidroxilo durante la calcinación (Fernandez et al., 2011; Hanein et al., 2021). Esta transformación es crucial para el desarrollo de su actividad puzolánica.

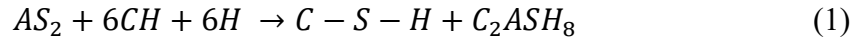
La calcinación es un proceso térmico en el cual las arcillas caoliníticas son sometidas a temperaturas entre 550 y 900 °C, lo que provoca la deshidroxilación de la estructura cristalina y genera una fase amorfa conocida como metacaolín (Alujas et al., 2015). Esta fase carece de la ordenación cristalina original, lo que permite una mayor reactividad química con el hidróxido de calcio presente en el cemento y promueve la formación de productos hidratados como el gel C-S-H (silicato de calcio hidratado).

Estudios han demostrado que la temperatura óptima para la activación de las arcillas caoliníticas se encuentra entre 700 y 800 °C (Alujas et al., 2015; Fernandez et al., 2011; Hanein et al., 2021; Sabir et al., 2001). A temperaturas inferiores, la deshidroxilación es incompleta, lo que reduce la reactividad del material. Por otro lado, a temperaturas

superiores a 900 °C, la reestructuración del material lleva a la formación de mullita, una fase cristalina estable que disminuye la reactividad puzolánica (Hanein et al., 2021).

3.2.3.3 Reacciones de hidratación en LC³

En la ecuación (1) se muestra el efecto de las arcillas calcinadas en el proceso de hidratación del cemento (Zhao & Zhang, 2023; Zunino, 2020).



Donde:

AS₂: Metacaolín, un material puzolánico derivado de la calcinación de la arcilla.

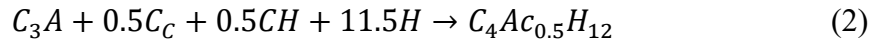
CH: Hidróxido de calcio, también conocido como portlandita, que es un subproducto de la hidratación del cemento.

H: Agua.

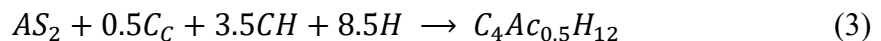
C-S-H: Silicato calcio hidratado, la fase de hidrato primaria responsable de la resistencia y durabilidad del concreto.

C₂ASH₈: Estratlingita o silicato de aluminio y calcio hidratado. Es una fase específica del aluminosilicato de calcio hidratado la cual puede ser responsable de la alta resistencia.

La ecuación (2) explica que cuando se añade piedra caliza a este sistema (Cc), se forman monocarboaluminato de calcio (C₄AcH₁₁, Mc) y hemicarboaluminato (C₄Ac_{0.5}H₁₂, Hc) como fases AFm (Zhao & Zhang, 2023).



Según Zunino (2020), cuando se introduce en el sistema una fuente adicional de alúmina amorfa, como el metacaolín, la calcita puede reaccionar aún más con estos aluminatos para formar más fases Mc y Hc. Como se describe en la ecuación (3), este denominado efecto sinérgico de la caliza/metacaolín conduce a la formación de una mayor cantidad de hidratos (Hc y Mc) que rellenan aún más la porosidad, reduciendo la permeabilidad del material.



3.2.4 Estabilidad volumétrica del concreto

La **estabilidad volumétrica** en el concreto se refiere a su capacidad de mantener dimensiones constantes frente a los cambios de volumen que ocurren principalmente por retracción. Estos cambios son más representativos en las edades tempranas, cuando el proceso de hidratación del cemento avanza y el material interactúa con el entorno (Rüsch et al., 1983). Factores como la pérdida de agua hacia el ambiente, la evolución de los productos de hidratación y el desarrollo de tensiones internas en la matriz cementicia contribuyen a estas variaciones volumétricas, que, de no controlarse, pueden dar lugar a fisuras que afectan el desempeño del concreto. En el caso de cementos de bajo carbono como el LC³, este aspecto adquiere especial relevancia, ya que ciertos mecanismos de retracción pueden tener una incidencia distinta frente a los observados en cementos convencionales (Nguyen et al., 2022).

Según Mindess et al. (2003), dentro de las principales formas de retracción que afectan al concreto se incluyen la retracción química, autógena y por secado. Cada una de estas retracciones puede inducir fisuración temprana, lo cual podría comprometer la resistencia, aumentar la permeabilidad y, en consecuencia, comprometer la durabilidad del concreto.

3.2.4.1 *Retracción química*

La retracción química ocurre debido a las reacciones químicas durante la hidratación del cemento. Este fenómeno se debe a que el volumen absoluto de los productos de hidratación es menor que la suma del volumen de los reactantes (cemento anhidro y agua) antes de la reacción (Helwig et al., 1999). A diferencia de la retracción autógena, no depende de la pérdida de agua hacia el entorno, sino de la transformación estructural de los materiales hidratados.

3.2.4.2 *Retracción autógena*

La retracción autógena es una forma específica de cambio volumétrico que ocurre en las primeras etapas del endurecimiento del concreto. Este fenómeno se manifiesta como una disminución del volumen del material sin que haya pérdida de agua al exterior. Es particularmente notable en concretos con relaciones agua-cemento bajas (Helwig et al., 1999).

La retracción autógena ocurre porque los productos de hidratación consumen agua dentro de la matriz del cemento, por lo que el concreto tiende a desecarse por sí solo durante la hidratación. En el caso del cemento LC^3 , esta retracción puede ser más pronunciada debido a la mayor reactividad de los componentes puzolánicos (Nguyen et al., 2022). En la Figura 20 se muestra la diferencia entre la retracción química y la autógena, esquematizando agua no hidratada (W), agua sangrante en el concreto (W_b), cemento no hidratado (C), productos de hidratación (H_y) y los vacíos generados por la hidratación.

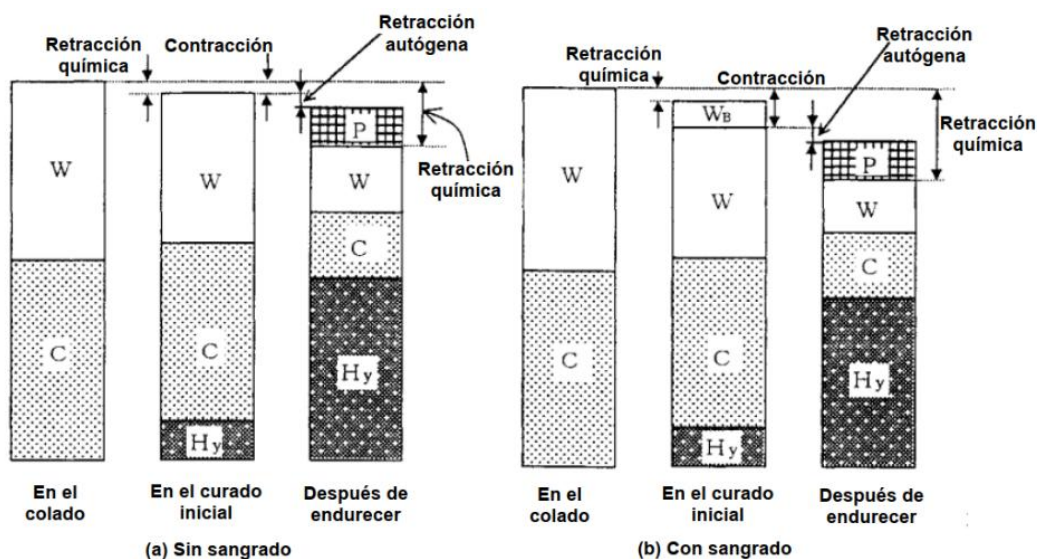


Figura 20. Relación entre la retracción química y la retracción autógena. Fuente: Adaptado de (Helwig et al., 1999)

3.2.4.3 Retracción por secado

La retracción por secado ocurre debido a la evaporación del agua desde el interior del concreto hacia el exterior cuando está expuesto a condiciones ambientales secas. La pérdida de agua reduce el volumen del concreto, causando tensiones internas que pueden llevar a la formación de fisuras (Duckheim & Setzer, 2009). Este tipo de retracción depende de factores como la humedad relativa, la temperatura ambiental, la velocidad del viento y la relación agua-cemento (Mindess et al., 2003).

Según Rüsç et al. (1983), la retracción por secado está influenciada por gradientes de humedad en la estructura del concreto. Elementos más gruesos pierden agua más

lentamente, retrasando el inicio de la retracción. Además, los efectos de la retracción por secado pueden combinarse con la retracción autógena, agravando la formación de fisuras.

3.2.4.4 Factores que influyen en las retracciones

De acuerdo con Helwig et al. (1999) este es un fenómeno complejo que involucra varios parámetros, mecanismos y reacciones entre las que se encuentran:

- Relación agua-cementante: Una mayor relación agua-cemento proporciona más agua disponible para la hidratación, afectando la retracción en edades tempranas.
- Tipo de cemento: Diferentes tipos de cemento tienen tasas de hidratación variables, lo que influye en la retracción autógena. En particular, la retracción autógena en el cemento LC³ es significativa debido a la alta reactividad de sus componentes (Nguyen et al., 2022).
- Tamaño y distribución de partículas: Una distribución de partículas más fina aumenta la superficie de reacción, lo que puede incrementar el consumo de agua durante la hidratación y, por ende, la retracción.
- Condiciones ambientales: La humedad relativa, temperatura y viento influyen en la retracción por secado, exacerbando la pérdida de agua y la formación de fisuras (Duckheim & Setzer, 2009).

3.2.5 Transporte de agentes agresivos en el concreto

El concreto puede ser penetrado por gases y líquidos a través de sus poros, un fenómeno conocido como permeabilidad, crucial para su durabilidad y especialmente relevante en estructuras que retienen agua. La permeabilidad permite la entrada de sustancias como agua, dióxido de carbono, iones cloruro, oxígeno y sulfato, influyendo en los procesos de degradación del concreto armado (Bertollini et al., 2014). Los diferentes tipos de retracción puede incidir directamente en este fenómeno, puesto que provoca ciertas afectaciones al material como la generación de fisuras (Afroz, Nguyen, et al., 2023). Estas fisuras pueden comprometer la durabilidad del concreto, especialmente en situaciones donde la retracción no puede ser fácilmente compensada o donde se cuenta con exposición a agentes agresivos. Estos agentes pueden deteriorar el concreto y afectar su desempeño.

3.2.5.1 Agentes agresivos comunes

- Iones cloruro: Provenientes de agua de mar, sales descongelantes o ambientes industriales. Pueden inducir la corrosión del acero de refuerzo.
- Dióxido de carbono (CO₂): A través del proceso de carbonatación, reduce el pH del concreto y compromete la pasivación del acero.
- Sulfatos: Presentes en suelos o aguas subterráneas, pueden reaccionar con los componentes del concreto y causar expansión y desintegración.

3.2.5.2 Mecanismos de transporte

Comprender el transporte de agentes agresivos en el concreto es esencial para garantizar la durabilidad de las estructuras de concreto, especialmente en ambientes agresivos. Bertollini et al. (2014) describen diversos mecanismos de transporte, entre los que se destacan:

- Succión capilar: este mecanismo ocurre debido a la acción capilar dentro de los capilares de la pasta de cemento. La succión capilar es el proceso por el cual los líquidos son atraídos y transportados a través de los poros del concreto debido a las fuerzas de tensión superficial.
- Permeación: es el movimiento de fluidos a través del concreto debido a gradientes de presión. Esto ocurre cuando hay una diferencia de presión entre dos lados del concreto, impulsando el flujo de líquidos de una zona de alta presión a una de baja presión. Es relevante en estructuras sometidas a presiones hidráulicas, como presas y tanques, y puede contribuir a la degradación al permitir la entrada de agua y sustancias disueltas.
- Difusión: es el movimiento de iones o moléculas desde áreas de alta concentración a áreas de baja concentración. Este mecanismo es crucial en la penetración de gases como el dióxido de carbono y de iones como el cloruro, que pueden causar corrosión del acero de refuerzo y otros deterioros.
- Migración: es el movimiento de iones debido a gradientes de potencial eléctrico. Esto puede ocurrir cuando se aplica un campo eléctrico, lo que impulsa los iones a moverse en dirección del campo. Es utilizado en técnicas de prueba aceleradas

para evaluar la durabilidad del concreto, como los ensayos de migración de cloruros, y es también un factor en la corrosión electroquímica.

3.2.6 Corrosión de sistemas de concreto reforzado

Los aceros de refuerzo en el concreto están protegidos del proceso de corrosión debido al ambiente altamente alcalino que proporciona la matriz cementicia (pH alrededor de 12–13), el cual permite la formación de una capa pasiva de óxidos muy delgada y estable sobre la superficie del acero, que actúa como barrera contra reacciones electroquímicas (pH alrededor de 12-13) (Broomfield, 2007). Sin embargo, este ambiente protector puede deteriorarse por diferentes mecanismos.

En el caso de la carbonatación, el CO_2 presente en el aire penetra en el concreto y reacciona con el hidróxido de calcio y otros compuestos alcalinos de la pasta, reduciendo progresivamente el pH hasta valores cercanos a 9. Este descenso en la alcalinidad provoca la desestabilización de la capa pasiva, dejando al acero vulnerable al ataque del oxígeno y la humedad, lo que inicia el proceso de corrosión (Salazar-Mayorga et al., 2025). Por otro lado, la penetración de cloruros —provenientes de ambientes marinos, sales descongelantes u otras fuentes— no necesariamente disminuye el pH, pero rompe la capa pasiva al concentrarse en la interfase acero-concreto. Una vez superado el umbral crítico de cloruros, se produce corrosión localizada, caracterizada por la formación de picaduras profundas y aceleradas que comprometen rápidamente la sección efectiva del refuerzo (Käthler et al., 2022). En ambos casos, la pérdida de la protección pasiva conduce a la generación de productos de corrosión expansivos, que ejercen presión sobre la pasta de cemento circundante y generan fisuración y desprendimiento del recubrimiento, lo cual acelera aún más la degradación estructural.

Es necesario estudiar los conceptos clave de la corrosión del acero en el concreto, las diferentes condiciones de intemperismo que inciden y las diferentes técnicas electroquímicas que se pueden usar para evaluar la velocidad de corrosión.

3.2.6.1 Mecanismo electroquímico de la corrosión

En la Figura 21 se esquematiza el mecanismo electroquímico de la corrosión del acero en concreto, el cual se puede entender como un sistema compuesto por cuatro componentes

fundamentales: 1) el ánodo, donde ocurre la oxidación del hierro y se liberan electrones; 2) el cátodo, donde se produce la reducción, generalmente del oxígeno disuelto; 3) el conductor, que permite el flujo de electrones entre ánodo y cátodo a través del acero; y 3) el electrolito, representado por la solución acuosa presente en los poros del concreto, que facilita el transporte de iones para completar el circuito electroquímico (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

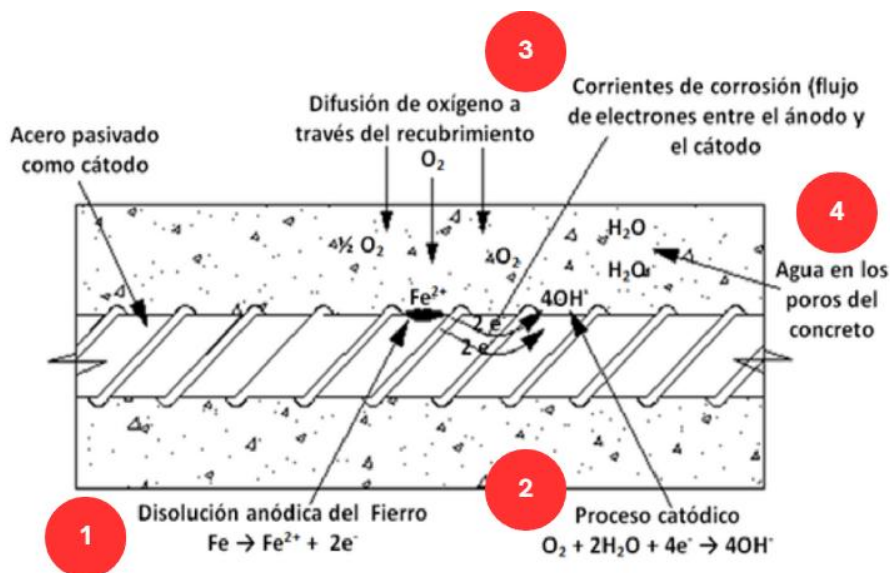
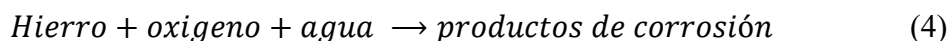


Figura 21. Mecanismo electroquímico de la corrosión. Fuente: adaptado de (Bertollini et al., 2014)

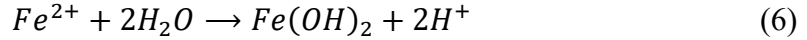
En la ecuación (4) se presenta un esquema simplificado de la reacción electroquímica de la corrosión, la cual está compuesta por cuatro procesos que se describen a continuación:



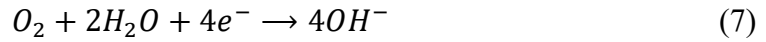
- Proceso anódico:** hace referencia a la oxidación del acero. Este libera electrones en la fase metálica y da lugar a la formación de iones hierro como se muestra en la ecuación (5), cuya hidrólisis produce la acidez descrita en la ecuación (6).



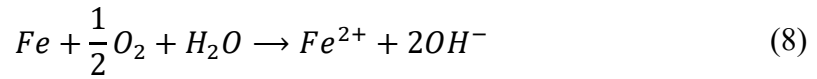
En la ecuación (5) se evidencia cómo el hierro en el acero se oxida para formar iones de hierro. En esta reacción, el hierro metálico pierde electrones para convertirse en iones de hierro en solución.



- 2. Proceso catódico:** hace referencia a la reducción del oxígeno, que puede involucrar la absorción de oxígeno del aire o agua y la formación de hidróxidos. La ecuación (7) indica que hay un consumo de electrones, puesto que el oxígeno y el agua se reducen para formar iones hidróxidos.



La corrosión total se presenta mediante las reacciones anódica y catódica combinadas mostrado a través de la ecuación (8).



- 3. Conductión:** se requiere un transporte de electrones dentro del metal desde las regiones anódicas, donde están disponible, hasta las regiones catódicas, donde se consumen. Dado que los electrones llevan una carga negativa, esto da lugar a una corriente eléctrica nominal que fluye en la dirección opuesta.
- 4. Electrolito:** para que el circuito sea completo, se necesita un flujo de corriente en el interior del concreto desde las regiones anódicas a las catódicas, transportado por el electrolito que son los iones de la solución de poros.

En resumen, la corrosión del acero implica la oxidación del hierro en el ánodo, liberando electrones que fluyen a través del metal hacia el cátodo, donde se lleva a cabo la reducción. Este proceso electroquímico genera productos de corrosión que conduce a la degradación del acero con el tiempo.

3.2.6.2 Corrosión inducida por cloruros

La presencia de iones cloro en el concreto ocasiona variaciones en el comportamiento anódico del acero, lo cual modifica su curva de pasivación anódica. En la Figura 22 se muestra el comportamiento electroquímico del acero debido a la corrosión inducida por cloruros.

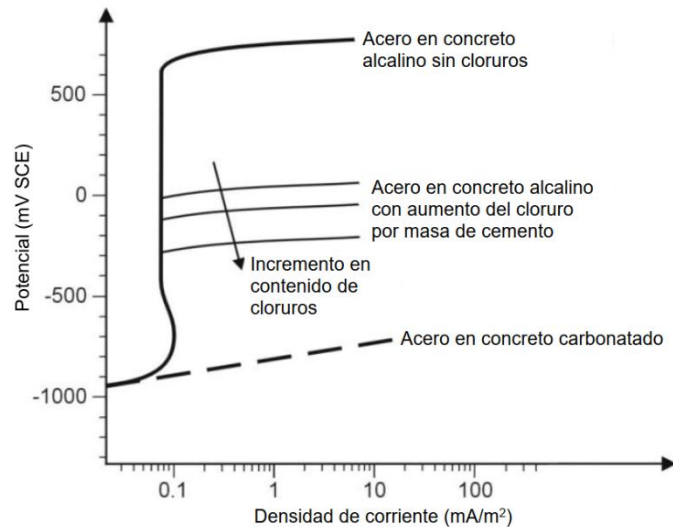


Figura 22. Representación esquemática de la curva de polarización anódica del acero en el concreto con diferentes contenidos de cloruros. Fuente: Adaptado de (Bertollini et al., 2014).

El rango de pasividad se reduce porque el potencial de picadura disminuye a medida que aumenta el contenido de cloruros. Este potencial de picadura se refiere al límite superior de rango de pasividad, el cual es el potencial a partir del cual la película pasiva en la superficie del acero puede romperse localmente.

3.2.6.3 Umbral de corrosión

Se refiere al nivel de condiciones en el entorno que, cuando se alcanza o supera, puede iniciar o acelerar el proceso de corrosión en materiales metálicos. Cuando la concentración de cloruros en el entorno alcanza un nivel crítico, se considera que se ha superado el umbral de cloruros, lo que aumenta significativamente el riesgo de corrosión a causa de la despasivación del acero.

3.2.6.4 Técnicas para evaluar la corrosión

Dentro de las técnicas para evaluar la corrosión se encuentran:

- Resistividad eléctrica: es una medida de la capacidad del material para oponerse al flujo de corriente eléctrica (Bertollini et al., 2014). Este parámetro proporciona información sobre la conductividad eléctrica del concreto y se utiliza como indicador de diversas propiedades relacionadas con la resistencia a la corrosión. De acuerdo con Broomfield (2007) este parámetro es función del contenido de

agua en el concreto, del tipo de cemento utilizado, de la relación agua/cementante y de la presencia de iones cloruro.

- **Potencial de corrosión:** es un parámetro electroquímico que indica la tendencia de un metal a corroerse en un determinado entorno (Bertollini et al., 2014). Para su determinación es importante tener en cuenta el electrodo de referencia estándar para medir el potencial con relación a un punto de referencia conocido y la corriente asociada con la reacción de corrosión (Bentur et al., 1997). Por lo tanto, la medición del potencial de corrosión proporciona información sobre la actividad corrosiva en la estructura.
- **Resistencia a la polarización lineal:** la polarización lineal es una técnica que implica medir la respuesta de corriente de un electrodo frente a un potencial variable en condiciones lineales (Bertollini et al., 2014). Por lo que la resistencia a la polarización lineal se refiere a la oposición que presenta un sistema a cambios en el potencial electroquímico cuando se aplica una pequeña perturbación. Esta resistencia está relacionada con la velocidad de reacción de corrosión y puede proporcionar información valiosa sobre la capacidad de un material para resistir la corrosión (Bentur et al., 1997).
- **Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS):** esta técnica implica la aplicación de una señal de excitación de amplitud constante y frecuencia variable a un sistema electroquímico (Bertollini et al., 2014). Lo anterior permite su aplicación en el estudio de la respuesta eléctrica frente a una perturbación sinusoidal aplicada. Esta respuesta se mide en términos de impedancia, que es la oposición al flujo de corriente alterna. Según Broomfield (2007) la determinación de la EIS depende de la frecuencia de la señal de excitación y de la modelización del sistema con un circuito equivalente para representar los procesos electroquímicos presentes.

3.2.7 Vida útil de estructuras de concreto reforzado

La vida útil de una estructura de concreto reforzado se define como el periodo de tiempo en el cual la estructura mantiene los requisitos previstos en su diseño, tales como seguridad, funcionalidad, estética y mantenimiento razonable en términos económicos (Schiessl et al., 2006). Este concepto está ligado a los mecanismos de deterioro que afectan

el concreto y la armadura de refuerzo, siendo la corrosión inducida por cloruros uno de los más críticos en ambientes marinos.

3.2.7.1 Modelo de Vida Útil de Tuutti

El modelo desarrollado por Tutti (1982) divide la vida útil de una estructura de concreto reforzado en dos etapas: el periodo de iniciación y el periodo de propagación. Durante la fase de iniciación, los agentes agresivos, como los cloruros, penetran en el concreto hasta alcanzar la armadura. En la fase de propagación, la corrosión avanza y produce deterioros visibles como manchas, fisuras y degradación estructural.

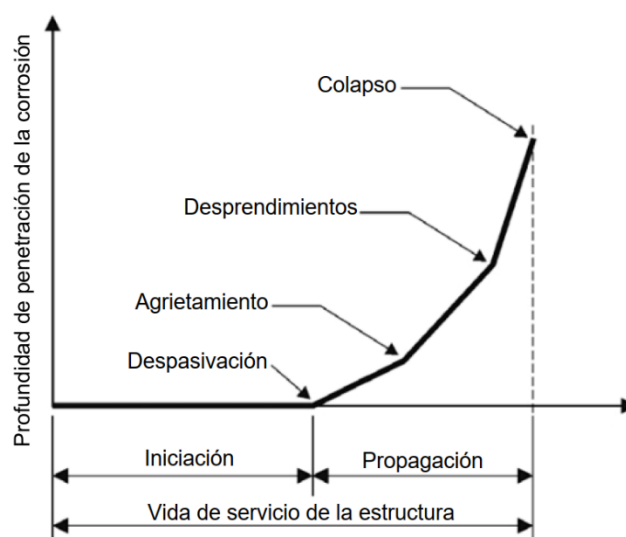


Figura 23. Esquema de los tiempos de iniciación y propagación del modelo de vida útil propuesto por Tutti. Fuente: (Bertollini et al., 2014)

3.2.7.2 Difusión de Cloruros en el Concreto

Los cloruros pueden encontrarse en el concreto por dos razones principales: su presencia en los materiales de origen o su ingreso desde el ambiente. La difusión es el principal mecanismo de penetración de cloruros en el concreto, siendo influenciada por factores como la porosidad, la humedad relativa y la temperatura (Bertollini, 2011).

La difusión de cloruros se describe matemáticamente mediante las leyes de Fick:

- **Estado Estacionario:** En este caso, la concentración de cloruros en el material no cambia con el tiempo, lo que implica que el flujo de cloruros es constante en todas las posiciones dentro del concreto. Esta condición se da cuando el sistema ha

alcanzado un equilibrio estable y la ecuación de la primera ley de Fick es suficiente para describir el comportamiento de la difusión. Este escenario es poco común en estructuras de concreto expuestas a ambientes agresivos, ya que la concentración de cloruros tiende a aumentar con el tiempo.

La primera ley de Fick, ilustrada en la ecuación (9) establece que el flujo difusivo es proporcional al gradiente de concentración de cloruros en el concreto (Y. Wang et al., 2005).

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (9)$$

Donde:

J: Flujo Difusivo, kg/m²*s.

D: Coeficiente de Difusión m²/s.

C: Concentración kg/m³.

- **Estado No Estacionario:** Se refiere a situaciones en las que la concentración de cloruros varía con el tiempo y la ecuación de la segunda ley de Fick es necesaria para modelar su comportamiento. En este caso, la difusión de cloruros está influenciada por la variabilidad de factores ambientales, como la exposición al agua de mar o los cambios en la humedad relativa.

La segunda ley de difusión de Fick, que se muestra en la ecuación (10), describe la evolución temporal de la concentración de cloruros en el material: Esta ecuación se utiliza para predecir la penetración de cloruros y evaluar el deterioro a largo plazo (Bertollini et al., 2014).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) * \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (10)$$

Donde:

t: tiempo de difusión

c: distancia de la difusión

D: Coeficiente de Difusión

C: Concentración de cloruros

El tiempo de iniciación se define como el periodo necesario para que la concentración de cloruros en la armadura alcance un umbral crítico que inicie el proceso de corrosión. Este umbral varía según la composición del concreto y las condiciones ambientales (Ann & Song, 2007). La difusión de cloruros, combinada con otros mecanismos como la absorción capilar y la permeabilidad, determina el tiempo de iniciación de la corrosión.

3.2.8 Formation factor

Es un parámetro que describe la resistividad eléctrica de los poros saturados en una matriz cementante y su relación con la conectividad de la red porosa del concreto (Spragg et al., 2023). La forma más ampliamente aceptada de esta relación fue propuesta por Archie en 1942, como se muestra en la ecuación (11):

$$FF = \frac{\rho}{\rho_0} \approx \frac{\alpha}{\phi^m} \quad (11)$$

Donde:

ρ_0 : Resistividad de la solución de poros

ρ : Resistividad del concreto saturado

α : Factor de tortuosidad

ϕ^m : Porosidad del concreto

Capítulo 4– Metodología experimental

Este capítulo presenta de forma detallada el desarrollo experimental llevado a cabo para evaluar el desempeño de mezclas de concreto elaboradas con los tres tipos de cemento considerados en el estudio. En la Figura 24 se aprecia la metodología de este estudio, la cual se organiza en cinco etapas principales: i) caracterización de los materiales, diseño de mezclas y evaluación de propiedades mecánicas; ii) análisis de la estabilidad volumétrica mediante la medición de retracción química, autógena y por secado; iii) determinación de propiedades de transporte; iv) monitoreo electroquímico bajo condiciones de exposición agresivas; y v) estimación de la vida útil frente a mecanismos de corrosión inducida por carbonatación y por cloruros.

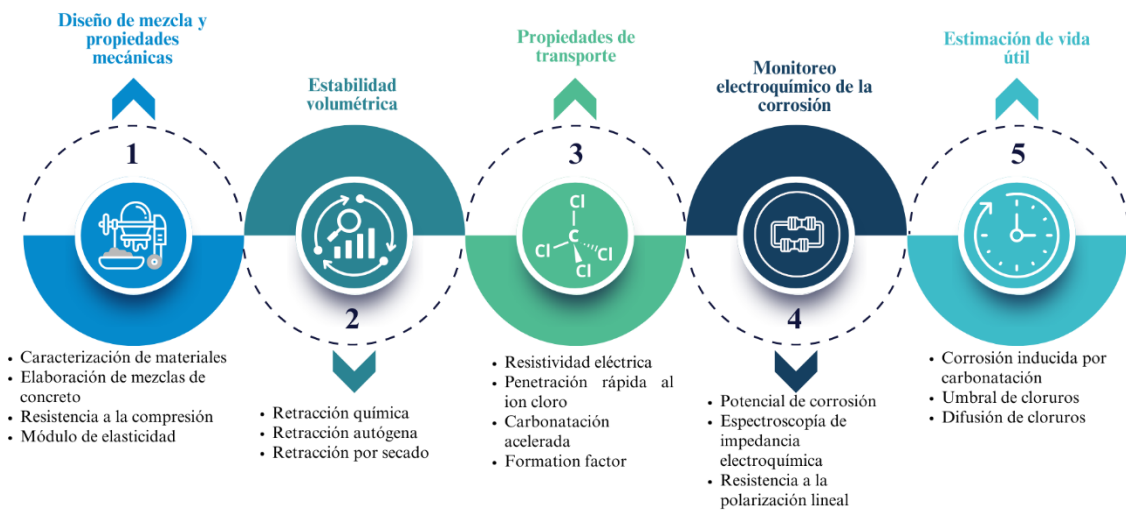


Figura 24. Esquema de las fases que abarca la metodología experimental para la evaluación de las propiedades mecánicas, estabilidad volumétrica y durabilidad de los cementos en estudio.

Fuente: elaboración propia.

4.1 Etapa 1 – Diseño de mezcla y propiedades mecánicas

La primera etapa incluye la caracterización de los materiales, la elaboración de mezclas de prueba para definir la dosificación de concreto para los diferentes niveles de resistencia a evaluar y la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas definitivas.

4.1.1 Caracterización de los materiales

Los materiales utilizados en esta etapa son:

- **Agregados grueso y fino:** Se realizaron ensayos de densidad y absorción (ASTM C127, 2015) , masa unitaria seca compacta (ASTM C29/C29M-09, 2009) y análisis granulométrico (ASTM C136, 2015).
- **Cementos:** Los cementos utilizados en este estudio fueron proporcionados por la compañía **Holcim** y fabricados en su planta ubicada en **Apaxco, México**. Todos los cementos cuentan con la misma base de **clínker**, pero varían en su proporción: aproximadamente **80%**, **60%** y **50%**, siendo este último un cemento de tipo **LC³**.

Para caracterizar los cementos, se evaluaron sus propiedades físicas y microestructurales. Se determinó la **densidad** según la norma ASTM C188 (2015), así como el **tiempo de fraguado** de acuerdo con ASTM C191 (2013), la consistencia normal según la ASTM C187 (2011) y se elaboraron especímenes para resistencia a la compresión (ASTM C109, 2016). Además, se analizó la **distribución de tamaño de partícula** para comprender el grado de finura de cada sistema cementante. En cuanto a la caracterización microestructural, se emplearon técnicas como la **difracción de rayos X (DRX)** para identificar fases cristalinas y la **fluorescencia de rayos X (FRX)** para determinar la composición química.

En la Figura 25 se presenta un resumen gráfico de los ensayos de caracterización realizados a los agregados y cementantes usados para el desarrollo experimental de la investigación. Las siglas utilizadas para referirse a los cementos a lo largo del documento son:

C80: Cemento con aproximadamente 80% de clínker, clase resistente 40 (CPC 40R).

C60: Cemento con aproximadamente 60% de clínker, clase resistente 30 (CPC 30R).

C50: Cemento con aproximadamente 50% de clínker, clase resistente 30 (CPC 30R), correspondiente a un sistema de tipo **LC³**.

- **Aditivos:** Para los concretos de resistencia de 20 MPa se empleó Mapeplast RP190 como aditivo reductor de agua (WR1). En cuanto a los diseños para 40, 60 y 70 MPa, se utilizó el aditivo base policarboxilato Flowcon de Eucomex (WR2). Estos fueron incorporados al diseño para alcanzar el revenimiento deseado de 12 ± 2 cm.

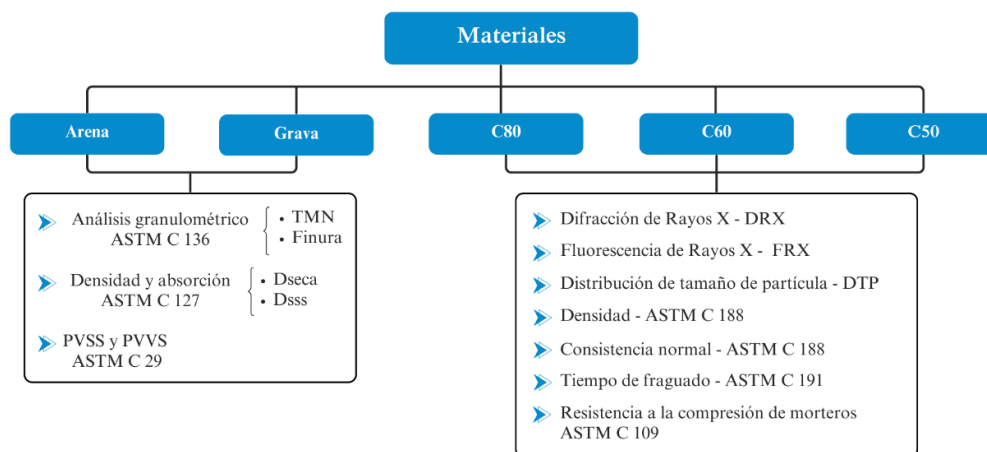


Figura 25. Diagrama de la caracterización de las propiedades de los agregados y cementantes previo al diseño de mezclas de concreto. Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Elaboración de mezclas de concreto

Para establecer los diseños de mezcla definitivos, se siguió el paso a paso que se describe en la Figura 26. En primera instancia, se elaboró una dosificación preliminar de acuerdo con las especificaciones del Comité 211 del ACI (2009) incluyendo la realización de ajustes por homogeneidad y consistencia para obtener la trabajabilidad deseada. Posteriormente, se elaboraron mezclas de prueba con un revenimiento de 12 ± 2 cm realizando modificaciones a la relación agua/cementante (a/cm) y el consumo de cemento por m^3 hasta cumplir con la resistencia objetivo.

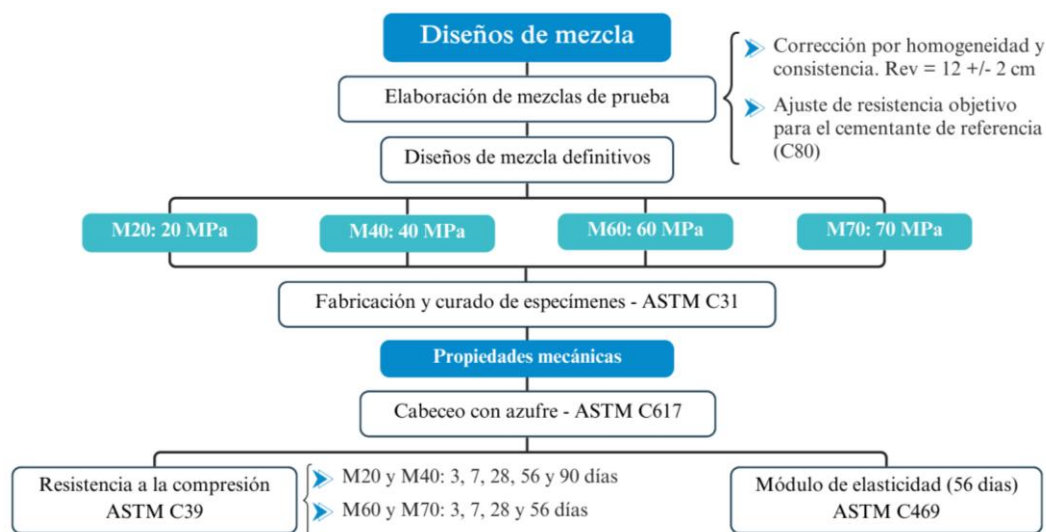


Figura 26. Flujograma para la elaboración de los diseños de mezcla y la evaluación de las propiedades mecánicas. Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el desempeño de los cementos con bajo contenido de clinker, se desarrollaron diseños de mezcla base utilizando el cemento de referencia con 80% de clinker (C80), con el objetivo de alcanzar resistencias a la compresión de 20, 40, 60 y 70 MPa. Estas mezclas fueron formuladas bajo condiciones controladas, optimizando proporciones de materiales y dosificaciones para cumplir con los niveles de resistencia deseados. Posteriormente, se reprodujeron estas mismas mezclas sustituyendo el cemento C80 por los cementos con 60% (C60) y 50% (C50) de clinker, manteniendo constante la relación agua/cementante. Esta metodología permite analizar comparativamente el efecto del contenido de clinker en las propiedades mecánicas, la estabilidad volumétrica y la durabilidad del concreto, bajo condiciones equivalentes de diseño.

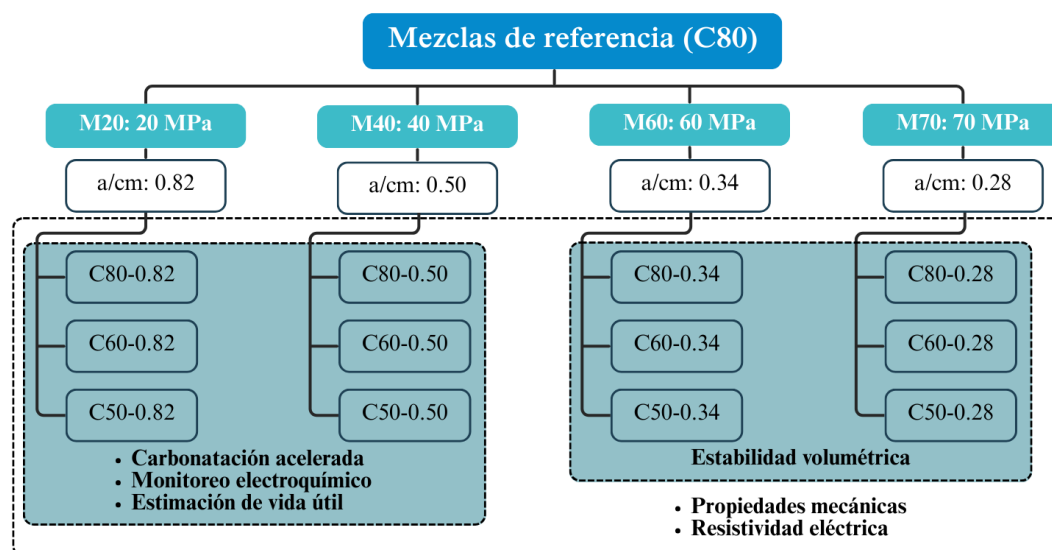


Figura 27. Distribución de los ensayos realizados a los diseños de mezcla definitivos. Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Propiedades mecánicas

Para los diseños de mezcla definitivos, se fabricaron y curaron especímenes cilíndricos de concreto de acuerdo con la norma (ASTM C31, 2015), con el fin de evaluar la resistencia a la compresión a las edades especificadas (ASTM C39, 2016).

