



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

“ADICIONES ECOLÓGICAS PARA INCREMENTAR LA VIDA ÚTIL DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO”

Tesis que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

ING. JOSUÉ DE JESÚS GARCÍA CHÁVEZ

Director:

DR. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Codirectores:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA

Morelia, Michoacán, Octubre de 2019

Dedicatoria

Al forjador de mi camino, el que siempre ha estado ahí a pesar de mis constantes tropiezos, mi Dios.

A mi compañera de vida, por tenerme paciencia y estar siempre al pendiente de mis pasos, por darme asilo cuando más lo necesité y esas palabras de aliento de seguir luchando a pesar de ver el caos y la decepción. Gracias por mostrarme que con esfuerzo y dedicación todo se puede. A la acreedora del premio padre de la patria, mi princesa: Cinthia Lisette.

A mis padres: Teresita Chávez y José García, por haberme forjado como la persona que soy, gracias por motivarme para seguir superándome, esta meta y todos mis triunfos son y serán suyos.

A Maín García y Raúl Aguilera, por ser fuente de inspiración y motivación para continuar luchando por alcanzar mis metas.

Agradecimientos

A mi Director y Codirectores de Tesis: Dr. Wilfrido Martínez, Dra. Elia Alonso, Dr. Andrés Torres, gracias por ser mis tutores, por darme sabiduría, paciencia y fortaleza. En especial al Dr. Andrés por adoptarme unos meses durante mi estancia en Qro, disculpe tantas molestias. Gracias a todos.

A mis compañeros de Maestría: Ariel, Alfredo, Armando, Juan Carlos y Ezequiel, por su apoyo, disposición, consejos y ánimo, sin ustedes no se hubiera alcanzado esta meta. Gracias gallos.

A Mr. Colín por ayudarme en todo momento con los trámites y pruebas cuando más lo necesité. Gracias amigo.

A mis compañeros de laboratorio y verano, en especial a los ingenieros: Beto, Diana, Bernabé, Sandra, Noel, Uriel, Perdomo, Blancas y Goretti por apoyarme siempre que lo necesité. Gracias por todo.

A los ingenieros: Jorge Villegas, Jonathan Ayala y Samuel Tinajero por tenerme paciencia y apoyarme en el trascurso de la culminación de este proyecto. Gracias amigos.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial al cuerpo académico y el NAB de la división de estudios de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil. Gracias por sus consejos, regaños, proyectos y motivación en todo momento, es un orgullo haber sido parte de ustedes.

Al Conacyt por ser parte de este gran proyecto, darme su apoyo y confianza.

Finalmente, y no menos importante, a todos aquellos que dieron parte a la realización de este trabajo y olvidé mencionarles. Gracias totales.

“El éxito consiste en ir de fracaso a fracaso sin perder el entusiasmo”

- Winston Churchill

Resumen

El problema más importante que se presenta actualmente en las estructuras de concreto reforzado es el deterioro por fenómenos ambientales. Algunos de estos agentes provocan daños directamente al concreto, pero principalmente producen la corrosión del acero de refuerzo, la cual está estrechamente ligada al agrietamiento y desprendimiento del concreto armado, provocando una disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero, por agrietamientos del recubrimiento de concreto, por pérdida de adherencia entre el refuerzo metálico y la masa de concreto y por ende se presenta la disminución de la vida útil de la estructura.

En este estudio se utilizó, como alternativa para incrementar la vida útil del concreto, la adición de productos aluminosilíceos provenientes de materiales de deshecho: ceniza de bagazo de caña (CC) y ceniza de horno (CH), así como la implementación de concreto reciclado producto de demolición, como agregado pétreo grueso.

Se evaluaron propiedades físicas y mecánicas del concreto por medio de pruebas no destructivas como: velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica (Re) proporcionando mejoras significativas en el caso de las mezclas con adiciones ecológicas. Se realizaron pruebas destructivas de resistencia a la compresión (f'_c) dando resultados para concretos de altas resistencias (>30 MPa) a 28 días. Se evaluó el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en concreto, los especímenes se sumergieron en una solución salina (3.5% NaCl) con ciclos de humedecimiento y secado (simulando condiciones costeras). Se determinó el Potencial de corrosión (E_{corr}) alcanzando valores >-200 mV en condiciones secas, de -200 a <-250 mV en condiciones superficialmente secas y <-350 mV sumergidas. Del mismo modo se determinó la densidad eléctrica de corrosión con valores <0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ en condiciones secas, 0.1 a 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ superficialmente secas y >1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sumergidas.

El uso de agregado reciclado en combinación con las adiciones ecológicas presentó en la mayoría de las pruebas mejores resultados que los especímenes testigo, dando cabida a un mejoramiento en las propiedades físico-químico-mecánicas. A través de las pruebas por durabilidad de concretos, el Microanálisis de Barrido (MEB) y el Microanálisis Químico Elemental vía EDS pudimos corroborar la densificación la matriz cementicia con las adiciones ecológicas, mermando el paso de los agentes que oxidan al acero de refuerzo y a su vez degradan el concreto.

Al utilizar ecomateriales coadyuvamos a mitigar el impacto ambiental disminuyendo la huella de carbono y teniendo una considerable reducción en el costo de la elaboración del concreto.

Palabras Clave: adiciones ecológicas, concreto reforzado, corrosión, durabilidad, vida útil.

Abstract

The most important problem that currently arises in reinforced concrete structures is the deterioration by environmental phenomena. Some of these agent's cause damage directly to the concrete, but mainly produce corrosion of the reinforcing steel, which is closely linked to the cracking and detachment of the reinforced concrete, causing a decrease in the strength of the elements by loss of steel area, by cracking of the concrete coating, by loss of adhesion between the metal reinforcement and the concrete mass and thus the decrease in the service life of the Structure.

This study used, as an alternative to increase the life of concrete, the addition of alumino-silicean products from waste materials: cane bagasse ash (CC) and kiln ash (CH), as well as the implementation of concrete recycled demolition product, as a thick stone aggregate.

Physical and mechanical properties of concrete were evaluated through non-destructive tests such as ultrasonic pulse rate (VPU) and electrical resistivity (Re) providing significant improvements in the case of mixtures with ecological additions. Destructive compression resistance (f'_c) tests were performed giving results for high-strength concrete (>30 MPa) at 28 days. The electrochemical behavior of the reinforcement steel embedded in concrete was evaluated, the specimens were immersed in a saline solution (3.5% NaCl) with wetting and drying cycles (simulating coastal conditions). Corrosion Potential (E_{corr}) was determined to reach values >-200 mV in dry conditions, from -200 to <-250 mV in superficially dry conditions and <-350 mV submerged. The electrical corrosion density was determined with <0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ values in dry conditions, 0.1 to 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ superficially dry, and a submerged >1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

The use of recycled aggregate in combination with ecological additions presented in most tests better results than witness specimens, leading to an improvement in physical-chemical-mechanical properties.

Through concrete durability tests, The Sweep Microanalysis (MEB) and Elemental Chemical Microanalysis with EDS were able to corroborate the densification of the cement matrix with the ecological additions, diminishing the passage of agents that oxidize to steel reinforcement and in turn degrade concrete.

By using ecomaterials we help mitigate the environmental impact by reducing the carbon footprint and having a considerable reduction in the cost of making concrete.

Key Words: ecological additions, reinforced concrete, corrosion, durability, service life.

Índice General

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Índice General.....	v
Índice de ilustraciones.....	viii
Índice de Tablas.....	xiii
Índice de Ecuaciones	xiv
Objetivos.....	xv
Objetivo general	xv
Objetivos particulares	xv
Hipótesis	1
1. Introducción y Justificación	2
1.1. Planteamiento y delimitación del problema	6
1.2. Metodología	7
1.3. Desarrollo Experimental	7
1.3.1. Organigrama de Actividades.....	7
2. Revisión del Estado del Arte	8
3. Materiales y Métodos	16
3.1. Durabilidad de estructuras de concreto reforzado	16
3.2. Definición de la corrosión en obras de infraestructura de concreto reforzado	18
3.2.1. Evaluación y diagnóstico de Estructuras.....	19
3.3. Adiciones ecológicas inhibidoras de corrosión	19
3.3.1. Adiciones ecológicas	20
3.3.2. Análisis de partículas de las cenizas de sustitución	20
3.4. Tipo de cemento y agregados pétreos	22
3.4.1. Cemento.....	22
3.4.2. Agregados pétreos	23
3.5. Otras adiciones	23
3.5.1. Fluidificante	23

3.5.2.	Análisis del agua	23
3.6.	Caracterización de los materiales	24
3.6.1.	Mezclas Control o Testigo	24
3.6.2.	Mezclas elaboradas con Ceniza de Horno (CH)	24
3.6.3.	Mezclas elaboradas con Ceniza de bagazo de caña (CC).....	25
3.7.	Elaboración de especímenes	25
3.8.	Pruebas destructivas y no destructivas	27
3.8.1.	Pruebas no destructivas	28
3.8.2.	Pruebas destructivas	35
3.9.	Pruebas Electroquímicas (Corrosión).....	37
3.9.1.	Velocidad y Potencial de corrosión	37
3.9.2.	Determinación de la Velocidad y Potencial de corrosión.....	39
3.10.	Pruebas por durabilidad en el concreto.....	46
3.10.1.	Determinación de la resistencia del concreto a los sulfatos de sodio 46	
3.10.2.	Determinación de la profundidad de carbonatación en concreto ...	52
3.10.3.	Determinación de la permeabilidad rápida de iones cloruro	56
4.	Resultados.....	62
4.1.	Resultados de caracterización de los materiales.....	62
4.1.1.	Granulometría en el agregado fino (arena) de Joyitas.	64
4.1.2.	Granulometría en el agregado grueso (grava convencional T.M. ½")	65
4.1.3.	Granulometría en el agregado grueso (grava reciclada T.M. ¾").....	66
4.1.4.	Resultados del análisis del agua utilizada para la elaboración de mezclas de concreto	67
4.2.	Resultados de las pruebas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microanálisis Químico Elemental vía EDS.....	68
4.3.	Resultados de pruebas no destructivas.....	74
4.3.1.	Resultados de Resistividad eléctrica (Re).....	74
4.3.2.	Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)	78
4.4.	Resultados de pruebas destructivas	82
4.4.1.	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión	82
4.5.	Resultados de Pruebas electroquímicas	86
4.6.	Resultados de Pruebas por durabilidad:.....	94

4.6.1.	Resultados de la prueba de resistencia del concreto a los sulfatos de sodio	94
4.6.2.	Resultados de la prueba de profundidad de carbonatación en concreto	102
4.6.3.	Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de iones cloruro	104
4.7.	Tabla General de Resultados.....	107
5.	Conclusiones y Trabajo futuro.....	109
5.1.	Conclusiones Particulares.....	109
5.1.1.	Conclusiones de las pruebas de caracterización de los agregados pétreos.....	109
5.1.2.	Conclusiones de las pruebas de Microscopia de Barrido (MEB) y Microanálisis Químico Elemental vía EDS.	110
5.1.3.	Conclusiones de las pruebas no destructivas	113
5.1.4.	Conclusión de las pruebas destructivas.....	115
5.1.5.	Conclusión de las pruebas electroquímicas (Corrosión)	116
5.1.6.	Conclusión de las pruebas por durabilidad en el concreto	117
5.2.	Conclusiones Generales	120
5.3.	Trabajo futuro.....	123
5.4.	Productos de la Investigación (Ponencias en congresos Nacionales e Internacionales).....	124
	XXVIII Congreso Internacional de Investigación de Materiales (IMRC) 2019	124
	XV Congreso Latino-Americano de patología de construcción (CONPAT) 2019	125
	Bibliografía.....	126

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Distribución de puentes por tipo de material. (IMT-pt-380, 2011)	2
Ilustración 2. Panorama de la producción y consumo del cemento per cápita en 2012. (Federación Interamericana del Cemento [FICEM], 2013)	3
Ilustración 3. Matriz de concreto con adición de humo sílice. Vacíos interconectados unos con otros (a), Vacíos desconectados por la presencia de humo sílice (b). (Lau, s.f.).....	4
Ilustración 4. Diagrama de la problemática de estudio.	6
Ilustración 5. Modelo propuesto de durabilidad por corrosión. (Torres Acosta & MArtínez Madrid , 2001).....	17
Ilustración 6. Proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto. (Rojas Martínez, 1998).....	18
Ilustración 7. Matriz de concreto con adición de humo sílice. Vacíos interconectados unos con otros (a), Vacíos desconectados por la presencia de humo sílice (b). (Lau, s.f.).....	20
Ilustración 8. Morfología de la CC analizada en el MEB a 1500x. (García Chávez, 2019).....	21
Ilustración 9. Morfología de la CH analizada en el MEB a 500x. (García Chávez, 2019).....	21
Ilustración 10. Cemento CPC 30R-RS, utilizado para el diseño de las mezclas de concreto.	22
Ilustración 11. Partes y composición de un espécimen cilíndrico de 10cmx20cm. Elaborado con agregado triturado con a/c= 0.45. (García Chávez, 2019)	26
Ilustración 12. Partes y composición de un espécimen rectangular de 20cmx10cmx5cm. Elaborado con agregado triturado con a/c= 0.45. (García Chávez, 2019).....	26
Ilustración 13. A la izquierda: Corte de especímenes de concreto para extracción de esquirlas. Al centro: esquirlas de 0.5 cm ³ de una mezcla de concreto testigo de relación a/c= 0.45. A la derecha: total de portamuestras para microanálisis MEB. (García Chávez, 2019).....	28
Ilustración 14. Clasificación de muestras para proceso de metalización. (García Chávez, 2019).....	29
Ilustración 15. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). (García Chávez, 2019)	29
Ilustración 16. A la izquierda: Microanálisis de una muestra de concreto con MEB. A la derecha: Análisis químico elemental vía EDS con MEB. (García Chávez, 2019)	29
Ilustración 17. Resistómetro utilizado para determinar la resistividad eléctrica. (García Chávez, 2019).....	30
Ilustración 18. A la izquierda: medición de la Re para especímenes del lote (a). A la derecha: medición de la intensidad de corriente y voltaje para determinar le Re en los especímenes del lote (b). (García Chávez, 2019).....	31

Ilustración 19. Sistema digital para ensayos ultrasónicos, para determinar la VPU. (García Chávez, 2019).....	32
Ilustración 20. Izquierda arriba: Especímenes en curado hasta el momento de su uso. Arriba centro: Colocación de gel a la cara de los transductores y a las dos caras del espécimen a ensayar. Derecha arriba: Colocación de los transductores al centro del espécimen. Abajo: Determinación de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. (García Chávez, 2019).....	33
Ilustración 21. A la izquierda: Máquina de carga axial. Al centro: Placas de neopreno para dar uniformidad a la superficie de la probeta. A la derecha: Cilindro con placas de neopreno. (García Chávez, 2019).....	35
Ilustración 22. Similitud de la interface electrificada con un circuito eléctrico equivalente. (Pérez, 2002).....	39
Ilustración 23. Potenciostato marca GAMRY modelo 600.	39
Ilustración 24. Especímenes inmersos en solución salina. (García Chávez, 2019).....	40
Ilustración 25. A la izquierda: Gráfica de Corriente i (A) vs Voltaje E (V), generada por el potenciostato. A la derecha: Resultados de la gráfica generada. (García Chávez, 2019).....	42
Ilustración 26. electrodo RE-7 marca: McMILLER para determinación de Potencial (Ecorr). (García Chávez, 2019).....	42
Ilustración 27. Factor B, el cual indica pasividad o actividad del acero de refuerzo. (García Chávez, 2019).....	43
Ilustración 28. Cortadora de roca para extracción de rodajas de 5cm x 10cm. (García Chávez, 2019).....	48
Ilustración 29. A la izquierda: Especímenes secando en horno a temperatura constante de 50°C, A la derecha: Monitoreo de pesos hasta obtener masa constante. (García Chávez, 2019).....	48
Ilustración 30. A la izquierda: Sulfato de sodio (Na_2SO_4). Al centro: Elaboración de la solución de Na_2SO_4 a temperatura <40°C con aspas mezcladoras, Derecha arriba: Solución de Na_2SO_4 sin disolverse en su totalidad, Derecha abajo: Solución de Na_2SO_4 con solución disuelta en su totalidad en el recipiente. (García Chávez, 2019).....	49
Ilustración 31. A la izquierda arriba: Preparación de recipientes de plástico con solución de Na_2SO_4 , A la derecha arriba: Colocación de rejillas de plástico para evitar contacto de las rodajas con el fondo del recipiente. Izquierda abajo: Colocación de los especímenes sobre la solución de Na_2SO_4 y de las rejillas de plástico. Derecha abajo: Colocación de Na_2SO_4 con un tirante >1.5cm por encima de las rodajas, con la finalidad de que estas queden sumergidas en la salmuera. (García Chávez, 2019).....	50
Ilustración 32. Extracción de los especímenes de la solución de Na_2SO_4 en un intervalo de tiempo entre 16h y 18h. (García Chávez, 2019).....	50
Ilustración 33. A la izquierda: Medición de la Re de los especímenes de estudio. A la derecha: Evaluación física del espécimen de estudio. (García Chávez, 2019) .	51

Ilustración 34. Arriba izquierda: Colocación de las rodajas en charolas de acero inoxidable. Arriba derecha: Colocación de las charolas con los especímenes de estudio en el horno de secado hasta alcanzar su masa constante, Abajo: Monitoreo de Ws de cada uno de los especímenes hasta alcanzar masa constante. (García Chávez, 2019).....	51
Ilustración 35. A la izquierda: cortadora de roca para extracción de rodajas. Al centro: cubierta de parafina en muestras. A la derecha: rodaja cubierta de parafina . (García Chávez, 2019)	53
Ilustración 36. A la izquierda: 54 rodajas de concreto con cubierta de parafina. A la derecha: rodajas expuestas a la intemperie en dirección suroeste para tener contacto directo con CO ₂ . (García Chávez, 2019).....	53
Ilustración 37. Corte transversal del espécimen con ayuda de marro y cincel. (García Chávez, 2019).....	54
Ilustración 38. Rodaja libre de polvo y lista para analizar. (García Chávez, 2019)	54
Ilustración 39. Preparación y colocación de la solución de Fenolftaleína a los especímenes de estudio. (García Chávez, 2019).....	55
Ilustración 40. Medición de la carbonatación en mm, con ayuda de vernier. (García Chávez, 2019).....	55
Ilustración 41. Especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm de cada una de las mezclas. (García Chávez, 2019)	58
Ilustración 42. A la izquierda: Cortadora de roca, A la derecha: Rodajas de 10cm x 5cm. (García Chávez, 2019)	58
Ilustración 43. Solución de NaOH al 1.2% y, solución de NaCl al 3%. (García Chávez, 2019).....	58
Ilustración 44. A la izquierda: Tornillos para sujetar las celdas y mantener en confinamiento las pastillas, A la derecha: Embudos por los cuales se vertió cada una de las soluciones. (García Chávez, 2019)	59
Ilustración 45. Terminales positivo y negativo respectivamente, así como medidor de temperatura en la solución de NaOH. (García Chávez, 2019).....	59
Ilustración 46. A la derecha: 4 pastillas con el centro de control, A la derecha: programa del ordenador para llevar a cabo las lecturas. (García Chávez, 2019) .	60
Ilustración 47. Tina de curado en la cual se mantuvieron las rodajas hasta el momento de su prueba. (García Chávez, 2019).....	60
Ilustración 48. Resistómetro (RCON™) para medir la Re de los especímenes de estudio. (García Chávez, 2019)	61
Ilustración 49. Curva Granulométrica de la Arena de Joyitas la Unión. (García Chávez, 2019).....	64
Ilustración 50. Curva Granulométrica de la Grava convencional de TRACSA. (García Chávez, 2019).....	65
Ilustración 51. Curva Granulométrica de la Grava reciclada (IMSS). (García Chávez, 2019).....	66
Ilustración 52. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHT0.45 con MEB a 150x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)	68

Ilustración 53. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHT0.65 con MEB a 400x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 69	69
Ilustración 54. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHR0.45 con MEB a 120x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 69	69
Ilustración 55. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHR0.65 con MEB a 120x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 70	70
Ilustración 56. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.45 con MEB a 350x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 71	71
Ilustración 57. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 1500x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 71	71
Ilustración 58. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 1500x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 72	72
Ilustración 59. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 1500x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 73	73
Ilustración 60. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 100x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019) 73	73
Ilustración 61. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo convencional y con relación a/c=0.45 y 0.65.	74
Ilustración 62. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado reciclado y relación a/c=0.45 y 0.65.	75
Ilustración 63. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CH, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	76
Ilustración 64. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CC, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	77
Ilustración 65. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo convencional con relación a/c=0.45 y 0.65.	78
Ilustración 66. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo reciclado con relación a/c=0.45 y 0.65.	79
Ilustración 67. Comparación de especímenes de concreto elaborados con CH, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	80
Ilustración 68. Comparación de especímenes de concreto elaborados con CC, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	81
Ilustración 69. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo convencional y con relación a/c= 0.45 y 0.65.	82
Ilustración 70. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado reciclado y relación a/c=0.45 y 0.65.	83
Ilustración 71. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CH, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c= 0.45 y 0.65.	84

Ilustración 72. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CC, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c= 0.45 y 0.65.	85
Ilustración 73. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una TT vs TRF con una relación a/c=0.45. (García Chávez, 2019)	86
Ilustración 74. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una TT vs TRF con una relación a/c=0.65. (García Chávez, 2019)	87
Ilustración 75. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CHT vs CHR con una relación a/c=0.45. (García Chávez, 2019)	88
Ilustración 76. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CHT vs CHR con una relación a/c=0.65. (García Chávez, 2019)	89
Ilustración 77. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CCT vs CCR con una relación a/c=0.45. (García Chávez, 2019)	90
Ilustración 78. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CCT vs CCR con una relación a/c=0.65. (García Chávez, 2019)	91
Ilustración 79. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de todas los concretos con una relación a/c=0.45. (García Chávez, 2019)	92
Ilustración 80. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de todas los concretos con una relación a/c=0.65. (García Chávez, 2019)	93
Ilustración 81. Comparación de testigos con agregados convencionales y diferentes relaciones a/c.	95
Ilustración 82. Re en mezclas testigo con agregados convencionales y con diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	95
Ilustración 83. Comparación del % de pérdida de masa en concreto testigo con agregados reciclados y con diferentes relaciones a/c.	96
Ilustración 84. Re en mezclas testigo con agregados reciclados y con diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	97
Ilustración 85. Comparación de mezclas con adición de CH, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones a/c.	98
Ilustración 86. Re en mezclas con adición de CH, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	99
Ilustración 87. Comparación de mezclas con adición de CC, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones a/c.	100
Ilustración 88. Re en mezclas con adición de CC, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones a/c=0.45 y 0.65.	101
Ilustración 89. Comparación de profundidad de carbonatación de testigos con agregados convencionales y reciclados con una relación a/c=0.45.	102
Ilustración 90. Comparación de profundidad de carbonatación de testigos con agregados convencionales y reciclados con una relación a/c=0.65.	103
Ilustración 91. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros en concretos testigos con agregados convencionales y diferentes relaciones a/c.	104
Ilustración 92. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros en concretos testigos con agregados reciclados y diferentes relaciones a/c.	105

Ilustración 93. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros de los concretos con CH, agregados convencionales y reciclados y diferentes relaciones a/c. 106

Ilustración 94. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros de los concretos con CC, agregados convencionales y reciclados y diferentes relaciones a/c. 106

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los cementos de acuerdo a la norma (NMX-C-414-ONNCCE-2016). (García Chávez, 2019)	22
Tabla 2. Propiedades del agregado triturado convencional y reciclado utilizado para las diferentes mezclas de estudio.	24
Tabla 3. Mezclas control o testigo. Propiedades.	24
Tabla 4. Mezclas elaboradas con ceniza de horno (CH) con 10% sustitución.	24
Tabla 5. Mezclas elaboradas con ceniza de bagazo de caña (CC) con 10% sustitución.	25
Tabla 6. Especímenes de estudio elaborados con las diferentes adiciones ecológicas.	26
Tabla 7. Criterios de riesgo con base a la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). (García Chávez, 2019).....	31
Tabla 8. Criterios de VPU con base a la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017)	34
Tabla 9. Relaciones entre el a/c o la relación agua/materiales cementicios y la Resistencia a la Compresión del concreto. (Darwin, Young, & Mindess, 2003)....	36
Tabla 10. Determinación de la Velocidad y Potencial de corrosión. (Tipo de mezcla de concreto, relación a/c y barra a analizar). (García Chávez, 2019)	40
Tabla 11. Metodología correspondiente a los ciclos de humedecimiento y secado. (García Chávez, 2019).....	41
Tabla 12. Cálculo del As, EW, Densidad, Ecorr y Rp. (García Chávez, 2019)	41
Tabla 13. Determinación de la RPL en $\Omega\text{-cm}^2$. (García Chávez, 2019)	43
Tabla 14. Determinación de la Densidad de corriente (i_{corr}) con ayuda del factor B. (García Chávez, 2019).....	43
Tabla 15. Determinación de la Velocidad de corrosión en mm/año. (García Chávez, 2019).....	44
Tabla 16. Criterio de valoración de Potenciales del acero en hormigón vs Cu/CuSO ₄ . (CYTED-DURAR, 1998).....	45
Tabla 17. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil. (CYTED-RED DURAR, 1998)	45
Tabla 18. Normativa vigente correspondiente a los métodos de prueba para durabilidad. (García Chávez, 2019).....	46
Tabla 19. Criterio de Penetrabilidad de iones de cloruro basada en la carga, con base a la Norma (ASTM-C-1202, 2012).	60
Tabla 20. Tipo de permeabilidad por penetración rápida de ion cloruro. (ASTM-C-1202, 2012) (García Chávez, 2019)	61

Tabla 21. Normativas vigentes con que se llevaron a cabo las pruebas a los materiales de agregado pétreo.	62
Tabla 22. Resultados obtenidos de la caracterización de los agregados pétreos de las diferentes pruebas de laboratorio.	63
Tabla 23. Clasificación SUCS de la arena de Joyitas La Unión. (García Chávez, 2019).....	64
Tabla 24. Clasificación SUCS de la grava convencional de T.M.=1/2" de la Empresa TRACSA. (García Chávez, 2019).....	65
Tabla 25. Clasificación SUCS de la grava reciclada de T.M.=3/4" de la Torre del IMSS. (García Chávez, 2019)	66
Tabla 26. Resultados del análisis del agua para la elaboración de mezclas de concreto.	67
Tabla 27. Tabla de % de composición elemental de la prueba de Microanálisis Químico Elemental EDS. (García Chávez, 2019).....	68
Tabla 28. Tabla de clasificación y evaluación con criterios de durabilidad para las diferentes mezclas de estudio.	107
Tabla 29. Tabla General de Resultados de todas las mezclas de estudio.....	108

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de Periodo de vida útil. (Tuutti, 1982).....	16
Ecuación 2. Resistividad eléctrica. (CYTED-RED DURAR, 1998).....	31
Ecuación 3. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).....	33
Ecuación 4. Esfuerzo a compresión (MPa).	35
Ecuación 5. Intensidad de la corriente eléctrica.	37
Ecuación 6. Intensidad de corriente de corrosión.	37
Ecuación 7. Potencial eléctrico en (volts).....	38
Ecuación 8. Potencial eléctrico de una señal alterna a la expresión equivalente..	38
Ecuación 9. Determinación de la Velocidad de corrosión en mm/año. (García Chávez, 2019).....	44
Ecuación 10. Constante de carbonatación promedio, en $(mm/año^{0.5})$	56
Ecuación 11. Profundidad teórica de carbonatación, en (mm)	56

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la incorporación de adiciones ecológicas para incrementar la vida útil de obras de infraestructura de concreto reforzado

Objetivos particulares

- Determinar si el uso de ceniza de bagazo de caña en mezclas de concreto mejora su durabilidad.
- Determinar si el uso de ceniza de horno producto de elaboración de ladrillo en mezclas de concreto mejora su durabilidad.
- Determinar si el uso de agregado reciclado producto de la demolición en mezclas de concreto mejora su durabilidad.

Hipótesis

El concreto hidráulico elaborado con cemento Portland, debe de tener una adecuada durabilidad, aparte de su resistencia mecánica. El concreto armado contiene poros vacíos o poros capilares que transportan líquidos y gases dentro de su masa, por los cuales pueden penetrar agentes agresivos como cloruros, sulfatos y gas dióxido de carbono o azufre, provenientes del medio ambiente de exposición, que pueden detonar la corrosión en el refuerzo. Incorporando adiciones ecológicas como ceniza de bagazo de caña y ceniza de elaboración de ladrillo a las mezclas se forman productos de reacción, los que densifican la matriz cementicia. Utilizando concreto reciclado producto de demolición de estructuras, como agregado grueso en el concreto, se aprovecha un producto de desecho y se mantiene la resistencia en el concreto, al seguirse hidratando el mismo con el tiempo, aumentando así la durabilidad de las mezclas de concreto.

1. Introducción y Justificación

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Los principales agentes agresores como cloruros, sulfatos y carbonatación penetran a través de la red de poros interconectados provocando daños directamente al concreto, principalmente la corrosión del acero de refuerzo, la cual está estrechamente ligada al agrietamiento y desprendimiento del concreto armado, provocando una disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero y por ende disminución de la vida útil.