Con el objetivo de garantizar el control de calidad del concreto producido durante la fase experimental, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en tres especímenes por cada edad de curado. Previo al ensayo, los cilindros fueron capeados con azufre,

conforme a la ASTM C617 (2010), para asegurar superficies planas y perpendiculares que permitieran una distribución uniforme de la carga. Posteriormente, los ensayos de compresión se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos establecidos en la ASTM C39 (2016).

El módulo de elasticidad se determinó de acuerdo con la ASTM C469 (2002). Para este propósito, se ensayaron tres especímenes cilíndricos de concreto, cada uno instrumentado con un deformímetro lineal de alta precisión fijado mediante anillos metálicos y tornillos, lo cual permitió registrar las deformaciones longitudinales durante la aplicación de la carga. Los especímenes fueron sometidos a carga axial en una prensa hidráulica, registrándose simultáneamente la carga aplicada y la correspondiente deformación unitaria. A partir de estos datos se construyó la curva esfuerzo–deformación, de la cual se calculó el módulo secante de elasticidad, definido como la pendiente de la recta trazada entre dos puntos específicos dentro del rango elástico de la curva, usualmente entre 0 y 40% de la resistencia máxima a la compresión del concreto, conforme a lo estipulado en la ASTM C469.

4.2 Etapa 2 – Estabilidad volumétrica

En este estudio se optó por realizar los ensayos de estabilidad volumétrica únicamente con las relaciones agua-cementante más bajas (0.34 y 0.28), aunque se dispusiera de cuatro niveles (0.82, 0.50, 0.34 y 0.28). Lo anterior se justifica porque la estabilidad volumétrica del concreto —entendida como su capacidad de conservar su volumen original bajo diversas condiciones ambientales o internas— está estrechamente relacionada con la tasa de hidratación del cemento y con la relación agua-cementante, como se explicó en la sección 3.2.4 de este documento. Una relación agua-cementante mayor proporciona más agua libre que puede favorecer la hidratación. Se ha estimado que para que el cemento alcance una hidratación completa (o cercana al máximo grado químico) se requiere una relación agua-cementante crítica de aproximadamente 0.42; valores menores inciden en tasas y grados de hidratación inferiores, generándose mayor influencia en la estabilidad volumétrica de la mezcla (Ley-Hernandez et al., 2018). Por ello, al seleccionar 0.34 y 0.28 se asegura trabajar por debajo de ese umbral crítico, permitiendo observar con más

claridad los efectos de las retracciones química, autógena y por secado bajo condiciones en que la hidratación puede no ser completa.

En este orden de ideas, en la Figura 28 se esquematiza las mezclas a las que se le evaluó la estabilidad volumétrica y las diferentes edades finales de ensayo.

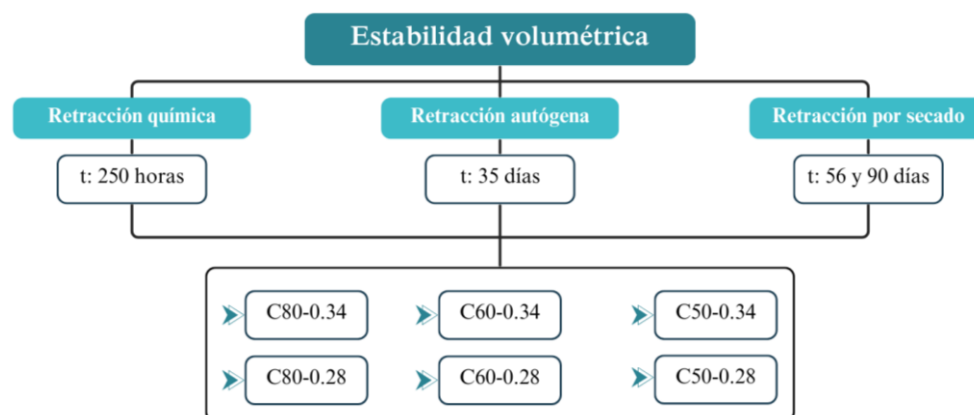


Figura 28. Esquema de los ensayos de retracciones realizados en la etapa 2. Fuente: elaboración propia.

4.2.1 Retracción química

Este ensayo se realizó en pastas con relaciones agua/cementante de 0.34 y 0.28, empleando los tres tipos de cemento considerados en el estudio. La metodología se basó en la norma ASTM C1608 (2023) Método de ensayo estándar para la contracción química de la pasta de cemento hidráulico. El montaje experimental consistió en un baño termorregulado de agua (23 ± 0.5 °C) dentro de una caja de acrílico, donde se colocaron recipientes de vidrio sellados herméticamente. Cada uno contenía un tubo capilar graduado en incrementos de 0.01 mL, lo que permitió registrar las variaciones de volumen producidas por la hidratación del cemento.

En la Figura 29 se muestra el sistema utilizado para la evaluación de la retracción química. De acuerdo con la ASTM C1608, esta debe registrarse periódicamente durante un periodo mínimo de 24 horas. Específicamente, se recomienda tomar lecturas de nivel de agua en los tubos capilares cada 30 minutos o cada hora durante las primeras 8 horas, y posteriormente cada 8 horas o más, a fin de evitar mediciones nocturnas, siempre asegurando un registro a las 24 horas. Además, se establece que debe tomarse una lectura a la hora de haberse mezclado la pasta, la cual se emplea como punto de referencia cero

en los cálculos, permitiendo que la muestra alcance el equilibrio térmico dentro del baño de agua. Aunque la norma limita el seguimiento a las primeras 24 horas, en el presente estudio se amplió la evaluación hasta 250 horas, con el propósito de analizar el comportamiento de la retracción química en edades más avanzadas y obtener una caracterización más completa del proceso.

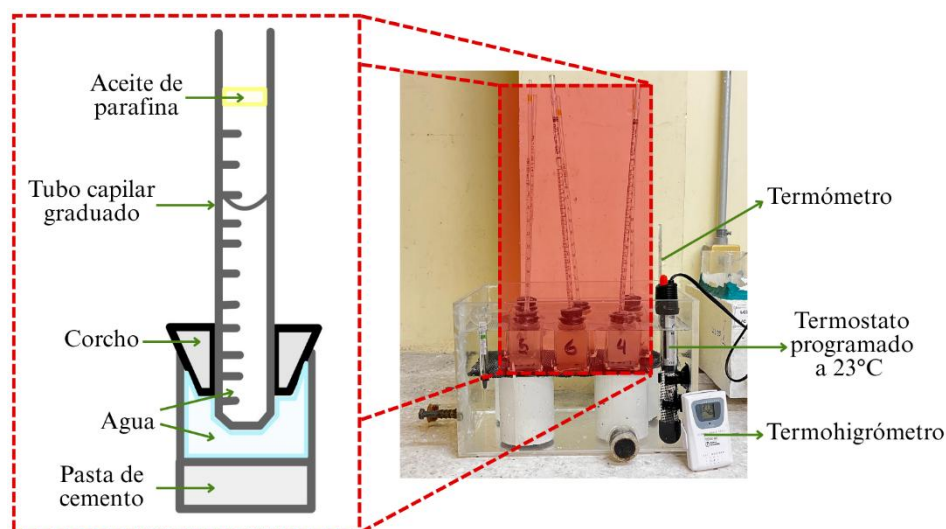


Figura 29. Montaje experimental para el monitoreo de la contracción química. Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Retracción autógena

Para la evaluación de la retracción autógena, se siguieron los lineamientos de la ASTM C1581/C1581M (2018), el cual es el método de ensayo estándar para determinar la edad a la que se agrieta el concreto o el mortero y las características de tensión de tracción inducida en condiciones de contracción restringida. Para ello, se emplearon moldes metálicos instrumentados con tres extensómetros eléctricos (strain gages) conectados a un sistema de adquisición de datos TDS-150, el cual registró las deformaciones cada 20 minutos. La Figura 30 ilustra los especímenes que se fabricaron, mientras que la Figura 31 muestra la conexión del sistema de monitoreo. Este montaje permitió obtener la curva de deformación del anillo de acero en función del tiempo, así como determinar el ancho final de la grieta al momento de la fractura del espécimen.



Figura 30. Preparación y fabricación de especímenes para contracción autógena del concreto.

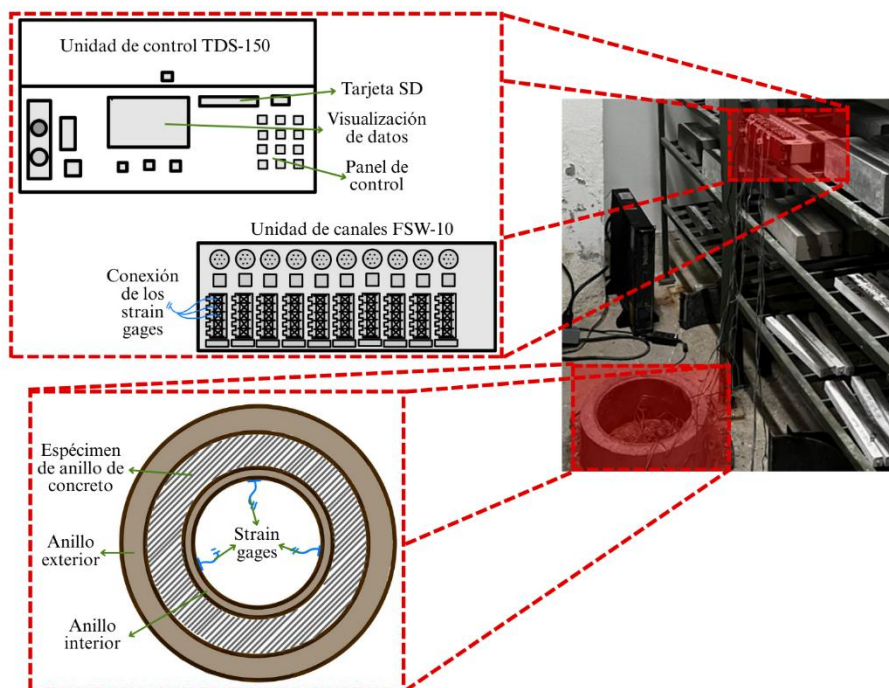


Figura 31. Montaje experimental de los especímenes y la conexión al sistema de adquisición de datos. Fuente: elaboración propia.

4.2.3 Retracción por secado

Este ensayo se aplicó a concretos con relaciones agua/cementante de 0.34 y 0.28, empleando los tres cementos en estudio, y se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM C157/C157M (2024). Se elaboraron prismas de concreto de $10 \times 10 \times 30$ cm con insertos

metálicos en los extremos, ubicados a una distancia inicial de 10 pulgadas, para facilitar la medición precisa de la longitud. Luego de 28 días de curado en condiciones húmedas, los especímenes se trasladaron a un cuarto de secado con temperatura controlada (23 ± 2 °C) y humedad relativa de 50 ± 4 %. Las mediciones de la variación longitudinal se realizaron a los 1, 3, 7, 28 y 56 días de exposición. La Figura 32 muestra los especímenes dispuestos en el ambiente de secado.



Figura 32. Prismas de concreto en cuarto con temperatura y humedad controlada, fabricados para evaluación de la contracción por secado.

4.3 Etapa 3 – Propiedades de transporte

La evaluación de las propiedades de transporte de los concretos estudiados se llevó a cabo mediante cuatro ensayos principales: resistividad eléctrica, penetración rápida de cloruros, avance del frente de carbonatación y formation factor. Estos ensayos permiten conocer el grado de susceptibilidad del material al ingreso de agentes agresivos que comprometan su durabilidad. La Figura 33 explica los diferentes ensayos empleados en esta etapa, las edades de evaluación y las mezclas de concreto empleadas el estudio de las propiedades de transporte.

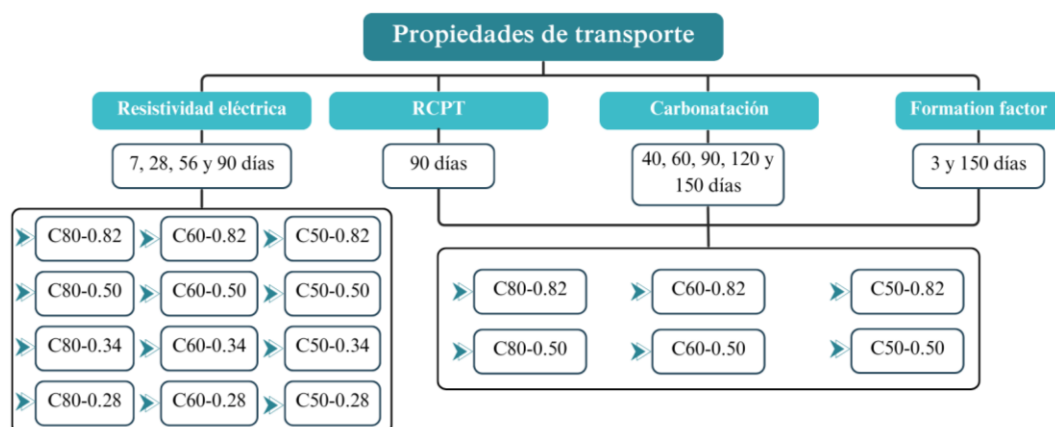


Figura 33. Diagrama de los ensayos y tiempos de evaluación para el estudio de las propiedades de transporte. Fuente: elaboración propia.

4.3.1 Resistividad eléctrica

Se determinaron dos tipos de resistividad: superficial y en masa (bulk), con el fin de caracterizar la resistencia del concreto al paso de corriente eléctrica en diferentes configuraciones. Para ambos métodos se emplearon especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, ensayados a edades de 7, 28, 56 y 90 días.

- El método de **las cuatro puntas (Wenner)** se aplicó conforme a la norma ASHTO T 358 (2015). Para el ensayo de resistividad superficial, los especímenes cilíndricos de concreto fueron retirados de las condiciones de curado en la edad correspondiente y posteriormente limpiados para eliminar residuos o partículas adheridas. A continuación, se secaron con un paño húmedo hasta alcanzar la condición de saturación superficial seca (SSD), evitando la presencia de agua libre en la superficie. Finalmente, se verificó que las caras de apoyo estuvieran planas y limpias, con el fin de garantizar un contacto adecuado de los electrodos del equipo tipo Wenner durante la medición. En este caso, se midió la resistividad superficial del concreto mediante un dispositivo de cuatro electrodos alineados y equiespaciados, que se apoyan sobre la superficie del espécimen. La corriente se aplica a través de los electrodos externos, mientras que los internos miden la diferencia de potencial, como se indica en la Figura 34.

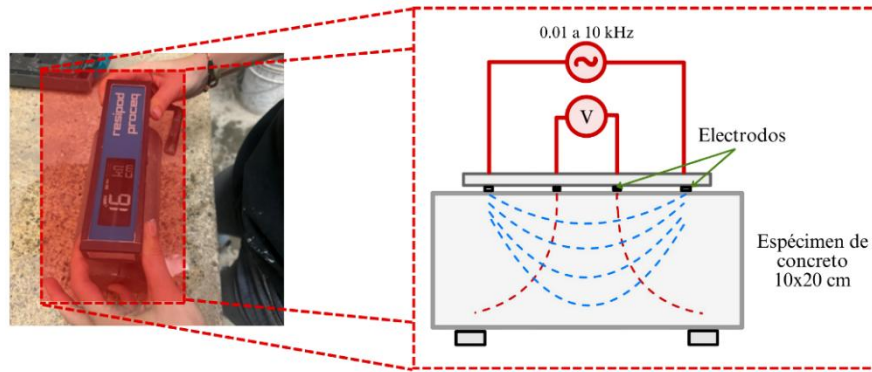


Figura 34. Configuración experimental del ensayo de resistividad superficial. Fuente: elaboración propia.

- En el **método directo (bulk)**, se siguió la norma ASTM C1760 (2021). Los especímenes también fueron retirados de las condiciones de curado a la edad de ensayo y limpiados superficialmente antes de su preparación. Posteriormente, se secaron con un paño húmedo hasta alcanzar la condición SSD. En cada extremo de los cilindros se colocaron esponjas húmedas y electrodos metálicos, asegurando un contacto eléctrico uniforme durante la aplicación de corriente. Se verificó además la ausencia de burbujas de aire o discontinuidades en la interfase entre los electrodos y las superficies de los especímenes, a fin de obtener mediciones confiables.

La medición se realizó con electrodos en ambas caras del cilindro saturado, de modo que la corriente eléctrica atraviesa directamente el volumen de la muestra (Figura 35). Esta configuración permite obtener la resistividad eléctrica efectiva del concreto.

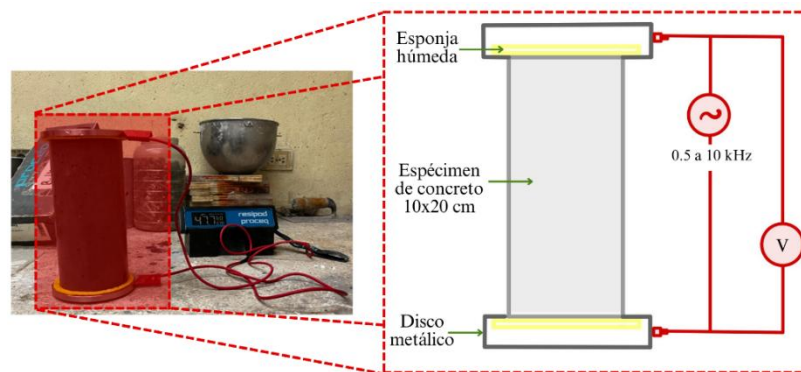


Figura 35. Configuración experimental para las mediciones de resistividad bulk. Fuente: elaboración propia.

4.3.2 Penetración rápida al ion cloro

El ensayo de penetración rápida de cloruros se realizó a los 90 días de edad. El montaje se hizo de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C1202 (2019), el cual es el método de ensayo estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones cloro. Se utilizaron discos cilíndricos de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura, obtenidos a partir de los especímenes cilíndricos estándar.

Cada muestra fue colocada entre dos cámaras selladas: una conteniendo una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.3 M en el lado catódico y otra con cloruro de sodio (NaCl) al 3% en el lado anódico. Se aplicó una diferencia de potencial de 60 V de corriente continua durante 6 horas, mientras se monitoreó el flujo de corriente en intervalos regulares (véase Figura 36). La carga total transferida, calculada como el área bajo la curva de corriente vs tiempo, se empleó como indicador indirecto (en coulomb) de la permeabilidad al ion cloruro del concreto.

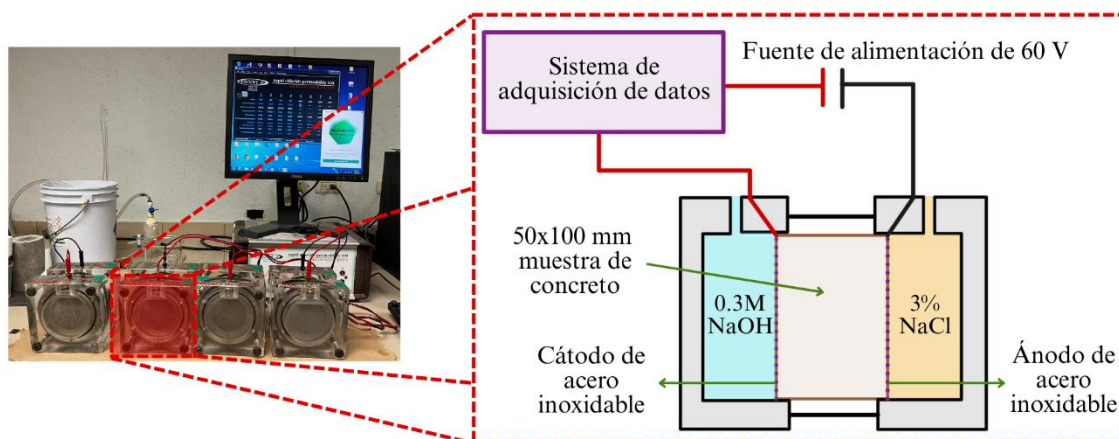


Figura 36. Esquema de la configuración experimental para el ensayo de penetración rápida al ion cloro. Fuente: elaboración propia.

4.3.3 Carbonatación acelerada

El avance del frente de carbonatación se evaluó mediante un ensayo acelerado realizado de acuerdo con la norma EN 13295 (2004), la cual establece que la resistencia de un material frente a la carbonatación se determina exponiendo las probetas a una atmósfera con 1 % de CO₂, a una temperatura de 21 ± 2 °C y una humedad relativa de 60 ± 10 %. Sin embargo, en el presente estudio se empleó una concentración más elevada de 4.0 %

de CO₂, con el propósito de intensificar el proceso y reducir los tiempos de exposición, manteniendo constantes la temperatura (21 ± 2 °C) y la humedad relativa (60 ± 5 %). Los especímenes ensayados correspondieron a prismas de $10 \times 10 \times 30$ cm, previamente curados durante 28 días.

La profundidad de carbonatación se evaluó a edades de exposición de 28, 56, 90, 120 y 150 días. En cada intervalo, los prismas fueron fracturados y se extrajo un corte con un espesor mínimo de 15 mm, empleando cincel o cortafrío, sobre el cual se aplicó una solución de fenolftaleína al 1 %. La superficie recién expuesta permitió identificar el frente de carbonatación, ya que las zonas no carbonatadas presentaron una coloración púrpura debido al elevado pH del concreto, mientras que las áreas carbonatadas no mostraron cambios de color. Como lo ilustra la Figura 37, la determinación de la profundidad se realizó en las cuatro caras del prisma; en cada una de ellas, la longitud se dividió en cuatro segmentos iguales, obteniendo cinco puntos de medición. La distancia se midió de forma perpendicular a la superficie con una precisión de 0.1 mm, y el valor medio de cada cara se redondeó a 0.5 mm. Finalmente, la profundidad promedio de carbonatación (d_k) del espécimen se calculó como el promedio de las cuatro caras.

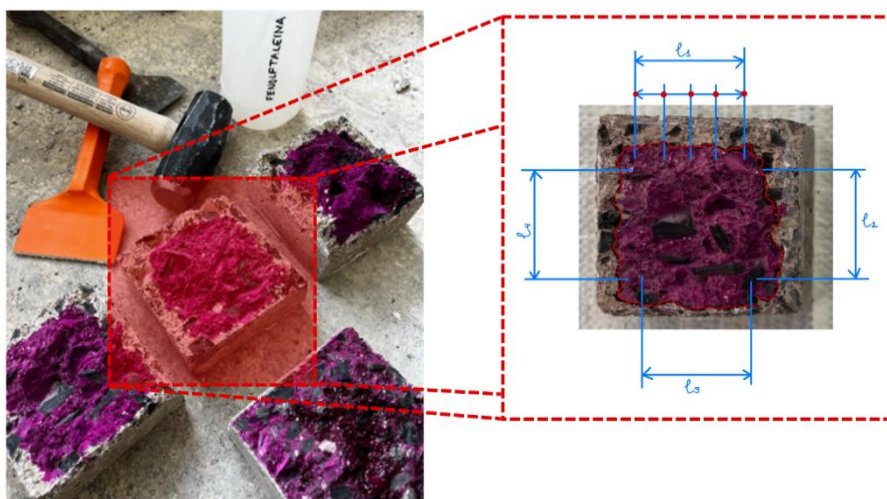


Figura 37. Procedimiento de toma de datos para el ensayo de avance del frente de carbonatación.

Fuente: elaboración propia.

4.3.4 Formation factor

4.3.4.1 Conductividad de la solución de poros

La resistividad de la solución de poros se calculó a partir de su conductividad iónica. Para ello, se extrajo el líquido intersticial de pastas de cemento mediante prensado hidráulico, utilizando especímenes cilíndricos (49 mm de diámetro × 98 mm de altura) con relaciones a/cm de 0.80 y 0.50, correspondientes a los tres cementos en estudio.

El sistema de extracción empleó un disco metálico hueco y una prensa hidráulica (véase Figura 38). La conductividad se midió con un conductímetro de mesa Lab 945 equipado con un sensor LF435T.

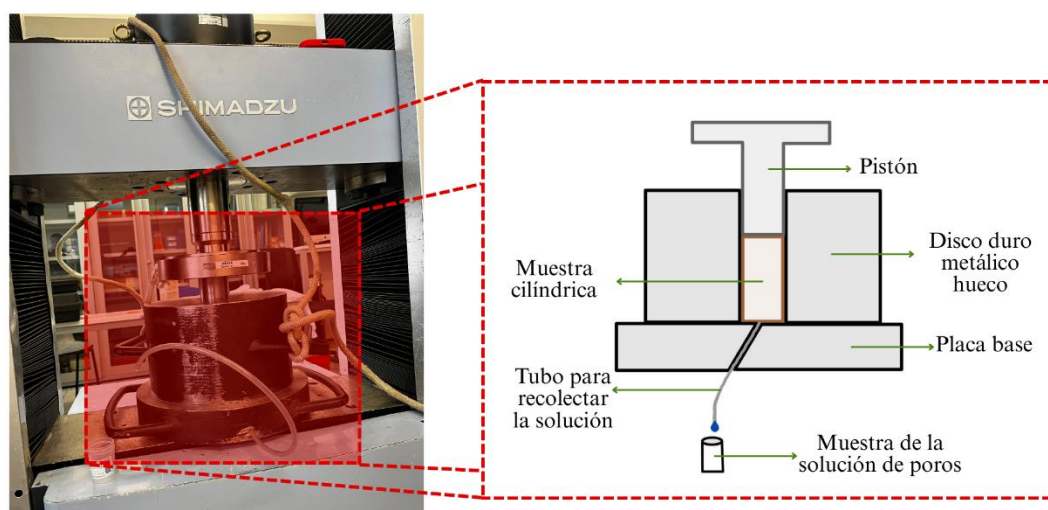


Figura 38. Montaje experimental para la extracción de la solución de poros.

4.3.4.2 pH de la solución de poros

El pH de la solución extraída también fue determinado para caracterizar químicamente el sistema. Las mediciones se realizaron con un medidor multiparamétrico digital de mesa WTW™ inoLab™ Multi 9430 IDS™, equipado con un electrodo de pH SenTix 940.

4.4 Etapa 4 – Monitoreo electroquímico de la corrosión

4.4.1 Configuración de los especímenes

Para el análisis de la velocidad de corrosión inducida por cloruros, se seleccionaron las mezclas correspondientes a relaciones a/mc de 0.80 y 0.50 para cada uno de los tres cementos empleados. Esta decisión obedeció a que las relaciones a/cm altas, permiten obtener resultados de corrosión en menor tiempo debido a la mayor porosidad y conectividad de la red capilar, lo que facilita la difusión de cloruros hacia la interfaz acero–concreto. Por el contrario, en mezclas con bajas relaciones a/cm la matriz cementicia presenta una microestructura más densa, con poros más finos y menos interconectados, lo cual retrasa significativamente el ingreso de cloruros y, en consecuencia, prolonga el tiempo requerido para observar manifestaciones de corrosión. Por esta razón, no fue viable seleccionar únicamente relaciones a/cm bajas, ya que los resultados habrían tardado considerablemente más en manifestarse dentro del marco temporal del estudio.

Los especímenes empleados consistieron en prismas de $115 \times 150 \times 280$ mm, diseñados con una zona de exposición (ponding) centrada en la cara superior, con dimensiones de $75 \times 75 \times 150$ mm, tal como se muestra en la Figura 39. La geometría de estos especímenes se adoptó siguiendo lo establecido en la norma ASTM G109 (2021), la cual propone este tipo de configuración prismática para la evaluación del efecto de aditivos químicos en la corrosión del acero bajo ambientes de exposición con cloruros.

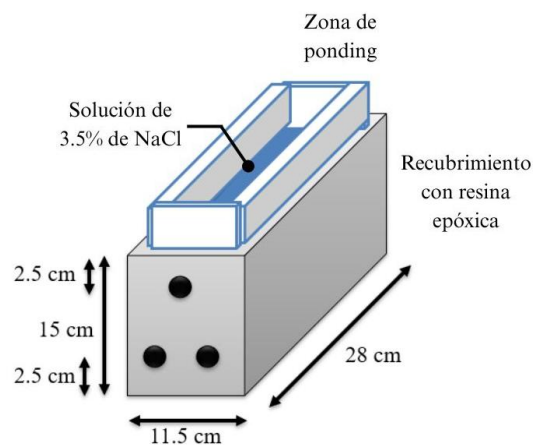


Figura 39. Configuración geométrica del espécimen para evaluación electroquímica de la corrosión inducida por cloruros.

Cada espécimen incorpora una configuración de barras de acero al carbono ($\Theta = 3/8''$) embebidas en el concreto. Estas barras corresponden a acero de baja aleación, corrugado, conforme a la normativa ASTM A706 (2022), que corresponde a la especificación para barras de acero de baja aleación, corrugadas y lisas, para refuerzo de concreto. El sistema cuenta con dos barras colocadas a 25 mm del fondo actúan como cátodos, y una barra superior como ánodo. La posición de esta barra anódica fue determinada siguiendo la recomendación de mantener una distancia desde la superficie equivalente al doble del tamaño máximo nominal del agregado. Las barras fueron limpiadas conforme a los lineamientos de la norma ASTM G1 (2017), la cual es la práctica estándar para la preparación, limpieza y evaluación de muestras de prueba de corrosión.

Los extremos de la barra anódica fueron recubiertos con pintura epóxica, dejando expuestos solamente 200 mm en la parte central, que corresponde a la zona activa para el monitoreo del proceso de corrosión (ver Figura 40). Para garantizar una difusión unidireccional de los cloruros, las caras laterales del espécimen fueron selladas también con recubrimiento epóxico, de modo que la solución de NaCl al 3.5% utilizada en la zona de ponding penetre únicamente desde la cara superior y se propague verticalmente hasta alcanzar las barras embebidas.

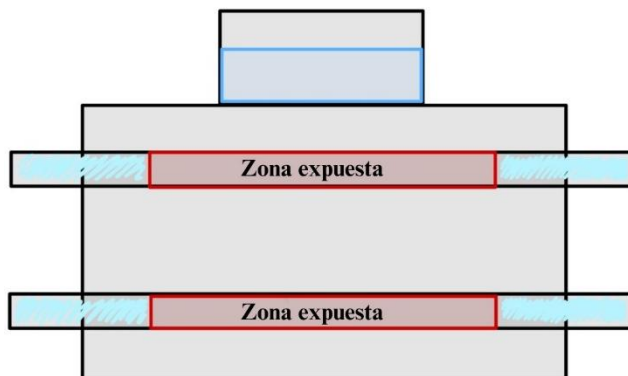


Figura 40. Detalle del recubrimiento epóxico en los extremos de la barra anódica, dejando una zona central expuesta de 200 mm para el monitoreo del proceso corrosivo.

El sistema fue conectado eléctricamente mediante un circuito que incluye interruptores y una resistencia de 10 ohmios (Figura 41). Los interruptores permanecen cerrados para permitir el paso de corriente durante la exposición, y se abren exclusivamente para realizar

las mediciones de resistencia a la polarización lineal (LPR) y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

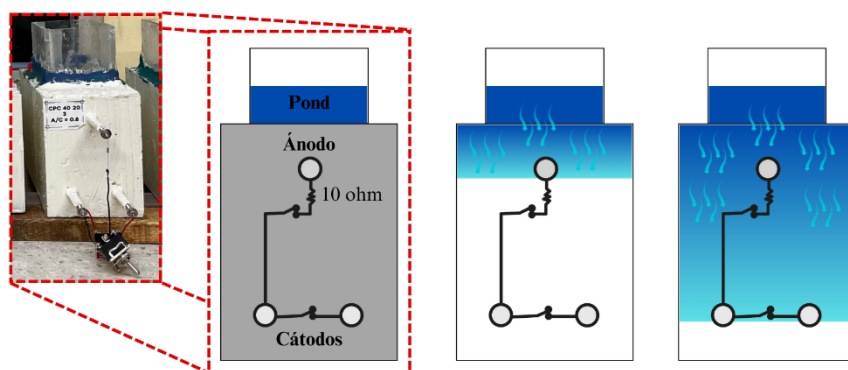


Figura 41. Esquema del circuito eléctrico utilizado para conectar los especímenes.

4.4.2 Medio de exposición acelerado

Una vez fabricados los especímenes y completado un periodo de curado húmedo de 28 días, se instalaron recipientes de lámina acrílica sobre la zona de ponding para contener la solución salina (NaCl al 3.5%). Esta etapa simula condiciones de exposición en ambientes marinos mediante ciclos acelerados de ataque por cloruros. Cada ciclo consistió en 15 días de inmersión en la solución, seguidos de 15 días de secado en ambiente controlado. Al finalizar cada ciclo, se realizaron las mediciones electroquímicas correspondientes.

4.4.3 Monitoreo electroquímico

El seguimiento de la actividad corrosiva se llevó a cabo mediante técnicas electroquímicas no destructivas.

Potencial de corrosión: Se realizaron mediciones del potencial del ánodo (Figura 42a) y del cátodo (Figura 42b) tres veces por semana, utilizando un electrodo de calomel saturado (SCE) como referencia y un multímetro digital. Para ello, el electrodo se conectó a la terminal negativa del multímetro, mientras que la barra de acero se conectó a la terminal positiva. El circuito se completó mediante el contacto del electrodo con la superficie del concreto.

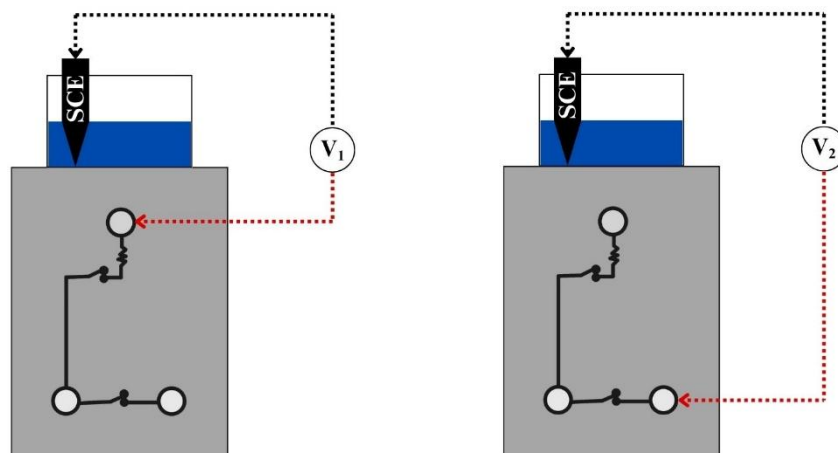


Figura 42. Esquemas para las mediciones de los potenciales de corrosión con el electrodo de calomel saturado. a) Potencial del ánodo, b) potencial del cátodo.

La interpretación de estos valores se hizo conforme a la norma ASTM C876 (2022) Método de prueba estándar para determinar el potencial de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, la cual proporciona umbrales que indican la probabilidad de presencia de corrosión, como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de evaluación de potenciales de corrosión (ASTM C876)

Potencial (mV vs. SCE)	Condición de corrosión
<-50	Condición pasiva
-50 a -126	Baja (<10%) probabilidad de corrosión
-126 a -276	Intermedia (~50%) probabilidad de corrosión
-276 a -426	Alta (>90%) probabilidad de corrosión
<-426	Corrosión severa

b) Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS): La EIS se utilizó para caracterizar con mayor precisión la velocidad de corrosión y los procesos interfaciales en el sistema acero-concreto. Esta técnica es particularmente adecuada para medios de alta resistividad como el concreto, y permite interpretar el comportamiento electroquímico mediante circuitos equivalentes.

Se aplicó una señal sinusoidal con frecuencia variable entre 10 mHz y 100 kHz utilizando un potenciostato PARSTAT MC Multichannel. Las mediciones se realizaron al finalizar cada ciclo de exposición. La configuración experimental consistió en una celda de tres

electrodos: el acero de refuerzo como electrodo de trabajo, un electrodo SCE como referencia y una malla de acero inoxidable como contraelectrodo.

c) Resistencia a la polarización lineal (LPR): Además del seguimiento de potenciales y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), se realizaron mediciones de resistencia a la polarización lineal (LPR) al finalizar cada ciclo de exposición. Esta técnica permite estimar la velocidad de corrosión a través de la obtención de la resistencia de polarización (R_p), aplicando una pequeño sobrepotencial (± 10 mV) alrededor del potencial de corrosión.

La corriente resultante se mide y se grafica contra el potencial aplicado para obtener la pendiente, que corresponde a R_p . Esta magnitud está inversamente relacionada con la densidad de corriente de corrosión (i_{cor}) según la ecuación de Stern-Geary:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (12)$$

Donde:

B : Constante de Stern-Geary, cuyo valor depende del tipo de sistema (típicamente entre 26 y 52 mV para sistemas de acero en concreto).

La configuración experimental para estas mediciones fue la misma que en el caso del EIS: celda de tres electrodos (barra de acero como electrodo de trabajo, electrodo de calomel saturado como referencia y rejilla de acero inoxidable como contraelectrodo), utilizando el mismo equipo potencioestático (PARSTAT MC Multichannel Potentiostat). En la Figura 43 se ilustra la configuración experimental que se ejecutó en el laboratorio para la medición de estos parámetros electroquímicos.

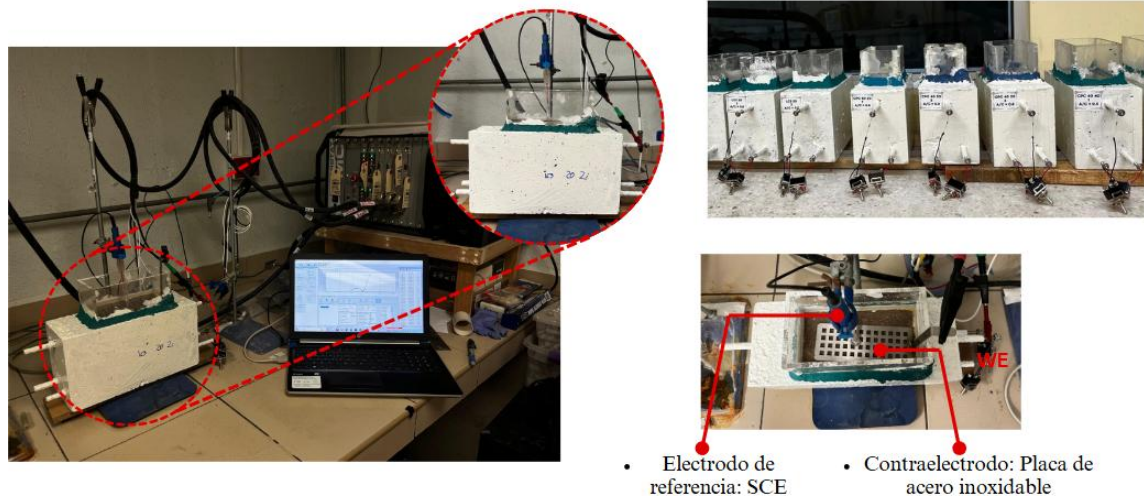


Figura 43. Esquema de la celda de tres electrodos utilizada en las pruebas de EIS y LPR.

4.5 Etapa 5 – Estimación de vida útil

4.5.1 Corrosión inducida por carbonatación

La penetración de dióxido de carbono (CO_2) en el concreto se describe comúnmente mediante la Ecuación (13), una relación parabólica que representa la profundidad de carbonatación en función del tiempo:

$$d = K \times \sqrt{t} \quad (13)$$

Donde:

d : Profundidad de carbonatación, mm

K : Coeficiente de carbonatación, $\text{mm/años}^{0.5}$

t : Tiempo, años

Esta expresión se utilizará para estimar el tiempo de iniciación de la corrosión inducida por carbonatación, considerando que la corrosión comienza cuando el frente de carbonatación alcanza la armadura de refuerzo.

4.5.2 Umbral de corrosión inducida por cloruros

Según los lineamientos propuestos por Angst et al. (2009), la configuración experimental para la determinación del umbral de cloruros debe cumplir con los siguientes criterios:

- Un electrodo de acero embebido en una matriz cementante (pasta, mortero o concreto) o sumergido en una solución simulada.
- Presencia de iones cloruro en contacto con la superficie del acero.
- Un método para detectar la despasivación del acero o evaluar si el grado de corrosión supera un límite aceptable.
- Un procedimiento para cuantificar el contenido de cloruros.

El espécimen utilizado consistió en un cilindro de concreto de 75×150 mm, como lo ilustra la Figura 44, con una barra corrugada de 3/8" como electrodo de trabajo, embebida centralmente. Las probetas fueron curadas a 25 ± 2 °C durante 28 días. La solución de exposición fue NaCl al 3.5% y se aplicaron ciclos alternados de inmersión (15 días) y secado (15 días).

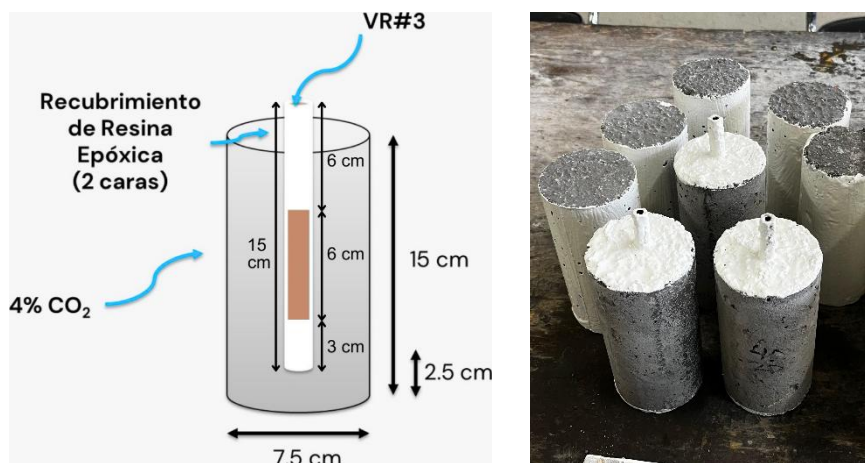


Figura 44. Especimen para determinación de umbral de cloruros.

Tras cada ciclo, se realizó un seguimiento electroquímico empleando la técnica de resistencia a la polarización lineal (LPR), con un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE) y una placa de acero inoxidable como contraelectrodo. La LPR se llevó a cabo aplicando una polarización de ± 20 mV respecto al potencial de corrosión a una velocidad de barrido de 0.16 mV/s. De forma complementaria, se utilizó espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) como herramienta de validación. La Figura 45 presenta la configuración experimental de los ensayos electroquímicos.

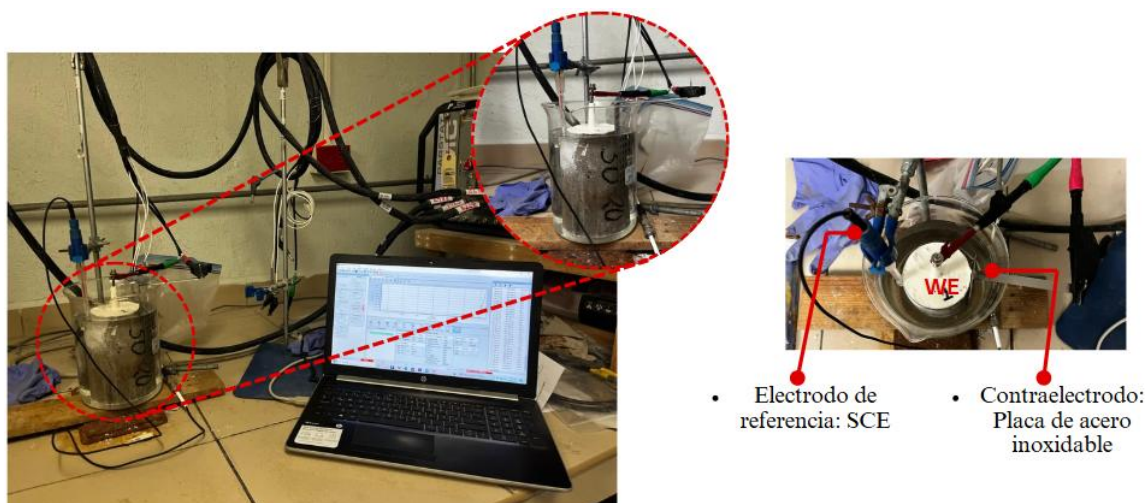


Figura 45. Configuración experimental para seguimiento electroquímico de los especímenes para la determinación del umbral de corrosión.

Se utilizaron dos criterios principales para detectar la despasivación:

1. **Potencial electroquímico:** Valores de potencial más negativos que -277 mV vs SCE se consideran indicativos de alta probabilidad de corrosión activa.
2. **Densidad de corriente:** En estos rangos de potencial, densidades de corriente superiores a $0.1\text{--}0.2\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ también señalan la ruptura de la capa pasiva.

Finalmente, el contenido de cloruros en la interfaz acero-concreto se determinó por el método de titulación potenciométrica, siguiendo la norma ASTM C1152 (2020) Método de prueba estándar para la determinación de cloruros solubles en ácido en mortero y concreto.

4.5.3 Difusión de cloruros

4.5.3.1 Coeficiente de difusión aparente

El estudio de la difusión de cloruros se realizó conforme a la norma NT Build 443, método que especifica un procedimiento para determinar los parámetros de penetración con el fin de estimar la resistencia a la penetración de cloruros en concreto endurecido u otros materiales a base de cemento. Se utilizaron especímenes cilíndricos de concreto ($75 \times 150\text{ mm}$), sellados en todas sus caras excepto la superior, para inducir una difusión

unidireccional. Estas muestras fueron sumergidas en una solución de NaCl al 3.5% y retiradas a los 120 y 150 días para realizar el perfil de concentración de cloruros.

Para ello, se cortaron rodajas de 1 cm de espesor a partir de la cara expuesta (véase Figura 46). Cada rodaja se pulverizó y tamizó (tamiz No. 20) para obtener muestras con un tamaño máximo de 850 μm . Posteriormente, se determinaron los cloruros **totales** (solubles en ácido), según la norma ASTM C1152.



Figura 46. Preparación de muestras para ensayo de coeficiente de difusión de cloruros.

El análisis químico se realizó mediante un sistema automatizado de titulación de Metrohm (véase Figura 47), conformado por:

- Titulador 848 Titrino Plus
- Dosificador 876 Dosimat Plus
- Intercambiador de muestras 869 Compact Sample Changer



Figura 47. Sistema de titulación para estimación de contenido de cloruros.

El perfil de concentración obtenido se ajustó a la segunda ley de Fick para estimar el coeficiente aparente de difusión. Con este coeficiente y el umbral de deterioro, es posible determinar el tiempo de iniciación de la corrosión inducida por cloruros.

4.5.3.2 Capacidad de fijación de cloruros

Con los mismos especímenes y condiciones descritas en la sección anterior, se determinó la capacidad de fijación de cloruros. En este caso, se cuantificaron los cloruros libres (solubles en agua), conforme a la norma ASTM C1218 (2020).

Posteriormente, se calcularon los cloruros fijados mediante la relación:

$$C_b = C_t - C_f \quad (14)$$

Donde:

C_b : Cloruros fijados

C_t : Cloruros totales

C_f : Cloruros libres

A partir de estos datos, se construyeron las tres isothermas de fijación más comunes. En la ecuación de cada isoterma se encuentran constantes α y β , los cuales son parámetros teóricos de ajuste que se calculan a partir de los datos experimentales de cloruros libres y fijados.

- **Isoterma lineal o de Tutti (Ecuación (15))**

$$C_b = \alpha C_f \quad (15)$$

Donde α es una constante.

- **Isoterma de Langmuir (Ecuación (16))**

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad (16)$$

Donde α y β son constantes.

- **Isoterma de Freundlich (Ecuación (17))**

$$C_b = \alpha C_f^\beta \quad (17)$$

Donde α y β son constantes.

Se evaluó cuál de los modelos proporcionaba el mejor ajuste a los datos experimentales y, con base en este, se determinó el contenido límite de cloruros (C_L) en función de la concentración de cloruros fijados, según la Ecuación (18).

$$C_b^{-1} = (K \times C_f)^{-1} + C_L^{-1} \quad (18)$$

Donde K es la constante de ajuste y hace relación a la pendiente de la recta.

Capítulo 5- Resultados y análisis

5.1 Diseño de mezcla y propiedades mecánicas

5.1.1 Caracterización de los materiales

5.1.1.1 Propiedades de los agregados

El agregado fino corresponde a arena No. 4 y módulo de finura de 3.15. En la Figura 48 se muestra la granulometría de este material junto con los límites establecidos por la especificación de agregados para concreto ASTM C33 (2023). La Tabla 3 presenta un resumen de la caracterización del agregado fino.

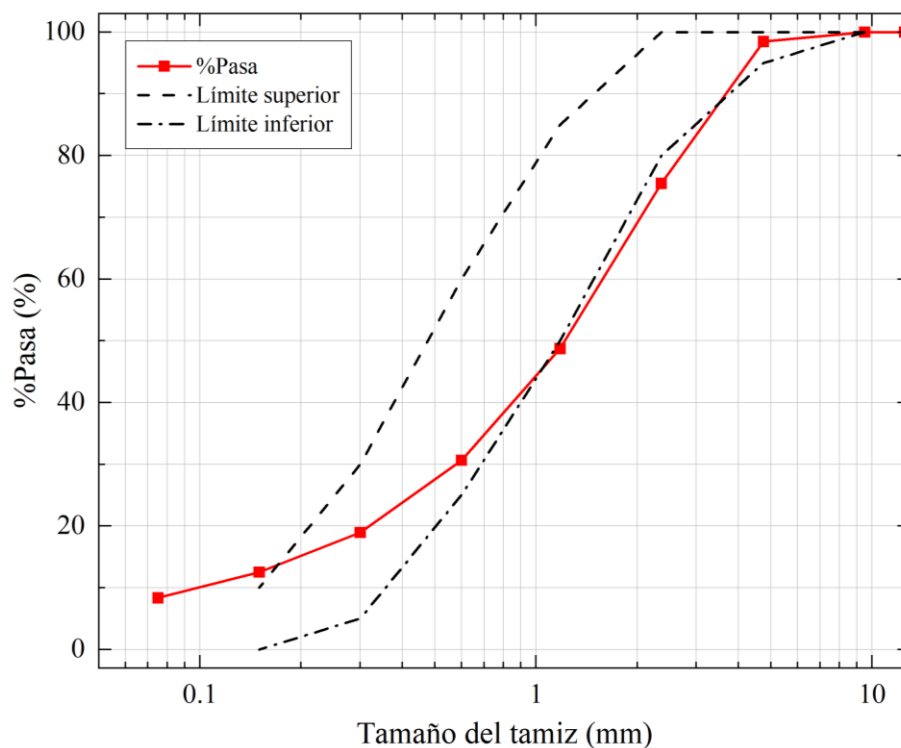


Figura 48. Curva de gradación de la arena.

Tabla 3. Propiedades del agregado fino

Propiedad	Resultado
Módulo de finura	3.15
Densidad seca [g/cm ³]	2.69
Densidad SSS [g/cm ³]	2.74

Absorción2.04%

El agregado grueso usado en la elaboración de mezclas es una grava con tamaño máximo nominal ¾” (19 mm). En la Figura 49 se muestra la granulometría de este material junto con los límites establecidos por la especificación de agregados para concreto ASTM C33 (2023). La Tabla 4 presenta un resumen de la caracterización del agregado grueso.

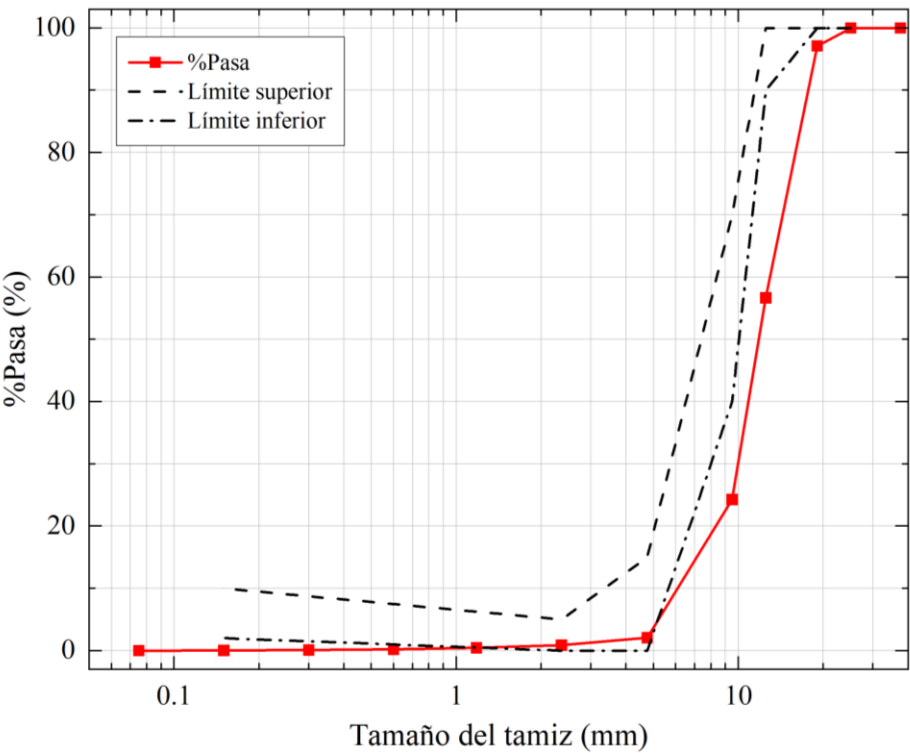


Figura 49. Curva de gradación de la grava

Tabla 4. Propiedades del agregado grueso

Propiedad	Resultado
Tamaño máximo nominal [mm]	19
Densidad seca [g/cm³]	2.41
Densidad SSS [g/cm³]	2.43
Absorción	0.56%
Peso volumétrico varillado seco - PVVS [g/cm³]	1524

5.1.1.2 Composición química de los cementantes

Para determinar la composición química de los materiales cementantes, se empleó la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). El análisis se llevó a cabo utilizando una muestra prensada en pastillas, utilizando una cera inerte como aglutinante. Los resultados obtenidos fueron procesados con el software Omnian y se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química de los materiales cementantes

Compuesto	C80	C60	C50
Na ₂ O	-	0.43%	-
MgO	0.85%	0.70%	0.65%
Al ₂ O ₃	3.30%	4.20%	5.53%
SiO ₂	14.80%	19.16%	16.43%
SO ₃	3.63%	3.51%	3.10%
K ₂ O	1.11%	1.26%	0.67%
CaO	63.50%	56.36%	51.98%
MnO	0.04%	0.06%	0.05%
Fe ₂ O ₃	3.51%	2.91%	4.83%
SrO	0.29%	0.24%	0.19%
BaO	0.14%	0.17%	0.11%
LOI	8.41%	10.67%	15.84%

El análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) permitió obtener una caracterización química detallada de los cementos adicionados, lo que facilita comprender mejor sus propiedades y comportamiento en función de los compuestos presentes. De acuerdo con la norma ASTM C595 (2025) Especificación estándar para cementos hidráulicos adicionados, los cementos Portland-puzolánicos (Tipo IP) y Portland-caliza (Tipo IL) deben cumplir requisitos específicos de composición química. En este sentido, los tres cementos analizados presentan contenidos de MgO inferiores al límite máximo del 6 %, establecido para cementos Tipo IP. Respecto al trióxido de azufre (SO₃), se observaron valores entre 3.10 y 3.63 %, ligeramente por encima del límite máximo de 3 % para cementos Tipo IL y cerca de 4 % para Tipo IP. En cuanto a la pérdida por ignición (LOI), todos los cementos exceden el máximo permitido de 5% para cementos con adiciones puzolanas. Sin embargo, la norma permite un máximo de 10% de LOI al adicionar caliza,

por lo que el C80 y ligeramente el C60 cumplen con esta especificación y el C50 la excede. Por otra parte, el contenido de CaO y SiO₂ se encuentra en rangos característicos de los cementos adicionados, aunque con una disminución progresiva de CaO conforme aumenta la sustitución. Finalmente, dado que uno de los cementos corresponde a una mezcla IP-IL, es importante señalar que la ASTM C595 exige que la caliza empleada en este tipo de cementos posea un contenido total de carbonatos ≥ 70 % y de carbonato de calcio ≥ 40 %, determinados a partir de los óxidos de CaO y MgO.

5.1.1.3 Composición mineralógica de los cementantes

La técnica de difracción de rayos X (DRX) se empleó para identificar la estructura cristalina de los materiales cementantes, basándose en la posición de los ángulos de difracción y en la intensidad de los picos generados por los rayos secundarios. Los polvos obtenidos de cada muestra fueron analizados en un difractómetro PANalytical Empyrean, operando en un rango de barrido de 2 θ entre 10° y 70°. Cada muestra generó un difractograma individual, los cuales fueron procesados y analizados mediante el software X'Pert HighScore Plus. Los resultados se presentan en la Figura 50.

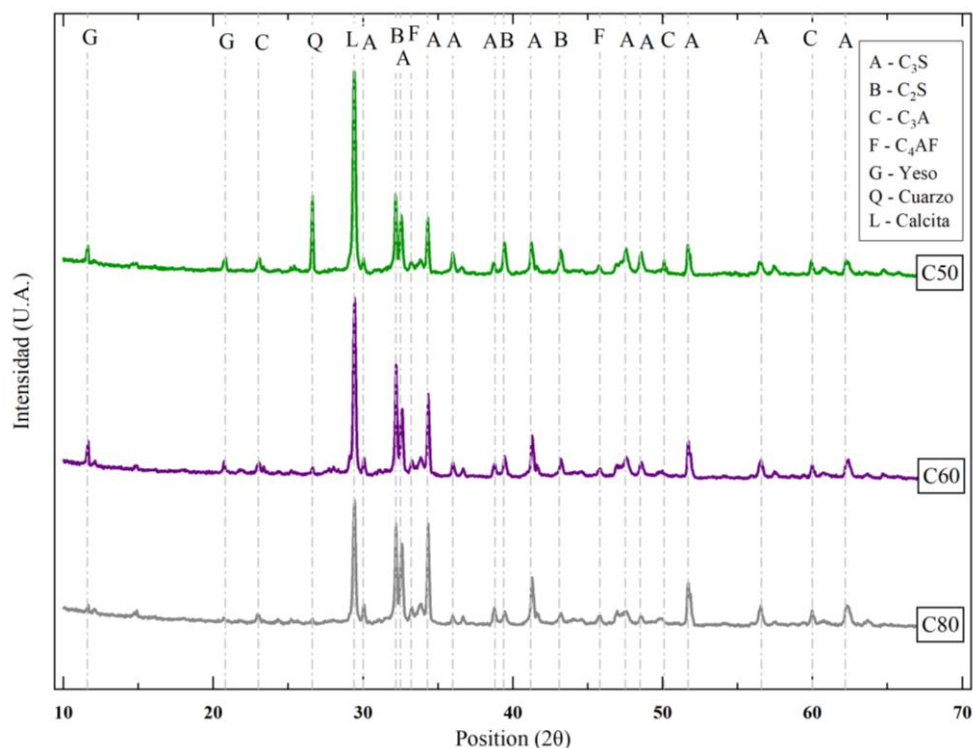


Figura 50. Difractograma de Rayos X de los cementantes en estudio.

Dado que el componente principal de los cementos analizados es el clínker —en proporciones aproximadas de 50 %, 60 % y 80 %—, se identificaron en todos los casos los picos característicos de las fases minerales del cemento: alita (C_3S), belita (C_2S), celita (C_3A), ferrita (C_4AF) y yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), este último adicionado para controlar el fraguado inicial. Además de estas fases, los difractogramas revelaron únicamente la presencia de calcita y cuarzo, lo cual se explica por la naturaleza de las adiciones empleadas en los cementos mezclados. La calcita proviene directamente de la piedra caliza incorporada en la molienda final, mientras que el cuarzo corresponde al componente cristalino residual de la arcilla calcinada. La ausencia de otras fases cristalinas en la arcilla se debe a que la caolinita original se transformó completamente durante el proceso de calcinación, como lo evidencia la inexistencia de sus picos característicos en el DRX. Este proceso de deshidroxilación de la caolinita conduce a la formación de una fase amorfizada altamente reactiva, que constituye el principal aporte puzolánico de las arcillas calcinadas (Nguyen et al., 2018).

5.1.1.4 Distribución de tamaño de partícula de los cementantes

Como parte de la caracterización física, se determinó la distribución de tamaño de partícula, cuyos resultados se muestran en la Figura 51. A partir de los resultados obtenidos, es posible extraer información importante de las propiedades de los materiales, las cuales se muestran en la Tabla 6.

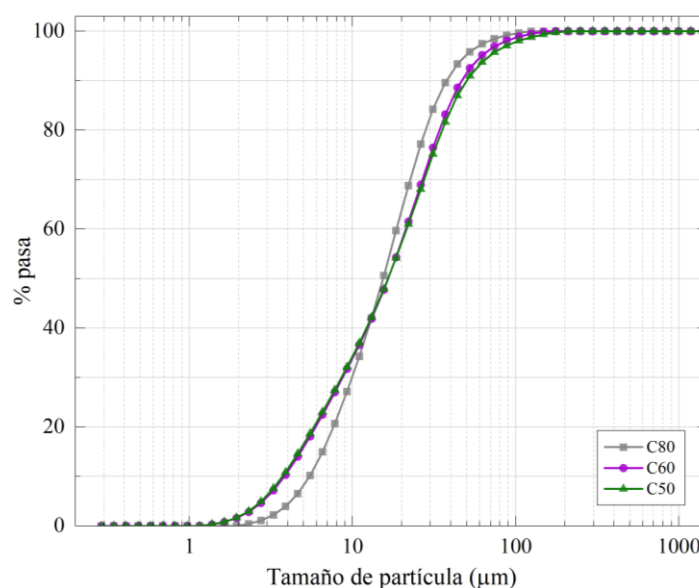


Figura 51. Distribución de tamaño de partícula de los cementantes en estudio.

Tabla 6. Propiedades físicas de los cementantes

Parámetro	C80	C60	C50
Tamaño Máximo [μm]	104.7	148.0	176.0
D50 [μm]	15.38	16.55	16.52

5.1.1.5 Densidad, tiempo de fraguado y consistencia normal

Para el cálculo del proporcionamiento en los diseños de mezcla de concreto, se determinó la densidad de los tres tipos de cementantes, cuyos resultados se presentan en la Tabla 7. Estos valores evidencian la influencia del tamaño de partícula de las adiciones minerales, las cuales pueden generar ligeras variaciones en la densidad del material final.

Asimismo, se elaboraron mezclas de pastas de cemento con la consistencia normal de la Figura 52 con el fin de evaluar los tiempos de fraguado inicial y final, cuyos resultados obtenidos se muestran en la Figura 53. Según la norma NMX C414 (2014), los cementos en México deben mostrar un fraguado inicial no menor a 45 minutos y un fraguado final no mayor a 600 minutos; bajo este criterio, los tres cementos analizados cumplen satisfactoriamente. Sin embargo, se observan diferencias en la duración de los tiempos de fraguado: el cemento con 60% de clínker y adiciones puzolánicas presenta los valores más altos, seguido por el cemento LC³, mientras que el cemento con 80% de clínker muestra los fraguados más cortos. Esta tendencia se explica porque las puzolanas naturales y la ceniza volante reaccionan lentamente en las primeras horas, retardando la formación de productos hidratados y prolongando el fraguado (Rafieizonooz et al., 2022). En contraste, en el LC3 la presencia de metacaolinita promueve reacciones puzolánicas tempranas con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado, acelerando la hidratación y reduciendo los tiempos respecto al primer caso (Zhao & Zhang, 2023). Finalmente, el cemento con mayor proporción de clínker desarrolla una hidratación más rápida de sus fases principales (C_3S y C_3A), lo que se traduce en los menores tiempos de fraguado entre los cementos evaluados.

Tabla 7. Resultados de consistencia normal y coeficiente de variación para tres réplicas

Tipo de cemento	Densidad		Consistencia normal	
	Promedio	CV [%]	Promedio	CV [%]
C80	3.00	0.12%	0.29	2.5%
C60	2.86	0.18%	0.28	2.2%

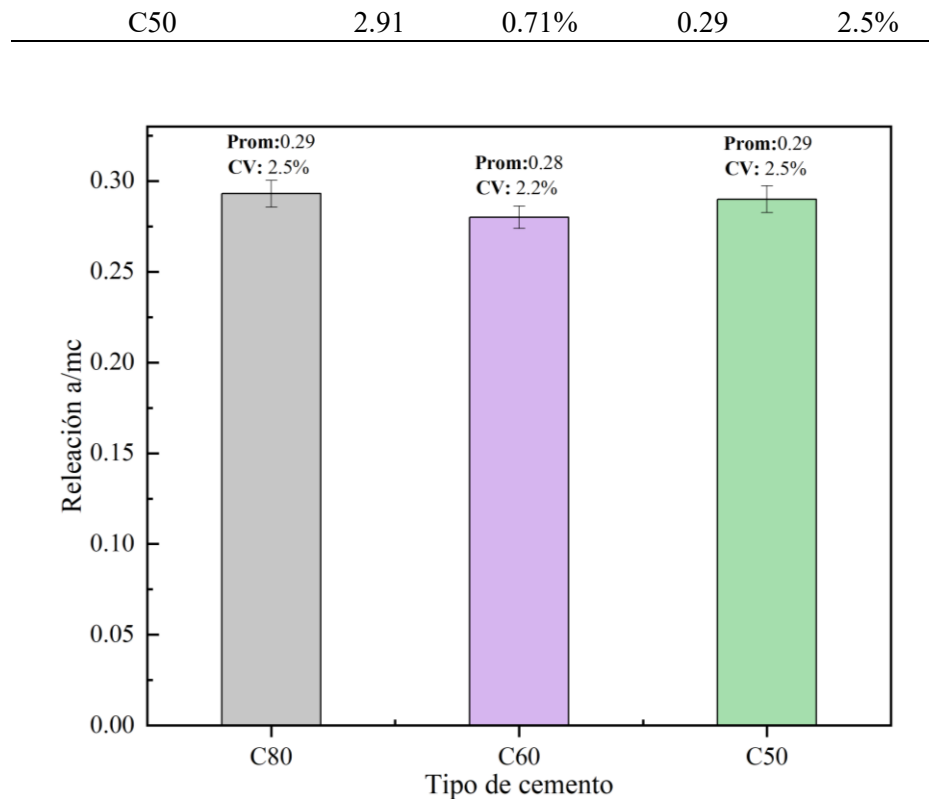


Figura 52. Consistencia normal determinada para cada tipo de cementante.

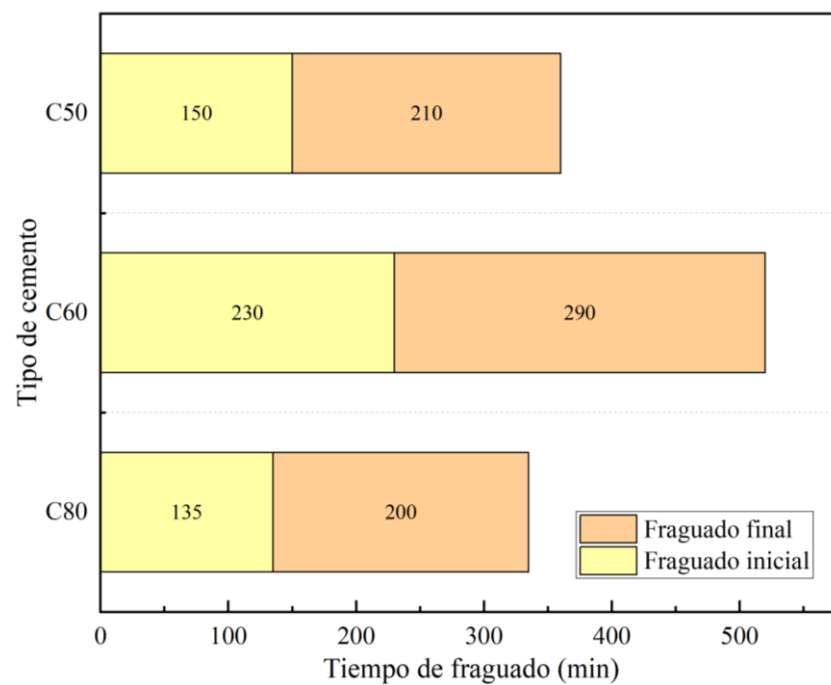


Figura 53. Resultados de los tiempos de fraguado inicial y final de las pastas cementantes.

Finalmente, se fabricaron cubos de mortero empleando arena estandarizada y la consistencia normal que se observa en la Figura 54. Los resultados de resistencia a compresión (Figura 55) muestran valores iniciales relativamente bajos a 3 días en el cemento con menor contenido de clínker. Este comportamiento se atribuye a que la reducción de clínker disminuye la cantidad de fases altamente reactivas (principalmente C_3S), responsables del desarrollo de resistencia temprana. En su lugar, la hidratación inicial depende en mayor medida de las reacciones puzolánicas entre el $Ca(OH)_2$ y las adiciones minerales, las cuales evolucionan de manera más lenta en las primeras edades. Sin embargo, estas mismas reacciones contribuyen a una microestructura más densa y refinada en el largo plazo, lo que explica la ganancia sostenida de resistencia a medida que avanza el curado, manteniéndose esta tendencia hasta los 90 días en comparación con el otro cemento de clase resistente similar (Scrivener, Avet, et al., 2018).

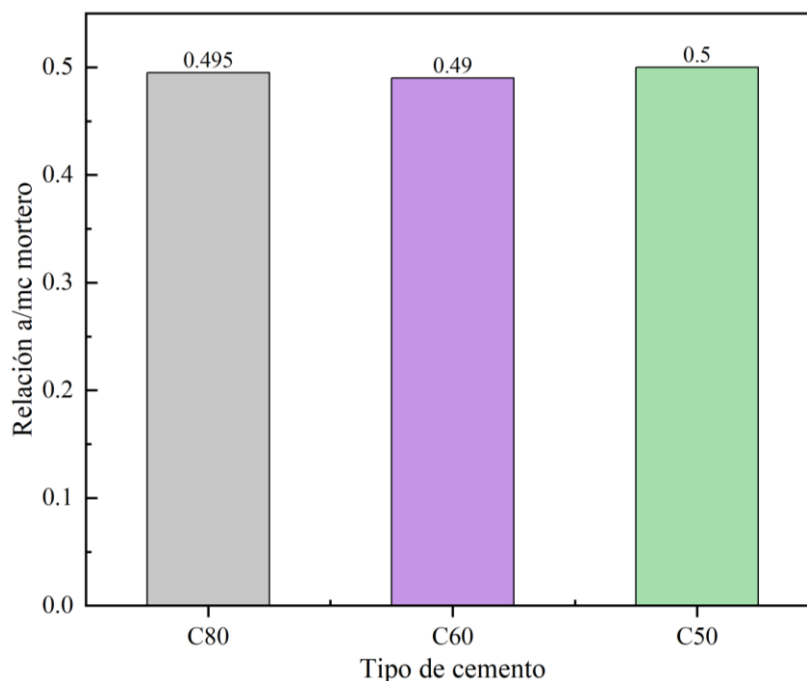


Figura 54. Consistencia normal para fabricación de cubos de mortero.

Tabla 8. Precisión y sesgo de los resultados de resistencia a la compresión en cubos de mortero a 3, 7, 28 y 90 días.

Cementante	Edad	Resistencia (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV
C80	3	23.1	0.8	3.5%
	7	34.7	1.3	3.7%
	28	41.1	1.5	3.7%
	90	42.6	1.6	3.8%
C60	3	17.7	0.5	2.8%
	7	23.9	0.8	3.3%
	28	29.0	0.9	3.0%
	90	36.9	1.3	3.5%
C50	3	14.7	0.4	2.7%
	7	28.0	1.0	3.6%
	28	36.1	0.9	2.5%
	90	39.7	1.3	3.3%

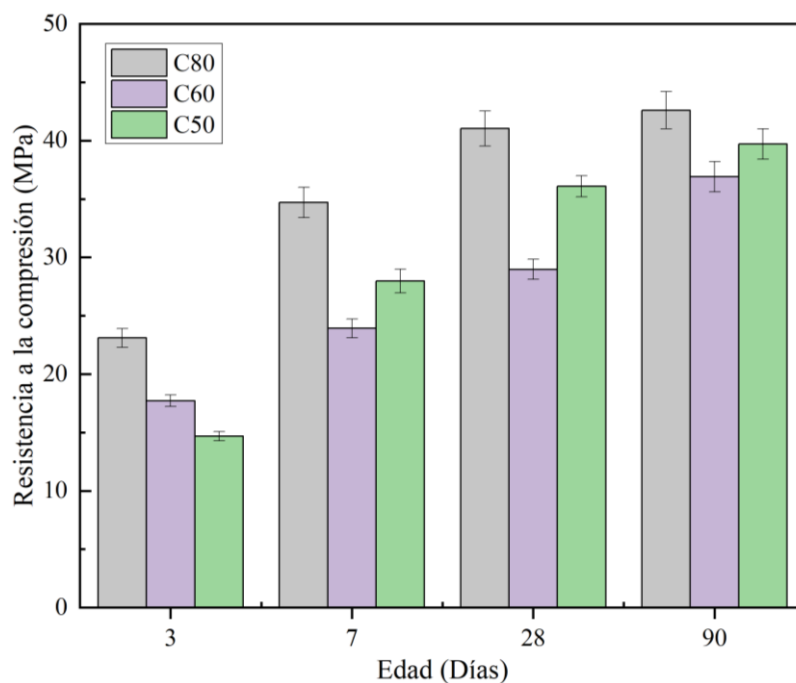


Figura 55. Evolución de la resistencia a compresión en cubos de mortero a 3, 7, 28 y 90 días.

El análisis de la evolución de la resistencia a compresión en función de la edad, complementado con el cálculo de las pendientes de las curvas (MPa/día), permite entender

mejor la cinética de ganancia de resistencia de los diferentes cementantes. El C80 muestra un incremento inicial relativamente alto entre 3 y 7 días (pendiente ≈ 2.9 MPa/día), lo cual evidencia una hidratación temprana más rápida, aunque a edades posteriores (28 a 90 días) la pendiente disminuye de manera significativa (≈ 0.02 MPa/día), indicando que el material alcanza un estado de maduración más temprano y tiende a estabilizarse. En contraste, el C60 presenta un inicio más lento, con menor pendiente a los primeros 3-7 días (≈ 1.6 MPa/día), pero mantiene una ganancia más constante hasta los 90 días (0.11 MPa/día en el rango 28-90 días), lo que sugiere un efecto retardado de las adiciones puzolánicas que contribuye a una hidratación progresiva. Finalmente, el tipo LC³ C50 evidencia la resistencia más baja a 3 días, pero con una pendiente destacada entre 3 y 7 días (≈ 3.3 MPa/día), que supera incluso a la del C80, y una tendencia sostenida de ganancia de resistencia a edades más avanzadas (≈ 0.06 MPa/día de 28 a 90 días). Esto indica que, aunque los cementos con menor contenido de clinker presentan un arranque más lento en términos de resistencia inicial, su capacidad de reacción puzolánica contribuye a una evolución más favorable en el mediano y largo plazo, acercándose e incluso superando a los cementos con mayor contenido de clinker.

5.1.2 Diseños de mezclas de concreto

5.1.2.1 Elaboración de mezclas de prueba

Para la elaboración de las mezclas de prueba, inicialmente se siguieron los parámetros del ACI Committee 211 (2009) y se realizaron proporcionamientos de acuerdo con el método de volúmenes absolutos. Con el fin de evaluar la fluidez y la resistencia del diseño, se preparan varias batchadas de las mezclas propuestas, ajustando los parámetros según sea necesario para cumplir con los requisitos establecidos. La Figura 56 ilustra la necesidad de ajustar la proporción de ingredientes, como la relación entre grava y arena, la cantidad de aditivo y otros factores, con el objetivo de alcanzar el nivel de revenimiento deseado.

El procedimiento de mezclado se llevó a cabo conforme a la norma ASTM C192 (2016), iniciando con la incorporación de los agregados junto con una fracción del agua de mezclado para favorecer la homogenización inicial. A continuación, se adicionaron el cemento, el agua restante y el aditivo, manteniendo el mezclado durante 3 minutos. Seguidamente, la mezcla se dejó en reposo por 3 minutos para permitir la absorción parcial

de agua por los agregados y la dispersión de los aditivos, finalizando con 2 minutos adicionales de mezclado. Este proceso garantiza la adecuada uniformidad y trabajabilidad de las mezclas, así como la repetibilidad en las propiedades evaluadas.



Figura 56. Elaboración de mezclas de prueba. a) Primera bachada con diseño de mezcla inicial.
b) Quinta bachada con diseño ajustado y cumplimiento de revenimiento.

Una vez se cumplen los parámetros de diseño en estado fresco del concreto, se procede a la elaboración de especímenes cilíndricos para la evaluación de la resistencia a la compresión. Verificado que los diseños cumplen tanto con el revenimiento como con la resistencia objetivo en el cemento de referencia, se definen los diseños definitivos para los especímenes de ensayo correspondientes a los tres tipos de cementantes.

5.1.2.2 Diseños definitivos para las mezclas de concreto

Una vez validados los diseños preliminares en estado fresco y endurecido para el cemento de referencia (C80), se definieron los diseños definitivos de mezcla que servirían como base para comparar el desempeño de los tres tipos de cementos. Para ello, se seleccionaron las relaciones agua/cementante y consumos de cemento que permitieran alcanzar resistencias objetivo de 20, 40, 60 y 70 MPa únicamente con el cemento C80, el cual contiene un 80 % de clínter. Los otros dos cementos (C60 y C50) utilizaron el mismo proporcionamiento establecido con el cemento de referencia, con el fin de evaluar las variaciones resultantes en propiedades mecánicas, estabilidad volumétrica y durabilidad.

La Figura 57 presenta la evolución de la resistencia a compresión en función de la relación a/mc y del consumo de cemento. Se observa que, conforme aumenta la resistencia, la

relación a/mc disminuye de manera marcada, pasando de 0.82 para 20 MPa a 0.28 para 70 MPa, lo que confirma la fuerte dependencia entre la reducción de la relación agua/cemento y el incremento en la resistencia mecánica. En paralelo, el consumo de cemento muestra un aumento progresivo, desde 180 kg/m³ para resistencias de 20 MPa hasta 600 kg/m³ en concretos de 70 MPa. Este comportamiento evidencia que para alcanzar resistencias elevadas se requiere no solo limitar el agua disponible en la mezcla, sino también incrementar significativamente la cantidad de cemento, lo que implica un mayor costo y huella ambiental. La doble escala permite visualizar que ambos parámetros —relación a/mc y consumo de cemento— están fuertemente correlacionados con la resistencia, aunque con tendencias opuestas: mientras la relación a/mc decrece, el consumo de cemento aumenta.