Se calculan gastos en corrosión por 276 billones de dólares al año en E.U.A., según el estudio de CC Technologies for the Federal Highway Administration (FHWA), en el informe del 2001. En México no se han hecho estudios para estimar los gastos que representan las pérdidas por corrosión (Orozco Cruz, 2007) y en general, se estiman gastos del 3.5% del PIB asociados a este fenómeno en cada país (González Fernández, 2007).

De acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) existe un repertorio de clasificación y cuantificación de los 7,351 puentes existentes en nuestro país de acuerdo con el tipo de material empleado en su construcción (IMT-pt-380, 2011). El 68% de los puentes están contruidos de concreto reforzado, lo cual repercute en la aplicación de técnicas y metodologías de mantenimiento, reparación o reconstrucción y con lo cual el presente estudio fortalece su justificación.

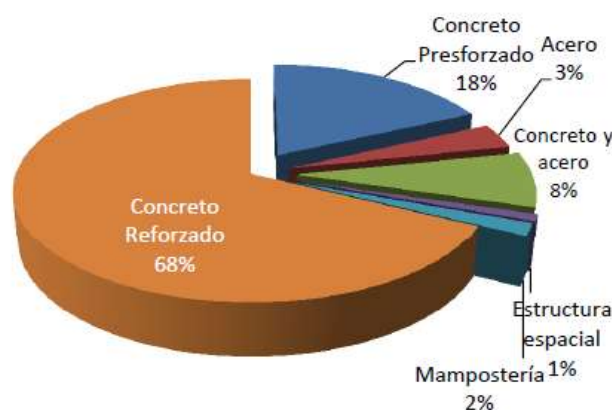


Ilustración 1. Distribución de puentes por tipo de material. (IMT-pt-380, 2011)

Si se toma en cuenta que los puentes y las carreteras son el factor principal que propicia el desarrollo social, económico y cultural de los habitantes de México, resulta indispensable que a estas obras viales se les destinen recursos para asegurar que sus niveles de servicio y de seguridad sean elevados y aceptables,

así como tratar de prevenir que los fenómenos naturales no provoquen incrementos considerables en sus costos de operación.

Actualmente, desde el punto de vista ambiental, la industria del cemento es responsable de cerca del 5% del total de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas por el hombre. (Cement Sustainability Initiative [CSI], 2012). La producción de una tonelada de Cemento Portland (CP) genera aproximadamente entre 0.67 y 1.0 tonelada de CO₂, siendo responsable del 7% de las emisiones en el mundo, según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC , 2007), tomando en cuenta que para el año 2012 la producción de cemento en México fue mayor a 10 millones de toneladas. (Federación Interamericana del Cemento [FICEM], 2013)



Ilustración 2. Panorama de la producción y consumo del cemento per cápita en 2012. (Federación Interamericana del Cemento [FICEM], 2013)

Al día de hoy, el material de construcción que predomina es el cemento portland. De acuerdo con la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) en México, en el 2016, la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas equivalente a 40.6 millones de toneladas de CO₂ que se liberaron al medio ambiente, y un consumo nacional de 40.1 millones de toneladas. (CANACEM, 2016)

Lo anterior ha despertado la preocupación e interés de las industrias y academias para generar alternativas y tecnologías de construcción de materiales con criterios de sostenibilidad. Para esto, es necesario promover el uso de los recursos cementicios alternativos, ya sea naturales o como subproductos de actividades industriales. Una forma de mitigar las consecuencias es implementando adiciones ecológicas al concreto armado.

Las adiciones ecológicas están compuestas principalmente de “puzolanas¹”. Hoy en día estos materiales aluminosilíceos son considerados como ecomateriales. Estas puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto. (Roland Stulz, 1997) Estas adiciones ecológicas son residuos que resultan de la quema de materia orgánica, la cual al adicionarla al concreto permite densificar la matriz. (Lau, s.f.)

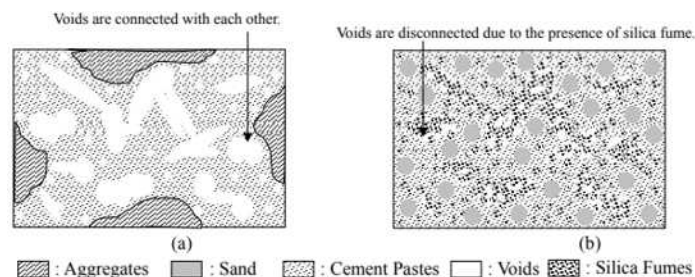


Ilustración 3. Matriz de concreto con adición de humo sílice. Vacíos interconectados unos con otros (a), Vacíos desconectados por la presencia de humo sílice (b). (Lau, s.f.)

Sustituir cemento con ceniza volante en el diseño de mezcla de concreto ha demostrado varios beneficios:

1. El reemplazo de cemento por ceniza volante incrementa el “cuidado ambiental” y disminuye el calor de hidratación, así como el costo del material.
2. La adición de ceniza volante puede mejorar la durabilidad y reduce la contracción por secado.
3. La morfología y micro agregados por efecto de partículas de ceniza volante ofrecen mejor trabajabilidad, mayor compactación en la zona de transición interfacial y una estructura de poro más fina en el sistema. (Leung, Yu, & Mishra, 2017)

¹ Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice o alúmina.

Hoy en día, encontramos una amplia disponibilidad de cenizas volantes alrededor de nuestro país y estamos conscientes del impacto ambiental por la generación de CO₂ causada por la producción del cemento portland, por lo que, esta investigación valora propiedades referentes a la durabilidad de diferentes mezclas de concreto con diferentes tipos de cenizas: Ceniza de bagazo de caña (CC) y Ceniza de Horno (CH), diferentes tipos de agregado (convencional y reciclado) con el objetivo de impulsar el uso de materiales sustentables, económicos y que reduzcan el consumo de materias primas naturales (como la producción de cemento portland) en estructuras de concreto y al mismo tiempo coadyuven a disminuir los problemas relacionados con la corrosión del concreto armado, Así como contribuir a los proyectos innovadores de investigación.

1.1. Planteamiento y delimitación del problema

El problema más importante que se presenta actualmente en las estructuras de concreto reforzado es el deterioro por fenómenos ambientales. Uno de estos es el deterioro debido a la corrosión del acero. Este fenómeno provoca degradación del concreto armado y por lo tanto desestabilidad de este, logrando que la infraestructura (principalmente puentes carreteros) pierdan su capacidad de carga y por lo tanto disminuya su vida útil. (SIPUMEX-SCT, 2005) Por lo anterior, es necesario mejorar la calidad y el diseño de estas estructuras empleando un método que ayude a corregir el problema de la corrosión.

Una forma de corregir este problema es utilizar adiciones ecológicas inhibidoras de corrosión las cuales ayuden a densificar la matriz del concreto, impidiendo el paso de los agentes oxidantes que corroen al acero e incrementando la durabilidad del concreto armado. (Lau, s.f.) Logrando así, disminuir la corrosión del acero de refuerzo incrementando la vida útil de las estructuras de concreto armado.

Para verificar que realmente se densifica la matriz y no sufre despasivación el acero, es decir; que se mantenga el acero de refuerzo inmune a los agentes oxidantes que lo corroen, es necesario llevar a cabo un correcto diseño por durabilidad de mezclas de concreto y analizarlas a través de la normatividad vigente. Se tendrá que conocer la relación existente entre la corrosión del acero y la degradación del concreto con lo que ayudaremos a comprobar y confirmar qué adición ecológica es de mayor utilidad para combatir la despasivación y de esta manera coadyuvar a incrementar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.

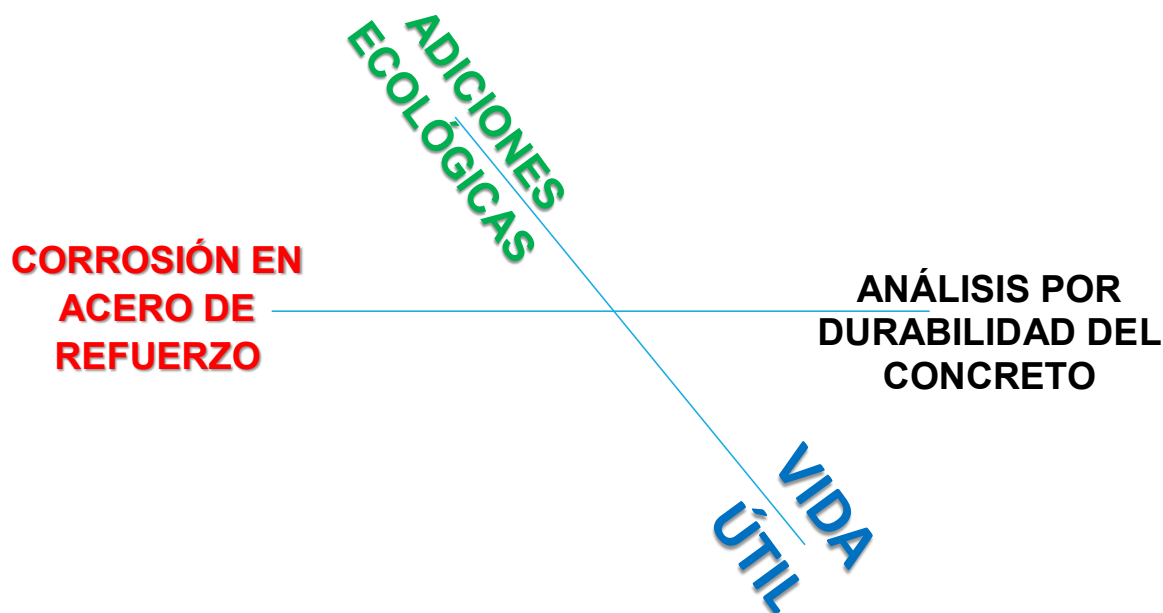


Ilustración 4. Diagrama de la problemática de estudio.

1.2. Metodología

La metodología del proyecto se basa principalmente en 4 fases:

1. Caracterización
2. Pruebas de laboratorio
3. Resultados de las pruebas
4. Conclusiones

A continuación, se muestra un diagrama de la metodología a emplear:



1.3. Desarrollo Experimental

A continuación, se presenta un diagrama de secuencia de los trabajos a realizar.

1.3.1. Organigrama de Actividades



2. Revisión del Estado del Arte

En las últimas décadas los conceptos corrosión y durabilidad han sido objetos de estudio de diversas investigaciones, las cuales son el punto de interés de este proyecto.

A principios de los años sesenta, muchos países empezaron a incorporar ceniza volante en el concreto, como material puzolánico que podía ser usado como un componente de mezclado del cemento portland, o como un mineral de adición en el concreto. Sustituir cemento con ceniza volante en el diseño de mezcla de concreto ha demostrado varios beneficios:

4. El reemplazo de cemento por ceniza volante incrementa el “cuidado ambiental” y disminuye el calor de hidratación, así como el costo del material.
5. La adición de ceniza volante puede mejorar la durabilidad y reduce la contracción por secado.
6. La morfología y micro agregados por efecto de partículas de ceniza volante ofrecen mejor trabajabilidad, mayor compactación en la zona de transición interfacial y una estructura de poro más fina en el sistema. (Leung, Yu, & Mishra, 2017)

A continuación, se mostrarán algunas de las investigaciones sobre el uso de las cenizas volantes usadas como sustitución del cemento:

(Malhotra, 1990) evaluó los aspectos de durabilidad en concretos con sustitución parcial de ceniza volante, de un 54 a 58% del total de la masa cementicia. Los resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) resultaron mayores a 4000 m/s, los valores de resistencia a la compresión a 28 días resultaron del orden de 40 MPa. En cuanto a la prueba de permeabilidad a 91 días, obtuvo baja permeabilidad con resultados del rango de 190 C. El autor señala que las reacciones álcali-agregado en el concreto pueden ser controladas usando ceniza volante, además de disminuir el calor de hidratación y el contenido de cemento en las mezclas de concreto.

(Álvarez, 1991) llevó a cabo la evaluación de la influencia de la ceniza volante como sustituto parcial del cemento de dos maneras: 1) en su estado de recepción original y 2) tamizada por tamiz de 75 μm . Reportan que cuando el porcentaje de sustitución es mayor al 10%, la absorción es menor respecto a la muestra sin ceniza volante (0%); en cuanto al ensayo de resistencia a la compresión, reportan que a edades tempranas se retrasa su desarrollo, pero a partir de los 28 días presentan una evolución similar a la muestra sin ceniza volante (0%). Reportan que obtuvieron los mejores resultados con un 20% de sustitución de ceniza.

(Molina, 2008) estudió la influencia de la ceniza volante como sustituto parcial de cemento portland, en el aspecto de durabilidad, empleando porcentajes del 0%,

15% y 35%. Los resultados mostraron que el uso de la ceniza volante desfavorece la difusión de dióxido de carbono (CO_2) en el concreto a los 28 y 56 días, debido al contenido de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ conocido también como portlandita. En la prueba de penetración del ion cloruro reportan que al aumentar el contenido de la ceniza volante la penetración de este ion se redujo debido a la disminución de porosidad producida por la ceniza volante. Mencionan que el mejor comportamiento lo presentaron los concretos con un contenido del 15% de ceniza volante.

(Garcés, Zornoza, Baeza, Galao, & J., 2012) investigaron la influencia de la ceniza volante como sustituto parcial del cemento portland, en morteros y concretos. Estos autores aplicaron dos pretratamientos a la ceniza: 1) molienda durante 60 minutos con separación magnética y 2) molienda durante 60 minutos sin separación magnética. La separación magnética se refiere a un sistema que separa el hierro de las cenizas volantes. Los resultados indicaron que el mortero con ceniza volante (CV) sometida a molienda y con separación magnética mantuvo al acero de refuerzo pasivado durante todo el estudio.

(Uysal & Akyuncu, 2012) estudiaron el efecto del uso de la ceniza volante clase C y F como reemplazo parcial del cemento en porcentajes del 0,10,15,17, 20, 25.5 y 34%. Evaluaron la resistencia mecánica, resistencia a la permeabilidad al ion cloruro y sortividad. Los resultados de resistencia a la compresión a 90 días, con un 20% de ceniza volante, resultaron del orden de 70 MPa con ambos tipos de ceniza volante. Para la prueba de permeabilidad al ión cloruro el valor más bajo de penetración, obtuvieron con un 34% de ceniza volante tipo F y con un 25.5% de ceniza tipo C. La sortividad de los concretos decreció con el incremento de la ceniza volante.

(Sanytsky, Rusyn, Halbiniak, & J., 2013) investigaron el efecto de las cenizas volantes ultra finas sobre las propiedades de los materiales cementantes. Reportan que la ceniza volante reaccionó más intensamente con el hidróxido de calcio del cemento, debido a la gran cantidad de fracciones activas y al tamaño ultra fino de la ceniza.