Para todos los diseños, se mantuvo constante una relación grava/arena entre 0.71-0.72 y se ajustaron las dosis de aditivo superplastificante hasta alcanzar un revenimiento de 12 ± 2 cm. Desde la Tabla 9 a la Tabla 12 se resumen los diseños de mezcla adoptados para los diferentes cementos y niveles de resistencia.

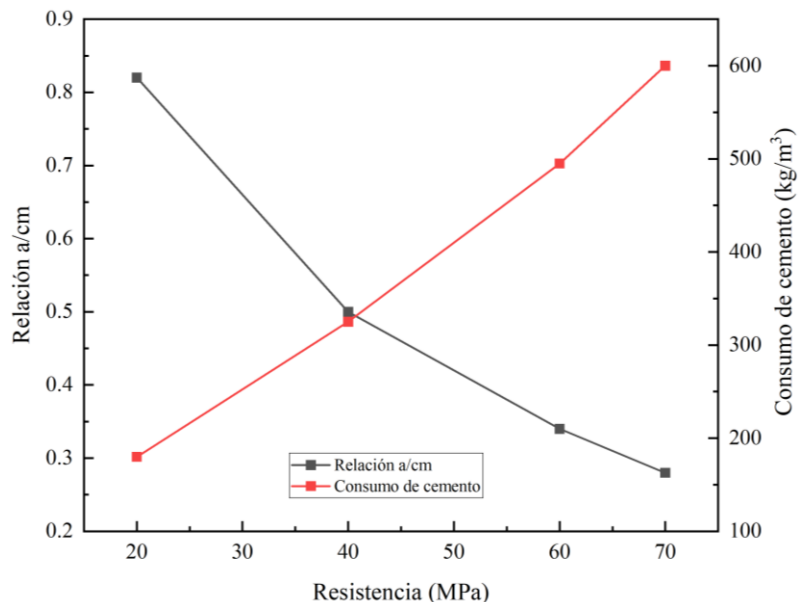


Figura 57. Relaciones agua/cementante y consumos de cementante utilizados para alcanzar las resistencias objetivo de 20, 40, 60 y 70 MPa en las mezclas de referencia.

Tabla 9. Proporciones de mezcla para concretos M20 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno.

Proporcionamiento y propiedades del concreto	M20		
	C80-0.82	C60-0.82	C50-0.82
Tipo de cementante	C80	C60	C50
Relación agua/cementante	0.82	0.82	0.82
Relación grava/arena	0.71	0.72	0.71
Consumo de cementante (kg/m ³)	180	180	180
Contenido de agua (kg/m ³)	147.6	147.6	147.6
Contenido de agregado fino (kg/m ³)	1176.8	1169.5	1172.4
Contenido de agregado grueso (kg/m ³)	838.2	838.2	838.2
Aire de diseño (%)	2	2	2
Aditivo WR1 (kg/m ³)	1.7	1.7	1.7
Aditivo WR2 (kg/m ³)	-	-	-
Asentamiento (mm)	120	140	140

Tabla 10. Proporciones de mezcla para concretos M40 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno.

Proporcionamiento y propiedades del concreto	M40		
	C80-0.5	C60-0.5	C50-0.5
Tipo de cementante	C80	C60	C50
Relación agua/cementante	0.50	0.50	0.50
Relación grava/arena	0.71	0.72	0.72
Consumo de cementante (kg/m ³)	325	325	325
Contenido de agua (kg/m ³)	162.5	162.5	162.5
Contenido de agregado fino (kg/m ³)	1079.0	1068.4	1072.8
Contenido de agregado grueso (kg/m ³)	768.1	768.1	768.1
Aire de diseño (%)	2	2	2
Aditivo WR1 (kg/m ³)	-	-	-
Aditivo WR2 (kg/m ³)	2.5	1.4	1.8
Asentamiento (mm)	130	140	135

Tabla 11. Proporciones de mezcla para concretos M60 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno.

Proporcionamiento y propiedades del concreto	M60		
	C80-0.5	C60-0.5	C50-0.5
Tipo de cementante	C80	C60	C50
Relación agua/cementante	0.34	0.34	0.34
Relación grava/arena	0.71	0.71	0.71
Consumo de cementante (kg/m ³)	495	495	495

Contenido de agua (kg/m ³)	168.3	168.3	168.3
Contenido de agregado fino (kg/m ³)	982.0	970.9	975.9
Contenido de agregado grueso (kg/m ³)	701.0	693.4	694.9
Aire de diseño (%)	2	2	2
Aditivo WR1 (kg/m ³)	-	-	-
Aditivo WR2 (kg/m ³)	2.6	2.2	1.8
Asentamiento (mm)	120	140	150

Tabla 12. Proporciones de mezcla para concretos M80 y sus parámetros relevantes. Las masas de los materiales se expresan en condición seca al horno.

Proporcionamiento y propiedades del concreto	M70		
	C80-0.5	C60-0.5	C50-0.5
Tipo de cementante	C80	C60	C50
Relación agua/cementante	0.28	0.28	0.28
Relación grava/arena	0.71	0.71	0.71
Consumo de cementante (kg/m ³)	600	600	600
Contenido de agua (kg/m ³)	168.0	168.0	168.0
Contenido de agregado fino (kg/m ³)	929.0	916.6	922.3
Contenido de agregado grueso (kg/m ³)	662.9	652.3	655.3
Aire de diseño (%)	2	2	2
Aditivo WR1 (kg/m ³)	-	-	-
Aditivo WR2 (kg/m ³)	2.6	2.3	2.4
Asentamiento (mm)	125	135	130

5.1.3 Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para las mezclas en estudio se presentan en la Figura 58, la cual muestra la evolución de la resistencia a distintas edades (3, 7, 28, 56 y 90 días) para los tres cementos evaluados (C80, C60 y C50) en función de la relación agua-cementante (a/cm). En la Figura 58A se observa la mezcla M20 (a/cm = 0.82), en la Figura 58B la mezcla M40 (a/cm = 0.50), en la Figura 58C la mezcla M60 (a/cm = 0.34) y en la Figura 58D la mezcla M70 (a/cm = 0.28). Los datos puntuales que respaldan estas curvas, incluyendo las desviaciones estándar y coeficientes de variación, se detallan en la Tabla 13 para la mezcla M20 y M40 y en la Tabla 14 para M60 y M70.

Tabla 13. Precisión y sesgo de los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas M20 y M40 con los tres tipos de cemento en estudio

Cementante	Edad	Mezcla M20			Mezcla M40		
		Resistencia (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV	Resistencia (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV
C80	3	15.1	0.4	2.60%	26.5	0.8	3.00%
	7	18.2	0.5	3.00%	31.2	0.5	1.70%
	28	21.8	0.7	3.00%	38	0.4	1.20%
	56	22.7	0.5	2.20%	39	0.6	1.50%
	90	23.2	0.4	1.80%	39.7	0.8	2.00%
C60	3	8	0.3	3.10%	10.6	0.3	2.40%
	7	12.5	0.4	3.20%	28.6	0.9	3.10%
	28	15.2	0.3	2.00%	31.7	0.7	2.20%
	56	16	0.4	2.50%	33.8	0.4	1.20%
	90	17.5	0.5	2.90%	36.8	0.6	1.50%
C50	3	7	0.2	3.10%	9.5	0.2	2.30%
	7	13	0.4	3.00%	28.7	0.8	2.80%
	28	16	0.5	2.80%	33	0.5	1.40%
	56	17.9	0.4	2.00%	34.7	0.9	2.60%
	90	18.7	0.2	1.10%	37.4	1.2	3.20%

Tabla 14. Precisión y sesgo de los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas M60 y M70 con los tres tipos de cemento en estudio

Cementante	Edad	Mezcla M60			Mezcla M70		
		Resistencia (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV	Resistencia (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV
C80	3	37.2	0.6	1.60%	50.3	1.5	3.00%
	7	49.3	1.5	3.10%	67.3	1.9	2.80%
	28	60.7	0.6	1.00%	69.7	1.7	2.40%
	56	61.4	0.4	0.70%	71.7	2.2	3.10%
C60	3	30	0.6	2.10%	45.1	1.4	3.10%
	7	46.9	1.4	3.00%	51.6	0.7	1.30%
	28	52.8	1.5	2.80%	59.6	1.9	3.20%
	56	54.6	1.2	2.20%	65.4	1.8	2.80%
C50	3	33.1	0.8	2.30%	40.7	0.8	2.00%
	7	49.1	1	2.10%	56.6	1.2	2.20%
	28	57.1	1.7	3.00%	60.7	1.9	3.10%
	56	58.7	1.8	3.10%	66.3	1.8	2.70%

Con los datos de la Tabla 13 y la Tabla 14 se realizó un análisis de pendientes como indicador de ganancia de resistencia para las edades de evaluación, revelando diferencias significativas entre los tres cementantes evaluados. Para la resistencia objetivo de 20 MPa (véase Figura 58A), el cemento con mayor contenido de clinker (C80) mostró un incremento inicial moderado (≈ 0.8 MPa/día), mientras que los cementos adicionados (C60 y C50) presentaron pendientes más elevadas en los primeros 7 días (1.1–1.5 MPa/día). Lo anterior se ve afectado principalmente por la poca ganancia de resistencia que tienen los cementos adicionados los primeros tres días de curado, lo cual hace que la tasa de evolución sea más elevada al séptimo día en comparación con el C80 que tiene alto contenido de clinker y por la naturaleza de sus componentes puede desarrollar mayores resistencias tempranas.

En el caso de M40, las diferencias se acentúan, las cuales también se pueden observar gráficamente en la Figura 58B. El cemento C80 evidenció un desarrollo progresivo y relativamente uniforme, con incrementos en torno a 1.2 MPa/día en las primeras edades y una estabilización paulatina hasta los 90 días. En contraste, los cementos C60 y C50 registraron pendientes muy altas en los primeros intervalos (≈ 4.5 – 4.8 MPa/día entre 3 y 7 días), lo que refleja una reacción inicial acelerada. Sin embargo, después de este periodo, la ganancia disminuyó de forma notoria, mostrando las altas tasas de ganancia de resistencia se concentran en edades tempranas.

Para la resistencia objetivo de 60 MPa, como lo ilustra la Figura 58C, las mezclas M60 para los tres cementantes siguieron una tendencia similar, con un fuerte incremento inicial y una reducción progresiva de las pendientes a medida que avanza el curado. El C80 presentó una ganancia elevada y sostenida (≈ 3.0 MPa/día entre 3 y 7 días). Por su parte, los cementos C60 y C50 alcanzaron pendientes todavía mayores (≈ 4.0 MPa/día), aunque, al igual que en los casos anteriores, estas se estabilizaron a edades avanzadas.

En la mezcla M70 todos los cementantes dependieron de un arranque muy rápido para alcanzar los valores de diseño (véase Figura 58D). El cemento C80 exhibió la pendiente más elevada en los primeros días (≈ 4.3 MPa/día entre 3 y 7 días), aunque su ganancia se volvió casi nula en edades posteriores. Los cementos adicionados mostraron un patrón similar, si bien el C60 tuvo un inicio más lento en comparación con el C50. Estos

resultados evidencian que, a resistencias tan altas, el desempeño depende en gran medida de la hidratación inicial del clinker y de la densificación de la matriz, mientras que las reacciones secundarias de las adiciones tienen un efecto limitado en el crecimiento a largo plazo.

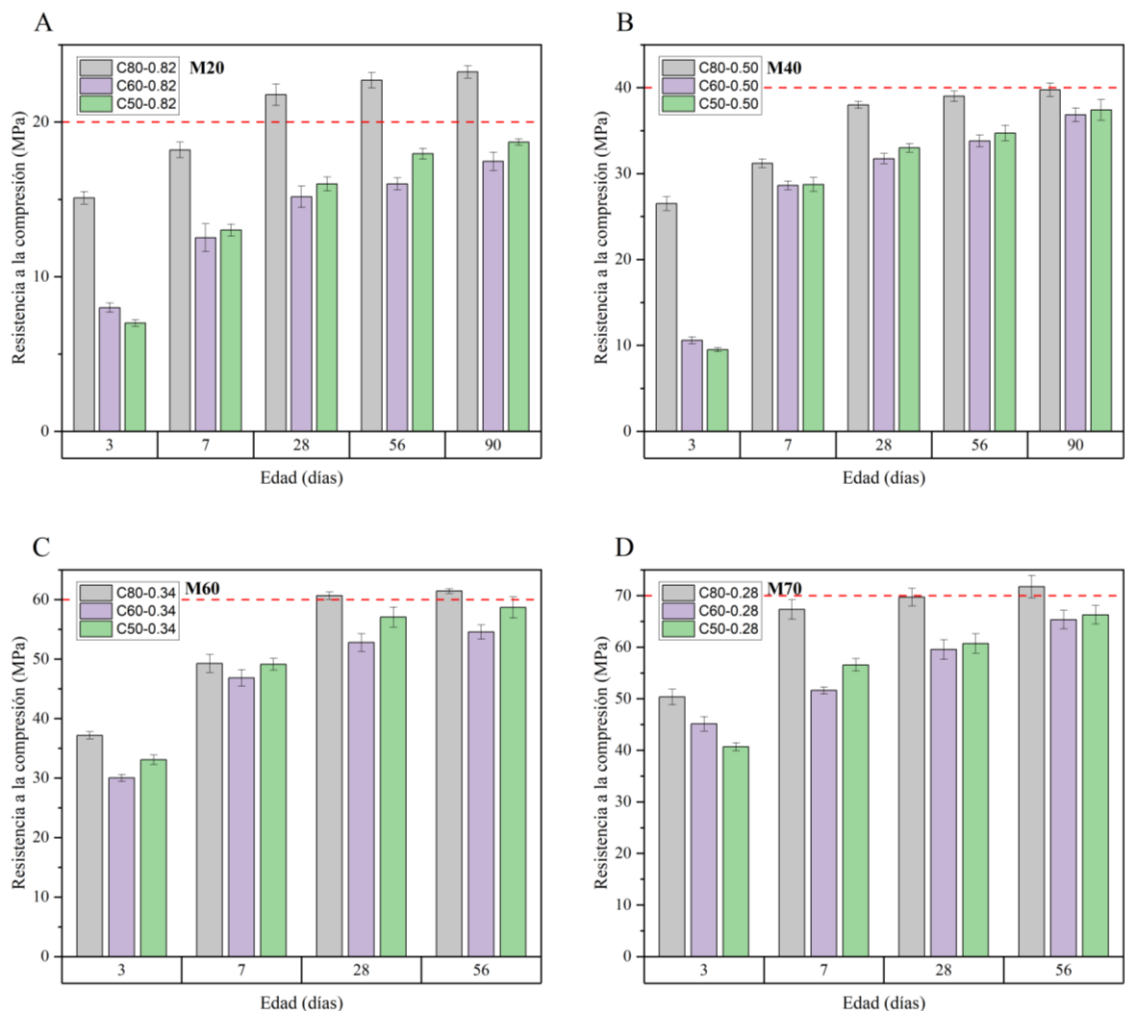


Figura 58. Evolución de la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, evaluadas a distintas relaciones agua/cementante. A) Mezcla M20 (a/cm = 0.82) con resistencia objetivo de 20 MPa. B) Mezcla M40 (a/cm = 0.50). C) Mezcla M60 (a/cm = 0.34). D) Mezcla M70 (a/cm = 0.28).

Los resultados de resistencia a la compresión evidencian el efecto combinado del contenido de clinker y la relación agua-cementante (a/cm) en el desarrollo mecánico de las mezclas estudiadas. Para la mezcla de referencia de 20 MPa (Figura 58A), el cemento con 80 % de clinker (C80) supera ampliamente a los otros dos cementos: a 28 días alcanza

21.8 MPa, mientras que C60 y C50 registran 15.2 y 16.0 MPa, respectivamente, es decir, 30 % y 26 % menos que C80. No obstante, los cementos con menor contenido de clinker muestran mayores ganancias relativas en edades tardías: entre 28 y 90 días, C60 y C50 incrementan su resistencia en torno al 15 % y 17 %, respectivamente, frente al 6 % de C80, acercándose a su desempeño.

Al reducir la relación a/cm a 0.50 (Figura 58B), las diferencias entre cementos disminuyen notablemente. A 28 días, C60 y C50 alcanzan 31.7 y 33.0 MPa, quedando un 16 % y 13 % por debajo de C80 (38.0 MPa). La mezcla con C50 destaca por su elevada ganancia tardía: a 90 días alcanza 37.4 MPa, quedando apenas un 6 % por debajo de C80. Este comportamiento se acentúa en las mezclas de mayor desempeño (Figura 58 C y D), donde la brecha entre cementos se reduce aún más. En la mezcla de referencia 60 MPa, C50 logra 57.1 MPa a 28 días, sólo un 6 % inferior a C80 (60.7 MPa), y en la de 70 MPa alcanza 60.7 MPa, quedando un 13 % por debajo. A 56 días, estas diferencias se reducen a 4–8 %.

En términos generales, la reducción de la relación a/cm potencia el desarrollo mecánico de todas las mezclas y atenúa las diferencias derivadas del contenido de clinker. Los cementos con mayor sustitución por materiales suplementarios (C50 y C60) presentan menores resistencias a edades tempranas, pero mantienen una ganancia sostenida a edades avanzadas, atribuida a la reacción puzolánica, mientras que C80 alcanza más rápidamente su resistencia final y se estabiliza. En particular, el cemento C50 tiende a superar al C60 en mezclas de baja relación a/cm , reflejando una mejor eficiencia de sus reacciones secundarias.

En conjunto, los resultados confirman que, si bien C80 ofrece un desarrollo rápido y mayores resistencias iniciales, la brecha con cementos de menor clinker disminuye considerablemente en diseños de alta calidad, donde C50 y C60 logran resistencias comparables a edades avanzadas, evidenciando su potencial para producir concretos más sostenibles sin comprometer significativamente el desempeño mecánico.

5.1.3 Módulo de elasticidad

Los resultados de módulo de elasticidad a 56 días (Tabla 15) evidencian una tendencia consistente con las resistencias a la compresión: valores más altos para mezclas de menor relación agua-cementante (a/cm). La Figura 48 muestra que, en la mezcla M20 ($a/cm =$

0.82), el módulo de elasticidad de C80 (21.0 GPa) supera en 19 % y 12 % a los obtenidos por C60 (17.6 GPa) y C50 (18.8 GPa), respectivamente. En la mezcla M40 ($a/cm = 0.50$), las diferencias relativas se reducen: C80 alcanza 26.6 GPa, apenas un 7 % y 3 % por encima de C60 (24.8 GPa) y C50 (25.9 GPa). Esta tendencia se mantiene en M60 ($a/cm = 0.34$), donde C80 (32.4 GPa) excede en 5 % y 2 % los valores de C60 (30.8 GPa) y C50 (31.7 GPa). Finalmente, en M70 ($a/cm = 0.28$), las diferencias son prácticamente marginales: C80 registra 34.5 GPa, con C60 y C50 alcanzando 33.3 GPa y 33.4 GPa, es decir, apenas 3 % inferiores.

Tabla 15. Resultados de módulo de elasticidad para las mezclas de concreto en estudio

Referencia	f'_c (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Desviación estándar (GPa)	CV
C80-0.82	22.7	21.0	0.78	3.72%
C60-0.82	16.0	17.6	0.61	3.46%
C50-0.82	17.9	18.8	0.70	3.72%
C80-0.5	39.0	26.6	0.85	3.19%
C60-0.5	33.8	24.8	0.70	2.82%
C50-0.5	34.7	25.9	0.81	3.14%
C80-0.34	61.4	32.4	1.02	3.16%
C60-0.34	54.6	30.8	0.82	2.66%
C50-0.34	58.7	31.7	0.89	2.80%
C80-0.28	71.1	34.5	1.04	3.03%
C60-0.28	65.4	33.3	1.01	3.04%
C50-0.28	66.3	33.4	1.00	3.00%

En conjunto, estos resultados sugieren que el módulo de elasticidad está más condicionado por el diseño de mezcla y el nivel resistente alcanzado que por el contenido de clinker en el cemento. Las adiciones minerales presentes en C60 y C50 no generaron reducciones significativas en la rigidez del material, lo que indica que la elección de cementos con menor proporción de clinker no compromete el desempeño mecánico en este parámetro. Conforme se incrementa la resistencia del concreto (menores relaciones a/cm), las diferencias entre cementos tienden a desaparecer, reforzando la idea de que los cementos adicionados pueden ser una alternativa viable sin detrimento en las propiedades elásticas.

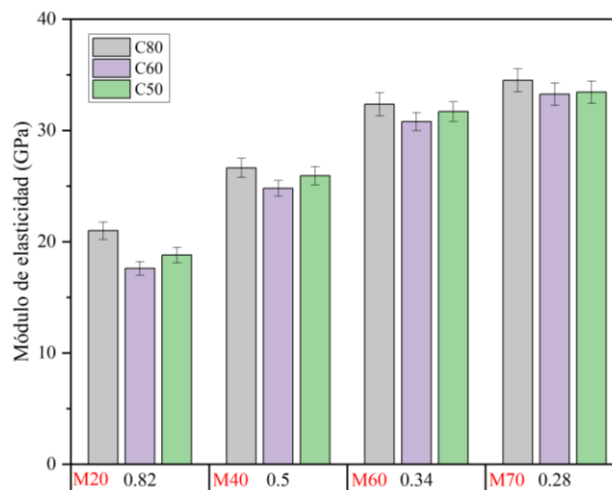


Figura 59. Módulo de elasticidad estático a 56 días para las mezclas de concreto elaboradas con cementos C80, C60 y C50, evaluadas a diferentes relaciones agua/cementante ($a/cm = 0.82$, 0.50 , 0.34 y 0.28).

Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura. Dhandapani et al., (2018) evaluaron el módulo de elasticidad de concretos con LC^3 con especímenes cilíndricos de 150×300 mm conforme a la norma ASTM C469. Los concretos con LC^3 presentaron módulos de elasticidad comparables a los obtenidos en sistemas cementantes convencionales, confirmando que las adiciones minerales en el cemento no influyen de manera significativa en la rigidez del material y pueden ofrecer propiedades mecánicas similares.

5.2 Estabilidad volumétrica

5.2.1 Retracción química

En la Figura 60A, correspondiente a la retracción química de pastas de cemento con $a/cm = 0.34$, se observa que la pasta con cemento C50 presenta la mayor retracción, alcanzando $20.5 \text{ mm}^3/\text{g}$ a 215 horas, seguida por C60 con $19.5 \text{ mm}^3/\text{g}$ y C80 con $14.7 \text{ mm}^3/\text{g}$. Esto representa incrementos de aproximadamente $+39 \%$ (C50) y $+33 \%$ (C60) respecto a C80. La diferencia entre C50 y C60 es menor, alrededor de 5% , lo que indica que ambos cementos, con mayor contenido de materiales cementantes suplementarios, consumen mayor volumen de agua por gramo de cemento debido a la hidratación extendida y la

reacción puzolánica. A edades intermedias (24–30 h), C60 y C50 ya superan la retracción de C80 en más de un 25 %, reflejando un mayor grado de reacción en las primeras etapas.

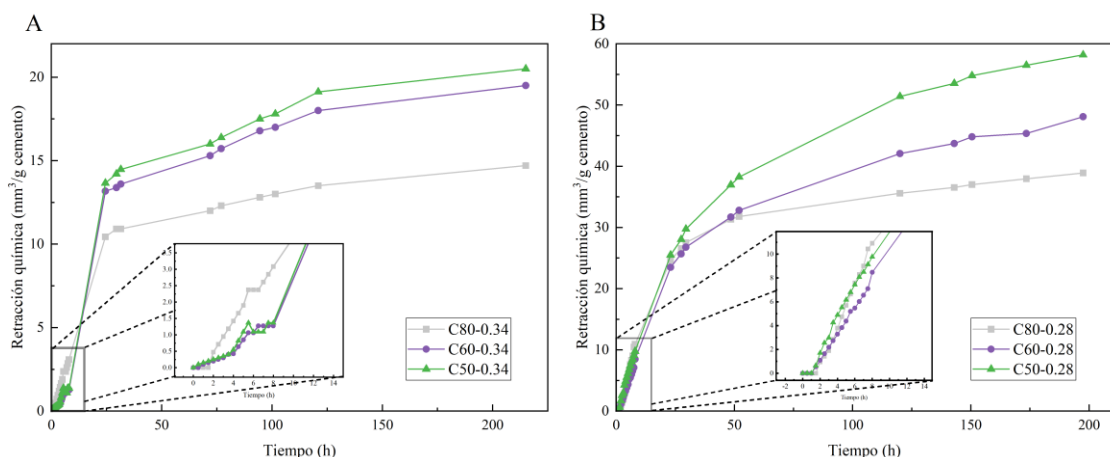


Figura 60. Evolución de la retracción química de pastas elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, A) para una relación agua/cementante de 0.34 y B) para una relación agua/cementante de 0.28.

En la Figura 60B, correspondiente a $a/cm = 0.28$, todas las pastas muestran un incremento sustancial en la retracción química debido al mayor contenido de sólidos reactivos y la densificación de la matriz. C50 alcanza una retracción final de $58.2 \text{ mm}^3/\text{g}$, C60 de $48.1 \text{ mm}^3/\text{g}$ y C80 de $38.9 \text{ mm}^3/\text{g}$, lo que representa aumentos relativos de +50 % (C50) y +24 % (C60) respecto a C80, y de +21 % de C50 sobre C60. Comparando con la condición de $a/cm = 0.34$, los valores finales se incrementan en +184 % para C50, +147 % para C60 y +165 % para C80, confirmando que la disminución de la relación agua/cementante intensifica la retracción química en todos los cementos. La influencia de las adiciones minerales es especialmente notoria en C50, cuyo alto contenido de materiales puzolánicos genera diferentes productos de hidratación y, en consecuencia, una mayor retracción química.

5.2.2 Retracción autógena

La evolución de la retracción autógena de las mezclas se presenta en la Figura 61. En ambas relaciones a/cm se observa un patrón de retracción acelerada durante los primeros 7 días, con valores más pronunciados en las mezclas con mayor contenido de adiciones minerales (C50 y C60). En la Figura 53 se evidencia que para la relación $a/cm = 0.34$, la

mezcla con C50 alcanzó una deformación mínima de aproximadamente $-42 \mu\text{m/m}$, con un ancho de grieta asociado de 0.3 mm, mientras que C60 presentó $-36 \mu\text{m/m}$ (0.2 mm) y C80 $-28 \mu\text{m/m}$ (0.1 mm).

Al reducir la relación a/cm a 0.28, la Figura 61A muestra que las diferencias entre cementos se acentúan: C50 registró la mayor retracción autógena ($\approx -52 \mu\text{m/m}$) y un ancho de grieta de 0.6 mm, seguido de C60 con $-43 \mu\text{m/m}$ (0.5 mm) y C80 con $-22 \mu\text{m/m}$ (0.3 mm). Esta tendencia confirma que las mezclas con menor relación a/cm y mayor sustitución de clíinker son más susceptibles a la retracción autógena, debido a su mayor grado de reacción y refinamiento de la microestructura, lo que incrementa los cambios volumétricos debido al endurecimiento del concreto.

En conjunto, se evidencia que tanto la reducción de la relación a/cm como el incremento en el contenido de materiales cementantes suplementarios amplifican la retracción autógena y la susceptibilidad al agrietamiento temprano. Los anchos de grieta observados guardan una correlación directa con las magnitudes de retracción: en ambas relaciones a/cm , C50 presenta las mayores aperturas, seguido de C60 y C80.

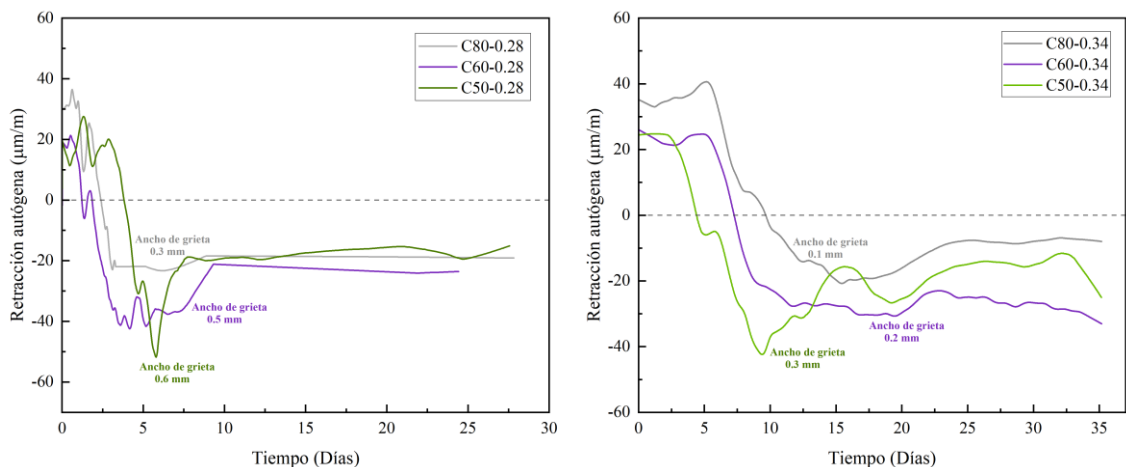


Figura 61. Evolución de la retracción autógena de los cementos C80, C60 y C50, A) para concretos una relación agua/cementante de 0.28 y B) para concretos una relación agua/cementante de 0.34.

5.2.3 Retracción por secado

La evolución de la retracción por secado de las mezclas se presenta en la Figura 62 para la relación $a/cm = 0.34$ y en la Figura 63 para la relación $a/cm = 0.28$. En ambos casos, se

observa un incremento progresivo de la deformación según avanza el tiempo, con una tendencia a estabilizarse tras 56 días. La Figura 62 evidencia que para la relación $a/cm = 0.34$, C60 presentó la mayor retracción final ($\approx -427 \mu m/m$ a 90 días), un 33 % superior a la de C80 ($-320 \mu m/m$) y un 10 % mayor que C50 ($-387 \mu m/m$). A 28 días, C60 ya superaba a C80 en un 38 % y a C50 en un 18 %. En esta relación a/cm , C50 mostró valores intermedios, con $-387 \mu m/m$ a 90 días, un 21 % mayor que C80.

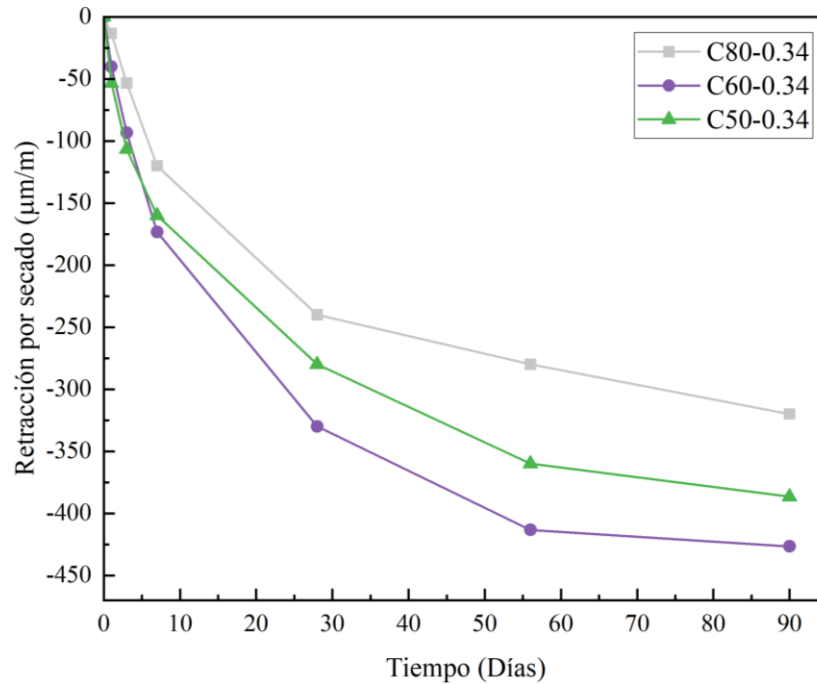


Figura 62. Evolución de la retracción por secado de los cementos C80, C60 y C50, para concretos una relación agua/cementante de 0.34.

En contraste, en la Figura 63 se muestra que al reducir la relación a/cm a 0.28, las magnitudes absolutas de retracción aumentan para todos los cementos. C60 nuevamente alcanzó los valores más elevados ($\approx -420 \mu m/m$ a 56 días), un 14 % superior a C80 ($-370 \mu m/m$) y un 10 % mayor que C50 ($-380 \mu m/m$). A 28 días, C60 presentó una retracción de $-340 \mu m/m$, un 11 % superior a C80 ($-307 \mu m/m$) y un 6 % mayor que C50 ($-320 \mu m/m$).

En general, se aprecia que la retracción por secado aumenta al reducir la relación a/cm y que los cementos con menor contenido de clínker (C60 y C50) son más susceptibles a este fenómeno, particularmente C60, que consistentemente presenta las mayores

deformaciones. Esta tendencia se atribuye a la mayor porosidad y capacidad de desorción de agua en sistemas con mayor contenido de materiales suplementarios, lo que intensifica la pérdida de volumen durante el secado.

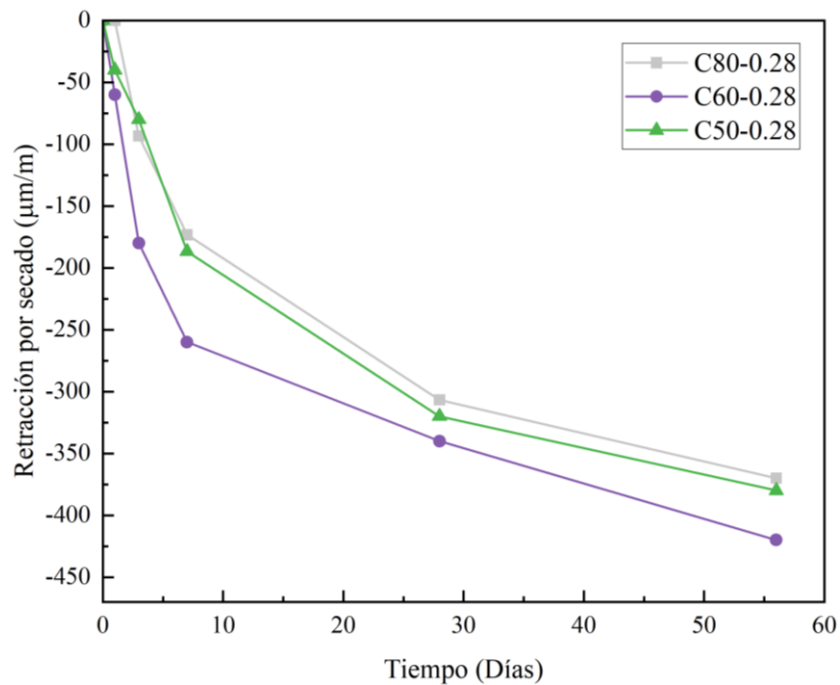


Figura 63. Evolución de la retracción por secado de los cementos C80, C60 y C50, para concretos una relación agua/cementante de 0.28.

5.3 Propiedades de transporte

5.3.1 Resistividad eléctrica bulk

Para el análisis de los resultados de la resistividad eléctrica bulk, se tuvieron en cuenta los criterios establecidos en el estándar mexicano NMX C-514 que se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Límites para la resistividad eléctrica bulk de acuerdo con NMX C-514

Resistividad Bulk [$\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$]	Probabilidad de corrosión
>100	Despreciable
50-100	Baja
10-50	Moderada
<10	Alta

Los resultados de resistividad eléctrica bulk (Tabla 17, Figura 64A) muestran que, a 90 días, C50 presenta la mayor resistividad con $64.2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, un 57 % superior a C80 ($40.8 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) y 79 % mayor que C60 ($36.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). C80 y C60 presentan valores relativamente cercanos, con C80 superando a C60 en torno a un 13 %. En términos de evolución, C50 registra un incremento de 76 % entre 28 y 90 días, mientras que C80 y C60 muestran aumentos más moderados del 47 % y 38 %, respectivamente. Según la NMX C-514 (Tabla 16), todas las mezclas permanecen en la categoría de probabilidad moderada de corrosión.

En la Figura 64B y la Tabla 18 se observa un aumento generalizado de la resistividad con respecto a M20, atribuible a la menor relación a/cm . C50 alcanza $92.3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ a 90 días, 80 % más alta que C80 ($51.1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) y 51 % mayor que C60 ($61.3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). La ganancia entre 28 y 90 días es más marcada en C60 (64 %), seguida de C50 (26 %) y C80 (45 %). C50 se acerca al límite inferior de la categoría de *baja probabilidad de corrosión* (50–100 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$).

Los datos de la Figura 64C y la Tabla 19 evidencian resistividades significativamente más altas. A 90 días, C50 alcanza $170.8 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, 219 % superior a C80 ($53.6 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) y 44 % mayor que C60 ($118.7 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). C60, a su vez, supera a C80 en 121 %. Todas las mezclas se ubican en la categoría de *despreciable probabilidad de corrosión*. El crecimiento de la

resistividad es notable entre 28 y 90 días, especialmente en C60 (142 %) y C50 (54 %), en contraste con C80 (17 %).

En la Figura 64D y la Tabla 20 se confirman los valores más altos de resistividad. C50 alcanza 210.8 k Ω ·cm a 90 días, 209 % superior a C80 (68.2 k Ω ·cm) y 6 % mayor que C60 (198.4 k Ω ·cm). C60 supera a C80 en 191 %. Entre 28 y 90 días, la ganancia relativa es de 53 % en C60, 53 % en C50 y 32 % en C80. Todas las mezclas superan holgadamente los 100 k Ω ·cm, clasificándose con *probabilidad despreciable* de corrosión.

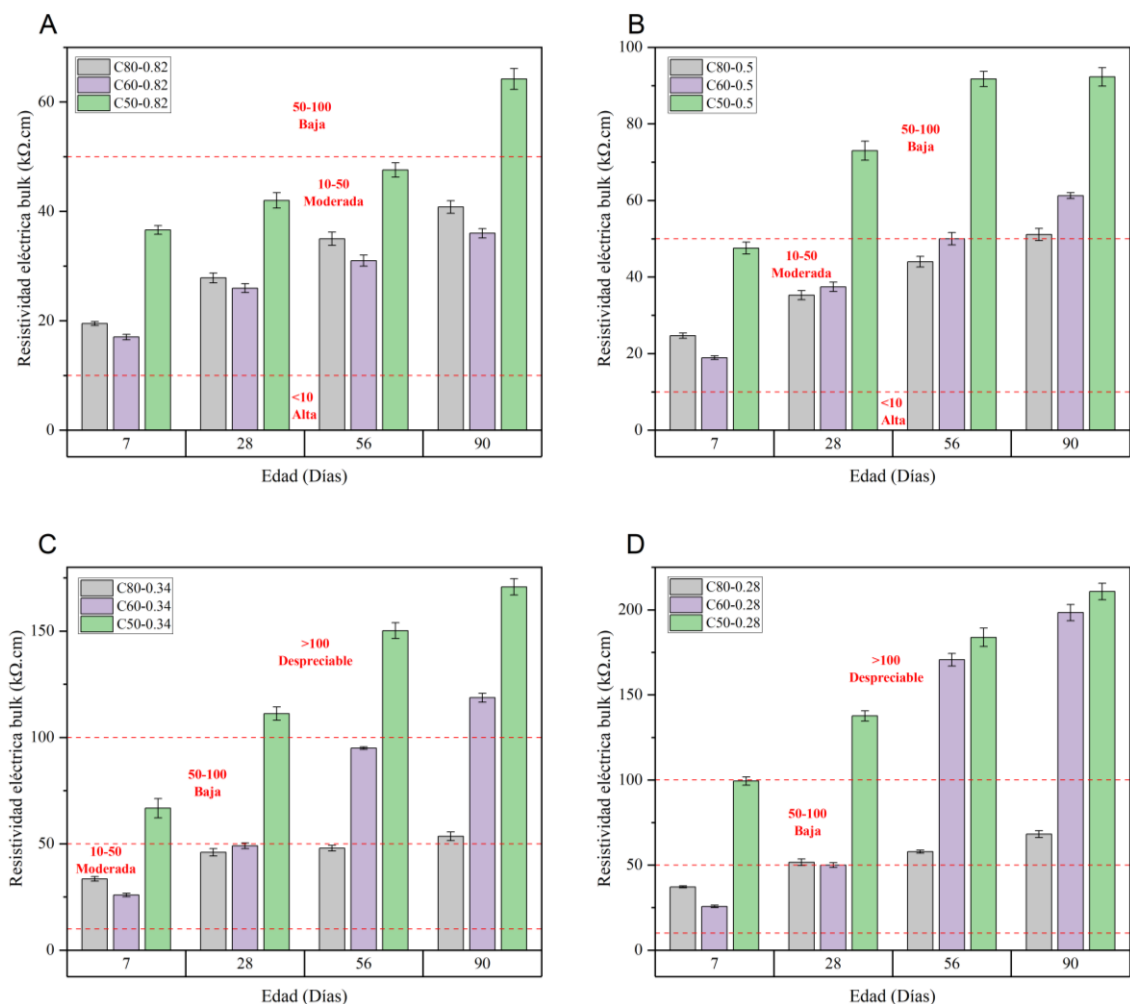


Figura 64. Evolución de la resistividad eléctrica bulk de las mezclas de concreto elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, evaluadas a distintas relaciones agua/cementante. A) Mezcla M20 (a/cm = 0.82) con resistencia objetivo de 20 MPa. B) Mezcla M40 (a/cm = 0.50). C) Mezcla M60 (a/cm = 0.34). D) Mezcla M70 (a/cm = 0.28).