(Madhavi & Swamy Raju L., 2014) reportan que el alto volumen de ceniza volante como reemplazo de cemento en mezclas de concreto mejora la durabilidad debido a la reducción de hidróxido de calcio; a largo plazo, la permeabilidad de estos concretos es muy baja (91 días mostraron un valor menor a 500 coulomb respecto a un concreto convencional que resultó de 2000 coulombios). Reportan también que el calor de hidratación se reduce cuando el reemplazo de cemento por ceniza volante es del 50%; para reemplazos menores del 40%, la resistencia a la compresión es alta a los 28 días; y con contenido mayor al 40%, el incremento de la resistencia es progresivo.

(Bernabé Reyes, 2015) Realizó una investigación titulada: “Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación” En dicho estudio analizó los resultados correspondientes a la utilización de ceniza de bagazo de caña (CBC), Escoria de alto horno (EAH) y Metacaolín (MK) como sustitutos del Cemento Portland (CP) en la elaboración de morteros, con el objetivo de reducir la cantidad de cemento, aprovechar los residuos originados en los procesos agroindustriales de la región y evaluar su comportamiento ante un medio agresivo por cloruros. Utilizó un electrodo calomel saturado de media celda como electrodo de referencia y como contra electrodo una placa de acero inoxidable AISI 316L. Una vez elaborados los especímenes no se sometieron a curado. Con los resultados obtenidos en la prueba de índice de actividad puzolánica, se infiere a las sustituciones con EAH, MK y CBC efectividad en el incremento de propiedades mecánicas del mortero. Cabe mencionar que La CBC estudiada en el presente trabajo no cumple con los requisitos para ser catalogada como puzolana, ya que el contenido mínimo de fases activas es ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 70\% \text{ mín.}$) teniendo solo 66.4%.

(González Castro, 2016) llevó a cabo una investigación en la cual empleó puzolanas como sustitución parcial de cemento Portland (CP) en la elaboración de concreto pretendiendo incrementar sus propiedades mecánicas a edades tardías, reducir la cantidad de CO_2 en la atmósfera y crear a su vez un material ecológico que satisfaga las solicitudes de proyecto. En los ensayos de durabilidad presenta buenos resultados para velocidad de pulso ultrasónico, porosidad efectiva y carbonatación. Presenta resultados desfavorables en los ensayos de resistividad eléctrica, resistencia a la abrasión y ataque por sulfatos. En los resultados menos favorables se encuentra la resistencia a la abrasión, en el que el concreto presentó mayor desgaste que el testigo. En la resistencia a los sulfatos los especímenes presentaron un severo daño en su estructura y propiedades resistentes. Los resultados de resistividad eléctrica clasifican al concreto como muy conductor, con alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo, de acuerdo con la RED DURAR.

(Saha, 2018) evaluó la aplicación de la ceniza volante tipo F como reemplazo parcial en porcentajes del 10, 20, 30 y 40% del cemento en concretos evaluados a 7, 28, 56, 90, 180 y 360 días. Reporta que los concretos sin ceniza volante, a los 7 días de curado alcanzaron resistencia a la compresión superiores respecto a los concretos con ceniza volante; menciona que la falta de contenido de óxido de calcio (CaO) en las mezclas de concreto conlleva a obtener bajas resistencias a la compresión a los 7 días; pero conforme el transcurso del tiempo, los valores incrementan. En el caso de la permeabilidad, reporta que disminuyó conforme aumentó la cantidad de ceniza volante.

(PT no.559 IMT, 2018) En el IMT se llevó a cabo una investigación la cual presenta resultados de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistividad eléctrica aparente (ρ), permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a diferentes edades de mezclas de concreto portland tipo CPC 40 y diferentes contenidos de ceniza volante activada. Los resultados indican que el contenido de ceniza volante activada en las mezclas afecta positivamente el desarrollo de la resistividad eléctrica, baja permeabilidad al ión cloruro y resistencias mecánicas a la compresión. Tales propiedades de los concretos permiten considerarlos como un desarrollo sostenible para la industria de la construcción, ya que contribuyen con la disminución en el uso de cementos portland y la consecuente reducción en la emisión de dióxido de carbono. Además de enriquecer la información de comportamiento a edades superiores a los 360 días.

Estas son algunas de las investigaciones reportadas sobre la evaluación de corrosión:

En el año 2000, el Instituto Mexicano del Transporte lanzó una iniciativa de proyecto de investigación denominado “Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión”. En la iniciativa se planteaba principalmente el capacitar al personal de los Centros de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en cada estado para que se realizara una evaluación preliminar del estado que guarda la durabilidad de la infraestructura de puentes federales libres de peaje. En 2001 y con la ayuda del Sistema de Puentes en México (SIPUMEX), cuya administración está a cargo de la Dirección general de conservación de carreteras (DGCC), se inició la captura de esta información en formato electrónico. Con lo cual se obtuvieron datos estadísticos de la cantidad de puentes dañados por corrosión. (Andrés A. Torres Acosta, 2005)

En el 2005, la SCT en conjunto con el IMT crearon el “Plan Nacional de Evaluación de Puentes Federales, Libres de Peaje, Dañados por Corrosión (2000-2005). Una Cuantificación de Resultados, Proyectos y Colaboraciones”. Este trabajo presenta un método para determinar el grado de corrosión en los puentes construidos en la Red de Carreteras Federales en México (MFRN), en función de los factores ambientales. Estos factores incluyen el clima imperante en el que se encuentra el puente, posición geográfica exacta del puente y su distancia de los corredores industriales. Esta información fue obtenida y analizada utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS), incorporando los datos estructurales actuales por medio de (SIPUMEX). (Andrés A. Torres Acosta, 2005)

En 2014, la M. Ing. América García Delgado del Instituto politécnico Nacional (IPN), llevó a cabo una investigación titulada: “Modificación del Sistema de concreto-acero de refuerzo mediante la adición de fibras de bagazo de caña para facilitar su protección anticorrosiva”. Propuso modificar el sistema concreto-acero de refuerzo,

mediante la adición de fibras de bagazo de caña con la finalidad de aprovechar sus propiedades higroscópicas a través de sus mecanismos de absorción y capilaridad para así mermar la resistividad del concreto. (García Delgado, 2014)

En 2014 el M.I. Noel Díaz González de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) llevó a cabo un trabajo de investigación titulado “Inspección y análisis por condiciones de durabilidad; propuesta de rehabilitación del puente El Teolán, localizado en el km 47+900 en la carretera Playa Azul–Manzanillo, Michoacán, México”. El presente trabajo evalúa las características del concreto de un puente ubicado en la costa michoacana. Esta estructura está expuesta a condiciones medioambientales adversas, por un lado, existe la presencia de contaminantes atmosféricos y por el otro la presencia de iones del agua de mar. Su evaluación consistió en una inspección preliminar visual en la cual se llevó a cabo un reporte fotográfico y cuantificación de daños, después una inspección detallada que consistió en levantamiento topográfico, cuantificación de daño, obtención de muestras, análisis en sitio y análisis en laboratorio. A la estructura se realizaron los siguientes análisis en el sitio: localización y profundidad de acero, velocidad de corrosión, resistencia eléctrica, potencial de corrosión, esclerometría y extracción de núcleos. Dentro de los resultados hace hincapié en que existe riesgo de corrosión y además se observa que no hubo control de construcción en el puente debido a la variación de resistencias. (Díaz González, Feb 2014)

(Linwen Yu, 2015). Realizaron una investigación titulada: “Structural performance of RC beams damaged by natural corrosion under sustained loading in a chloride environment”. Este documento discute el efecto de la corrosión en la capacidad de soporte de carga y carga última de flexión en vigas corroídas expuestas a ciclos de humedecimiento-secado en un ambiente de cloruros bajo carga constante sin corriente añadida, fue probado el comportamiento mecánico de un testigo de control y dos vigas corroídas. Los resultados experimentales se compararon con los obtenidos en un lapso de envejecimiento a largo plazo en un entorno de cloruros. Los resultados experimentales confirmaron que los efectos de la corrosión cambiaron los esfuerzos al modificarse el modo de fallo de vigas de concreto armado, el testigo de control falló debido a aplastamiento del concreto en la zona de compresión, mientras que las vigas deterioradas fallaron debido a la rotura de una barra de tracción. Como resultado, la pérdida máxima en sección transversal en barras de tensión permite que la capacidad de rendimiento y última residual a ser predicha desde el 1% de reducción. En sección transversal corresponde a la reducción del 1% en ceder la capacidad y la capacidad última.

Estas son algunas de las investigaciones reportadas sobre el uso de material de concreto reciclado como uso de agregado pétreo en mezclas de concreto:

(Corral, 2013) utilizó estrategias contributivas de sustentabilidad en la industria del concreto. En esta investigación, se utilizó agregado grueso de concreto reciclado y materiales cementantes suplementarios subproductos de procesos industriales tales como las cenizas volantes y el humo de sílice para la fabricación de concretos con características de sustentabilidad y para la evaluación de su comportamiento ante la exposición a cloruros. De los resultados obtenidos, se concluye que el concreto fabricado con 100% de agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios mejora su desempeño, en cuanto a resistencia y durabilidad al ser comparado con el concreto convencional.

(Costa Serpa , Alves Fernandes, Lucia Dayrell, & Santoro, 2018) El artículo analiza la producción de muestras de concreto que se utilizan en su composición agregados de reciclaje de residuos sólidos de construcción y demolición (SWCD). El estudio fue diseñado como experimental / comparativa, con pruebas destructivas de muestras de prueba hechas con agregados reciclados (grupo de prueba) y con agregados tradicionales (grupo de control). Se llevó a cabo un análisis estadístico posterior de los datos recogidos de la comparación entre estos grupos.

Los resultados corroboran la medición de la cantidad de agua necesaria a la realización de la dosificación. Estaba claro que la presencia de agregados reciclados hacía que la trabajabilidad fuera una actividad muy delicada. Cuanto más largo sea el tiempo de mezcla, mayor la necesidad de manipulación del hormigón. Para la absorción de agua, el agregado reciclado probado mostró un resultado similar al del grupo de control, con una diferencia de 2,3% menos para el grupo de prueba. En cuanto a la resistencia, teniendo en cuenta RCA en 25%, 24.96 MPa.

El objetivo en este punto de la investigación era entonces ajustar la caída de la mezcla tan rápido como sea posible, de lo contrario la muestra se abandonaría porque presentaría valores de viabilidad más allá de lo especificado con cantidades mínimas de agua agregada. A partir de los resultados medios dados por la compresión de los especímenes experimentales, se observó que el valor mínimo de 4.5 MPa establecido por la norma NBR 6136 se alcanzó a la edad de 3 (tres) días.

Se encontró la dosis óptima para muestras producidas con agregados reciclados, lo que demuestra que la elección de materiales reciclados podría ser una solución económica y sostenible desde el punto de vista medioambiental en el contexto de las eco innovaciones.

Si bien, aun con la información reportada sobre los beneficios que proporciona el uso de las cenizas volantes, el cemento Portland representa más del 80% del total de cemento producido a escala mundial. A pesar de las alternativas probadas que conllevan beneficios económicos adicionales y menos carga ambiental.

Una de las principales barreras identificadas para promover su uso, de acuerdo con el trabajo recabado por (Vargas & Halog, 2015), son:

El rendimiento de los cementos basados en ceniza volante es todavía medido en términos de resistencias a la compresión en 28 días; aunque, las resistencias a la compresión con el paso del tiempo incrementan añadiendo un beneficio significativo a largo plazo del uso de ceniza volante en mezclas de cemento y concreto. Esto es particularmente importante porque los fabricantes de cemento tradicionales pueden tomar decisiones basadas solo en datos a corto plazo, es por ello que la disponibilidad de datos de rendimiento a largo plazo de los cementos que contienen ceniza volante son cruciales para que los fabricantes de cemento puedan informarse sobre los beneficios del potencial económico y medioambiental de incorporar ceniza volante en sus cementos. La disponibilidad de información adecuada permitiría a las empresas hacer uso de grandes cantidades de ceniza volante y generalizar.

La comunicación entre las empresas es otra barrera que impide la expansión de un uso más amplio de la ceniza volante. Se subraya la relevancia de crear simbiosis industriales cuando el objetivo es reducir el CO₂. Debido a la naturaleza de los procesos industriales involucrados, la industria del cemento tiene la versatilidad de intercambiar múltiples flujos de material y energía desde y hacia otras industrias que también buscan colaboración. Sin embargo, las empresas de dosificación y los usuarios individuales a menudo son antagonistas a incorporar estas técnicas, generalmente porque requieren tiempo, recursos y costos adicionales.

Las limitaciones técnicas, en algunas aplicaciones el curado del concreto se convierte en un desafío cuando son usados los cementos de ceniza volante; dado que existen informes que indican que las resistencias a la compresión a largo plazo dependen directamente de las técnicas de curado precisas de los concretos que contienen estas adiciones.

Existe normativa que describe las características físicas y químicas (entre ellas la finura), clasificación que determinan el porcentaje de uso de ceniza volante. Conforme a literatura disponible, este límite se ha establecido en un 35%, porcentaje asociado básicamente a que la ceniza volante no puede mejorar las características de resistencia en su forma natural cuando es usada más allá de este reemplazo (ASTM C618, 2017). Es por ello que, si una ceniza no cumple con estas especificaciones, su uso ha sido descartado. La finura de la ceniza volante es considerada como la variable más importante e influyente en la mejora y normalización.

Otro aspecto cuestionable es la energía requerida en algunos métodos para alcanzar la adecuación o mejora de la ceniza volante. De acuerdo con resultados de simulación del uso de la ceniza volante, las reducciones máximas de emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de cemento son menores cuando esta es utilizada sin tratamientos adicionales que implican gastos de energía; sin embargo,

debido a que las cenizas volantes almacenadas (causada por falta de aplicación) no satisfacen los estándares de calidad del cemento, se requieren procesos de mejora.

Si bien, algunos de los estudios últimamente van enfocados al fenómeno de corrosión es debido a la importancia que tiene este impacto hacia las obras de infraestructura de concreto reforzado que están en funcionamiento hoy en día y a su pérdida de capacidad de carga debido a este problema que es la corrosión. Por lo tanto, es de vital importancia atacar este problema de raíz para que las construcciones que están próximas a realizarse se mantengan en una zona donde su vida útil no se vea afectada de una manera sobreestimada por la corrosión y al mismo tiempo conserve sus propiedades físicas y mecánicas manteniendo las estructuras en un criterio de alta durabilidad. De igual forma en el caso de las obras de infraestructura ya construidas, ayudar a combatir los problemas que provocan la degradación del concreto armado de una manera eficaz y que mejor que con la ayuda de adiciones ecológicas que son residuos o productos de desecho de procesos industriales o naturales. Además de que estos residuos nos ayudan a reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera y crear a su vez ecomateriales que satisfagan las demandas de proyecto.

3. Materiales y Métodos

3.1. Durabilidad de estructuras de concreto reforzado

En los últimos 20 años se ha escuchado el término “durabilidad” con mayor frecuencia en la ingeniería civil. La vida útil la definió DURAR como “el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad eficiente” (CYTED-RED DURAR, 1998)

El modelo de (Tuutti), contempla el concepto de durabilidad, el cual relaciona la degradación por corrosión del acero de refuerzo en concreto, en función del tiempo, en este modelo se basan la mayoría de los ya existentes.

Los diferencian 2 etapas: T_1 y T_2 ; donde:

T_1 = Periodo de iniciación

T_2 = Periodo de propagación

T_{vu} = Periodo de vida útil

$$T_{vu} = T_1 + T_2$$

Ecuación 1. Ecuación de Periodo de vida útil. (Tuutti, 1982)

Se define a T_1 como el lapso de tiempo que tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación.

En tanto T_2 se refiere al periodo entre la pérdida de protección de la película pasiva y la manifestación externa de los daños por corrosión (manchas de óxido, agrietamientos o desprendimientos de la cobertura del concreto). T_{vu} Se define como el periodo de vida útil de la estructura.

Si en la estructura se observan otro tipo de degradaciones como grietas más anchas de 0,1 mm, delaminaciones, barras de refuerzo expuestas con corrosión visible, etc., dicha estructura se encontrará más allá de su vida útil, o sea, en el periodo de su vida residual. El periodo de la vida residual finaliza hasta un límite inaceptable de durabilidad el cual se podría expresar en función de la capacidad de carga del elemento estructural. (Torres Acosta, 2003)

La siguiente figura presenta, de manera gráfica, las etapas T_1 y T_2 , así como el periodo de la vida residual con relación a la pérdida de la capacidad de carga o resistencia del elemento estructural.

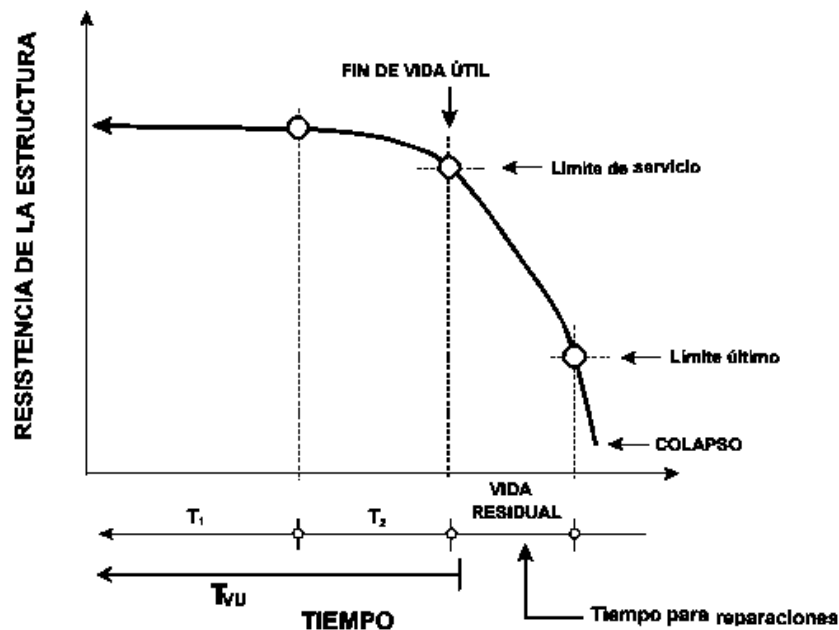


Ilustración 5. Modelo propuesto de durabilidad por corrosión. (Torres Acosta & Martínez Madrid, 2001)

El sistema carretero nacional cuenta con un sistema de administración de conservación y mantenimiento de su infraestructura que permite conocer, de manera genérica, el estado actual estructural que guarda cada obra, para así programar reparaciones, dependiendo del nivel de daño cuantificado y calificado. Sin embargo, no existe un estudio del estado de degradación por corrosión en nuestro país, ni una norma mexicana que estipule el tipo de concreto (mezcla de diseño) para la fabricación de infraestructura marina o terrestre resistente a la corrosión. (SIPUMEX-SCT, 2005)

Si se toma en cuenta que las obras de infraestructura que se construyen en México deben obedecer a una normatividad de tipo estructural, estática y dinámica, empleando agregados locales para cada obra, y que no existe un conocimiento preciso en cada localidad, de la agresividad del medio ambiente ni de sus componentes, no es factible que se diseñen y construyan estructuras bajo el concepto de durabilidad o “durables” de concreto reforzado que resistan al deterioro ambiental de la zona. (Andrés A. Torres Acosta, 2005)

Es por eso que resulta factible por medio de este estudio, formular un tipo de diseño de mezclas que en combinación con adiciones ecológicas inhibidoras de corrosión cumplan con los requerimientos mínimos para que aporten mejoras al diseño de dichas estructuras bajo el concepto de durabilidad, y así se minimicen los costos de mantenimiento, ayudando a mantener a las estructuras de concreto reforzado dentro de la zona determinada como vida útil.

3.2. Definición de la corrosión en obras de infraestructura de concreto reforzado

La corrosión es un fenómeno electroquímico en el cual, las zonas anódica y catódica se crea en la superficie del metal en un material que actúa como un electrolito y cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para formar una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material en contacto con otro y de un medio conductor para intercambiar electrones. El material que pierde electrones se conoce como ánodo y experimenta la reacción de oxidación; el material que acepta los electrones se reduce y se le llama cátodo; el medio en donde se encuentran el ánodo y el cátodo y permite el flujo de iones se conoce como electrolito (Villabona Ortiz, Tejada Tovar, & Villabona Durán, 2013).

La contribución entre el concreto y el acero de refuerzo (pre-esfuerzo) se basa en que el concreto provee al acero una protección física y química en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero impidiendo que éste continúe corroyéndose. A este fenómeno se le denomina pasivación (Fontana, 1986), ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero.

El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan despasar al acero e iniciar su corrosión. (Torres Acosta, 2003)

Cuando el acero embebido en concreto se corroe, se consume una capa de la superficie del acero y se forma una capa de productos de corrosión (óxido, Fe_3O_4 , o hidróxido de hierro, $\text{Fe}(\text{OH})_2$) en el perímetro de la barra. El volumen ocupado por dicho óxido (o hidróxido) es mayor que el que ocupaba el acero original, creando presiones contra el concreto que rodea al acero, propiciando la formación de grietas y desprendimientos del concreto. Estas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural. (Torres Acosta, 2003)

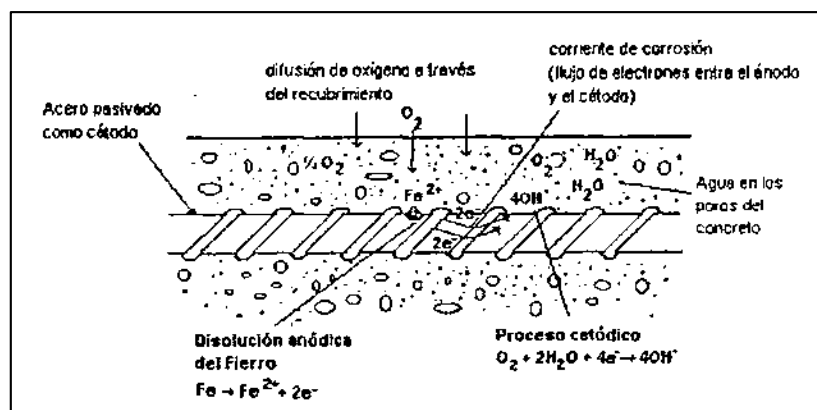


Ilustración 6. Proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto. (Rojas Martínez, 1998)

3.2.1. Evaluación y diagnóstico de Estructuras

La evaluación del comportamiento de adiciones de materiales sustitutos de cemento en la elaboración de concretos y su efecto en la resistencia a la corrosión, puede determinarse por medio de técnicas electroquímicas, tales como:

- Resistencia a la polarización Lineal (ASTM-G3, 2004; ASTM-G5, 2004; ASTM-G59, 2003)
- Extrapolación de Tafel (ASTM-G3, 2004; ASTM-G5, 2004; ASTM-G59, 2003)
- Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (ASTM-G106, 2004)

3.3. Adiciones ecológicas inhibidoras de corrosión

Según Roland, para combatir este problema de corrosión nos presentamos con dos tipos de obras de concreto reforzado. Las obras ya construidas y las obras por construir, en las cuales se muestran los tipos de solución para prevenir y atacar este conflicto de una manera adecuada. (Roland Stulz, 1997)

- Construidos: encamisado, protección catódica, re-alcalinización.
- Nuevos: *concretos (durabilidad)*, *aditivos al concreto*, barreras protectoras al acero.

El estudio se enfocará principalmente en la realización de concretos con adiciones ecológicas inhibidoras de corrosión.

Las adiciones ecológicas están compuestas principalmente de puzolanas (Alumino-Silicatos) a partir de los cuales se producía históricamente un cemento portland. Hoy en día estos materiales alumino-silíceos son considerados como ecomateriales. (EcoSurouth, 2018) Estas puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto. (Roland Stulz, 1997)

Existen dos tipos de puzolanas: naturales y artificiales.

Las puzolanas naturales son cenizas volcánicas producto de actividades volcánicas recientes.

Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales agrícolas, generalmente son el resultado de la quema de materiales orgánicos. Dentro de las puzolanas artificiales más conocidas están: ceniza de bagazo de caña, cenizas de arcilla cocida, cenizas de cáscara de arroz, escoria de alto horno, etc. (Roland Stulz, 1997)

Las adiciones que se utilizarán en este proyecto de investigación serán:

- Ceniza de bagazo de caña (CC) y Ceniza de Horno (CH).

Implementando adiciones ecológicas inhibidoras de corrosión al concreto se tiene que la matriz del concreto se densifica provocando que se desconecten los vacíos

de ésta, impidiendo así el paso a los agentes que corroen al acero de refuerzo y degradan al concreto. (Roland Stulz, 1997)

La siguiente figura, presenta del lado izquierdo, la presencia de vacíos interconectados entre sí en una matriz de concreto. En el lado derecho se observa como con la adición de humo sílice, los poros se cubren por completo, desconectando así los vacíos interconectados.

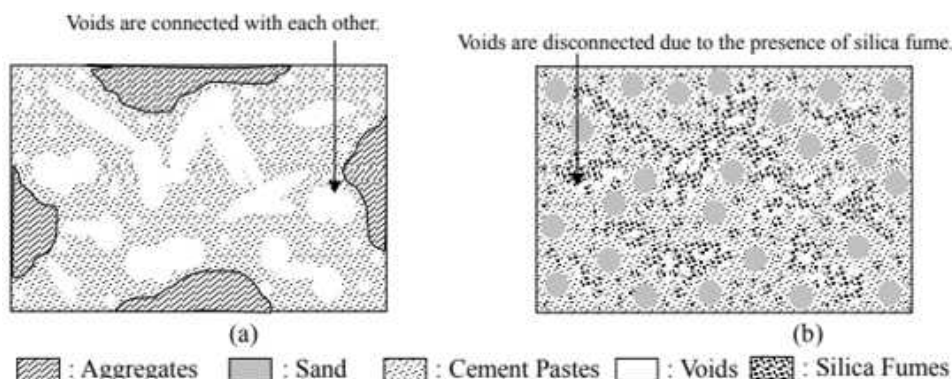


Ilustración 7. Matriz de concreto con adición de humo sílice. Vacíos interconectados unos con otros (a), Vacíos desconectados por la presencia de humo sílice (b). (Lau, s.f.)

3.3.1. Adiciones ecológicas

Se dividen en dos tipos:

1. Ceniza de Bagazo de Caña (CC)
2. Ceniza de Horno (CH)

1. Se utilizó una CC extraída del Ingenio de Pedernales, Tacámbaro, Michoacán, México.

2. Se utilizó una CH (producto de elaboración de ladrillo), extraída de la localidad de Tenencia Morelos, Michoacán, México.

3.3.2. Análisis de partículas de las cenizas de sustitución

3.3.2.1. Morfología de partículas

A continuación, se muestran la morfología de las partículas de CC y CH analizadas en el microscopio electrónico de barrido (MEB) a diferentes magnificaciones. Cabe mencionar que la normativa ASTM no especifica la estructura y morfología que deban tener las partículas de los materiales puzolánicos.

La CC presenta una morfología de partícula alargada, características propias de la caña de azúcar de la cual se obtiene, con un tamaño de partícula de 20 μm . Una forma lajeada supone una mayor área de humectación, y por lo tanto una mayor reacción.

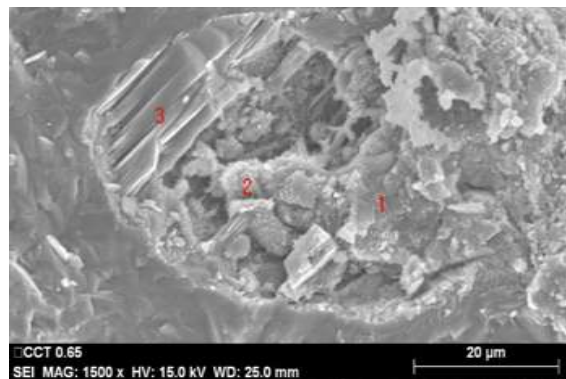


Ilustración 8. Morfología de la CC analizada en el MEB a 1500x. (García Chávez, 2019)

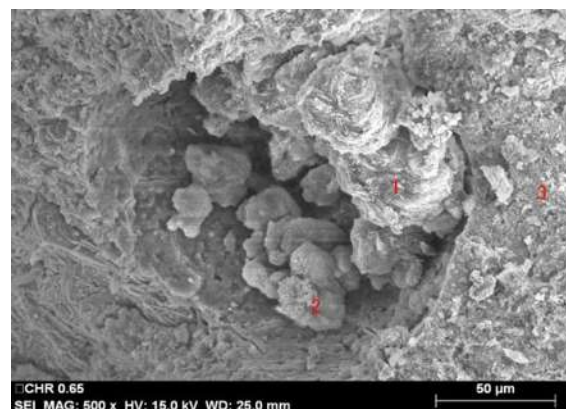


Ilustración 9. Morfología de la CH analizada en el MEB a 500x. (García Chávez, 2019)

La CC presenta una morfología de partícula alargada, características propias de la caña de azúcar de la cual se obtiene, con un tamaño de partícula de 50 μm . Una forma lajeada supone una mayor área de humectación, y por lo tanto una mayor reacción.

La CH presenta una morfología de partícula redondeada y angulosa, tal vez debido al proceso de molienda previo al tamizado, con tamaño promedio de partícula de 50 μm . Esto le atribuye mayores velocidades de reacción.