Tabla 17. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M20

ID Mezcla	Edad	Resistividad Bulk [k Ω .cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
C80-0.82	7	19.5	0.4	1.8%
	28	27.8	0.9	3.2%
	56	35.0	1.2	3.4%
	90	40.8	1.2	2.8%
C60-0.82	7	17.0	0.5	2.9%
	28	26.0	0.8	3.1%
	56	31.0	1.0	3.2%
	90	36.0	0.8	2.4%
C50-0.82	7	36.6	0.8	2.2%
	28	42.0	1.4	3.3%
	56	47.6	1.3	2.7%
	90	64.2	1.9	3.0%

Tabla 18. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M40

ID Mezcla	Edad	Resistividad Bulk [k Ω .cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
C80-0.5	7	24.7	0.7	2.8%
	28	35.3	1.2	3.4%
	56	44.0	1.4	3.2%
	90	51.1	1.6	3.1%
C60-0.5	7	18.9	0.5	2.6%
	28	37.4	1.2	3.2%
	56	50.0	1.6	3.2%
	90	61.3	0.8	1.3%
C50-0.5	7	47.6	1.6	3.3%
	28	73.0	2.5	3.4%
	56	91.7	2.0	2.1%
	90	92.3	2.4	2.6%

Tabla 19. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M60

ID Mezcla	Edad	Resistividad Bulk [kΩ.cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
C80-0.34	7	33.5	1.1	3.1%
	28	46.0	1.8	3.8%
	56	47.9	1.4	2.8%
	90	53.6	2.0	3.8%
C60-0.34	7	25.9	0.8	3.1%
	28	49.0	1.3	2.7%
	56	95.0	0.6	0.6%
	90	118.7	2.1	1.8%
C50-0.34	7	66.7	4.5	6.8%
	28	111.2	3.1	2.8%
	56	150.2	3.7	2.5%
	90	170.8	3.8	2.2%

Tabla 20. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad bulk para M70

ID Mezcla	Edad	Resistividad Bulk [kΩ.cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
C80-0.28	7	37.2	0.6	1.6%
	28	51.7	1.9	3.6%
	56	57.9	0.9	1.6%
	90	68.2	2.1	3.1%
C60-0.28	7	25.7	0.7	2.7%
	28	50.0	1.4	2.8%
	56	170.7	3.7	2.2%
	90	198.4	4.8	2.4%
C50-0.28	7	99.4	2.4	2.4%
	28	137.7	3.0	2.2%
	56	183.8	5.4	2.9%
	90	210.8	4.8	2.3%

En definitiva, el efecto del tipo de cemento es consistente, puesto que el C50 exhibe las resistividades más elevadas en todas las mezclas, con diferencias respecto a C80 que varían entre 57 % (M20) y más del 200 % (M60 y M70). C60 supera a C80 en todos los casos, aunque con brechas más reducidas. Por otra parte, la reducción de la relación a/cm incrementa significativamente la resistividad, desplazando las mezclas hacia categorías de

menor probabilidad de corrosión según la NMX C-514. A 90 días, la resistividad de C50 aumenta de 64.2 kΩ·cm en M20 a 210.8 kΩ·cm en M70 (incremento del 228 %).

En este orden de ideas, es posible concluir que el contenido de clínker guarda una relación inversa con la resistividad: los cementos con mayor sustitución por materiales cementantes suplementarios (C50 y C60) presentan resistividades superiores, atribuibles al refinamiento de la microestructura y la reducción de la conectividad porosa. Además, el efecto de la edad es más notorio en cementos con mayor contenido de SCMs, destacando C60 y C50, cuyas resistividades aumentan entre 50–150 % entre 28 y 90 días, mientras que en C80 los incrementos son más moderados (17–47 %).

En conjunto, los resultados confirman que la resistividad eléctrica bulk mejora significativamente con menores relaciones a/cm y mayores sustituciones de clínker, posicionando a los cementos C50 y C60 como opciones con mayor potencial para la durabilidad frente a procesos de corrosión.

5.3.2 Resistividad eléctrica superficial

Para el análisis de los resultados de la resistividad eléctrica superficial, se tuvieron en cuenta los criterios establecidos en el estándar AASHTO T 358 (2015) que se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Límites para la resistividad eléctrica superficial de acuerdo con AASHTO T 358

Resistividad Bulk [kΩ·cm]	Probabilidad de corrosión
>254	Despreciable
37-254	Muy baja
21-37	Baja
12-21	Moderada
<12	Alta

La evolución de la resistividad eléctrica superficial para las mezclas en estudio se muestra en la Figura 65, mientras que el análisis de precisión y sesgo está contenido en las Tablas 25–28. De acuerdo con la Figura 65A, y Tabla 22, a los 90 días, la resistividad superficial de C50 (13.4 kΩ·cm) es 46 % mayor que la de C80 (9.2 kΩ·cm) y 38 % superior a la de C60 (9.7 kΩ·cm). Todos los valores se ubican en la categoría de *alta*

probabilidad de corrosión según la NMX C-514, aunque C50 se aproxima al umbral de *moderada*.

En este orden, se puede apreciar en la Figura 65B y la Tabla 23 que, a los 90 días, C50 ($25.3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) supera en 109 % a C80 ($12.1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) y en 41 % a C60 ($18.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). La incorporación de SCMs eleva la resistividad, desplazando la mezcla C50 a la categoría de moderada probabilidad de corrosión. Asimismo, la Figura 65C y la Tabla 24 evidencian que la resistividad aumenta notablemente con la edad y la sustitución de clínker. A 90 días, C50 ($52.4 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) registra valores 261 % superiores a C80 ($14.5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) y 35 % mayores que C60 ($38.7 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$), alcanzando la categoría de muy baja probabilidad de corrosión. Por último, los resultados en la Figura 65D y la Tabla 25 ilustran que C50 muestra la resistividad más alta a 90 días ($64.2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$), 244 % superior a C80 ($18.7 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) y ligeramente mayor (2 %) que C60 ($62.7 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). Tanto C50 como C60 alcanzan categorías de muy baja probabilidad de corrosión, mientras que C80 permanece en moderada.

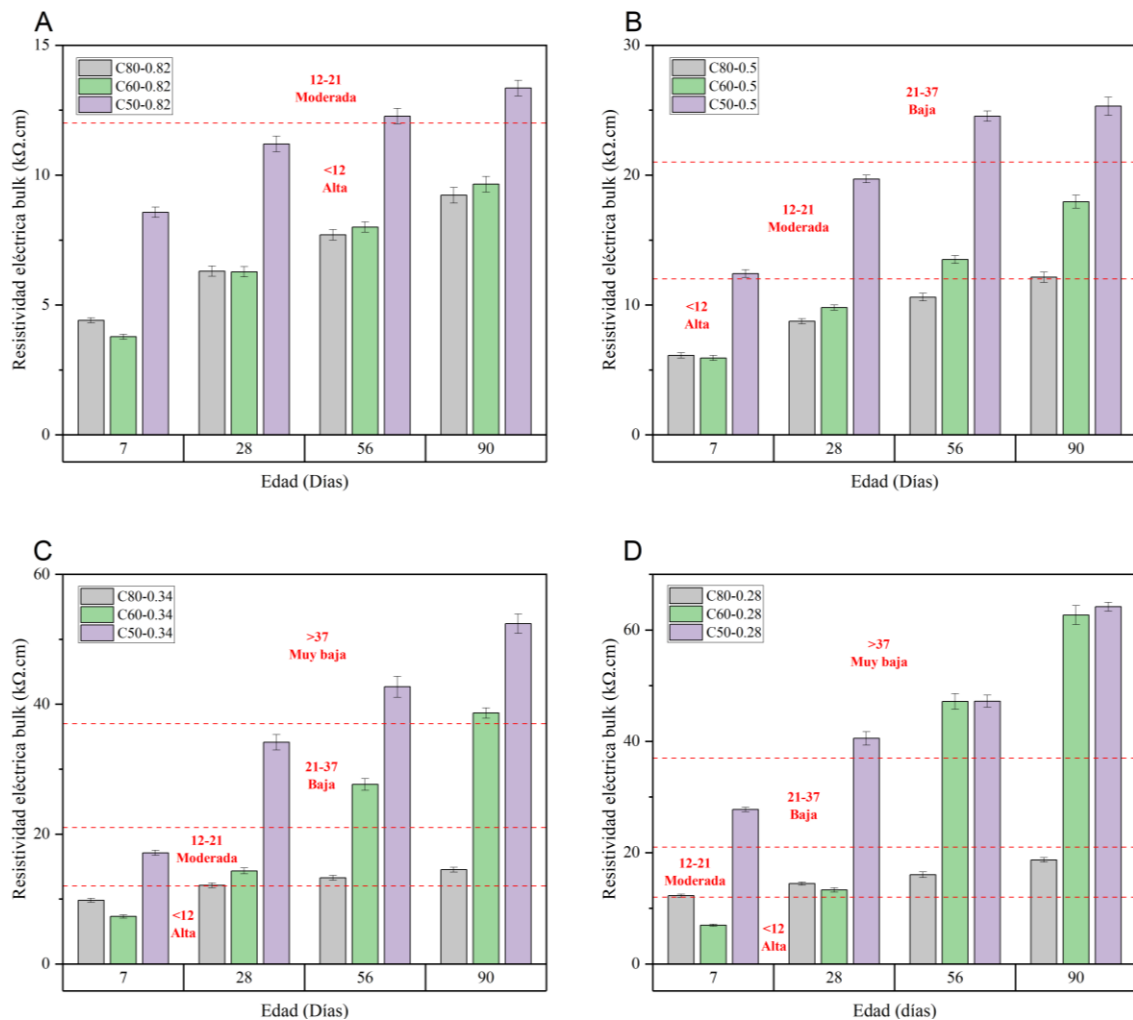


Figura 65. Evolución de la resistividad eléctrica superficial de las mezclas de concreto elaboradas con los cementos C80, C60 y C50, evaluadas a distintas relaciones agua/cementante.

A) Mezcla M20 ($a/cm = 0.82$) con resistencia objetivo de 20 MPa. B) Mezcla M40 ($a/cm = 0.50$). C) Mezcla M60 ($a/cm = 0.34$). D) Mezcla M70 ($a/cm = 0.28$).

Tabla 22. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M20

ID Mezcla	Edad	Resistividad Superficial [kΩ.cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
C80-0.82	7	4.4	0.1	2.3%
	28	6.3	0.2	3.2%
	56	7.7	0.2	2.6%
	90	9.2	0.3	3.3%
C60-0.82	7	3.8	0.1	2.6%
	28	6.3	0.2	3.2%
	56	8.0	0.2	2.5%

	90	9.7	0.3	3.1%
	7	8.6	0.2	2.3%
C50-0.82	28	11.2	0.3	2.7%
	56	12.3	0.3	2.4%
	90	13.4	0.3	2.2%

Tabla 23. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M40

ID Mezcla	Edad	Resistividad Superficial [kΩ.cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
	7	6.1	0.2	3.3%
C80-0.5	28	8.7	0.2	2.3%
	56	10.6	0.3	2.8%
	90	12.1	0.4	3.3%
	7	5.9	0.2	3.4%
C60-0.5	28	9.8	0.2	2.0%
	56	13.5	0.3	2.2%
	90	18.0	0.5	2.8%
	7	12.4	0.3	2.4%
C50-0.5	28	19.7	0.3	1.5%
	56	24.5	0.4	1.6%
	90	25.3	0.7	2.8%

Tabla 24. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M60

ID Mezcla	Edad	Resistividad Superficial [kΩ.cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
	7	9.8	0.3	3.1%
C80-0.34	28	12.1	0.4	3.0%
	56	13.3	0.4	2.9%
	90	14.5	0.4	2.6%
	7	7.3	0.2	3.3%
C60-0.34	28	14.3	0.5	3.2%
	56	27.6	0.9	3.3%
	90	38.7	0.8	2.1%
	7	17.1	0.4	2.3%
C50-0.34	28	34.1	1.2	3.5%
	56	42.7	1.6	3.8%
	90	52.4	1.5	2.9%

Tabla 25. Análisis de precisión y sesgo de los resultados de resistividad superficial para M70

ID Mezcla	Edad	Resistividad Superficial [kΩ.cm]	Desviación estándar (MPa)	CV
C80-0.28	7	12.3	0.3	2.4%
	28	14.4	0.3	2.1%
	56	16.0	0.5	3.1%
	90	18.7	0.4	2.2%
C60-0.28	7	7.0	0.2	2.9%
	28	13.3	0.4	3.0%
	56	47.2	1.4	3.0%
	90	62.7	1.7	2.7%
C50-0.28	7	27.7	0.4	1.4%
	28	40.5	1.2	3.0%
	56	47.2	1.1	2.3%
	90	64.2	0.8	1.2%

En definitiva, la reducción de la relación a/cm potencia significativamente la resistividad en todos los cementos, particularmente en C50, que pasa de 13.4 kΩ·cm en M20 a 64.2 kΩ·cm en M70, un incremento del 379 %. En C60 y C80 los aumentos son del 547 % (de 9.7 a 62.7 kΩ·cm) y del 103 % (de 9.2 a 18.7 kΩ·cm), respectivamente. La influencia del contenido de clinker se vuelve más marcada en mezclas de baja relación a/cm: a 90 días, las diferencias entre C50 y C80 crecen desde 46 % en M20 hasta 244 % en M70.

En conjunto, los resultados evidencian que las mezclas con mayor sustitución de clinker y relaciones agua/cementante reducidas presentan resistividades eléctricas superficiales significativamente superiores, desplazándose hacia categorías de baja o muy baja probabilidad de corrosión. Esto confirma el potencial de cementos con alta incorporación de SCMs para optimizar la durabilidad del concreto frente al ingreso de agentes agresivos.

5.3.3 Penetración rápida al ion cloro

En la Tabla 26 se especifican los criterios de la norma ASTM C1202-19 para determinar cualitativamente la penetración del ion cloruro en el concreto basándose en la carga que pasa al final del ensayo de permeabilidad rápida.

Tabla 26. Penetrabilidad del Ion Cloro basado en la carga que pasa. Fuente: ASTM C1202-19

Carga que pasa (Coulombs)	Penetración del Ion Cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Insignificante

En la Tabla 27 se detallan los resultados de este ensayo y en la Figura 66 muestra la carga eléctrica total (en Coulombs) que atravesó las muestras durante el ensayo de penetración rápida de iones cloruro. Para las mezclas con relación agua/cementante (a/cm) de 0.82, la menor carga eléctrica fue registrada por la mezcla con el cemento C50, seguida por la C80, mientras que la mayor carga se observó en la mezcla con C60. En las mezclas con relación a/cm de 0.50, se mantuvo una tendencia similar: la mezcla C50-0.5 presentó la menor carga, seguida por C60-0.5, y finalmente C80-0.5 con el valor más alto.

Tabla 27. Resultados y análisis de precisión y sesgo del ensayo de RCPT para las mezclas de concreto M20 y M40.

Referencia	Carga [C]	Desviación estándar [C]	CV
C80-0.82	4848	240	5.0%
C60-0.82	6180	86	1.4%
C50-0.82	4323	63	1.5%
C80-0.5	3257	220	6.8%
C60-0.5	2182	11	0.5%
C50-0.5	1468	67	4.5%

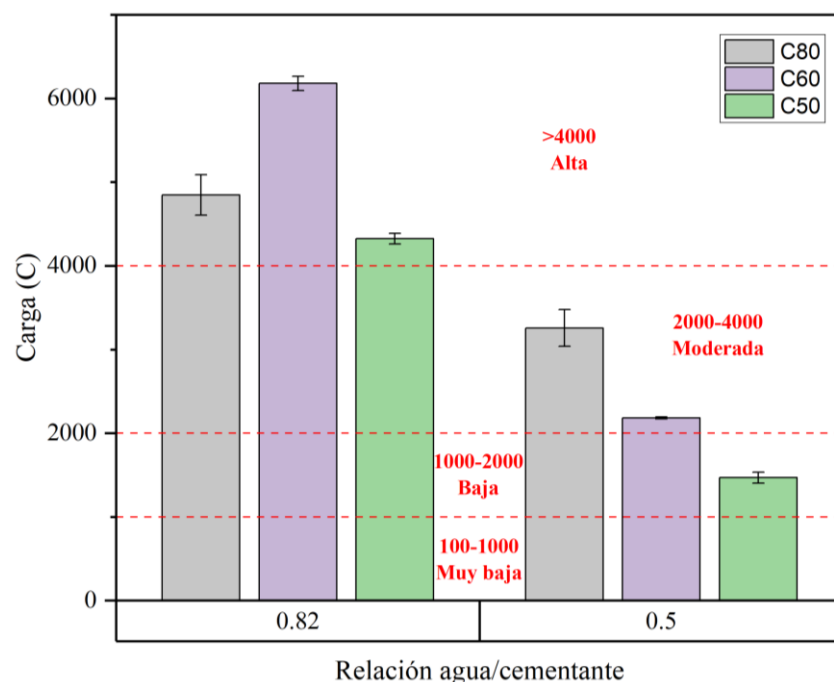


Figura 66. Carga total que pasa durante el ensayo de RCPT para las mezclas de concreto M20 y M40.

Este comportamiento contrasta con los resultados de resistencia a la compresión, donde C80 mostró los mayores valores. Sin embargo, en términos de durabilidad frente al ingreso de cloruros, los cementantes con mayor contenido de materiales cementantes suplementarios (SCM), mostraron un desempeño notablemente superior. Estos materiales puzolánicos promueven el refinamiento de la red de poros, reduciendo así la permeabilidad y dificultando el transporte de iones agresivos a través del concreto.

Particularmente destacable es el resultado de la mezcla C50-0.5, que fue la única de todas las evaluadas en ubicarse dentro del rango de baja permeabilidad al ion cloruro, según los criterios de interpretación del RCPT establecidos por la norma ASTM C1202 (carga entre 1000 y 2000 coulomb). Esto sugiere una probabilidad baja de corrosión de las armaduras en ambientes agresivos, lo que representa un criterio clave para el diseño de concretos durables.

5.3.4 Carbonatación acelerada

En la Tabla 28 se presentan detalladamente los resultados del ensayo de frente de carbonatación por el método acelerado. Asimismo, la Figura 67 muestra la evolución de

la profundidad de carbonatación en función del tiempo de exposición al CO₂ para seis mezclas de concreto, diferenciadas por el tipo de cementante (C80, C60 y C50) y la relación agua/cementante ($a/cm = 0.82$ y $a/cm = 0.50$).

Tabla 28. Resultados y análisis de precisión y sesgo de la carbonatación acelerada.

Referencia	Edad [días]	Profundidad de carbonatación [mm]	Desviación estándar [mm]	CV
C80-0.82	40	1.8	0.2	11%
	56	2.4	0.2	9%
	90	7.9	0.7	9%
	120	9.4	1.2	13%
	150	15.2	1.7	11%
C60-0.82	40	17.4	2.4	14%
	56	19.3	2.7	14%
	90	27.0	3.7	14%
	120	42.5	5.5	13%
	150	50.0	4.4	9%
C50-0.82	40	12.2	1.5	13%
	56	13.8	2.0	14%
	90	17.6	2.0	11%
	120	30.7	3.8	12%
	150	33.1	3.1	9%
C80-0.50	40	0.0	0.0	-
	56	0.0	0.0	-
	90	0.1	0.0	15%
	120	0.5	0.1	18%
	150	1.7	0.2	13%
C60-0.50	40	0.0	0.0	-
	56	0.0	0.0	-
	90	2.5	0.3	13%
	120	6.2	0.8	13%
	150	7.9	1.1	14%
C50-0.50	40	0.0	0.0	-
	56	0.0	0.0	-
	90	1.2	0.2	13%
	120	3.8	0.5	13%
	150	4.1	0.6	14%

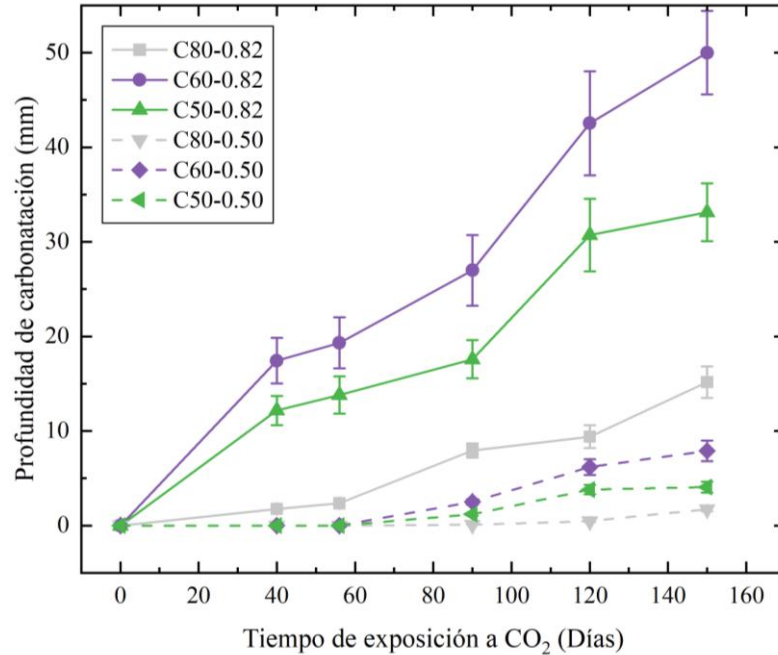


Figura 67. Evolución de la profundidad de carbonatación para el concreto M20 y M40.

Para las mezclas con alta relación a/cm (0.82), se observa que las profundidades de carbonatación más elevadas corresponden a los cementantes C60 y C50, alcanzando valores de hasta 52 mm y 32 mm, respectivamente, tras 150 días de exposición. En contraste, la mezcla con C80-0.82, que contiene un mayor contenido de clinker y menor proporción de materiales cementantes suplementarios (SCMs), presentó una velocidad de carbonatación considerablemente más baja (≈ 15 mm). Este comportamiento sugiere que los cementos con menor contenido de clinker pueden ser más susceptibles al proceso de carbonatación, especialmente cuando se combinan con diseños de mezcla de alta porosidad.

Sin embargo, al reducir la relación agua/cementante a 0.50, las diferencias entre las mezclas disminuyen notablemente. En este caso, las profundidades de carbonatación después de 150 días se mantienen por debajo de 10 mm para todas las mezclas, evidenciando que el diseño de mezcla tiene una influencia más determinante que el tipo de cemento en el comportamiento frente a este mecanismo de deterioro. La reducción en la relación a/cm contribuye a una matriz cementante menos porosa y más densa, que limita el ingreso de CO₂ y mejora sustancialmente la durabilidad del material.

Estos resultados demuestran que no se debe descalificar el uso de cementos con bajo contenido de clínker, ya que su desempeño frente a la carbonatación puede ser adecuado si se emplean en diseños de mezcla optimizados. Además de sus beneficios ambientales, estos cementos pueden cumplir con los requisitos de durabilidad exigidos en muchas aplicaciones, siempre que se controlen adecuadamente los parámetros de diseño.

5.3.5 Formation factor

5.3.5.1 pH de la solución de poros

En la Figura 68 se observa que el pH de la solución de poro en todas las mezclas se mantiene elevado, entre 12.6 y 13.1, tanto a 3 días como a 150 días. Aunque se esperaba que la incorporación de adiciones minerales, especialmente en cementos LC³ (C50 y C60), pudiera reducir significativamente la alcalinidad debido al consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en reacciones puzolánicas, no se identificaron disminuciones críticas. La reducción máxima fue de 0.3 unidades de pH (C80-0.82), equivalente a un 2.3 %, lo cual no representa un compromiso relevante en la capacidad protectora de la matriz frente a la pasivación del acero de refuerzo. Estos resultados confirman que incluso a edades prolongadas (150 días), la alcalinidad se mantiene dentro del rango necesario para garantizar la estabilidad de la película pasiva.

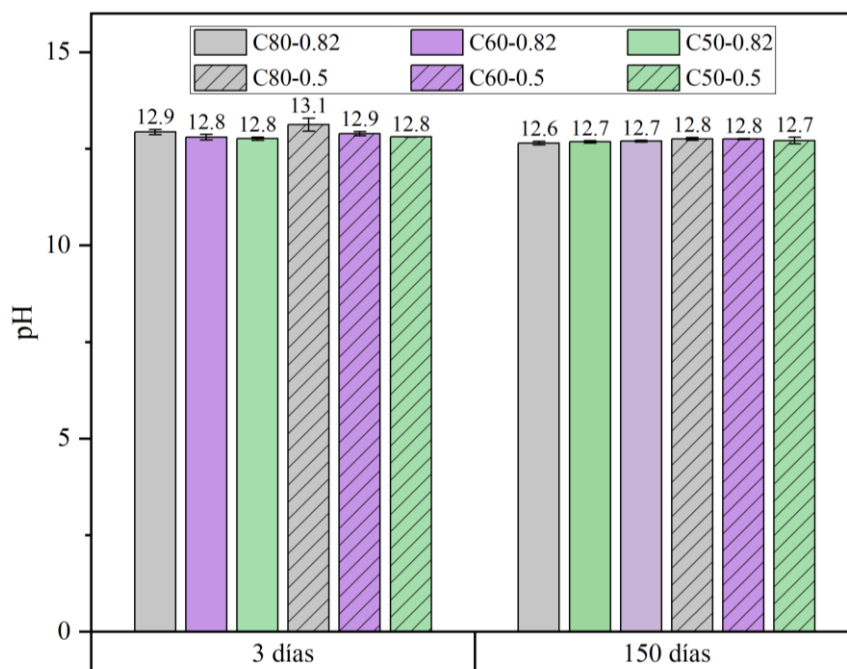


Figura 68. pH de la solución de poros a 3 días y 120 días de las mezclas en estudio.

5.3.5.2 Conductividad de la solución de poros

La conductividad de la solución de poros presentó descensos significativos con la edad en todas las mezclas (Véase Figura 69). Para la relación $a/cm = 0.82$, las reducciones oscilaron entre -54% (C50) y -58% (C80), mientras que para $a/cm = 0.50$ las disminuciones fueron aún más marcadas, entre -46% (C60) y -55% (C80). Esto se relaciona con la progresiva hidratación y refinamiento de la microestructura, que disminuyen la concentración iónica en los poros. Al comparar tipos de cemento, a 3 días C80-0.5 presentó la conductividad más elevada (77.7 mS/cm), un 74 % mayor que C50-0.5 (32.7 mS/cm), comportamiento consistente con la mayor liberación inicial de iones en cementos con alto contenido de clínker.

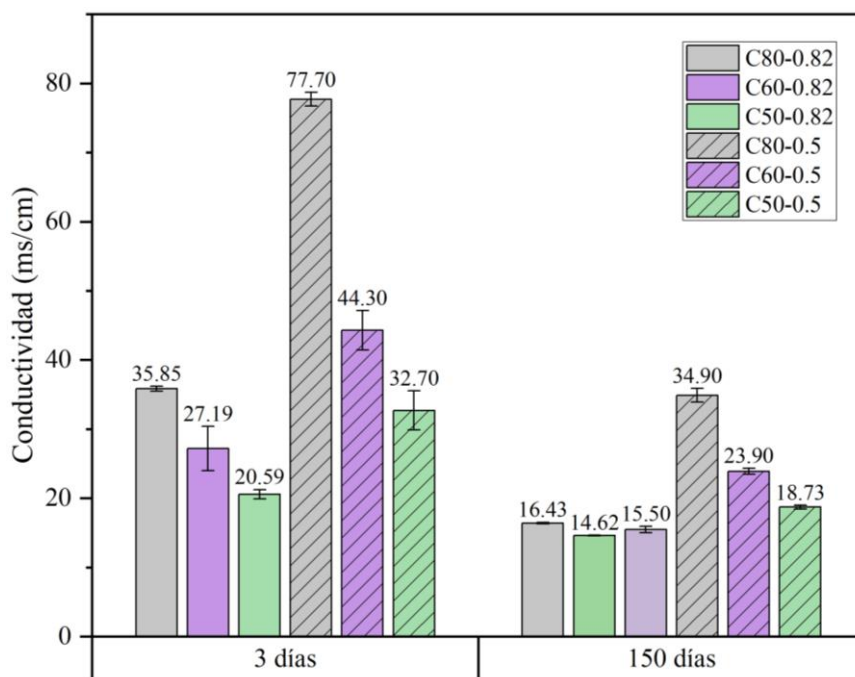


Figura 69. Conductividad de la solución de poros a 3 días y 120 días de las mezclas en estudio.

5.3.5.3 Cálculo del Formation Factor

El formation factor (Ff), calculado como la razón entre la resistividad del concreto y la conductividad de la solución de poro, es un parámetro fundamental para caracterizar la tortuosidad de la red porosa y su capacidad para restringir la migración iónica. En la Figura 70, las mezclas con $a/cm = 0.50$ exhiben factores significativamente superiores, alcanzando valores entre 1465 (C60) y 1783 (C80), que representan incrementos de $\sim 160\%$ –

220 % respecto a sus homólogos con $a/cm = 0.82$ (526–670). Este aumento se atribuye al menor volumen de poros conectados y a la mayor densificación de la matriz. Al comparar tipos de cemento dentro de la misma a/cm , C80 muestra sistemáticamente los valores más altos, con diferencias de hasta 27 % frente a C60 ($a/cm = 0.5$), confirmando el efecto positivo del mayor contenido de clinker en la reducción de la conectividad porosa.

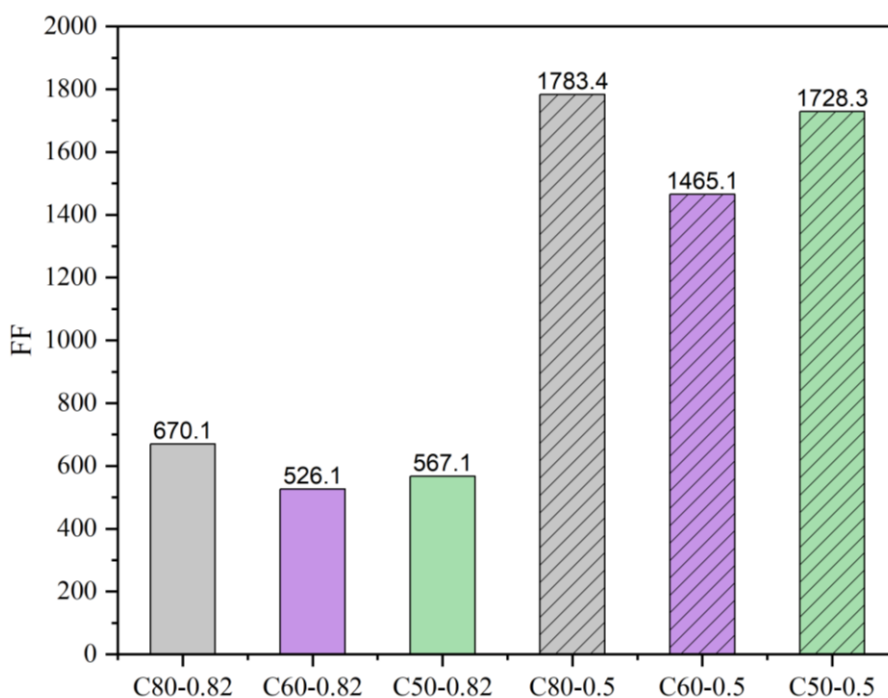


Figura 70. Determinación del formation factor (FF) para las mezclas en estudio.

En conjunto, los resultados evidencian que la combinación de alta alcalinidad estable, baja conductividad iónica y elevado formation factor proporciona condiciones favorables para la protección del acero de refuerzo, especialmente en mezclas de baja relación a/cm .

5.4 Monitoreo electroquímico de la corrosión

5.4.1 Potenciales de corrosión

Para la mezcla C80-0.82, los potenciales anódicos mostrados en la Figura 71 se mantuvieron en promedio entre -140 y -160 mV vs. SCE durante todo el periodo de exposición, ubicándose principalmente en la zona de probabilidad intermedia de corrosión ($\sim 50\%$) según la Tabla 3. Los potenciales catódicos (Figura 72) fueron consistentemente menos negativos (-100 a -140 mV), indicando una baja a intermedia probabilidad. Este comportamiento sugiere que la mezcla con la relación a/cm más alta (0.82) presenta una capa pasiva menos estable y una mayor vulnerabilidad inicial frente al inicio de la corrosión.

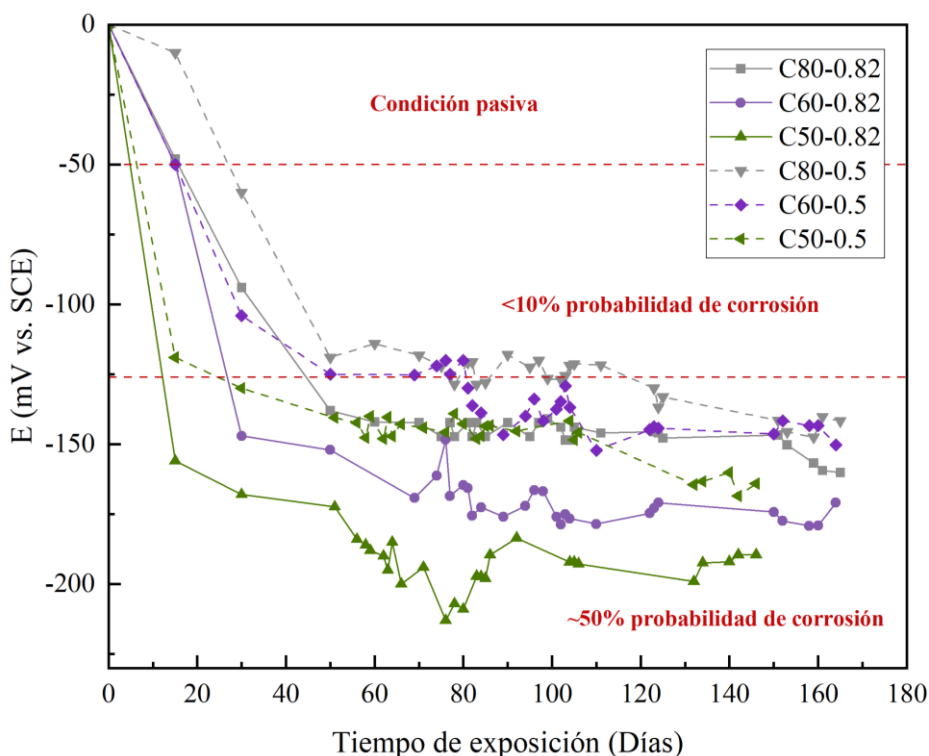


Figura 71. Monitoreo del potencial de corrosión del ánodo para las probetas de concreto con configuración experimental de acuerdo con la ASTM G109.

En C60-0.82, los potenciales anódicos mostraron valores algo más negativos, alcanzando hasta -180 mV, lo que refleja una tendencia hacia una probabilidad intermedia-alta de corrosión. En comparación con C80-0.82, los potenciales fueron aproximadamente un 12–15% más negativos, evidenciando una mayor susceptibilidad asociada al mayor contenido

de adiciones minerales. Los potenciales catódicos se mantuvieron en la zona de baja a intermedia probabilidad, con variaciones menores al 10% respecto a C80.

La mezcla C50-0.82 presentó los valores más negativos entre los cementos evaluados, alcanzando -190 a -210 mV en los ánodos, dentro de la probabilidad intermedia y próximos al umbral de alta probabilidad. Comparada con C80-0.82, los potenciales fueron en promedio un 30–40% más negativos, confirmando que la mayor sustitución de clínker reduce la estabilidad de la capa pasiva a altas relaciones a/cm. Los potenciales catódicos oscilaron entre -110 y -150 mV, manteniéndose en la probabilidad intermedia.

Al disminuir la relación a/cm a 0.50, las tres mezclas mostraron potenciales anódicos menos negativos: C80-0.5 osciló entre -110 y -145 mV (probabilidad baja a intermedia), C60-0.5 entre -120 y -150 mV (intermedia) y C50-0.5 entre -130 y -165 mV (intermedia). La reducción en el valor medio respecto a las mezclas con a/cm = 0.82 fue del orden de 15–25%, evidenciando el efecto benéfico de la menor relación a/cm en la estabilidad electroquímica.

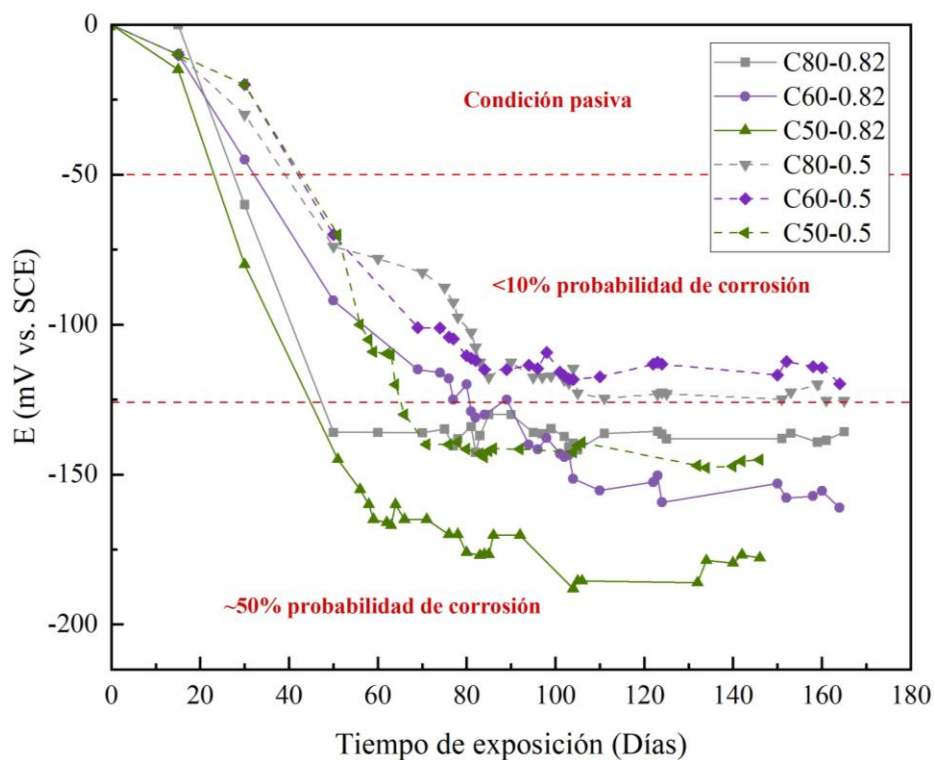


Figura 72. Monitoreo del potencial de corrosión del cátodo para las probetas de concreto con configuración experimental de acuerdo con la ASTM G109.

En este contexto, el comportamiento electroquímico del acero embebido está fuertemente influenciado por la relación a/cm y el tipo de cemento. A mayores relaciones a/cm (0.82), los potenciales son más negativos, aumentando la probabilidad de corrosión, especialmente en C50. La reducción a 0.50 desplaza los potenciales hacia valores menos negativos, favoreciendo la pasivación. En todas las edades, la tendencia entre cementos se mantuvo: C50 presentó los potenciales más negativos, seguido de C60 y C80, patrón consistente con la estabilidad pasiva esperada en mezclas con menor contenido de adiciones minerales.

El monitoreo del potencial catódico de la Figura 72 refuerza que las variaciones entre cementos son menos marcadas ($\leq 20\%$), y la mayoría de los valores se mantienen en la zona de baja a intermedia probabilidad, lo que sugiere una capa pasiva relativamente estable. En conjunto, los datos confirman que la reducción de la relación a/cm y un menor contenido de adiciones minerales contribuyen a potenciales menos negativos y, por ende, a una menor probabilidad de corrosión del acero embebido.

5.4.2 Resistencia a la polarización lineal

La Figura 73 muestra la evolución de la resistencia a la polarización (R_p) para las mezclas con relaciones a/cm 0.82 y 0.50. En general, R_p presentó valores consistentemente mayores en las mezclas con cemento C50, seguido de C60 y C80, reflejando la tendencia inversa a la corrosión: a mayor R_p , menor velocidad de corrosión. Para a/cm = 0.82, la R_p media aumentó de aproximadamente $177 \Omega \cdot \text{cm}^2$ en C80 a $315 \Omega \cdot \text{cm}^2$ en C60 (+78%) y $493 \Omega \cdot \text{cm}^2$ en C50 (+178%). Al reducir la relación a/cm a 0.50, los valores de R_p se incrementaron en todas las mezclas: C80 pasó de 177 a $242 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (+37%), C60 de 315 a $356 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (+13%) y C50 de 493 a $450 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (-9%), indicando que la disminución de la relación agua/cementante favorece la formación de productos más densos y protectores, aunque la magnitud de este efecto depende del tipo de cemento.

De acuerdo con lo anterior, los cementos con mayor contenido de adiciones minerales generan matrices más densas y con películas pasivas más estables sobre el acero. Para a/cm = 0.82, la R_p media de C50 ($\approx 493 \Omega \cdot \text{cm}^2$) superó en +57% a C60 ($\approx 315 \Omega \cdot \text{cm}^2$) y en +178% a C80 ($\approx 177 \Omega \cdot \text{cm}^2$). A una a/cm de 0.50, la R_p de C60 ($\approx 356 \Omega \cdot \text{cm}^2$) se

mantuvo un +47% por encima de C80 ($242 \Omega \cdot \text{cm}^2$), mientras que C50 registró la R_p más alta ($450 \Omega \cdot \text{cm}^2$), +86% mayor que C80.

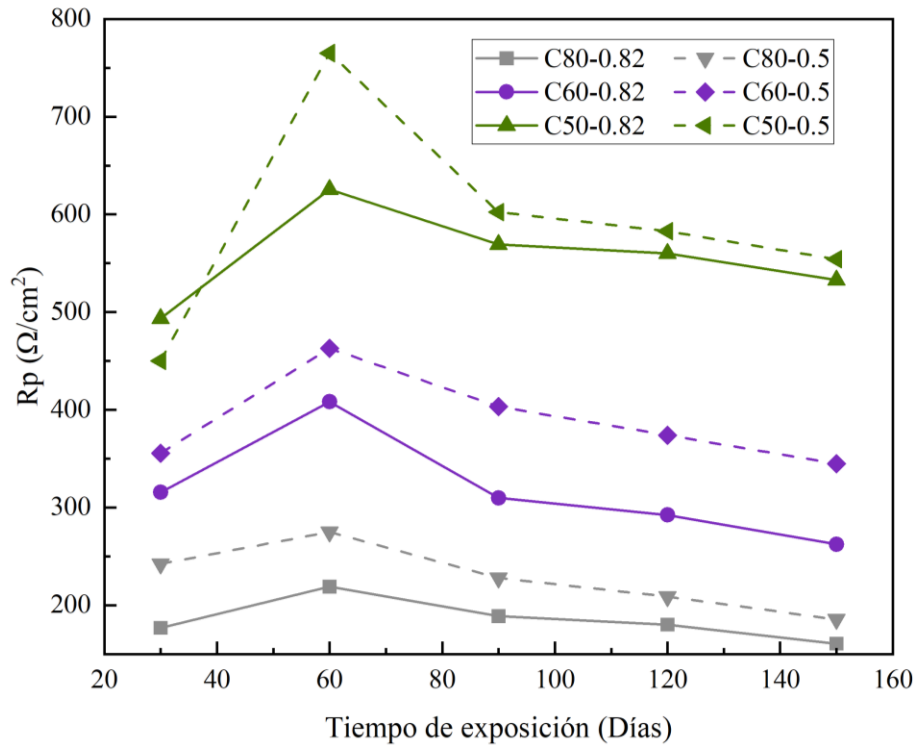


Figura 73. Monitoreo de la resistencia a la polarización lineal del acero embebido en las mezclas de concreto en estudio.

La Figura 74 evidencia que la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) mantiene una correlación inversa con R_p , con C50 presentando los valores más bajos en todas las condiciones, seguido de C60 y C80, en concordancia con su mayor resistencia a la corrosión. Para $a/\text{cm} = 0.82$, i_{corr} disminuyó de $0.294 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en C80 a $0.165 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en C60 (−44%) y $0.105 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en C50 (−64%). Con $a/\text{cm} = 0.50$, i_{corr} se redujo en todas las mezclas: C80 bajó de 0.294 a $0.215 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (−27%), C60 de 0.165 a $0.146 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (−11%) y C50 de 0.105 a $0.116 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (+10%), evidenciando que la reducción en la relación agua/cementante tiene un efecto predominante en la disminución de la velocidad de corrosión, aunque en C50 la mejora fue marginal.

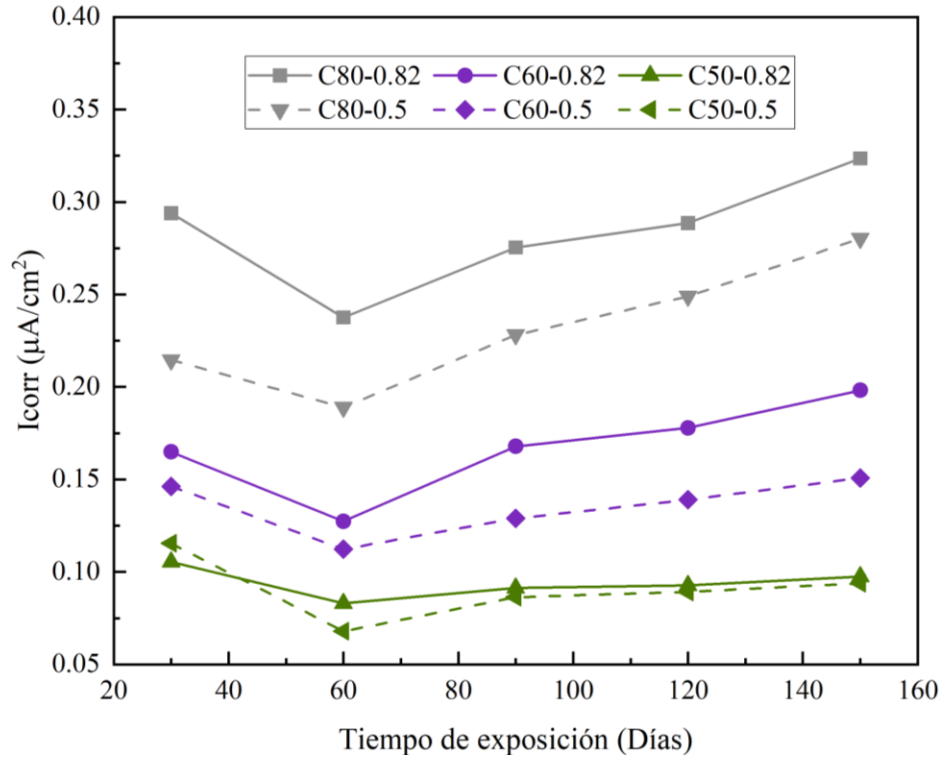


Figura 74. Densidad de corriente de corrosión del acero embebido en las mezclas de concreto en estudio.

En conclusión, la reducción de la relación a/cm mejora la resistencia a la polarización y disminuye la densidad de corriente de corrosión, confirmando un comportamiento más estable y una menor cinética corrosiva. Entre los cementos, C50 mostró el mejor desempeño anticorrosivo en ambas relaciones a/cm, con reducciones de i_{corr} superiores al 60% respecto a C80, atribuible a su mayor contenido de adiciones minerales que promueven una matriz más densa y menos permeable. C60 presentó un comportamiento intermedio, mientras que C80, con mayor contenido de clínker, registró los mayores valores de i_{corr} , reflejando mayor susceptibilidad a la corrosión.

5.5 Modelos de vida útil

5.5.1 Corrosión inducida por carbonatación

Con base en los resultados de la carbonatación acelerada obtenidos en la etapa 3, se calculó el coeficiente de difusión de CO₂ (K) para cada mezcla empleando la ecuación (13). A partir de este parámetro y considerando un recubrimiento típico de 40 mm, se estimó el tiempo de iniciación de la corrosión (Tabla 32). Los valores de K obtenidos en la Tabla 29 muestran que, bajo condiciones aceleradas (4 % de CO₂, 23 °C y HR de 60 %), las mezclas con mayor relación agua/cementante ($a/cm = 0.82$) presentan coeficientes de difusión significativamente más altos: C60 alcanzó 77.99 mm/y^{0.5}, superando en +230 % y +51 % a C80 y C50, respectivamente. Esta tendencia se traduce en tiempos de iniciación muy reducidos, con Ti de 0.26 años para C60, 0.60 años para C50 y 2.86 años para C80, confirmando la alta vulnerabilidad de concretos más porosos y con mayor grado de sustitución de clínker.

Al reducir la relación a/cm a 0.50, los valores de K se reducen drásticamente: C80 muestra 4.25 mm/y^{0.5}, disminuyendo en -82 % respecto a su homóloga $a/cm = 0.82$. Para C60 y C50, las reducciones fueron aún más notorias (-84 % y -88 %, respectivamente), lo que se refleja en un incremento sustancial de Ti: +336 % en C50 (39.8 años), +3900 % en C60 (10.5 años) y hasta +2990 % en C80 (88.4 años). Estos resultados evidencian la fuerte dependencia de la velocidad de carbonatación con la relación a/cm , atribuible al refinamiento de la red porosa y a la mayor capacidad de fijación de CO₂ de matrices más densas.

Tabla 29. Coeficientes de difusión de CO₂ para ambiente acelerado, 4% CO₂

ID	K [mm/y ^{1/2}]
C80-0.82	23.66
C60-0.82	78.00
C50-0.82	51.69
C80-0.5	4.25
C60-0.5	12.32
C50-0.5	6.34

Dado que los ensayos acelerados no reproducen fielmente las condiciones ambientales reales, se aplicaron correlaciones de la literatura para estimar la carbonatación natural. Se consideraron dos escenarios:

- Caso 1 (Durán-Herrera et al., 2015):

Para este caso de estudio, se considera una concentración de CO₂ en el ambiente de hasta 0.09%, temperaturas entre 27°C y 45°C y humedades relativas entre 18% y 60%. La ecuación propuesta para realizar el análisis de carbonatación natural a partir de datos de carbonatación acelerada se muestra en la ecuación (19).

$$K_{acelerado} = 2.22 K_{natural} \quad (19)$$

En este escenario, en la Tabla 30 se evidencia que los coeficientes K disminuyen significativamente. Para $a/cm = 0.82$, C60 mantiene el mayor valor (35.13 mm/y^{0.5}), seguido de C50 (23.28 mm/y^{0.5}) y C80 (10.66 mm/y^{0.5}), con tiempos de iniciación estimados de 1.3, 3.0 y 14.1 años, respectivamente (véase Tabla 32). Comparado con la condición acelerada, Ti se incrementa 5 a 6 veces. La reducción de a/cm a 0.50 eleva los tiempos de iniciación de forma exponencial: C80 alcanza 436 años, C50 196 años y C60 52 años, evidenciando el efecto protector de matrices densas.

Tabla 30. Coeficientes de difusión de CO₂ para ambiente natural – 0.09% CO₂

ID	K [mm/y ^{1/2}]
C80-0.82	10.66
C60-0.82	35.13
C50-0.82	23.28
C80-0.5	1.92
C60-0.5	5.55
C50-0.5	2.86

- Caso 2 (Dhanya et al., 2019):

Las condiciones del segundo caso de estudio corresponden a una concentración de CO₂ entre 0.04% y 0.05%, temperatura de 33°C y una humedad relativa del 70%. La relación entre la carbonatación acelerada y natural corresponde a la ecuación (20).

$$K_{acelerado} = 5.7 \times K_{natural} \quad (20)$$

Para este segundo escenario, con una correlación más conservadora, los coeficientes K y las tasas de carbonatación natural se reducen aún más. De acuerdo con la Tabla 31 y la Tabla 32, C60 $a/cm = 0.82$ presenta $K = 13.68 \text{ mm/y}^{0.5}$, con un T_i proyectado de 8.5 años, mientras que C80 y C50 alcanzan 92.9 y 19.5 años, respectivamente. A $a/cm = 0.50$, los tiempos de iniciación se extienden de manera considerable, con valores superiores a los 300 años para C60 y C50, y hasta 2872 años para C80, representando aumentos de 30 a 60 veces respecto a la carbonatación acelerada.

Tabla 31. Coeficientes de difusión de CO_2 para ambiente natural – 0.04% CO_2

ID	K [$\text{mm/y}^{1/2}$]
C80-0.82	4.15
C60-0.82	13.68
C50-0.82	9.07
C80-0.5	0.75
C60-0.5	2.16
C50-0.5	1.11

En la Figura 75 y la Tabla 32 se muestra un resumen de los coeficientes de difusión de CO_2 para todas las mezclas de concreto en los tres diferentes tipos de ambiente en estudio. Los resultados confirman que la relación a/cm es el factor predominante en la vida útil frente a la carbonatación. Disminuir la a/cm de 0.82 a 0.50 reduce los coeficientes K entre 82 % y 88 % y aumenta T_i en órdenes de magnitud. En cuanto al tipo de cementante, se observa que C80, con mayor contenido de clínker, muestra la mejor resistencia a la carbonatación en todos los escenarios, mientras que C60 —con 40% adiciones minerales— presenta las menores vidas útiles proyectadas, con reducciones de T_i de hasta –91 % respecto a C80 en $a/cm = 0.82$. C50 se comporta de manera intermedia, aunque a baja a/cm puede alcanzar desempeños comparables a C80.

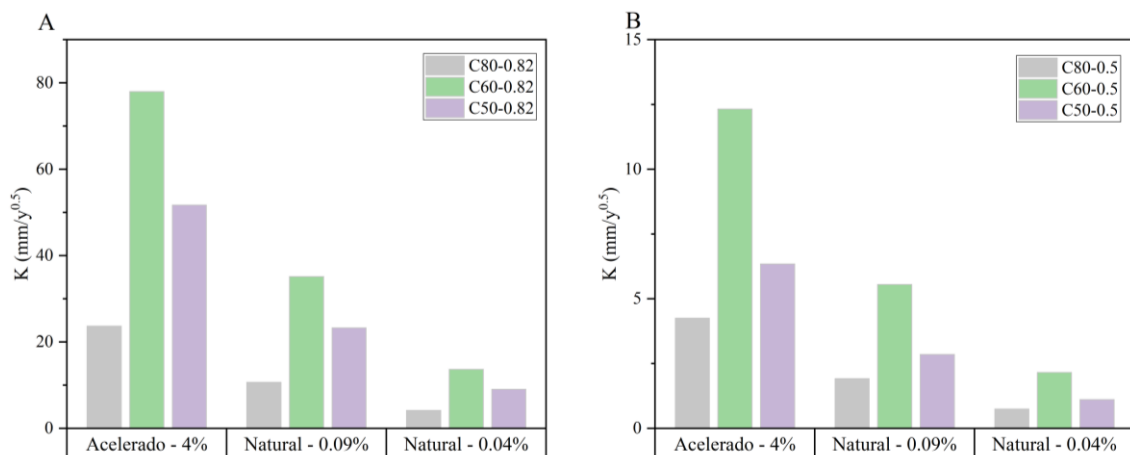


Figura 75. Coeficientes de difusión de CO₂ de las mezclas en estudio para los tres tipos de cemento. A) Concreto M20 con relación a/cm 0.82. B) Concreto M40 con relación a/cm 0.5.

Tabla 32. Tiempo de iniciación de la corrosión inducida por carbonatación

ID	Ti - Tiempo de iniciación de la corrosión (años)		
	Accelerado - 4%	Natural - 0.09%	Natural - 0.04%
C80-0.82	2.86	14.09	92.87
C60-0.82	0.26	1.30	8.55
C50-0.82	0.60	2.95	19.46
C80-0.5	88.40	435.68	2872.18
C60-0.5	10.54	51.92	342.31
C50-0.5	39.76	195.95	1291.79

En conjunto, la modelación de vida útil bajo carbonatación confirma que el diseño de mezclas con baja relación a/cm y mayor contenido de clinker prolonga significativamente el periodo de iniciación de la corrosión. La extrapolación de datos acelerados a condiciones naturales evidencia que, dependiendo del escenario ambiental, la vida útil de mezclas densas como C80-0.5 puede superar los 400 años, mientras que concretos más porosos y con elevada sustitución de clinker (C60-0.82) podrían iniciar la corrosión en menos de 10 años. Estos hallazgos destacan la necesidad de optimizar simultáneamente la relación a/cm y la composición cementante para estructuras expuestas a entornos carbonatantes.

5.5.2 Corrosión inducida por cloruros

5.5.2.1 Umbral de corrosión

En la Figura 76 se presenta la evolución de la resistencia a la polarización (R_p) en el tiempo para las distintas matrices estudiadas. Se observa que, en general, los concretos con mayor proporción de clínker (C80) presentan una caída más temprana y pronunciada en los valores de R_p , lo cual está asociado a una pérdida más rápida de la pasivación de las armaduras. En contraste, la mezcla C50 –es decir, aquella con un menor contenido de clínker y mayor proporción de materiales cementantes suplementarios– mostró sistemáticamente los valores más altos de R_p a lo largo del tiempo, tanto en condiciones de exposición natural como en los ensayos electroquímicos, indicando una mayor capacidad de mantener las armaduras pasivas.

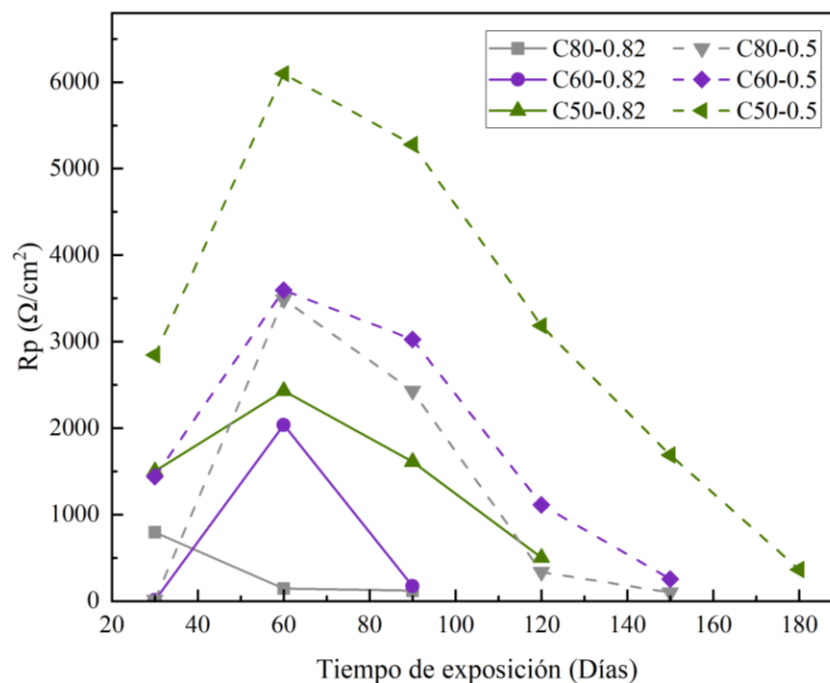


Figura 76. Evolución de la resistencia a la polarización lineal de los especímenes de umbral de corrosión.

Es importante destacar que la resistencia a la polarización es inversamente proporcional a la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) (véase Figura 78), por lo que caídas significativas en R_p pueden sugerir el inicio de procesos corrosivos. Sin embargo, esto no implica automáticamente la activación de la corrosión, ya que los valores alcanzados en

muchos casos aún se mantienen por encima de los umbrales típicamente asociados con condiciones activas. Según los criterios adoptados en esta investigación –potenciales más negativos que -277 mV vs. SCE y densidades de corriente superiores a $0.1\text{--}0.2\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ –, no todas las disminuciones de R_p implicaron una despasivación efectiva.

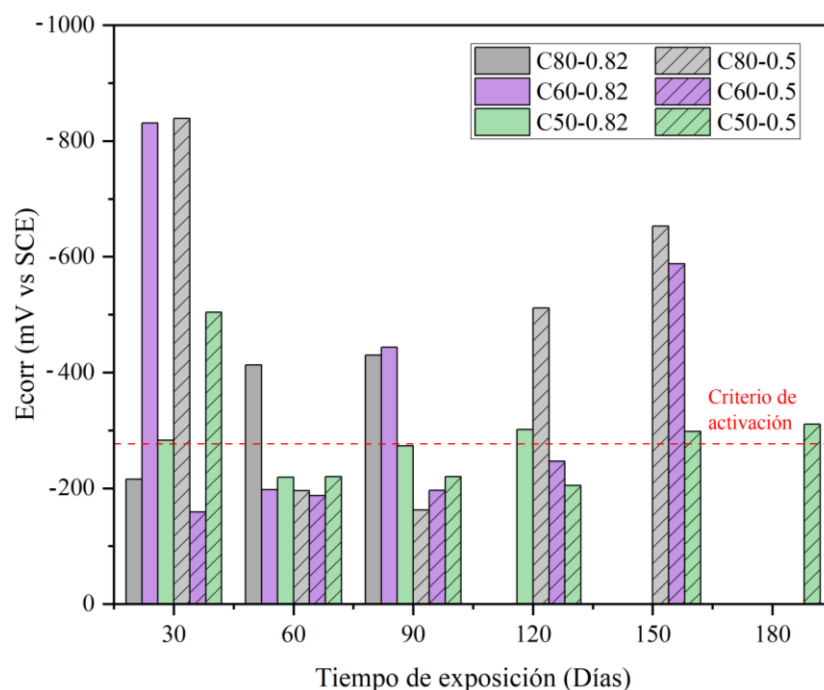


Figura 77. Evolución de los potenciales de corrosión de los especímenes de umbral de corrosión.

En efecto, como se muestra en la Figura 77, algunas mezclas presentaron potenciales por debajo del umbral de -277 mV vs. SCE sin que esto necesariamente se tradujera en una I_{corr} elevada, lo cual resalta la necesidad de evaluar ambos criterios de forma conjunta. Este comportamiento indica que, en mezclas con adiciones minerales como las de tipo LC^3 , la caída del potencial electroquímico puede anticiparse, pero la cinética de corrosión (reflejada en I_{corr}) puede permanecer baja, posiblemente debido a características de la microestructura como la densificación de la zona interfacial, la reducción de la porosidad o la modificación del sistema de poros conectados.

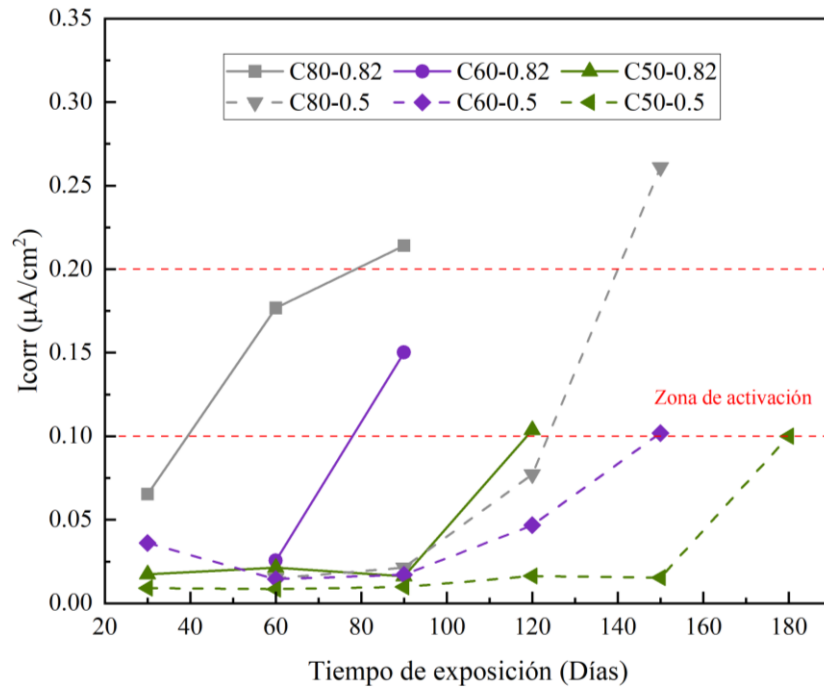


Figura 78. Densidad de corriente de corrosión para los especímenes de umbral de corrosión.

La Figura 79 ilustra el circuito equivalente utilizado para ajustar los datos de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Este modelo consta de una resistencia del electrolito (R_s), una constante de fase constante (CPE1) y una resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) asociada al recubrimiento de concreto, así como una segunda constante de fase (CPE2) y resistencia (R_{pass}) que representan el comportamiento de la película pasiva sobre la armadura. Esta configuración se seleccionó por su capacidad para modelar adecuadamente los sistemas multicapa como el concreto armado, donde coexisten procesos de transporte iónico en el recubrimiento y fenómenos interfaciales en la barra.

En la Figura 80 y la Tabla 33 se muestran los espectros Nyquist ajustados para los concretos de relación a/cm 0.50. Los valores de R_{ct} y R_{pass} fueron mayores en los concretos con menores relaciones a/cm, lo cual indica una mayor dificultad para el paso de corriente y, por tanto, una mejor protección de las armaduras. Este comportamiento se ve reforzado al comparar los tipos de cemento: las matrices C50 (con mayor proporción de MCS) muestran mayor R_{ct} y R_{pass} , mientras que las C80 presentan los valores más bajos, en línea con una menor capacidad de pasivación sostenida.

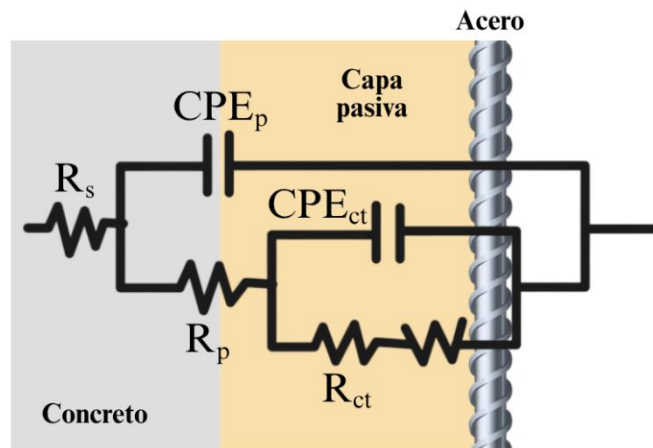


Figura 79. Circuito equivalente para ajuste de datos de EIS.

La Figura 80 a la Figura 84 permiten visualizar esta tendencia de forma consolidada. En términos generales, se observó que tanto la reducción de la relación a/cm como la incorporación de adiciones minerales tienden a mejorar el comportamiento electroquímico del sistema, retrasando la despasivación de las armaduras.

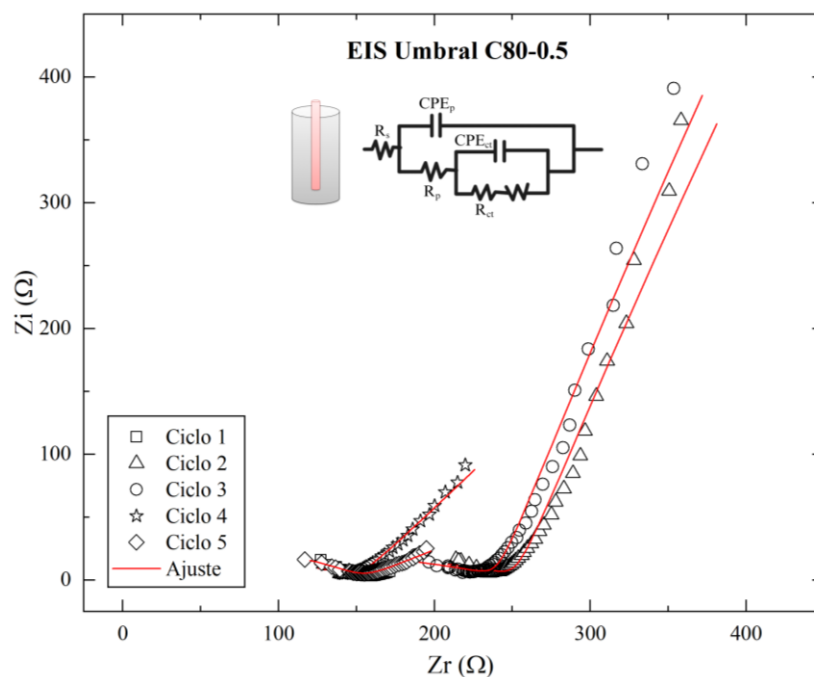


Figura 80. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C80-0.5

Tabla 33. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C80-0.5

Parámetro	R_s [Ω]	CPE _p		R_p [Ω]	CPE _{ct}			R_{ct} [Ω]	R_T [Ω]
		Y_0 [S*S ^a]	a_1		Y_0 [S*S ^a]	a_2	W [S*S ^{1/2}]		
Ciclo 1	1.379	1.26E-03	0.07	215.2	9.19E+05	1.000	3.88E-17	1771	1986.2
Ciclo 2	8.641	9.64E-05	0.19	254.5	0.002951	0.801	1.31E-05	5.87E+00	260.4
Ciclo 3	215	1.38E-03	0.60	68.01	1.34E-03	1.000	3.21E-04	162.5	230.5
Ciclo 4	9.02	0.0001603	0.21	149.6	0.009643	0.564	4.84E-10	2.78E+04	27899.6
Ciclo 5	83.29	0.009125	0.07	2.47E+04	2.15E-06	0.011	8.00E-12	6.98E+31	6.98E+31

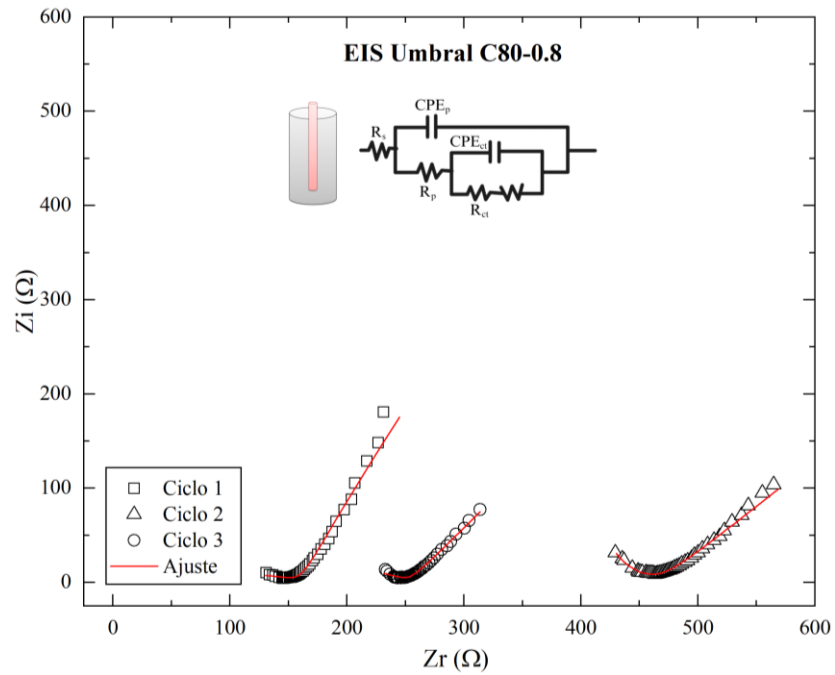


Figura 81. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C80-0.8

Tabla 34. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C80-0.8

Parámetro	R_s [Ω]	CPE _p		R_p [Ω]	CPE _{ct}			R_{ct} [Ω]	R_T [Ω]
		Y_0 [S*S ^a]	a_1		Y_0 [S*S ^a]	a_2	W [S*S ^{1/2}]		
Ciclo 1	148.7	5.81E-03	0.63	0.14	1.67E-04	0.635	7.06E-05	3.44E+07	34390000
Ciclo 2	383.7	1.29E-06	0.79	77.01	3.95E-07	0.060	7.48E-03	1.49E+00	78.5
Ciclo 3	242	8.03E-03	0.46	46.55	3.19E-03	0.542	1.23E-06	0.0003277	46.6

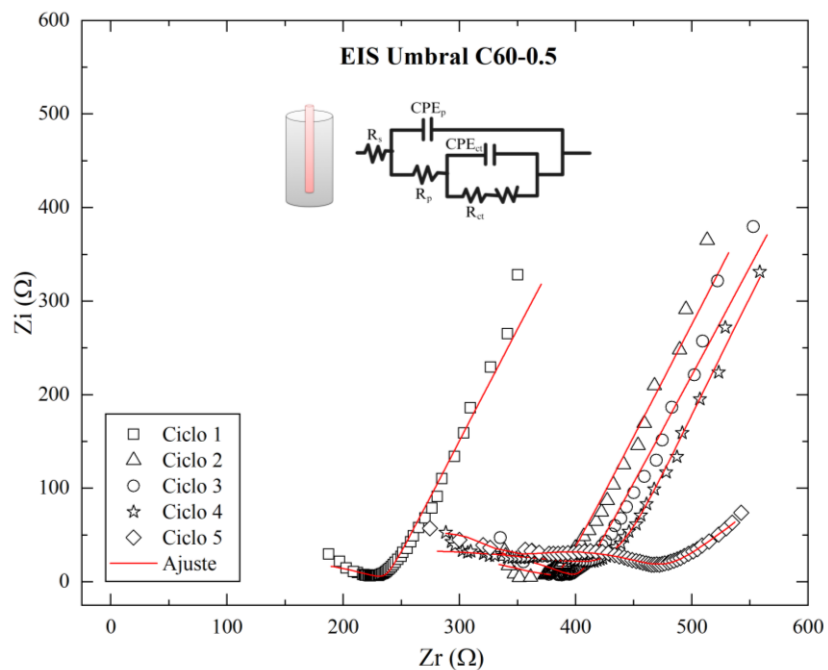


Figura 82. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C60-0.5

Tabla 35. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C60-0.5

Parámetro	R_s [Ω]	CPE _p		R_p [Ω]	CPE _{ct}			R_{ct} [Ω]	R_T [Ω]
		Y_0 [S*S ^a]	a_1		Y_0 [S*S ^a]	a_2	W [S*S ^{1/2}]		
Ciclo 1	123.4	5.75E-06	0.53	108.1	0.003773	0.737	3.07E-04	5.30E+01	161.1
Ciclo 2	356.5	0.001826	0.58	129.4	0.001258	0.662	4.22E+00	4.11E+03	4241.4
Ciclo 3	273.3	1.24E-06	0.69	119.3	2.92E-03	0.713	9.34E-14	0.1441	119.4
Ciclo 4	63.62	0.0001795	0.20	412.3	0.00303	0.793	2.74E-07	116.8	529.1
Ciclo 5	1.89	0.0001025	0.20	295.8	1.45E-22	0.002	0.0146	216.5	512.3

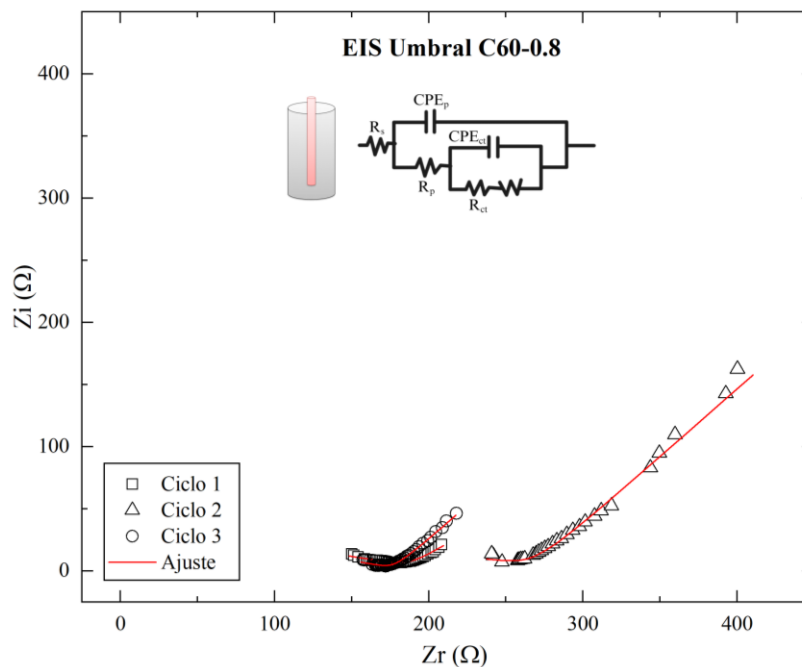


Figura 83. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C60-0.8

Tabla 36. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C60-0.8

Parámetro	R_s [Ω]	CPE_p		R_p [Ω]	CPE_{ct}			R_{ct} [Ω]	R_T [Ω]
		Y_0 [$S \cdot S^a$]	a_1		Y_0 [$S \cdot S^a$]	a_2	W [$S \cdot S^{1/2}$]		
Ciclo 1	125.9	0.0000507	0.57	44.19	2.56E-02	0.256	2.02E-07	3.15E+02	359
Ciclo 2	277.2	0.003136	0.63	0.07035	8.18E-04	1.000	1.27E-09	1.93E+03	1925
Ciclo 3	166.5	0.01397	0.39	1.30E-18	0.00102	0.009	1.74E-03	0.008978	0.008978

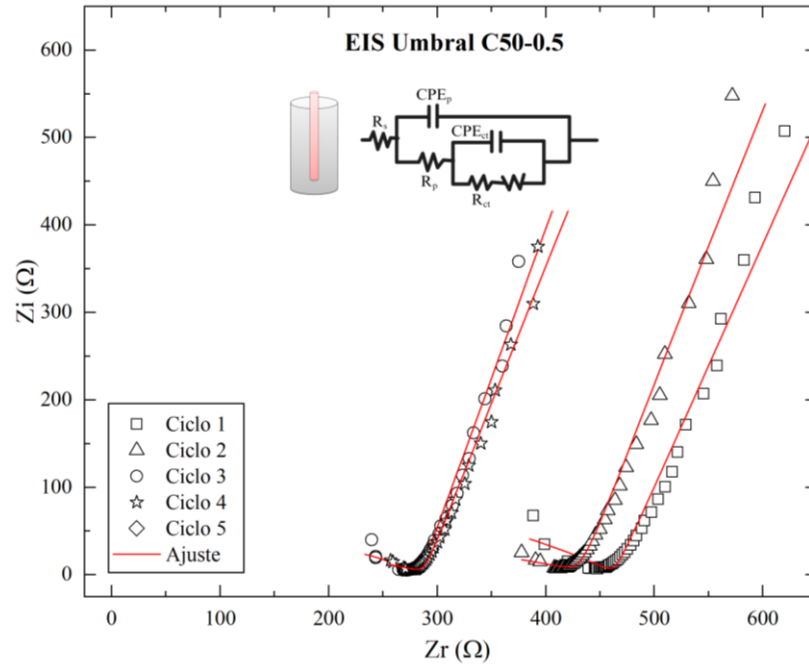


Figura 84. Diagrama de Nyquist para especímenes de umbral de corrosión con la mezcla de concreto C50-0.5

Tabla 37. Parámetros de ajuste de circuito equivalente para EIS. Mezcla C50-0.5

Parámetro	R_s [Ω]	CPE_p		R_p [Ω]	CPE_{ct}			R_{ct} [Ω]	R_T [Ω]
		Y_0 [$S \cdot s^a$]	a_1		Y_0 [$S \cdot s^a$]	a_2	W [$S \cdot s^{1/2}$]		
Ciclo 2	0.001	3.81E-06	0.37	465.9	0.002223	0.781	2.77E-13	2129	2594.9
Ciclo 3	409.1	9.36E-04	0.72	77.23	0.001057	0.931	1.71E-04	7072	7149.23
Ciclo 4	269.3	0.001082	0.74	64.64	0.001121	0.968	9.44E-04	6280	6344.64
Ciclo 5	270	0.0008141	0.69	35.55	0.001702	0.857	1.04E-05	5696	5731.55

La Figura 85 presenta el umbral de cloruros determinado para cada una de las mezclas, calculada a partir del momento en que se detectó la ruptura de la pasivación, según los criterios combinados de potencial electroquímico (valores más negativos que -277 mV vs SCE) y densidad de corriente (superior a $0.1-0.2 \mu A/cm^2$). Los valores obtenidos, resumidos en la Tabla 24, muestran que la mezcla C80-0.82 alcanzó el umbral más alto (0.384% respecto al peso del cemento), seguida por C80-0.5 (0.372%) y C60-0.82 (0.307%). Las mezclas con reemplazo de 50% de clinker (C50) presentaron los umbrales más bajos, con valores de 0.212% y 0.206% para relaciones a/cm de 0.82 y 0.5, respectivamente.