3.4. Tipo de cemento y agregados pétreos

3.4.1. Cemento

La obtención de cemento en el mundo se realiza en grandes cantidades a niveles extraordinarios, produciendo en todos sus casos la molienda de clínker portland, así como mezclas con materiales con escorias granuladas de alto horno hasta materiales puzolánicos; lo que proporciona una clasificación del cemento producido a nivel mundial. La norma (NMX-C-414-ONNCCE-2016) clasifica a los diversos tipos de cemento de fabricación nacional o extranjera que se comercializan en territorio nacional, dicha norma hace mención a la clasificación del cemento de acuerdo a sus componentes, a su resistencia a la compresión y de acuerdo a sus características especiales, como lo muestra la Tabla 1.

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Tabla 1. Clasificación de los cementos de acuerdo a la norma (NMX-C-414-ONNCCE-2016). (García Chávez, 2019)

Se utilizó un cemento CPC 30R-RS (Cemento Portland Compuesto- Resistente a los Sulfatos) para la elaboración de los especímenes.



Ilustración 10. Cemento CPC 30R-RS, utilizado para el diseño de las mezclas de concreto.

3.4.2. Agregados pétreos

Los especímenes en su conjunto se dividen en dos diferentes tipos de agregado pétreo:

1. Agregado triturado convencional (T)
2. Agregado triturado reciclado (R)

3.4.2.1. Agregado triturado convencional

Se utilizó agregado triturado convencional de Tamaño máximo de agregado (T.M.) de $\frac{1}{2}$ " obtenida de la empresa TRACSA, Morelia, Michoacán.

3.4.2.2. Agregado triturado reciclado

Se utilizó agregado triturado reciclado de T.M. de agregado de $\frac{3}{4}$ " obtenida de la torre demolida del antiguo IMSS de Morelia, Michoacán.

3.4.2.3. Arena triturada convencional

Se utilizó para todas las mezclas arena del banco Joyitas "La Unión", ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia-Quiroga en la entrada a la comunidad a San Bernabé, Michoacán.

3.5. Otras adiciones

3.5.1. Fluidificante

En las mezclas con relación agua/cemento (a/c) = 0.45, se utilizó fluidificante marca Christianson para mejorar su trabajabilidad en cantidad de 8ml/kg de cemento.

3.5.2. Análisis del agua

El agua utilizada en la elaboración de concretos debe cumplir con parámetros indicadores de calidad. El análisis del agua empleada en el presente trabajo fue realizado por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), quienes expidieron los resultados con base a la normativa (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). Los datos del reporte se presentan en la sección de resultados.

3.6. Caracterización de los materiales

A continuación, se muestran las propiedades de los dos diferentes tipos de agregados (convencionales y triturados) utilizados para las diferentes mezclas con que se elaboraron los especímenes.

	Grava Triturada				Grava Reciclada			
	a/c=0.45	m.f=2.68	a/c=0.65	m.f=2.25	a/c=0.45	m.f=3.22	a/c=0.65	m.f=2.8
	Vol (lts)	Masa (Kg)	Vol (lts)	Masa (Kg)	Vol (lts)	Masa (Kg)	Vol (lts)	Masa (Kg)
Cemento	155	480	107	332	147	456	102	315
Grava	330	871	355	937	343	741	367	794
Arena	274	659	297	712	285	684	306	734
Agua	216	216	216	216	205	205	205	205
Aire	25	0	25	0	20	0	20	0
Total	1000	2225	1000	2198	1000	2086	1000	2048

Tabla 2. Propiedades del agregado triturado convencional y reciclado utilizado para las diferentes mezclas de estudio.

Se colaron los especímenes con 2 tipos de relación a/c= 0.45 y 0.65. Debido a que con relaciones de a/c bajas la resistencia a la compresión ($f'c$) es mayor.

En las siguientes tablas se muestran cada uno de los tipos de mezclas con sus diferentes proporcionamientos y propiedades de fabricación:

3.6.1. Mezclas Control o Testigo

MEZCLAS CONTROL O TESTIGO											
TIPO DE MEZCLA	Fecha de elaboración	Fecha de descimbrado	Cilindros 10cm x 20cm	FLUIDIFICANTE 8cm3/kg	DESPERDICIO (%)	REVENIMIENTO (cm)	PESO DE MATERIAL (kg)				
							CEMENTO	GRAVA	ARENA	AGUA	TOTAL
TT0.65	27/07/2017	28/07/2017	34	NO	15	11	20.4	56.6	42.2	15.7	135.0
TT0.65F	31/07/2017	31/07/2017	34	SI	15	21	20.4	56.6	42.2	15.7	135.0
TT0.45	14/08/2017	15/08/2017	34	NO	15	12.5	29.5	52.6	39.0	15.9	137.0
TT0.45F	16/08/2017	18/08/2017	34	SI	15	21	29.5	52.6	39.0	15.9	137.0
TR0.65F	18/08/2017	21/08/2017	34	SI	15	s/r	19.4	45.8	43.5	17.1	125.8
TR0.45F	21/08/2017	22/08/2017	34	SI	15	10	29.5	45.8	43.5	17.1	135.9

Tabla 3. Mezclas control o testigo. Propiedades.

3.6.2. Mezclas elaboradas con Ceniza de Horno (CH)

MEZCLAS DE CENIZA DE HORNO (10% SUSTITUCION)											
TIPO DE MEZCLA	Fecha de elaboración	Fecha de descimbrado	Cilindros 10cm x 20cm	FLUIDIFICANTE 8cc	DESPERDICIO (%)	REVENIMIENTO (cm)	PESO DE MATERIAL (kg)				
							CEMENTO	GRAVA	ARENA	AGUA	TOTAL
CH0.45T	22/08/2017	23/08/2017	34	SI	15	21	28.0	52.6	39.0	15.5	136.7
CH0.45R	25/08/2017	28/08/2017	34	SI	15	15	28.0	52.6	39.0	15.5	136.6
CH0.65R	29/08/2017	31/08/2017	34	SI	15	s/r	18.4	45.8	43.5	17.1	125.8
CH0.65T	04/09/2017	05/09/2017	34	NO	15	18	18.4	56.6	42.2	15.7	134.0

Tabla 4. Mezclas elaboradas con ceniza de horno (CH) con 10% sustitución.

3.6.3. Mezclas elaboradas con Ceniza de bagazo de caña (CC)

MEZCLAS DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA (10% SUSTITUCION)												
TIPO DE MEZCLA	Fecha de elaboración	Fecha de descimbrado	Cilindros	FLUIDIFICANTE	DESPERDICIO	REVENIMIENTO	PESO DE MATERIAL (kg)					
			10cm x 20cm	8cc	(%)	(cm)	CEMENTO	GRAVA	ARENA	AGUA	CENIZA	TOTAL
CC0.65T	13/09/2017	15/09/2017	34	SI	15	15	18.4	56.6	42.2	15.7	2.0	135.0
CC0.65R	19/09/2017	21/09/2017	34	SI	15	21	18.4	56.6	42.2	15.7	1.9	134.8
CC0.45T	22/09/2017	24/09/2017	34	SI	15	13	26.6	52.6	39.0	15.9	3.0	137.0
CC0.45R	26/09/2017	26/09/2017	34	SI	15	11	26.6	45.8	43.5	17.1	3.0	135.9

Tabla 5. Mezclas elaboradas con ceniza de bagazo de caña (CC) con 10% sustitución.

Cabe mencionar que se realizaron 14 diferentes tipos de mezclas de concreto. Una vez fabricadas las muestras, en el transcurso de 24 a 48h se procedió a descimbrar y comenzar el proceso de curado, el cual fue por inmersión en agua durante 9 meses hasta el día de las primeras pruebas para que se tuviera una pasivación del acero (en el caso de las muestras con acero de refuerzo embebido) por parte del cemento de manera natural.

3.7. Elaboración de especímenes

Con las 14 diferentes mezclas de concreto se realizaron dos lotes de muestras:

- Especímenes cilíndricos de $10\text{cm} \times 20\text{cm}$, fabricados con agregados triturados convencionales y reciclados, así como diferentes adiciones ecológicas (CC y CH).
- Especímenes rectangulares de concreto con acero de refuerzo de: $20\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm}$, fabricados con agregados triturados convencionales y reciclados, así como diferentes adiciones ecológicas (CC y CH). Se utilizó para cada una de las probetas 2 varillas corrugadas de $3/8''$ de aproximadamente 15 cm de longitud (con recubrimiento de concreto en cada extremo de 2cm) y 1 grafito como electrodo de referencia estable (al centro del espécimen entre varilla y varilla).

Se colaron los especímenes con 2 tipos de relación $a/c=0.45$ y 0.65

Para el caso de las mezclas con relación $a/c=0.45$ se utilizó un fluidificante (marca Christianson) para mejorar su trabajabilidad únicamente en la cantidad de 8ml/kg de cemento. Al tener esta relación el acomodo de la mezcla tiene mayor dificultad a la hora de compactación, es por eso que se adicionó un fluidificante.

Para la compactación de los especímenes se realizó de manera manual, sin vibrado, por lo tanto; se dificulta su compactación.

A continuación, se muestra una imagen de los especímenes elaborados.



Ilustración 11. Partes y composición de un espécimen cilíndrico de 10cmx20cm. Elaborado con agregado triturado con $a/c = 0.45$. (García Chávez, 2019)



Ilustración 12. Partes y composición de un espécimen rectangular de 20cmx10cmx5cm. Elaborado con agregado triturado con $a/c = 0.45$. (García Chávez, 2019)

Para generalizar un poco, en la siguiente tabla se especifican las diferentes mezclas, relaciones a/c y adiciones ecológicas (10% de sustitución) que se utilizaron en el estudio en combinación con los diferentes tipos de agregado.

Mezcla	Relación a/c		Fluidificante	Nombre de la mezcla de estudio
TT	0.45	0.65	NO	Testigo con agregado triturado convencional
TTF	0.45	0.65	SI	Testigo con agregado triturado convencional con fluidificante
TRF	0.45		SI	Testigo con agregado triturado reciclado con fluidificante
TR	0.65		NO	Testigo con agregado triturado reciclado sin fluidificante
CHTF	0.45		SI	Ceniza de horno con agregado triturado convencional con fluidificante
CHT	0.65		NO	Ceniza de horno con agregado triturado convencional sin fluidificante
CHRF	0.45		SI	Ceniza de horno con agregado triturado reciclado con fluidificante
CHR	0.65		NO	Ceniza de horno con agregado triturado reciclado sin fluidificante
CCTF	0.45		SI	Ceniza de bagazo de caña con agregado triturado convencional con fluidificante
CCT	0.65		NO	Ceniza de bagazo de caña con agregado triturado convencional sin fluidificante
CCRF	0.45		SI	Ceniza de bagazo de caña con agregado triturado reciclado con fluidificante
CCR	0.65		NO	Ceniza de bagazo de caña con agregado triturado reciclado sin fluidificante

Tabla 6. Especímenes de estudio elaborados con las diferentes adiciones ecológicas.

3.8. Pruebas destructivas y no destructivas

Para lograr un resultado efectivo en cuanto al método de adición y tipo de adición ecológica con mejores propiedades, es necesario llevar a cabo un análisis y evaluación del comportamiento del concreto armado, mediante diversas pruebas destructivas y no destructivas, que puedan arrojar resultados cuantitativos verificando el comportamiento del material ensayado.

Una forma de lograrlo es implementando técnicas o pruebas propuestas por la normatividad vigente:

La evaluación del acero por medio de la Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado (RED DURAR) para las distintas variaciones de temperatura, reacciones químicas, vibraciones y erosión, donde el fenómeno de corrosión de las armaduras contribuye para la degradación del concreto. Y la evaluación del concreto con base a las pruebas y normas: American Society for Testing and Materials (ASTM), Catálogo de Normas Mexicanas (NMX), y American Concrete Institute (ACI) para la clasificación del concreto de acuerdo con su composición y a sus propiedades de resistencia y durabilidad.

Algunas de las pruebas que se encuentran dentro de estos manuales y normas son las que se consideran que servirán para dicho proyecto de estudio. Como son:

Pruebas al acero: Potenciales de corrosión, velocidad de corrosión.

Pruebas en concreto: velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistividad eléctrica (Re), penetración rápida de cloruros, ciclos en sulfato de sodio, carbonatación, microscopía de barrido (MEB), análisis químico con EDS.

Con estas pruebas se realizará un análisis de los parámetros obtenidos y se compararán los resultados con las diferentes adiciones estudiadas, determinando qué adición ecológica incrementa de mejor manera la vida útil en una estructura de concreto reforzado disminuyendo el fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo.

3.8.1. Pruebas no destructivas

De acuerdo a Charles, las pruebas no destructivas se realizan a los especímenes para conocer sus propiedades sin tener que someterlas a cargas y causar su fractura o algún efecto en su utilidad. Las pruebas no destructivas también suelen realizarse para medir otras características como: tamaño, dimensión, configuración, estructura, dureza, etc. (Charles, 2001)

3.8.1.1. Pruebas de Microanálisis de barrido (MEB) y Análisis Químico vía EDS

La prueba sirve para conocer la microestructura de la matriz cementicia de los diferentes concretos de estudio y los principales componentes o elementos químicos por medio de energía dispersiva encontrados dentro de la estructura con ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), en el cual, se analizaron únicamente aquellas mezclas de concreto que tuvieran adiciones ecológicas, es decir; aquellas muestras que tengan presencia de ceniza puzolánica en las cuales se pueda corroborar la reacción y presencia de Silicatos o Aluminatos dentro de la matriz cementicia, con la finalidad de eliminar la interconexión de poros, ayudando a densificar la matriz y al mismo tiempo desconectando el paso a los agentes que corroen el acero y degradan al concreto.

Esta prueba se realizó a esquirlas de 0.5 cm^3 , las cuales se mantuvieron secando en horno hasta peso constante. Estas se llevaron a cabo a edades >700 días.

Las pruebas se realizaron con lo siguiente:

- Esquirlas de 0.5 cm^3 .
- Vernier o pie de Rey
- Horno de secado a $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
- Metalizadora de muestras
- Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Procedimiento:

1. Se cortaron algunas muestras de concreto con adición de cenizas con ayuda de una cortadora de roca.



Ilustración 13. A la izquierda: Corte de especímenes de concreto para extracción de esquirlas. Al centro: esquirlas de 0.5 cm^3 de una mezcla de concreto testigo de relación $a/c= 0.45$. A la derecha: total de portamuestras para microanálisis MEB. (García Chávez, 2019)

2. Se colocaron cada una de las portamuestras en el horno de secado a $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar masa constante.
3. Una vez alcanzada masa seca constante se clasificaron las muestras para llevar a la cámara Metalizadora.

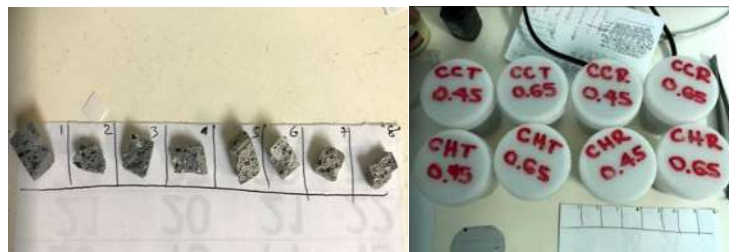


Ilustración 14. Clasificación de muestras para proceso de metalización. (García Chávez, 2019)

4. Una vez metalizadas se sometieron las muestras a un Microanálisis y Análisis Químico vía EDS con MEB.



Ilustración 15. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). (García Chávez, 2019)

5. Finalmente se obtuvieron los Microanálisis de cada una de las mezclas a analizar.

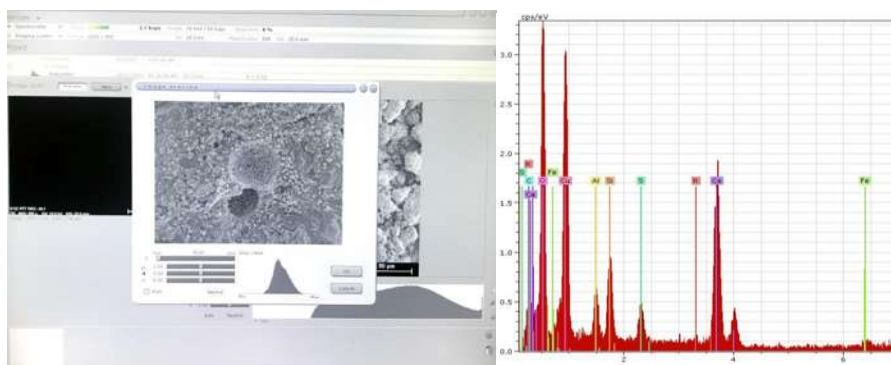


Ilustración 16. A la izquierda: Microanálisis de una muestra de concreto con MEB. A la derecha: Análisis químico elemental vía EDS con MEB. (García Chávez, 2019)

3.8.1.2. Resistividad eléctrica (R_e)

Las pruebas se realizaron a los dos lotes de muestras:

- Probetas cilíndricas con ancho de 10cm x 20cm de altura, las cuales se mantuvieron curando hasta el momento de su utilización. Estas se llevaron a cabo a diferentes edades: tempranas (28,45,90 días) y edades tardías (500 días).
- Probetas rectangulares de 20cm x 10cm x 5cm. A diferencia de las probetas cilíndricas; éstas se mantuvieron en ciclos de humedecimiento y secado al momento de su utilización.

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un Resistómetro no.400 marca Nilsson electrical laboratory inc., que mide resistividad eléctrica (R_e) en suelos y materiales porosos. (ASTM-G57, 2012)



Ilustración 17. Resistómetro utilizado para determinar la resistividad eléctrica. (García Chávez, 2019)

El procedimiento seguido se resume en los siguientes pasos:

- Se determinaron las dimensiones de las probetas: altura, base y espesor.
- Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
- Para las probetas del lote (a) se utilizan dos láminas circulares de cobre; una en la parte superior del cilindro y otra en la parte inferior formando con ello un circuito cerrado. Cabe mencionar que entre las láminas de cobre y las caras laterales de la probeta cilíndrica se coloca un ligero pedazo de tela humedecido para asegurar que las lecturas (de la corriente que pasa por el electrolito) sean lo más exactas posibles. Para las probetas del lote (b) se conectan los caimanes de corriente (I) y voltaje (E) en el electrodo de trabajo (varilla de acero de 3/8") y el electrodo de referencia (grafito de carbón).



Ilustración 18. A la izquierda: medición de la R_e para especímenes del lote (a). A la derecha: medición de la intensidad de corriente y voltaje para determinar R_e en los especímenes del lote (b). (García Chávez, 2019)

4. Se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
5. La resistencia eléctrica (R_e) se calcula como E/I y se expresa en Ω .
6. Para el cálculo de resistividad se utilizó la (Ecuación 2) conforme a la norma y manual (ASTM-G57, 2012), (CYTED-RED DURAR, 1998).

$$\rho = R_e (A/L)$$

Ecuación 2. Resistividad eléctrica. (CYTED-RED DURAR, 1998)

Dónde:

- ρ = Resistividad eléctrica en $K\Omega - cm$
- R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en Ω o $K\Omega$
- A = Área transversal del espécimen en cm^2
- L = Longitud del espécimen en cm

Se llevará a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de evaluación de la Norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) para determinar la resistividad eléctrica del concreto armado. Estos parámetros se evalúan en criterios de riesgo a la corrosión, como se especifica en la tabla siguiente:

Riesgo de Corrosión (NMX-C-530-ONNCCE-2017)	
Resistividad	Probabilidad de corrosión (porosidad interconectada)
$\rho > 100$ a $200 K\Omega - cm$	Porosidad extremadamente baja
$100 > \rho > 50 K\Omega - cm$	Porosidad baja
$50 > \rho > 10 K\Omega - cm$	Porosidad de consideración
$\rho < 10 K\Omega - cm$	Porosidad excesiva

Tabla 7. Criterios de riesgo con base a la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). (García Chávez, 2019)

3.8.1.3. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

Este tipo de ensaye es aplicable para la verificación de la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa); para detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, profundidad de fisuras y otras imperfecciones, así como el monitoreo de las variaciones de las propiedades del concreto a lo largo del tiempo debido a la agresividad del medio.

La prueba sirve para conocer la velocidad de propagación de una onda ultrasónica, esta prueba se realizó a las probetas cilíndricas de 10cm x 20cm, las cuales se mantuvieron curando hasta el momento de su utilización. Estas se llevaron a cabo a diferentes edades: tempranas (28,45,90 días) y edades tardías (500 días).

Las mediciones correspondientes se realizaron mediante un equipo de sistema digital para ensayos ultrasónicos, modelo V-Meter MK IV TM marca NDT - JAMES INSTRUMENTS; con una escala de frecuencia de 24 a 500kHz; impedancia de entrada del receptor de 100 k Ω ; sensibilidad del receptor de 250 micro volts, entre 30 kHz y 100 kHz; salida del transmisor con un pulso de 1000/500V, 2 microsegundos; exactitud de la propagación de 0.1 microsegundos.



Ilustración 19. Sistema digital para ensayos ultrasónicos, para determinar la VPU. (García Chávez, 2019)

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar por lo cual se empleó un medio conductor o agente de acoplamiento, en este caso un gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel comercial estético, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, por lo que se decidió aceptar el empleo del gel estético para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que, el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones que se iban a llevar a cabo, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.

El procedimiento seguido se resume en los siguientes pasos:

1. Se determinaron las dimensiones de las probetas: altura, base y espesor.
2. Se conectan los transductores al aparato de pulso ultrasónico, mediante los cables coaxiales.
3. Se calibra el equipo de velocidad de pulso ultrasónico usando la barra de referencia.
4. Se aplicó un adecuado agente de acoplamiento (gel), a la cara de los transductores y a las dos caras del espécimen a ensayar.
5. Se introdujo en el equipo la distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores (espesor o longitud del espécimen previamente medido) y se registró el valor estable de la velocidad de pulso ultrasónico del espécimen según fuese el caso.
6. Para el cálculo de VPU se utilizó la (Ecuación 3) con base al manual (CYTED-RED DURAR, 1998).

$$V = L / \Delta t$$

Ecuación 3. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).

Dónde:

- V = Velocidad de pulso ultrasónico en m/s
- L = Longitud del espécimen en cm
- Δt = Gradiente de tiempo en μs

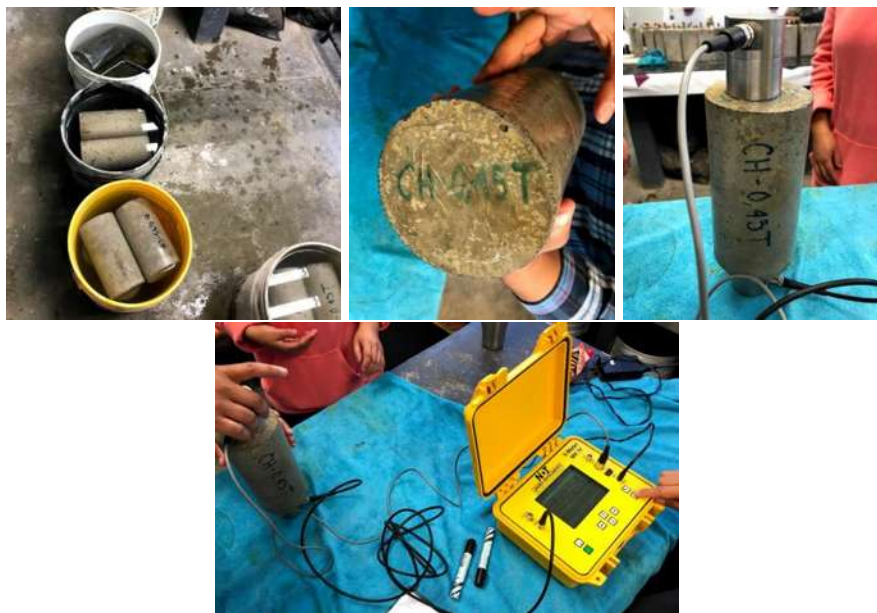


Ilustración 20. Izquierda arriba: Especímenes en curado hasta el momento de su uso. Arriba centro: Colocación de gel a la cara de los transductores y a las dos caras del espécimen a ensayar. Derecha arriba: Colocación de los transductores al centro del espécimen. Abajo: Determinación de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. (García Chávez, 2019)

Se llevará a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) para determinar la VPU del concreto armado. Estos parámetros se evalúan conforme a la calidad del concreto y a los criterios de velocidad de propagación, como se especifica en la tabla siguiente:

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Clasificación del concreto (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017)
$V > 4575$	EXCELENTE
$4575 > V > 3660$	BUENO
$3660 > V > 3050$	CUESTIONABLE
$3050 > V > 2135$	POBRE
$V < 2135$	MUY POBRE

Tabla 8. Criterios de VPU con base a la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017)

3.8.2. Pruebas destructivas

Las pruebas destructivas se realizaron después de realizar las pruebas no destructivas, cabe mencionar que los especímenes se conservaron en curado (sumergidas en agua) en todo momento hasta su utilización.

3.8.2.1. Compresión en cilindros

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes y necesarias para determinar una evaluación general de los distintos especímenes de concreto de estudio respecto a su capacidad de resistencia mecánica.

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en especímenes de concreto de 10 cm x 20 cm elaborados con adiciones ecológicas, agregado pétreo convencional y reciclado, relaciones $a/c = 0.45$ y 0.65 a edades tempranas (28, 45, 90 días) y edades tardías (500 días). Se planteó el uso de las diferentes relaciones a/c por durabilidad, simulando un concreto pobre de bajas resistencias (0.65) y un concreto bueno para altas resistencias (0.45), con la intención de verificar que los resultados sean concisos de acuerdo con lo que se requiere para simular resistencias de estructuras de medianas y altas especificaciones (puentes, carreteras y complementos).

Para este estudio se basó con la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015).

Se utilizó una máquina de carga axial para calcular el esfuerzo a compresión de los especímenes, se sometieron dos probetas por edad (28, 45, 90, 500 días) para obtener un promedio confiable.



Ilustración 21. A la izquierda: Máquina de carga axial. Al centro: Placas de neopreno para dar uniformidad a la superficie de la probeta. A la derecha: Cilindro con placas de neopreno. (García Chávez, 2019)

El esfuerzo a compresión se define como la carga entre el área transversal del cilindro.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación 4. Esfuerzo a compresión (MPa).

Dónde:

- σ = Esfuerzo a compresión (MPa)
- P = Carga (kg)
- A = Área transversal del cilindro (cm²)

Si bien, el valor de la resistencia mecánica de los elementos de concreto por sí solo no es indicativo de la durabilidad del concreto, pero en general se acepta que concretos de elevada resistencia (>30 MPa) son durables y que concretos por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad (Publicación Técnica #128, IMT, 1999).

En la siguiente tabla podemos verificar el esfuerzo a compresión esperado a 28 días dependiendo de la relación a/c con que se diseñe la mezcla de concreto.

Esfuerzo a la compresión a 28 días (MPa)	Relación a/c por peso	
	concreto sin vacíos de aire	concreto con vacíos de aire
45	0.37	-
40	0.42	-
37	0.45	0.41
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
21	0.65	0.49
20	0.69	0.60
18	0.76	0.65
15	0.79	0.70
Normativa: ASTM C31 y adaptado a ACI 211.1		

Tabla 9. Relaciones entre el a/c o la relación agua/materiales cementicios y la Resistencia a la Compresión del concreto. (Darwin, Young, & Mindess, 2003)

Para este estudio propondremos los valores de las resistencias esperadas como concretos con vacíos de aire (a/c=0.45 f'c=30MPa, a/c=0.65 f'c=18MPa), cabe mencionar que durante la elaboración de los especímenes la expulsión de vacíos de aire no se hizo por medios vibratorios, sino por medio de golpes manuales con un mazo de hule como lo especifica la norma.

3.9. Pruebas Electroquímicas (Corrosión)

3.9.1. Velocidad y Potencial de corrosión

3.9.1.1. Resistencia a la polarización lineal (RPL) y Potencial de corrosión (E_{corr})

Una de las técnicas utilizadas para el cálculo de la Velocidad de corrosión es la Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), con base a la norma (ASTM-G59, 2003).

La técnica electroquímica de la resistencia a la polarización permite medir la velocidad instantánea de corrosión, ha sido la más utilizada en los últimos 50 años y se define como la pendiente de la tangente a la curva de polarización en las vecindades del potencial de corrosión (E_{corr}), en caso de una reacción controlada por transferencia de carga (Medina Custodio, 2006). Los resultados de la RPL permiten conocer comportamientos activos o pasivos del sistema en estudio y la velocidad con que ocurren, es decir, se puede inferir mediante estos resultados la velocidad de corrosión. Para ello es necesario conocer las pendientes de Tafel (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

Cuando los electrones circulan por el electrolito encuentran una cierta dificultad al moverse, a esta "dificultad" se le llama Resistencia a la polarización. La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Esta ecuación es una analogía de la ley de Ohm, que establece que la intensidad de la corriente eléctrica (i) que circula por un elemento resistivo es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada (V), e inversamente proporcional a la resistencia del mismo (R), según expresa la Ecuación 5 y Ecuación 6. (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010)

$$i = \frac{V}{R} \quad \text{ley de ohm}$$

Ecuación 5. Intensidad de la corriente eléctrica.

$$i_{corr} = \frac{B}{RPL} \quad \text{Stern y Geary}$$

Ecuación 6. Intensidad de corriente de corrosión.