Aunque todas las mezclas mostraron la activación de la corrosión en el mismo ciclo de exposición, la concentración de cloruros medida al momento de la despasivación fue mayor en las mezclas con menor sustitución de clínker. Esto se debe a que las mezclas con cementantes suplementarios (C60 y especialmente C80) presentan una microestructura más densa y una red de poros más desconectada, lo que reduce significativamente la velocidad de difusión de los iones cloruro hacia la superficie del acero. Así, aunque el tiempo de exposición fue el mismo, la menor velocidad de ingreso resultó en una menor concentración crítica medida para estas mezclas. En otras palabras, el acero se despasivó con menos cloruros acumulados, no por menor tolerancia, sino por la resistencia que opone la matriz al transporte iónico.

Este comportamiento evidencia que una menor sustitución de clínker y una menor relación agua/cementante favorecen valores más elevados de umbral crítico de cloruros en términos absolutos. No obstante, esto no implica necesariamente una mejor resistencia a la corrosión a largo plazo, ya que el ingreso de cloruros en las matrices con C80 ocurre con mayor facilidad, lo que acelera el proceso de acumulación. La relación entre el tipo de cemento, la porosidad efectiva y la velocidad de transporte iónico se discutirá en los resultados correspondientes al formation factor, donde se evidencia la ventaja microestructural de las matrices con mayor contenido de SCMs.

En conjunto, estos resultados reflejan una interacción compleja entre la porosidad, la difusividad, la alcalinidad del sistema y la cinética de acumulación de cloruros. Por lo tanto, aunque los umbrales de cloruros sean más bajos en mezclas con mayor contenido de SCMs, su desempeño global frente a la corrosión inducida por cloruros sigue siendo superior por la mayor resistencia al transporte y su capacidad de retención química.

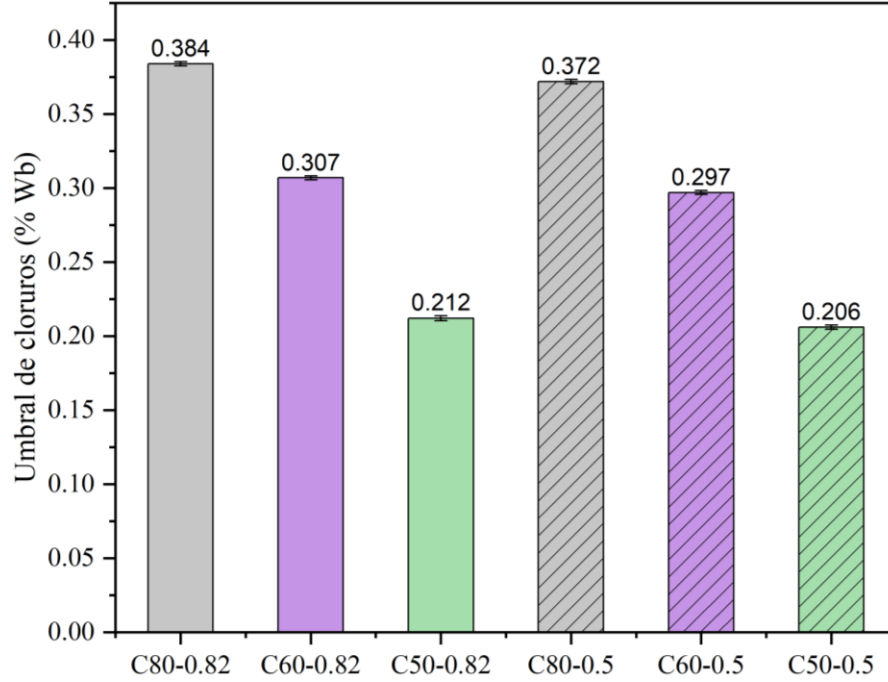


Figura 85. Resultados de umbral de corrosión para las mezclas en estudio.

5.5.2.2 Coeficiente de difusión de cloruros

Para la determinación del coeficiente de difusión de cloruros, en primera instancia es necesario la conversión de unidades de los resultados provenientes de la titulación potenciométrica de porcentaje en peso de concreto a porcentaje en peso de cemento. Para esto, se empleó la ecuación (21).

$$\%W_{cemento}(\%Wb) = \%W_{concreto} \times \frac{Densidad_{concreto}}{Consumo_{cemento}} \quad (21)$$

De la anterior ecuación se puede realizar el siguiente análisis de unidades:

$$\%Wb = \frac{kg_{cl}}{kg_{concreto}} \times \frac{\frac{kg_{concreto}}{m^3}}{\frac{kg_{cemento}}{m^3}} = \frac{kg_{cl}}{kg_{cemento}} = \%W_{cemento} \quad (22)$$

Después de realizar las conversiones, se procedió a realizar el ajuste de los datos experimentales a los datos teóricos según la segunda ley de difusión de Fick, explicada en la ecuación (10) y los resultados se muestran en la Figura 86.

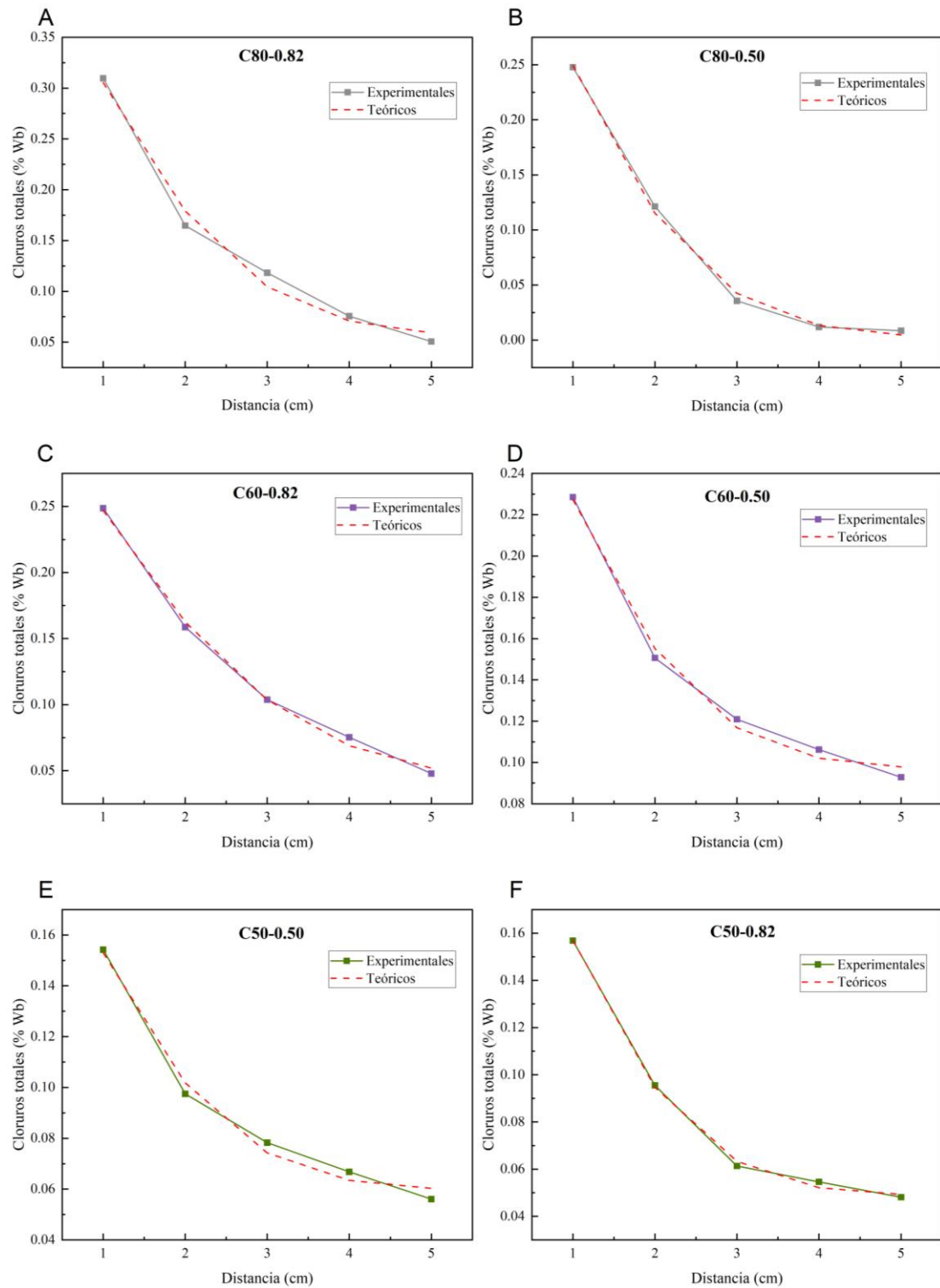


Figura 86. Ajuste de los perfiles de difusión de las mezclas en estudio.

A partir de la aplicación de la segunda ley de Fick, fue posible determinar ciertos parámetros como la concentración de cloruros en la superficie y el coeficiente de difusión de cloruros, criterios clave para la estimación del tiempo de iniciación de la corrosión.

La Figura 87 muestra los coeficientes de difusión aparente de iones cloruro para las distintas mezclas, calculados a partir del perfil de concentración según la solución de error complementaria para difusión unidimensional de la segunda ley de Fick. Se observa que, si bien existen diferencias entre mezclas, los valores obtenidos están en un rango relativamente estrecho, entre $1.02 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.93 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. En general, se aprecia que una menor relación agua/cementante tiende a reducir ligeramente el coeficiente de difusión, como se evidencia en el caso de C80-0.82 ($1.93 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) frente a C80-0.50 ($1.11 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), así como en C50-0.82 ($1.566 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) frente a C50-0.50 ($1.02 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$). Sin embargo, esta reducción no es drástica, lo que sugiere que las diferencias en densidad de la matriz no se reflejan de forma proporcional en la difusividad medida a través del perfil.

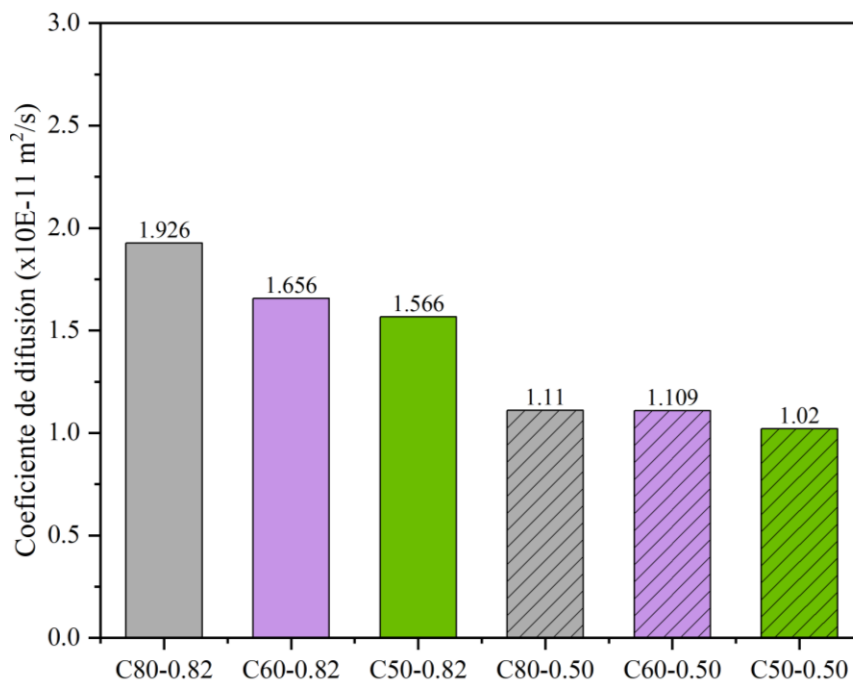


Figura 87. Coeficientes de difusión de cloruros de las mezclas en estudio.

Por otro lado, la Figura 88 evidencia diferencias mucho más marcadas en la concentración de cloruros en la superficie del concreto, parámetro clave para estimar el tiempo de

iniciación de la corrosión según modelos basados en la Ley de Fick. Las mezclas con mayor relación a/cm muestran sistemáticamente valores más altos de concentración superficial, con máximos de 0.453% y 0.429% del peso del cemento para C80-0.82 y C80-0.50, respectivamente. A su vez, se observa que para un mismo valor de relación a/cm, el contenido de clinker tiene un efecto importante: las mezclas con mayor contenido de cemento Portland (C80) presentan mayores concentraciones superficiales que sus contrapartes con mayor contenido de cementantes suplementarios (C50). Por ejemplo, C80-0.82 alcanza 0.453%, mientras que C50-0.82 apenas 0.239%.

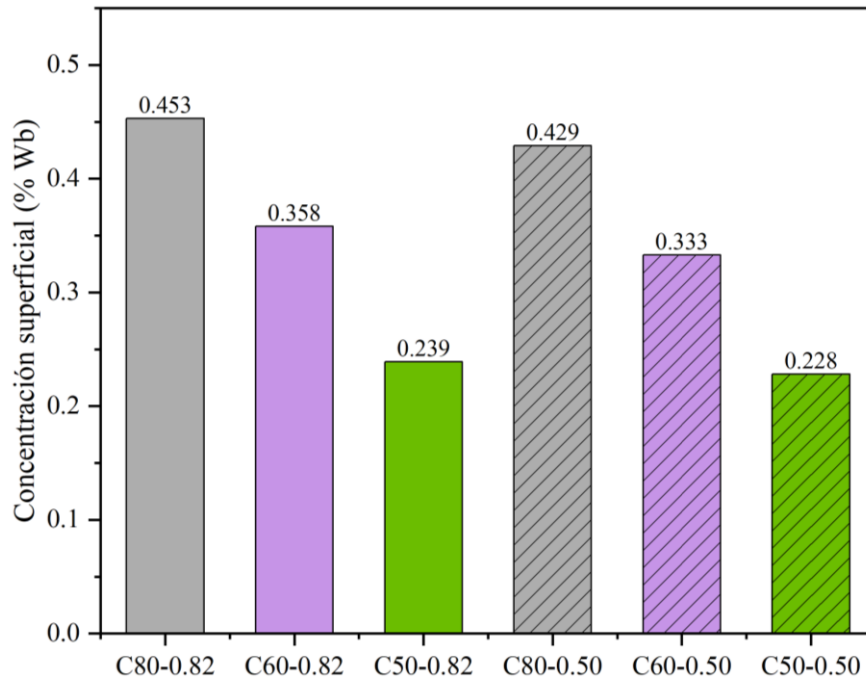


Figura 88. Concentración de cloruros en la superficie para las mezclas en estudio.

De esta manera, aunque los coeficientes de difusión entre mezclas no difieren significativamente, las concentraciones superficiales sí lo hacen, y en consecuencia, la velocidad de acumulación de cloruros hacia el acero también. En modelos de predicción de vida útil, donde el tiempo de inicio de la corrosión se calcula a partir de la solución de la Ley de Fick inversa, esta concentración superficial tiene un papel determinante. Mezclas con concentraciones más bajas pueden demorar más tiempo en alcanzar la concentración crítica de cloruros en la profundidad del refuerzo, incluso si su coeficiente de difusión es levemente mayor. En resumen, los resultados destacan que la concentración superficial de cloruros representa un parámetro más sensible y diferenciador entre mezclas

que el propio coeficiente de difusión, y debe ser cuidadosamente considerado en estimaciones de durabilidad por ingreso de cloruros.

5.5.2.3 Tiempo de iniciación de la corrosión

A partir de los valores experimentales de coeficiente de difusión aparente, concentración superficial de cloruros y umbral de corrosión determinados para cada mezcla, se procedió a estimar el tiempo de iniciación de la corrosión inducida por cloruros mediante un modelo unidimensional de difusión de Fick, considerando una profundidad de recubrimiento típica de 4 cm. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 89. Se observa que el tiempo estimado para alcanzar el umbral crítico varía significativamente en función de la relación agua/cementante y del tipo de cemento empleado.

En general, las mezclas con menor relación a/cm (0.50) muestran tiempos de iniciación notablemente mayores respecto a sus contrapartes con $a/cm = 0.82$, lo cual es coherente con su menor permeabilidad y mayor capacidad de resistir el ingreso de iones cloruro. Además, se evidencia que, dentro de cada nivel de a/cm, las mezclas con menor sustitución de clínter (C50) presentan los mayores tiempos de inicio de la corrosión: hasta 138 años en el caso de C50-0.50, frente a solo 18 años para C80-0.82.

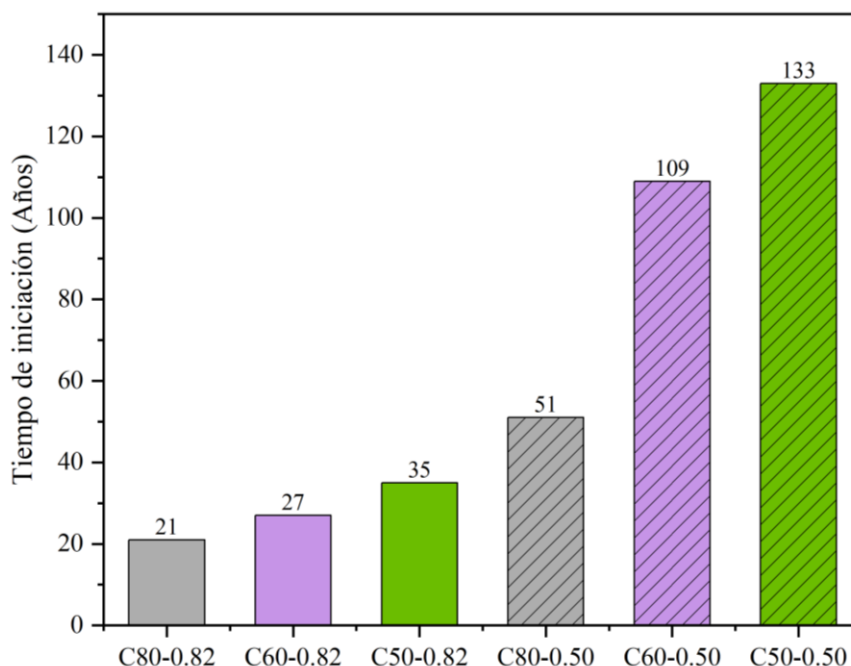


Figura 89. Tiempo de iniciación de la corrosión inducida por cloruros.

Este comportamiento se debe principalmente a dos factores: (1) los valores de umbral de cloruros más elevados asociados a los cementos con menor contenido de adiciones (es decir, con mayor proporción de clinker), y (2) las concentraciones superficiales de cloruros más bajas observadas en matrices con menor relación agua/cementante. Si bien las mezclas con mayor contenido de SCMs (como C50) presentan una alta resistencia a la difusión de cloruros, también exhiben umbrales más bajos para la despasivación del acero. No obstante, debido a que estas mismas mezclas también registran las menores concentraciones de cloruros en la superficie del concreto, el tiempo requerido para que los cloruros alcancen el umbral crítico se incrementa de forma considerable, lo cual explica sus mayores tiempos de iniciación de la corrosión.

Estos resultados subrayan la necesidad de considerar de forma conjunta los efectos de la microestructura del concreto, la capacidad de fijación química de los cloruros y la cinética de su acumulación en el recubrimiento, para una correcta evaluación del desempeño frente a la corrosión. Aunque los cementos con alto contenido de adiciones ofrecen ventajas en términos de sostenibilidad y refinamiento de poros, su uso no implica automáticamente una mayor vida útil frente a la corrosión inducida por cloruros. En este estudio, se observó que los cementos con bajo contenido de clinker (C50) presentaron los umbrales de corrosión más bajos, pero también las concentraciones superficiales de cloruros más reducidas, lo que resultó en mayores tiempos de iniciación. Por el contrario, los cementos con mayor contenido de clinker (C80) mostraron umbrales más altos, pero también una mayor concentración superficial de cloruros, lo que aceleró la llegada al umbral crítico y redujo significativamente el tiempo estimado para el inicio de la corrosión.

5.5.2.3 Análisis de fijación de cloruros

Para la determinación de la capacidad de fijación de cloruros de todas las mezclas, se calcularon los cloruros fijados a partir de los datos experimentales de cloruros totales y cloruros libres de acuerdo con la ecuación (14) y los resultados se muestran en la Figura 90. Se observa en la Figura 90 A y B que para las mezclas con el cemento del 80% de clinker los cloruros libres son mayores a los cloruros fijados. Sin embargo, esta tendencia cambia para los concretos con mayor reemplazo de clinker (C60 y C50). La Figura 90 C, D, E y F evidencia mayores concentraciones de cloruros fijados que cloruros libres, lo que refleja posibilidades de fijación de cloruros para estos dos tipos de cemento.

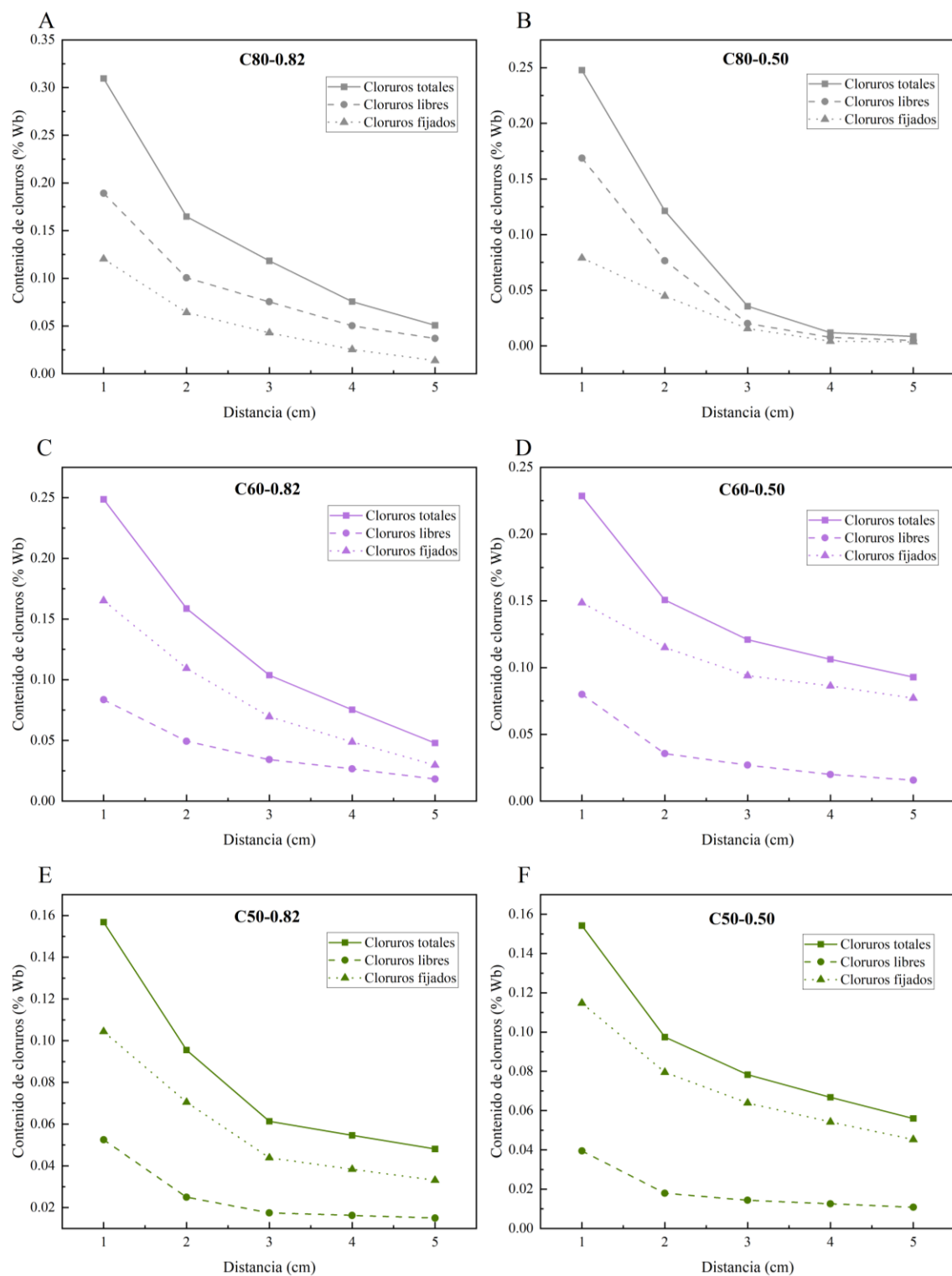


Figura 90. Determinación de cloruros totales, libres y fijados para todas las mezclas en estudio.

Seguidamente, se determinaron las isothermas lineal con la ecuación (15), la isoterma de Langmuir con la ecuación (16) y la isoterma de Freundlich con la ecuación (17). Este análisis de las tres isothermas se realizó para todas las mezclas de concreto y en la Figura 91 se muestra un ejemplo de esto. Sin embargo, la tendencia en todos los casos correspondía a que la isoterma de Langmuir presentaba un mejor ajuste a través de menores errores relativos. Por lo tanto, se procede a hacer el análisis de cloruros fijados siguiendo las constantes resultantes de las isothermas de Langmuir (véase Figura 92).

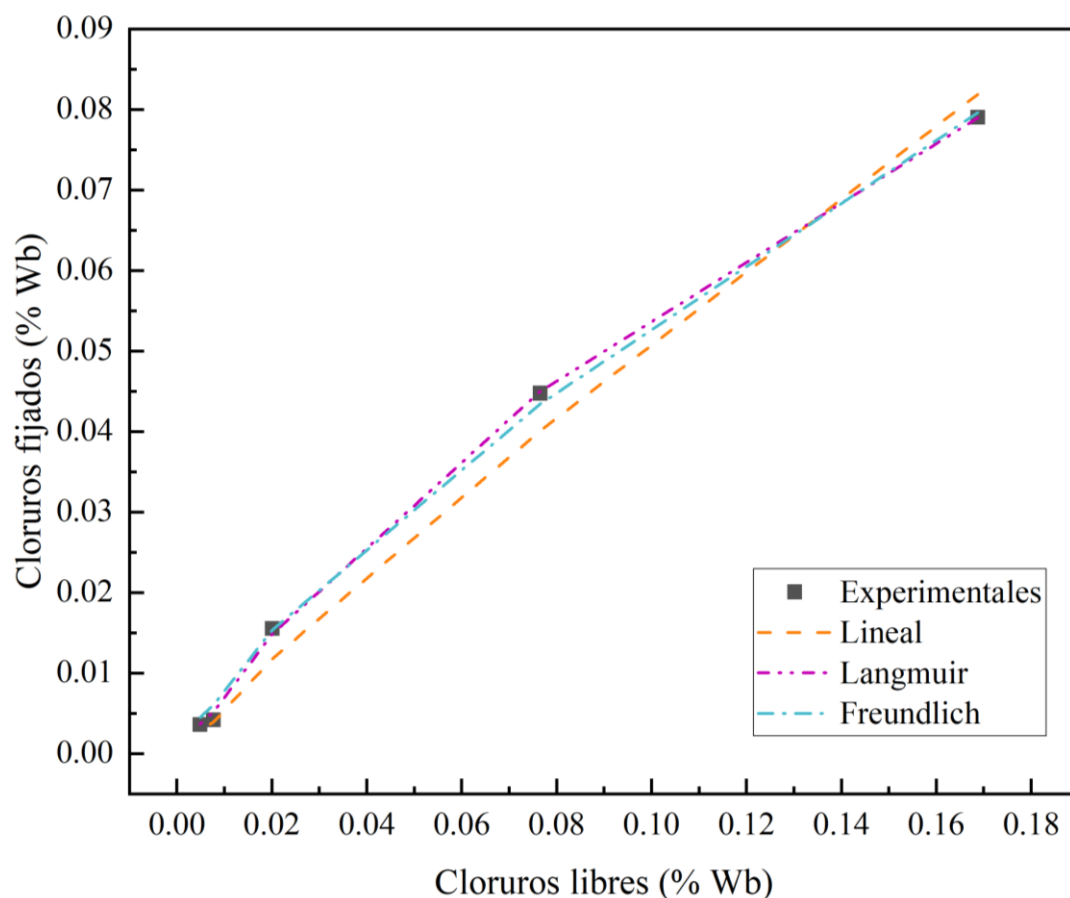


Figura 91. Cálculo de las isothermas de fijación de cloruros.

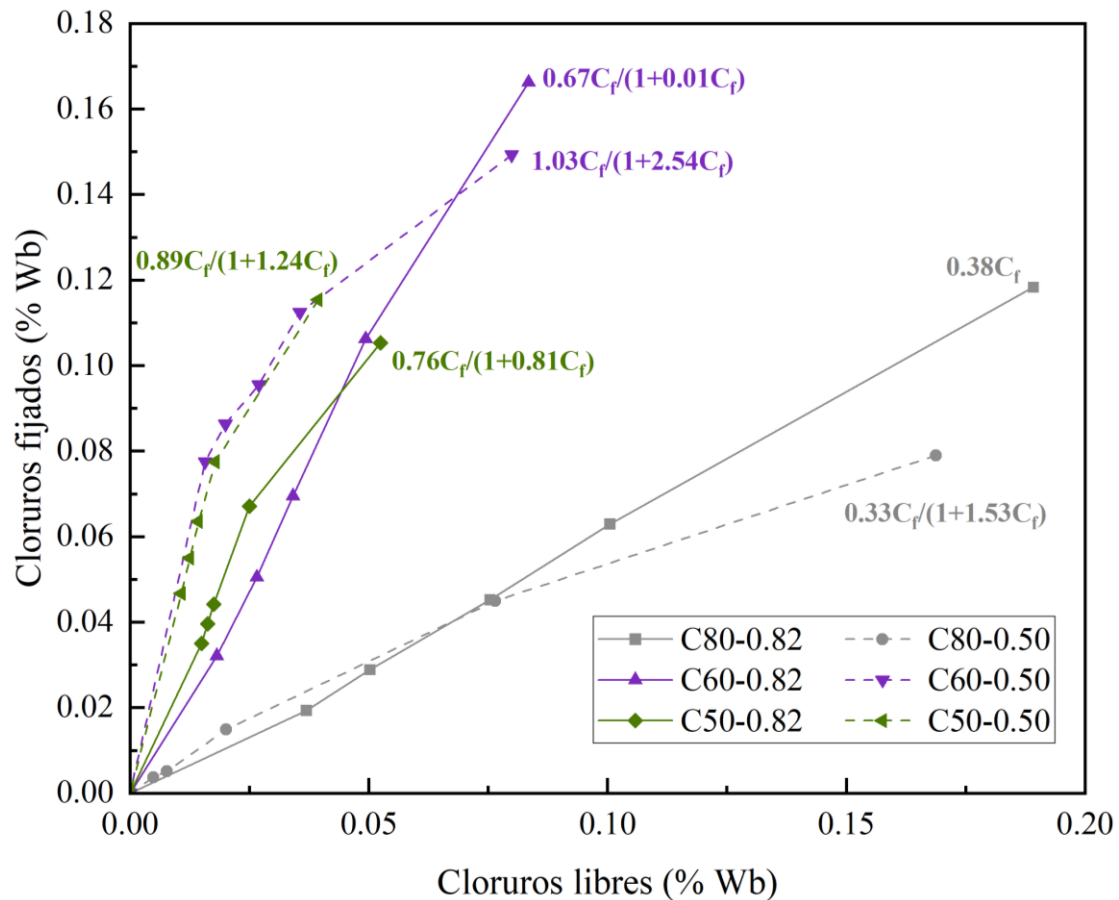


Figura 92. Isotermas de Langmuir para las mezclas en estudio.

Por último, se calculan los cloruros límite para cada mezcla, realizando una regresión lineal de los datos inversos de cloruros libres (C_f) vs cloruros fijados (C_b). Los resultados se muestran en la Figura 93. En estas gráficas, la intercepción con el eje Y corresponde al inverso de los cloruros límite $1/CL$. Sin embargo, los resultados demuestran que estos valores están muy cercanos a cero, por lo que se puede inferir que la fijación de los cloruros no está incidiendo significativamente en los cloruros libres en la matriz que participan en la despasivación del acero de refuerzo.

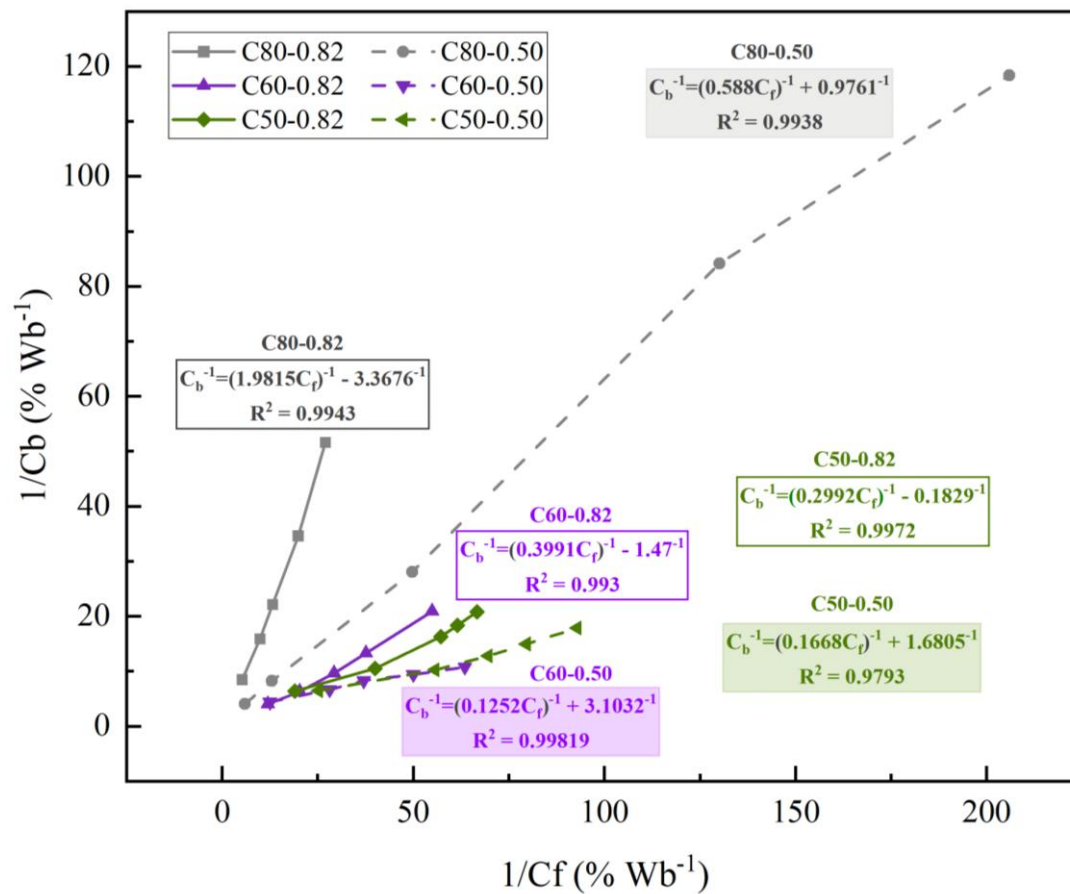


Figura 93. Determinación de cloruros límite de las mezclas en estudio.

Análisis general de la investigación

Etapas 1 – Propiedades mecánicas

- Los resultados de resistencia a la compresión evidencian que el contenido de clínker y la relación agua-cementante son factores determinantes en el desarrollo mecánico del concreto. El cemento de referencia (C80), con 80 % de clínker, alcanzó las resistencias iniciales más elevadas en todas las mezclas, superando a C60 y C50 a 28 días en 30 % y 26 % respectivamente en la mezcla M20 ($a/cm = 0.82$), y en 16 % y 13 % en la mezcla M40 ($a/cm = 0.50$). Sin embargo, los cementos con menor contenido de clínker mostraron un comportamiento más progresivo, con incrementos de resistencia entre 28 y 90 días del orden de 15 % y 17 % para C60 y C50 en M20, frente a un 6 % de C80. Al reducir la relación a/cm , las diferencias entre cementos se atenúan significativamente, alcanzando valores comparables a 56 y 90 días: en M60 ($a/cm = 0.34$), C50 quedó solo un 6 % por debajo de C80 a 28 días, y en M70 ($a/cm = 0.28$) la brecha se redujo a un 13 %, estrechándose aún más a edades posteriores. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de emplear cementos con menor contenido de clínker para concretos estructurales más sostenibles sin comprometer el desempeño mecánico a largo plazo.
- El análisis del módulo de elasticidad a 56 días confirma que este parámetro está fuertemente influenciado por la relación agua-cementante y la resistencia a compresión, mientras que el contenido de clínker tiene un efecto limitado. En la mezcla M20 ($a/cm = 0.82$), el módulo de C80 (21.0 GPa) supera en un 19 % y 12 % a los valores de C60 (17.6 GPa) y C50 (18.8 GPa), respectivamente. Estas diferencias disminuyen conforme se reduce la relación a/cm : en M40 ($a/cm = 0.50$) C80 supera a C60 y C50 en apenas 7 % y 3 %; en M60 ($a/cm = 0.34$) en 5 % y 2 %; y en M70 ($a/cm = 0.28$) las diferencias son marginales (3 % frente a ambos). Esto evidencia que, a medida que aumenta la calidad del concreto, la rigidez del material se homogeniza entre cementos, y la incorporación de materiales suplementarios en C60 y C50 no compromete significativamente el módulo

elástico, permitiendo concretos más sostenibles con un comportamiento mecánico comparable.

Etapas 2 – Estabilidad volumétrica

- Los resultados de retracción química evidenciaron una marcada influencia tanto del contenido de clínker como de la relación agua/cementante en el consumo volumétrico de agua durante la hidratación de las pastas de cemento. Para ambas relaciones a/cm, las pastas con mayor sustitución por materiales cementantes suplementarios (C50 y C60) mostraron retracciones químicas superiores a la pasta de referencia C80, alcanzando incrementos finales de 39–50 % y 24–33 %, respectivamente, respecto a C80. La reducción de la relación a/cm de 0.34 a 0.28 intensificó la retracción en todos los cementos, con aumentos de hasta 184 % en C50, 165 % en C80 y 147 % en C60. Estos resultados confirman que los cementos con menor contenido de clínker, en particular el LC³ (C50), presentan una mayor reactividad a largo plazo asociada a la hidratación extendida y las reacciones puzolánicas, lo que repercute en un mayor consumo químico de agua.
- Los resultados de retracción autógena evidencian que tanto la reducción de la relación agua/cementante como el incremento en el contenido de materiales cementantes suplementarios amplifican este fenómeno y aumentan la susceptibilidad al agrietamiento temprano. Las mezclas elaboradas con el cemento LC³ (C50) presentaron las mayores deformaciones y anchos de grieta (–42 y –52 $\mu\text{m}/\text{m}$, con 0.3 y 0.6 mm para a/cm = 0.34 y 0.28, respectivamente), seguidas por C60 (–36 y –43 $\mu\text{m}/\text{m}$, 0.2 y 0.5 mm) y C80 (–28 y –22 $\mu\text{m}/\text{m}$, 0.1 y 0.3 mm). Se confirma una correlación directa entre el grado de retracción y las aberturas de grieta, destacando que los sistemas con mayor reemplazo de clínker son más propensos a la autodesecación y a la generación de tensiones internas, lo que representa un factor crítico a considerar para mitigar riesgos de fisuración temprana en concretos de alto desempeño.
- En las mezclas evaluadas, la retracción por secado se incrementó al reducir la relación a/cm y fue más pronunciada en los cementos con menor contenido de clínker, especialmente C60, que mostró deformaciones finales hasta un 33 %

superiores a las de C80. C50 presentó valores intermedios, con diferencias de hasta un 21 % respecto a C80. Estos resultados confirman que la combinación de baja relación a/cm y mayor sustitución de clinker aumenta la susceptibilidad al acortamiento por secado, lo que puede tener implicaciones en el control de fisuración y durabilidad de las estructuras.

Etapas 3 – Propiedades de transporte

- Los resultados de resistividad eléctrica *bulk* confirmaron la influencia combinada del contenido de clinker y la relación agua/cementante en la capacidad del concreto para oponerse al transporte iónico. A 90 días, el cemento con 50 % de clinker (C50) presentó resistividades entre 57 % y más del 200 % superiores a las de C80, mientras que C60 superó a C80 entre 13 % y 191 %, evidenciando que los cementos con mayor sustitución por materiales cementantes suplementarios (SCMs) refinan de forma más efectiva la microestructura. La reducción de la relación a/cm impulsó notablemente la resistividad: en C50 pasó de 64.2 k Ω ·cm en M20 (a/cm = 0.82) a 210.8 k Ω ·cm en M70 (a/cm = 0.28), un incremento del 228 %, desplazando a todas las mezclas hacia categorías de *baja* o *despreciable* probabilidad de corrosión según la NMX C-514. En conjunto, se confirma que la mayor sustitución de clinker, combinada con diseños de baja relación a/cm, constituye una estrategia eficaz para mejorar la durabilidad del concreto frente a procesos de corrosión.
- En la evaluación de la resistividad eléctrica superficial, se evidenció que las mezclas con mayor sustitución de clinker (C50 y C60) desarrollan resistividades significativamente superiores a las del cemento de referencia (C80), especialmente al reducir la relación agua/cementante. A los 90 días, C50 alcanzó valores hasta 244 % mayores que C80 (64.2 vs. 18.7 k Ω ·cm en M70) y 46 % superiores en mezclas de alta relación a/cm (M20). C60 mostró incrementos aún más marcados en mezclas de baja a/cm, con resistividades 547 % superiores entre M20 y M70 (de 9.7 a 62.7 k Ω ·cm). Estos resultados confirman que la combinación de bajas relaciones a/cm y cementos con elevada incorporación de materiales cementantes suplementarios favorece el aumento de la resistividad superficial, desplazando a

las mezclas hacia categorías de baja o muy baja probabilidad de corrosión, lo que implica un potencial significativo para mejorar la durabilidad de los concretos.

- Los resultados de la prueba de penetración rápida de ion cloruro evidenciaron que las mezclas con mayor sustitución de clinker (C50 y C60) presentan una mayor resistencia al ingreso de cloruros en comparación con el cemento de referencia (C80), especialmente a bajas relaciones agua/cementante. En particular, la mezcla C50-0.50 se ubicó en la categoría de baja probabilidad de corrosión (1,000–2,000 Coulombs), mientras que el resto de las mezclas se clasificaron en la categoría de probabilidad moderada. Este comportamiento se asocia con la incorporación de materiales cementantes suplementarios que refinan la microestructura y disminuyen la permeabilidad, lo que contribuye a incrementar la durabilidad potencial frente a la corrosión inducida por cloruros.
- La evaluación de la velocidad de carbonatación mostró que, aunque las mezclas con menor contenido de clinker (C60 y C50) presentaron valores más altos, la diferencia respecto al cemento de referencia (C80) se reduce significativamente al disminuir la relación agua/cementante. Esto indica que la velocidad de carbonatación está fuertemente influenciada por el diseño de mezcla más que por el tipo de cemento en sí.

Etapas 4 – Monitoreo electroquímico de la corrosión

- En conjunto, el monitoreo de potenciales de corrosión evidencia que tanto la relación agua/cementante como el tipo de cemento ejercen un efecto determinante en la estabilidad electroquímica del acero embebido. Las mezclas con relaciones a/cm más bajas (0.50) presentan potenciales menos negativos y, por ende, una menor probabilidad de corrosión, mientras que las mezclas con $a/cm = 0.82$ muestran una mayor susceptibilidad, especialmente en cementos con mayor contenido de adiciones minerales (C50). En todas las edades, la tendencia $C50 > C60 > C80$ en magnitud negativa se mantuvo, confirmando que un mayor contenido de clinker favorece la estabilidad pasiva. Los potenciales catódicos, menos negativos y con variaciones menores, corroboran la existencia de una capa pasiva relativamente estable en todas las mezclas. Estos resultados resaltan la

importancia de controlar la relación a/cm y la composición del cemento para mitigar el riesgo de corrosión en condiciones de exposición similares.

- Los resultados de la resistencia a la polarización (Figura 61) e I_{corr} (Figura 62) evidencian la marcada influencia del tipo de cemento en la protección del acero embebido. En ambas relaciones a/cm , los cementos con mayor contenido de adiciones minerales (C50 y C60) presentaron los valores más altos de R_p y, en consecuencia, las menores densidades de corriente de corrosión, indicando una película pasiva más estable. En promedio, C50 mostró una R_p hasta +178% superior a la de C80 y una I_{corr} -64% menor, confirmando su mayor eficiencia protectora. La disminución de la relación a/cm mejoró la R_p de C80 y C60 en +37% y +13%, respectivamente, reduciendo sus valores de I_{corr} en proporciones equivalentes, mientras que C50 presentó variaciones mínimas, evidenciando que a bajas relaciones a/cm su matriz ya alcanza una densificación óptima. En conjunto, la correlación inversa entre R_p e I_{corr} refuerza que la mejora en la microestructura del concreto y la presencia de adiciones minerales incrementan la resistencia a la corrosión del acero.

Etapas 5 – Estimación de vida útil

- Los modelos de vida útil desarrollados a partir de los resultados de carbonatación muestran que la durabilidad del concreto frente a corrosión inducida por CO_2 está fuertemente condicionada por la relación agua/cementante y, en menor medida, por el tipo de cementante. Las mezclas con $a/cm = 0.82$, particularmente aquellas con mayor contenido de adiciones (C60 y C50), presentan coeficientes de difusión elevados y tiempos de iniciación inferiores a 3 años bajo condiciones aceleradas, y menores a 10 años al extrapolarlas a carbonatación natural, evidenciando su elevada vulnerabilidad. En contraste, la reducción de la a/cm a 0.50 incrementa los tiempos de iniciación en órdenes de magnitud, alcanzando valores superiores a 300 años para C60 y C50 y hasta más de 2800 años para C80 en escenarios naturales conservadores. Estos resultados subrayan la relevancia del diseño de mezclas densas y con alto contenido de clinker para prolongar significativamente la vida útil de estructuras expuestas a entornos carbonatantes.

- Los resultados obtenidos permiten concluir que la concentración crítica de cloruros al momento de la despasivación del acero no depende exclusivamente del tipo de cemento o de la relación agua/cementante, sino de la interacción entre estas variables y la microestructura resultante. En términos absolutos, se observaron valores más altos de umbral de cloruros en mezclas con menor sustitución de clínker ($C80 > C60 > C50$), debido a que todas las probetas se despasivaron en el mismo ciclo de exposición, pero con diferentes velocidades de penetración de cloruros. Las mezclas con mayor contenido de cementantes suplementarios (SCMs) presentaron menores umbrales medidos, no por una menor capacidad del acero para tolerar cloruros, sino porque sus matrices más densas y menos permeables redujeron la acumulación de estos iones durante el mismo periodo de exposición. Esto resalta la importancia de considerar el umbral de cloruros en conjunto con parámetros de transporte iónico y formación de poros, ya que una menor concentración crítica no implica necesariamente un peor desempeño frente a la corrosión. De hecho, las mezclas con mayor contenido de SCMs ofrecen una protección más robusta al limitar la llegada de cloruros a la superficie del acero, lo que podría traducirse en una mayor vida útil en condiciones de exposición prolongada.
- Los resultados obtenidos muestran que, si bien los coeficientes de difusión aparente de cloruros no presentan diferencias marcadas entre mezclas, la concentración de cloruros en la superficie del concreto sí se ve fuertemente influenciada tanto por el tipo de cemento como por la relación agua/cementante. En particular, las mezclas con menor contenido de clínker (C50 y C60) y menor relación a/cm (0.50) exhiben concentraciones superficiales significativamente más bajas. Esta diferencia es especialmente relevante en la estimación del tiempo de inicio de la corrosión por cloruros, ya que en modelos de predicción de vida útil, la concentración superficial es un parámetro clave. Así, aunque la difusividad sea similar entre mezclas, una menor concentración superficial implica un retraso mayor en alcanzar el umbral de corrosión en el acero de refuerzo. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar la concentración superficial como un factor

crítico en evaluaciones de durabilidad, incluso por encima del coeficiente de difusión en algunos casos.

- Los resultados obtenidos evidencian que el tiempo de iniciación de la corrosión inducida por cloruros no depende exclusivamente de un único parámetro, sino de la interacción entre la microestructura del concreto, la capacidad de difusión de cloruros, la concentración superficial y el valor umbral de despasivación del acero. En este estudio, se observó que, aunque los cementos con mayor contenido de adiciones (como C50) presentan los valores más bajos de umbral de cloruros, su elevada resistencia a la penetración de agentes agresivos y las menores concentraciones de cloruros en la superficie se traducen en tiempos de iniciación significativamente más prolongados. Por otro lado, las mezclas con alto contenido de clínker (C80) mostraron umbrales más elevados, pero también mayores concentraciones superficiales, lo que aceleró la llegada al umbral crítico. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar simultáneamente todos los factores que intervienen en la etapa de iniciación, especialmente en el diseño de concretos durables para ambientes marinos o expuestos a cloruros, y demuestran que la durabilidad frente a la corrosión no puede evaluarse únicamente con base en la difusión o el umbral de forma aislada, sino mediante un enfoque integral que contemple todo el proceso de acumulación hasta la despasivación.
- Los resultados de formation factor evidencian que, a pesar de la incorporación de adiciones minerales, la alcalinidad de la matriz cementante se mantiene elevada y estable hasta los 150 días, garantizando condiciones adecuadas para la pasivación del acero de refuerzo. La conductividad de la solución de poros disminuyó significativamente con la edad (46–58 %), efecto asociado al avance de la hidratación y la reducción de la concentración iónica, mientras que el formation factor aumentó marcadamente con la disminución de la relación a/cm , alcanzando incrementos de hasta 220 % entre $a/cm = 0.82$ y 0.50 . Dentro de cada relación a/cm , los cementos con mayor contenido de clínker (C80) presentaron los valores más elevados, reflejando una menor conectividad porosa y mayor capacidad para limitar la migración de iones. Estos hallazgos confirman que la combinación de alta alcalinidad estable, baja conductividad y elevado formation factor favorece la

Análisis general de la investigación

durabilidad del concreto frente a los mecanismos de transporte que controlan la corrosión.

Conclusiones

Objetivo 1 – Evaluar las propiedades mecánicas

- El cemento de referencia (C80), con 80 % de clinker, alcanzó las resistencias iniciales más elevadas en todas las mezclas. Las tasas de ganancia de resistencia son más elevadas para los cementos bajos en carbono. Al reducir la relación a/cm, las diferencias entre cementos se atenúan significativamente, alcanzando valores comparables a 56 y 90 días.
- El análisis del módulo de elasticidad confirma que este parámetro está fuertemente influenciado por la relación agua-cementante y la resistencia a compresión, mientras que el contenido de clinker tiene un efecto limitado.

Objetivo 2 – Valorar la estabilidad volumétrica

- Para ambas relaciones a/cm, las pastas con mayor sustitución por materiales cementantes suplementarios (C50 y C60) mostraron retracciones químicas superiores a la pasta de referencia C80, alcanzando incrementos finales de 39–50 % y 24–33 %, respectivamente, respecto a C80.
- Las mezclas elaboradas con LC3 (C50) presentaron las mayores deformaciones y anchos de grieta (-42 y -52 $\mu\text{m/m}$, con 0.3 y 0.6 mm para a/cm = 0.34 y 0.28, respectivamente), seguidas por C60 (-36 y -43 $\mu\text{m/m}$, 0.2 y 0.5 mm) y C80 (-28 y -22 $\mu\text{m/m}$, 0.1 y 0.3 mm).
- La retracción por secado se incrementó al reducir la relación a/cm y fue más pronunciada en los cementos con menor contenido de clinker, especialmente C60, que mostró deformaciones finales hasta un 33 % superiores a las de C80. C50 presentó valores intermedios, con diferencias de hasta un 21 % respecto a C80.

Objetivo 3 – Valorar las propiedades de transporte

- Los resultados de resistividad eléctrica bulk confirmaron la influencia combinada del contenido de clinker y la relación agua/cementante en la capacidad del concreto para oponerse al transporte iónico.

Conclusiones

- La incorporación de materiales cementantes suplementarios refinan la microestructura y disminuyen la permeabilidad, lo que resultó en menor penetración de cloruros en la prueba de RCPT.
- La velocidad de carbonatación está fuertemente influenciada por el diseño de mezcla más que por el tipo de cemento.

Objetivo 4 – Analizar con técnicas electroquímicas la velocidad de corrosión

- La tendencia de los E_{corr} $C50 > C60 > C80$ en magnitud negativa se mantuvo, confirmando que un mayor contenido de clínker favorece la estabilidad pasiva, por lo que al emplear cementos bajos en carbono se debe controlar la relación a/cm en el diseño de mezcla.
- Los cementos con mayor contenido de adiciones minerales (C50 y C60) presentaron los valores más altos de R_p y, en consecuencia, las menores densidades de corriente de corrosión, indicando una película pasiva más estable.
- La disminución de la relación a/cm mejoró la R_p de C80 y C60 en +37% y +13%, respectivamente, reduciendo sus valores de I_{corr} en proporciones equivalentes, mientras que C50 presentó variaciones mínimas, evidenciando que a este cemento presenta R_p muy elevadas independientemente de la relación a/cm.

Objetivo 5 – Estimar la vida útil del concreto reforzado

- La reducción de la a/cm a 0.50 incrementa los tiempos de iniciación por carbonatación, alcanzando valores superiores a 300 años para C60 y C50 y hasta más de 2800 años para C80 en escenarios naturales.
- La concentración crítica de cloruros al momento de la despasivación del acero no depende exclusivamente del tipo de cemento o de la relación agua/cementante, sino de la interacción entre estas variables y la microestructura.
- Los resultados indican tiempos de iniciación por cloruros de 21, 27 y 35 años para las mezclas con relación a/cm = 0.82 (C80, C60 y C50, respectivamente), mientras que para la relación a/cm = 0.5 los valores se incrementan de manera considerable, alcanzando 51, 109 y hasta 133 años en las mismas series de cementos.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones propias de la investigación, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

1. Dado que en este estudio se emplearon principalmente métodos acelerados de evaluación, se recomienda complementar estos hallazgos con ensayos de exposición natural en distintas condiciones ambientales. Esto permitirá validar la confiabilidad de los métodos acelerados y correlacionar los resultados con escenarios reales de servicio, especialmente en lo referente a corrosión por cloruros y carbonatación.
2. Es necesario profundizar en la caracterización e interacción de los nuevos productos de hidratación característicos de los cementos LC³, como el monocarboaluminato y el C-A-S-H. En particular, se sugiere investigar la sinergia entre la caliza y el metacaolín en la formación y estabilidad de dichos productos, así como su influencia en la microestructura y en la durabilidad. El análisis químico de la solución de poros y la determinación de parámetros de tortuosidad podrían proporcionar información clave sobre los mecanismos de transporte iónico y la resistencia a la penetración de agentes agresivos.
3. Considerando que el origen geológico y mineralógico de las adiciones puede modificar la cohesión y las propiedades glutinantes de las pastas y morteros, se recomienda realizar estudios reológicos detallados. Estos deben incluir la evaluación de la demanda de agua, el efecto sobre la trabajabilidad y la relación con el desarrollo de microfisuras tempranas, aspectos directamente vinculados con la colocación en obra y el desempeño mecánico inicial.
4. Los resultados sugieren la necesidad de optimizar el desempeño de los cementos LC³ en edades tempranas (1 a 3 días). En este sentido, se recomienda investigar adiciones o ajustes de dosificación que promuevan un mayor grado de hidratación inicial. Asimismo, explorar formulaciones tipo LC⁴ podría ser una alternativa prometedora para mejorar esta propiedad, sin comprometer la durabilidad y la sostenibilidad a largo plazo.

5. Con el fin de ampliar el entendimiento de la carbonatación en concretos con cementos adicionados, se recomienda estudiar el mecanismo electroquímico de la interacción acero CO_2 . Este análisis podría apoyarse en técnicas electroquímicas para establecer la cinética de la despasivación y su dependencia de la microestructura cementante.
6. Se considera relevante impulsar estudios que comparen el desempeño de los cementos LC^3 frente a los criterios establecidos en normativas nacionales e internacionales. Ello permitiría generar información técnica sólida que contribuya a la actualización de normativas y reglamentos, facilitando la aceptación y aplicación de cementos adicionados en la industria de la construcción.
7. Dado que la fisuración por retracción puede modificar significativamente las propiedades de transporte y, en consecuencia, los mecanismos de corrosión, se recomienda abordar estudios que relacionen la retracción con la durabilidad de concretos con cementos LC^3 . Particular énfasis debería ponerse en el análisis del efecto de microfisuras sobre la penetración de cloruros, la carbonatación y la propagación de la corrosión en el acero de refuerzo.
8. Finalmente, para complementar los resultados de desempeño técnico, se recomienda realizar un análisis de ciclo de vida (LCA) de las mezclas de concreto propuestas. Esto permitirá cuantificar de manera objetiva los beneficios ambientales del uso de cementos adicionados, considerando no solo la reducción de emisiones de CO_2 durante la producción, sino también la durabilidad a largo plazo y los costos de mantenimiento asociados a estructuras construidas con estos materiales.

Referencias

- AASHTO T 358. (2015). Surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1–9.
- ACI Committee 211. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*.
- Afroz, S., Nguyen, Q. D., Zhang, Y., Kim, T., & Castel, A. (2023). Cracking of limestone calcined clay blended concrete and mortar under restrained shrinkage. *Construction and Building Materials*, 386(May), 131599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131599>
- Afroz, S., Zhang, Y., Nguyen, Q. D., Kim, T., & Castel, A. (2023). Shrinkage of blended cement concrete with fly ash or limestone calcined clay. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 56(1), 1–20. <https://doi.org/10.1617/S11527-023-02099-8/TABLES/5>
- Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2015.01.028>
- Amran, M., Murali, G., Khalid, N. H. A., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H., Haruna, S., & Lee, Y. Y. (2021). Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 272, 121942. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121942>
- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete — A review. *Cement and Concrete Research*, 39, 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- Ann, K. Y., & Song, H. W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 49(11), 4113–4133.

Referencias

- <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2007.05.007>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.09.006>
- Antunes, M., Santos, R. L., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R. B., & Colaço, R. (2022). Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review. *Materials*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010209>
- Astm:C29/C29M-09. (2009). Standard Test Method for Bulk Density (“ Unit Weight ”) and Voids in Aggregate. *ASTM International*, i(c), 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0029>
- ASTM C109. (2016). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. In *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/C0109>
- ASTM C187. (2011). Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste. In *ASTM International* (Vol. 04, Issue 01). <https://doi.org/10.1520/C0187-11.2>
- ASTM C188. (2015). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. In *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/C0188-15.2>
- ASTM C191. (2013). Standard Test Methods Time os Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. In *ASTM International* (Vol. 15, Issue 9). <https://doi.org/10.1520/C0191-13.2>
- ASTM C192. (2016). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. <https://doi.org/10.1520/C0192>
- ASTM C31. (2015). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. In *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/C0031>
- ASTM C33. (2023). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. <https://doi.org/10.1520/C0033>
- ASTM C39. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical

Referencias

- Concrete Specimens. In *Annual Book of ASTM Standards: Vol. 04.02* (Issue July). <https://doi.org/10.1520/C0039>
- ASTM International. (2002). *ASTM C469 Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poissons Ratio of Concrete in Compression*. <https://doi.org/10.1520/C0469-02>
- ASTM International. (2010). *ASTM C617-10 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens*. <https://doi.org/10.1520/C0617-10>
- ASTM International. (2017). *ASTM G1 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. <https://doi.org/10.1520/G0001-03R17E01>
- ASTM International. (2018). *ASTM C1581/C1581M Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. https://doi.org/10.1520/C1581_C1581M-18A
- ASTM International. (2019). *ASTM C1202-19 Standard Test Method for Electrical Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. <https://doi.org/10.1520/C1202-19>
- ASTM International. (2020a). *ASTM C1152/C1152M Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. https://doi.org/10.1520/C1152_C1152M-20
- ASTM International. (2020b). *ASTM C1218/C1218M Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. https://doi.org/10.1520/C1218_C1218M-20
- ASTM International. (2021a). *ASTM C1760 Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete*. <https://store.astm.org/c1760-12.html>
- ASTM International. (2021b). *ASTM G109-21 Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0109-21>
- ASTM International. (2022a). *ASTM A706/A706M-22 Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement*. ASTM

Referencias

- International. https://doi.org/10.1520/A0706_A0706M-22
- ASTM International. (2022b). *ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0876-22B>
- ASTM International. (2023). *ASTM C1608 Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste*. <https://doi.org/10.1520/C1608-23>
- ASTM International. (2024). *ASTM C157/C157M Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0157_C0157M-17
- ASTM International. (2025). *ASTM C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. <https://doi.org/10.1520/C0595>
- ASTM INTERNATIONAL. (2015). *ASTM C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- ASTM Standard. (2015). ASTM C127–15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA: American Society for Testin. <https://doi.org/10.1520/C0127-15.2>
- Avet, F., & Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 124–135. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.02.016>
- Avet, F., Sofia, L., & Scrivener, K. (2019). Concrete Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC) Compared with Conventional Cements. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(3), 275–286. <https://doi.org/10.1520/ACEM20190052>
- Bahman-Zadeh, F., Ramezani-pour, A. A., & Zolfagharnasab, A. (2022). Effect of carbonation on chloride binding capacity of limestone calcined clay cement (LC3) and binary pastes. *Journal of Building Engineering*, 52, 104447. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104447>

Referencias

- Barbhuiya, S., Nepal, J., & Das, B. B. (2023). Properties, compatibility, environmental benefits and future directions of limestone calcined clay cement (LC3) concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 79(July), 107794. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107794>
- Ben Haha, M., Termkhajornkit, P., Ouzia, A., Uppalapati, S., & Huet, B. (2023a). Low clinker systems - Towards a rational use of SCMs for optimal performance. *Cement and Concrete Research*, 174(March), 107312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107312>
- Ben Haha, M., Termkhajornkit, P., Ouzia, A., Uppalapati, S., & Huet, B. (2023b). Low clinker systems - Towards a rational use of SCMs for optimal performance. *Cement and Concrete Research*, 174, 107312. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2023.107312>
- Bentur, A., Diamond, S., & Berke, N. (1997). *Steel Corrosion in Concrete* (First). Taylor & Francis.
- Bentz, D. P., Irassar, E. F., Bucher, B. E., & Weiss, W. J. (2011). Limestone fillers to conserve cement in low w/cm concretes: an analysis based on Powers' model. *Concrete International*, 31(11), 41–46.
- Bertollini, L. (2011). Performance-based service life design of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. In *The New Boundaries of Structural Concrete* (Second, pp. 17–30). <https://re.public.polimi.it/handle/11311/639914>
- Bertollini, L., Bernhard, E., Pedferri, P., Rodaelli, E., & Polder, R. B. (2014). *Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair*. (John Wiley & Sons (ed.); Second). Proquest Ebook.
- Black, L. (2016). Low clinker cement as a sustainable construction material. *Sustainability of Construction Materials*, 415–457. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100370-1.00017-2>
- Blouch, N., Rashid, K., Zafar, I., Ltifi, M., & Ju, M. (2023). Prioritization of low-grade kaolinite and mixed clays for performance evaluation of Limestone Calcined Clay

Referencias

- Cement (LC3): Multi-criteria assessment. *Applied Clay Science*, 243, 107080.
<https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2023.107080>
- Boanada-Fuchs, A., Heierli, U., & Scrivener, K. (2024). *Low Carbon Cement - Harmonizing Environmental Goals and Housing Needs*.
- Boscaro, F., Palacios, M., & Flatt, R. J. (2021). Formulation of low clinker blended cements and concrete with enhanced fresh and hardened properties. *Cement and Concrete Research*, 150, 106605.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2021.106605>
- Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete. Understanding, Investigation and Repair* (Second). Taylor & Francis.
- Cosoli, G., Mobili, A., Giulietti, N., Chiariotti, P., Pandarese, G., Tittarelli, F., Bellezze, T., Mikanovic, N., & Revel, G. M. (2021). Performance of concretes manufactured with newly developed low-clinker cements exposed to water and chlorides: Characterization by means of electrical impedance measurements. *Construction and Building Materials*, 271, 121546.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121546>
- De Weerd, K., Haha, M. Ben, Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 279–291.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.014>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., & Pillai, R. G. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107(July 2017), 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Dhanya, B. S., Rathnarajan, S., Santhanam, M., Pillai, R. G., & Gettu, R. (2019). Carbonation and its effect on microstructure of concrete with fly ASH and ground granulated blast furnace slag. *Indian Concrete Journal*, 93(4), 10–21.
<https://research.manchester.ac.uk/en/publications/carbonation-and-its-effect-on-microstructure-of-concrete-with-fly>

Referencias

- Doussang, L., Samson, G., Deby, F., Huet, B., Guillon, E., & Cyr, M. (2023). Durability parameters of three low-carbon concretes (low clinker, alkali-activated slag and supersulfated cement). *Construction and Building Materials*, 407, 133511. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133511>
- Duckheim, C., & Setzer, M. . (2009). Drying shrinkage mechanisms of hardened cement paste. In T. Tanabe, K. Sakata, R. Mihashi, R. Sato, K. Maekawa, & H. Nakamura (Eds.), *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures* (First, pp. 49–56).
- Durán-Herrera, A., Mendoza-Rangel, J. M., De-Los-Santos, E. U., Vázquez, F., Valdez, P., & Bentz, D. P. (2015). Accelerated and natural carbonation of concretes with internal curing and shrinkage/viscosity modifiers. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(4), 1207–1214. <https://doi.org/10.1617/S11527-013-0226-Y/FIGURES/4>
- Ejbouh, A., Ech-chebab, A., Hassi, S., Galai, M., Benqlilou, H., & Ebn Touhami, M. (2023). Durability assessment of LC3-based reinforced concrete under combined chloride-sulfate environment via the EIS technique. *Construction and Building Materials*, 366, 130194. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130194>
- Emmanuel, A. C., Haldar, P., Maity, S., & Bishnoi, S. (2016). Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: The experience. *The Indian Concrete Journal*, 90.
- EN 13295. (2004). Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance to carbonation. In *European Standard*.
- EPFL. (2023). *History LC3-Project – LC3*. <https://lc3.ch/history-of-lc3-research/>
- Fajardo, G., Valdez, P., & Pacheco, J. (2009). Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23(2), 768–774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023>
- Fernandez, R., Martirena, F., & Scrivener, K. L. (2011). The origin of the pozzolanic

Referencias

- activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 113–122. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.09.013>
- Gartner, E., & Sui, T. (2018). Alternative cement clinkers. *Cement and Concrete Research*, 114, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>
- GCCA. (2023). Cement Industry Net Zero Progress Report. In *Global Cement and Concrete Association*.
- Gowri, K., & Abdul Rahim, A. (2024). Investigation on rheological performance of indigenously developed sustainable low clinker hybrid cementing binders. *Results in Engineering*, 24, 103543. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103543>
- Hanein, T., Thienel, K. C., Zunino, F., Marsh, A. T. M., Maier, M., Wang, B., Canut, M., Juenger, M. C. G., Ben Haha, M., Avet, F., Parashar, A., Al-Jaberi, L. A., Almenares-Reyes, R. S., Alujas-Diaz, A., Scrivener, K. L., Bernal, S. A., Provis, J. L., Sui, T., Bishnoi, S., & Martirena-Hernández, F. (2021). Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures* 2023 55:1, 55(1), 1–29. <https://doi.org/10.1617/S11527-021-01807-6>
- Helwig, N. E., Hong, S., & Hsiao-wecksler, E. T. (1999). *Autogenous Shrinkage of Concrete* (E. Tazawa (ed.); First). Taylor & Francis.
- HOLCIM. (2023). *Holcim lanza Fuerte Más, el cemento con menos emisiones en México - Soluciones Concretas*. <https://www.solucionesconcretas.com.mx/2023/04/12/holcim-lanza-fuerte-mas-el-cemento-con-menos-emisiones-en-mexico/>
- IEA. (2023). *CO2 Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- Joseph, S., Bishnoi, S., & Maity, S. (2016). An economic analysis of the production of limestone calcined clay cement in India. *Indian Concrete Journal*, 90(11), 22–27.
- Kanagaraj, B., Anand, N., Johnson Alengaram, U., Samuvel Raj, R., & Karthick, S. (2024). Limestone calcined clay cement (LC3): A sustainable solution for mitigating environmental impact in the construction sector. *Resources, Conservation &*

Referencias

- Recycling Advances*, 21, 200197. <https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2023.200197>
- Kapeluszna, E., Szudek, W., Wolka, P., & Zieliński, A. (2021). Implementation of Alternative Mineral Additives in Low-Emission Sustainable Cement Composites. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 6423, 14(21), 6423. <https://doi.org/10.3390/MA14216423>
- Käthler, C. B., Ebell, G., Keßler, S., Schiegg, Y., Dauberschmidt, C., & Angst, U. M. (2022). A comparison of methods to assess the resistance of reinforcing steel against chloride - induced corrosion in concrete: Particular consideration of 12 % chromium steel. *Materials and Corrosion*, June 2021, 1–20. <https://doi.org/10.1002/maco.202112609>
- Krishnan, S., Emmanuel, A. C., Shah, V., Parashar, A., Mishra, G., Maity, S., & Bishnoi, S. (2019). Industrial production of limestone calcined clay cement: experience and insights. *Green Materials*, 7(1), 15–27. <https://doi.org/10.1680/JGRMA.18.00003>
- Kumar, M., Sinha, A. K., & Kujur, J. (2021). Mechanical and durability studies on high-volume fly-ash concrete. *Structural Concrete*, 22(S1), E1036–E1049. <https://doi.org/10.1002/SUCO.202000020>
- Ley-Hernandez, A. M., Lapeyre, J., Cook, R., Kumar, A., & Feys, D. (2018). Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of Cement. *ACS Omega*, 3(5), 5092–5105. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.8B00097>
- Li, X., Wanner, A., Hesse, C., Friesen, S., & Dengler, J. (2024). Clinker-free cement based on calcined clay, slag, portlandite, anhydrite, and C-S-H seeding: An SCM-based low-carbon cementitious binder approach. *Construction and Building Materials*, 442, 137546. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137546>
- Makul, N. (2021). Principles of Low-Carbon Cement. *Structural Integrity*, 18, 43–77. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69602-3_3
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para ingeniería civil* (Pearson education (ed.); Segunda).
- Mañosa, J., Calderón, A., Salgado-Pizarro, R., Maldonado-Alameda, A., & Chimenos, J.

Referencias

- M. (2024). Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder – A comprehensive overview. *Heliyon*, 10(3), e25117. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25117>
- Meddah, M. S., Lmbachiya, M. C., & Dhir, R. K. (2014). Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production. *Construction and Building Materials*, 58, 193–205. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.012>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (Pearson Education (ed.); Second). Prentice Hall.
- Ndahirwa, D., Zmamou, H., Lenormand, H., & Leblanc, N. (2022). The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review. *Cleaner Materials*, 5, 100123. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100123>
- Nguyen, Q. D., Afroz, S., Zhang, Y., Kim, T., Li, W., & Castel, A. (2022). Autogenous and total shrinkage of limestone calcined clay cement (LC3) concretes. *Construction and Building Materials*, 314(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125720>
- Nguyen, Q. D., Kim, T., & Castel, A. (2020). Mitigation of alkali-silica reaction by limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 137(July), 106176. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106176>
- Nguyen, Q. D., Shakhaout, M., Khan, H., Castel, A., Justnes, H., Mohammadi, J., & South, W. (2018). Engineering Properties of Limestone Calcined Clay Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(8), 343–357. <https://doi.org/10.3151/JACT.16.343>
- Nordtest Method. (1995). *Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration (NT BUILD 443)* . <https://www.nordtest.info/wp/1995/11/22/concrete-hardened-accelerated-chloride-penetration-nt-build-443/>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *NMX-C-414 Industria de la construcción - Cementantes Hidráulicos -*

Referencias

Especificaciones y métodos de ensayo (pp. 1–16).

- Pan, S., Chen, D., Chen, X., Ge, G., Su, D., & Liu, C. (2020). Experimental Study on the Workability and Stability of Steel Slag Self-Compacting Concrete. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 1291, 10(4), 1291. <https://doi.org/10.3390/APP10041291>
- Panesar, D. K., & Zhang, R. (2020). Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. *Construction and Building Materials*, 251, 118866. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118866>
- Pillai, R. G., Gettu, R., Santhanam, M., Rengaraju, S., Dhandapani, Y., Rathnarajan, S., & Basavaraj, A. S. (2019). Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 118, 111–119. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.11.019>
- Pol Segura, I., Ranjbar, N., Juul Damø, A., Skaarup Jensen, L., Canut, M., & Arendt Jensen, P. (2023). A review: Alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry. *Heliyon*, 9(5), e15718. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E15718>
- Rafieizonooz, M., Khankhaje, E., & Rezaia, S. (2022). Assessment of environmental and chemical properties of coal ashes including fly ash and bottom ash, and coal ash concrete. *Journal of Building Engineering*, 49(January 2022). <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104040>
- Ram, K., Flegar, M., Serdar, M., & Scrivener, K. (2022). Influence of Low- to Medium-Kaolinite Clay on the Durability of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. *Materials*, 16(1), 374. <https://doi.org/10.3390/MA16010374>
- Rüsch, H., Jungwirth, D., & Hilsdorf, H. (1983). *Creep and Shrinkage - Their Effect on the Behavior of Concrete Structures* (First). Springer-Verlag.
- Sabir, B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)

Referencias

- Salazar-Mayorga, L. F., Lizarazo-Marriaga, J., & Arango-L, J. F. (2025). Depassivation of reinforcing steel due to accelerated-carbonation in limestone calcined clay cement concretes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 58(1), 1–22. <https://doi.org/10.1617/S11527-024-02485-W/METRICS>
- Sánchez Berriel, S., Favier, A., Rosa Domínguez, E., Sánchez MacHado, I. R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Hernández, F., & Habert, G. (2016). Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>
- Schiessl, P., Helland, S., Gehlen, C., Nilsson, L. O., & Rostam, S. (2006). fib bulletin 34: Model code for service life design. *Fib (International Federation for Structural Concrete), February*, 116.
- Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpan, W., & Favier, A. (2018). Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). *Green Materials*, 7(1), 3–14. <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.08.017>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149(August), 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127277>
- Spragg, R., Qiao, C., Barrett, T., & Weiss, J. (2023). Assessing a concrete's resistance to chloride ion ingress using the formation factor. *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, 35–61. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821840-2.00025-0>
- Subathra Devi, V., Madhan Kumar, M., Iswarya, N., & Gnanavel, B. K. (2020). Durability

Referencias

- of Steel Slag Concrete under Various Exposure Conditions. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2764–2771. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.03.407>
- Tkachenko, N., Tang, K., McCarten, M., Reece, S., Kampmann, D., Hickey, C., Bayaraa, M., Foster, P., Layman, C., Rossi, C., Scott, K., Yoken, D., Christiaen, C., & Caldecott, B. (2023). Global database of cement production assets and upstream suppliers. *Scientific Data*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02599-w>
- Tutti, K. (1982). Corrosion of steel in concrete. *Swedish Cement and Concrete Research Institute*.
- United Nations. (2023). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/goals>
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-acosta, A., Tobón, J., & John, V. M. (2022). Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality. *RILEM Technical Letters*, 7, 30–46. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>
- Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., & Jia, H. (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>
- Wang, Y., Li, L. Y., & Page, C. L. (2005). Modelling of chloride ingress into concrete from a saline environment. *Building and Environment*, 40(12), 1573–1582. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.02.001>
- WBCSD. (2018). *Cement technology roadmap*. <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>
- World Economic Forum. (2024a). *Low-carbon cement for greener development in Global South*. Climate Action. <https://www.weforum.org/agenda/2024/06/low-carbon-cement-sustainable-development-global-south/>
- World Economic Forum. (2024b). *Sustainable concrete is possible – here are 4 examples* | *World Economic Forum*. Sustainable Development.

Referencias

- <https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/>
- Zeng, H., Li, Y., Zhang, J., Chong, P., & Zhang, K. (2022). Effect of limestone powder and fly ash on the pH evolution coefficient of concrete in a sulfate-freeze-thaw environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1889–1903. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.12.033>
- Zhang, G. Y., Oh, S., Han, Y., Lin, R. S., & Wang, X. Y. (2023). Using perforated cenospheres to improve the engineering performance of limestone-calcined clay-cement (LC3) high performance concrete: Autogenous shrinkage, strength, and microstructure. *Construction and Building Materials*, 406, 133467. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133467>
- Zhang, H., Gao, M., Feng, Y., & Lv, L. (2023). Volume stability study of new low-clinker high performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02068. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02068>
- Zhao, Y., & Zhang, Y. (2023). A Review on Hydration Process and Setting Time of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Solids*, 4(1), 24–38. <https://doi.org/10.3390/solids4010003>
- Zolfagharnasab, A., Ramezaniapour, A. A., & Bahman-Zadeh, F. (2021). Investigating the potential of low-grade calcined clays to produce durable LC3 binders against chloride ions attack. *Construction and Building Materials*, 303, 124541. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124541>
- Zunino, F. (2020). *Limestone calcined clay cements (LC3): raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics*. <http://infoscience.epfl.ch/record/277799>