Dónde:

i_{corr} = Densidad de corriente $\frac{\mu A}{cm^2}$

B = Factor de Stern-Geary que depende de las pendientes de Tafel en V .

RPL = Resistencia a la polarización en $\Omega \cdot cm^2$

La constante (B) depende exclusivamente de las pendientes de Tafel, que son calculadas a partir de una curva de Tafel o de polarización. Este valor oscila entre los 60 y 120 $mV/década$ (Rodríguez Gómez, 2000; Tres G. & E. Saborio, 2004).

Cabe mencionar que la ecuación de Stern y Geary es válida cuando exista control activacional o de transferencia de carga. El metal debe estar sumergido en un electrolito conductor, o sea que la resistividad de las soluciones no sea alta y debe encontrarse libre de películas resistivas, pues la RPL es una técnica que globaliza las contribuciones resistivas y no alcanza a discriminarlas. Si se trabaja con sistemas altamente resistivos se recomienda el uso de la otra técnica electroquímica llamada: Espectroscopia de impedancia electroquímica (Medina Custodio, 2006).

3.9.1.2. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de Ohm.

$$E = IR$$

Ecuación 7. Potencial eléctrico en (volts).

Dónde:

E = potencial en (volts).

I = corriente en (amperes)

R = resistencia eléctrica en (Ω)

En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente:

$$E = IZ$$

Ecuación 8. Potencial eléctrico de una señal alterna a la expresión equivalente.

Dónde:

Z = impedancia del circuito (Ω)

La finalidad de establecer la solución de un circuito eléctrico es poder aplicarlo al cálculo de la velocidad de corrosión, tomándolo como un circuito equivalente que represente al sistema en conjunto. Para ello se debe de considerar la resistencia propia de la transferencia de carga, la resistencia de la solución que funge como electrolito y el fenómeno de la doble capa que ocurre en la interface metal-electrolito (Ilustración 22), en la que las cargas positivas y negativas están separadas a una distancia muy pequeña desde la superficie del electrodo hasta el seno de la solución, por lo que se le puede considerar como un capacitor cargado con una capacitancia C_{dl} .

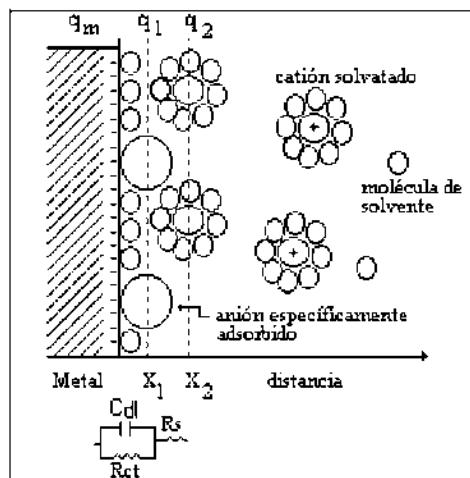


Ilustración 22. Similitud de la interfaz electrificada con un circuito eléctrico equivalente. (Pérez, 2002)

El valor de esta capacitancia depende de muchas variables como lo son el potencial de electrodo, temperatura, concentración iónica, tipo de iones, capas de óxido, rugosidad del electrodo, impurezas en la superficie (Medina Custodio, 2006).

3.9.2. Determinación de la Velocidad y Potencial de corrosión

Para medir el comportamiento de la velocidad y potencial de corrosión de los especímenes de estudio, la metodología que se utilizó se basa en utilizar los dos métodos antes descritos con ayuda de un potenciostato, el cual se rige conforme a las normas (ASTM-G3, 2004), (ASTM-G5, 2004) y (ASTM-G59, 2003).

El equipo utilizado es un potenciostato marca GAMRY modelo 600.



Ilustración 23. Potenciostato marca GAMRY modelo 600.

Las partes que conforman el sistema electroquímico son:

- Electrodo de Referencia (grafito de carbón).
- Electrodo de Trabajo (varilla de acero corrugada de 3/8" de diámetro).
- Solución salina, al 3.5% de $NaCl$ en peso.

Esta prueba se realizó a los especímenes rectangulares de 20cm x 10cm x 5cm (3 especímenes por mezcla de concreto), las cuales se mantuvieron en ciclos de

humedecimiento y secado al momento de su utilización. Estas se llevaron a cabo a diferentes edades a partir de los 400 días de edad en adelante.

Para tener un mejor control sobre el comportamiento de la velocidad y potencial de corrosión de cada uno de los especímenes y con la finalidad de tener los dos parámetros de control en una misma probeta se mide el potencial de ambas varillas de acero por separado.

3.9.2.1. Preparación de la solución salina

La idea principal de preparar una solución salina es simular el ambiente agresivo que causan los cloruros en las zonas costeras, y así evaluar los efectos negativos que infieren en la corrosión del acero de las estructuras de concreto reforzado.

Los especímenes se mantuvieron curando hasta después de los 2 meses de la elaboración, se sacaron y dejaron pasivar por 9 meses aproximadamente, después se realizó la inmersión en una solución de $NaCl$ al 3.5% (porcentaje que se sugiere como equivalente a la concentración de sales en el agua de mar) con agua destilada. (Tórres Gómez R. A., 2010)



Ilustración 24. Especímenes inmersos en solución salina. (García Chávez, 2019)

A continuación, se presentará el procedimiento utilizado (con referencia a una mezcla testigo con relaciones $a/c=0.45$ y 0.65) para la obtención de los parámetros de velocidad y potencial de corrosión.

Procedimiento:

1. Determinación del ciclo de prueba en el cual se encuentra la mezcla.

Mezcla	Relac a/c	Fecha Elaboración	Fecha de Prueba	Time Curado (d)	Ciclo	Prueba	Especímen/ barra
TT	0.65	27/07/2017	14/02/2018	30	S	1	1a
TT	0.45	14/08/2017	14/02/2018	30	S	1	1a

Tabla 10. Determinación de la Velocidad y Potencial de corrosión. (Tipo de mezcla de concreto, relación a/c y barra a analizar). (García Chávez, 2019)

Como se mencionó con anterioridad, los especímenes de estudio se mantuvieron en ciclos de humedecimiento y secado (en una solución salina con 3.5% de NaCl) al momento de su utilización.

Los ciclos de humedecimiento y secado consisten en que los especímenes de las diferentes mezclas de concreto se mantienen en un periodo de 3 semanas en seco + 1 semana en húmedo (siendo un total de 4 semanas), lo que corresponde a un ciclo.

CICLOS DE HUMEDECIMIENTO- SECADO												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7	7	7	7	7	7	28	7	28	7	28	7	28

6 1er, Ciclo

Ciclo= 21+7

{ 3 semanas en seco + 1 semana en húmedo }

Tabla 11. Metodología correspondiente a los ciclos de humedecimiento y secado. (García Chávez, 2019)

- Se calcula el Área de exposición del acero en cm^2 con ayuda de la longitud y el diámetro de la barra de acero.

Potencial Equipo (Ecorr-mV)	Potencial (Ecorr-mV) Cu/CuSO	Longitud (cm)	Diámetro(cm)	Área de exposición (cm^2)	EW (peso equivalente, sin dimension)	Densidad del hierro (g/cm^3)	Rp (Ω) equipo
-15.65	-54	12.7	0.9525	38.71561832	27.9235	7.87	40850
3.805	-57	12.7	0.9525	38.71561832	27.9235	7.87	30730

Tabla 12. Cálculo del As, EW, Densidad, Ecorr y Rp. (García Chávez, 2019)

- Se determina el peso equivalente (EW), la densidad de la varilla de acero, y con el área de acero antes calculada,
- Con los resultados obtenidos con anterioridad se llenan los parámetros solicitados por el programa del potencióstato Gamry.

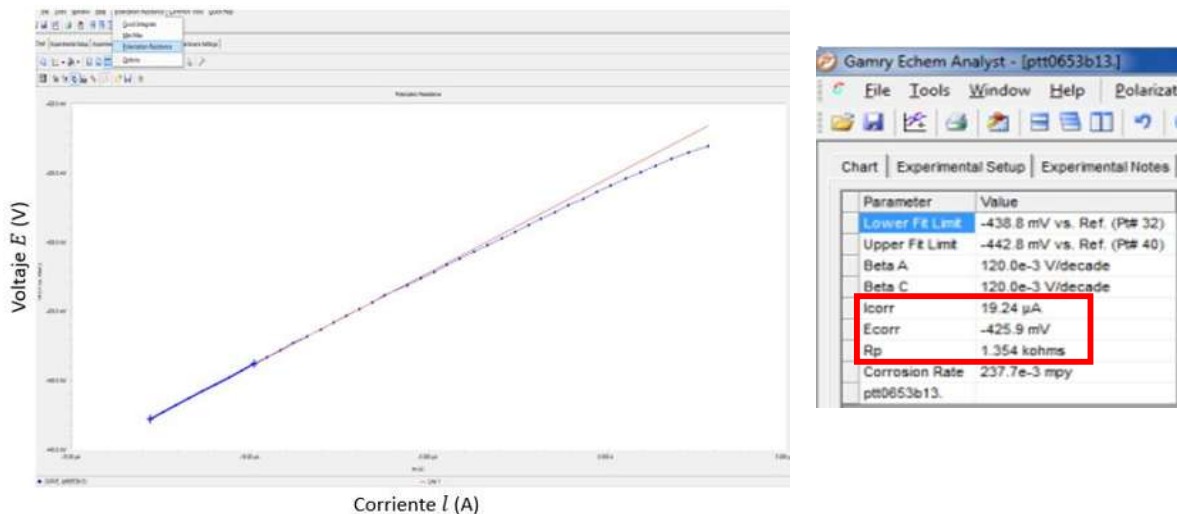


Ilustración 25. A la izquierda: Gráfica de Corriente i (A) vs Voltaje E (V), generada por el potenciostato. A la derecha: Resultados de la gráfica generada. (García Chávez, 2019)

Esta es calculada bajo un intervalo de prueba de -0.02V a +0.02V con una velocidad de barrido de 0.125 mV/s.

Se dice que $a > \text{pendiente} > \text{es la } RP_{\text{equipo}}$. (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010)

Con ayuda de la gráfica, se determina la RP_{equipo} , la cual se establece como la Resistencia a la Polarización Total entre el área destacada.

5. Determinación del Potencial real con Electrodo de Cu/CuSO₄

Para conocer de una manera más exacta el Potencial (E_{corr}), se utilizó un Electrodo RE-7, marca: McMILLER. Este es de los electrodos más utilizados debido a su alta confiabilidad de resultado.



Ilustración 26. electrodo RE-7 marca: McMILLER para determinación de Potencial (E_{corr}). (García Chávez, 2019)

6. Determinación de la RPL ($\Omega\text{-cm}^2$)

Rp real (Ω)	Rp ($\Omega\text{-cm}^2$)
40850	1581533.01
30730	1189730.95

$$R_p \text{ real } (\Omega) = R_p (\Omega) \text{ equipo} - \text{Resistencia Concreto } (\Omega)$$

$$R_p (\Omega\text{-cm}^2) = R_p \text{ real } (\Omega) * \text{Área de exposición } (\text{cm}^2)$$

Tabla 13. Determinación de la RPL en $\Omega\text{-cm}^2$. (García Chávez, 2019)

Se determinó la $R_{p \text{ real}}$ con ayuda del resistómetro (Ilustración 17) el cual es el resultado de la resistencia del concreto multiplicado por la $R_{p \text{ equipo}}$.

Una vez determinado la $R_{p \text{ real}}$, se multiplica por el Área de exposición del acero para obtener la RPL en $\Omega\text{-cm}^2$.

7. Determinación del factor B y la densidad de Corriente (i_{corr}).

Factor B, V (activo)	Factor B, V (pasivo)	Densidad de corriente de corrosión (B/Rp) (i_{corr}) ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) Ec2-G59
0.026	0.052	0.032879491
0.026	0.052	0.043707361

Tabla 14. Determinación de la Densidad de corriente (i_{corr}) con ayuda del factor B. (García Chávez, 2019)

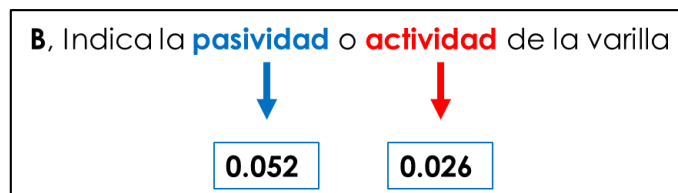


Ilustración 27. Factor B, el cual indica pasividad o actividad del acero de refuerzo. (García Chávez, 2019)

Como se mencionó con anterioridad, la constante (B) depende exclusivamente de las pendientes de Tafel, que son calculadas a partir de una curva de Tafel o de polarización, las cuales indican la pasividad o actividad de la varilla de acero de refuerzo embebida en el concreto. Para determinar cuál resultado de B tomar, se tiene que regir bajo la siguiente condicionante: Si $RPL < -250$; $B = 0.026$ (activo), si $RPL = 0$ a -250 ; $B = 0.052$ (pasivo).

Ahora bien, la densidad de corriente (i_{corr}) se determina mediante la (Ecuación 6) de Stern y Geary antes descrita y con base a la norma (ASTM-G59, 2003).

8. Determinación de la Velocidad de corrosión en mm/año.

EW (peso equivalente, sin dimension)	Densidad del fierro (g/cm ³)	Velocidad Corr (mm/año) Por fórmula y tabla de G102
27.9235	7.87	0.000381477
27.9235	7.87	0.000507104

Tabla 15. Determinación de la Velocidad de corrosión en mm/año. (García Chávez, 2019)

La determinación de la Velocidad de corrosión resulta de la siguiente

$$V_{corr} = \left(\frac{i_{corr} * EW}{densidad\ del\ fierro} \right)$$

Ecuación 9. Determinación de la Velocidad de corrosión en mm/año. (García Chávez, 2019)

Dónde:

V_{corr} = Velocidad de corrosión en mm/año

i_{corr} = Densidad de corriente $\frac{\mu A}{cm^2}$

EW = Peso equivalente, s/d

Densidad del fierro en g/cm²

Se llevará a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de la norma (ASTM-C876) para determinar el potencial de corrosión de los elementos de concreto reforzado.

Estos parámetros se evalúan conforme a la condición de corrosión y los riesgos de daño en los cuales se encuentre el acero de refuerzo en combinación con el concreto. Conforme a la norma, si los potenciales sobre un área son más positivos que -0.20 V hay una probabilidad del 90% de que no esté ocurriendo la corrosión en el acero, si están en el intervalo de -0.20 a -0.35 V es probable que esté ocurriendo el fenómeno de corrosión y para potenciales que son más negativos que -0.35 V hay más del 90% de probabilidad de que esté ocurriendo la corrosión del acero en el momento que se está realizando la prueba.

En la tabla siguiente se presentan los criterios de calificación del riesgo por corrosión del acero de refuerzo mediante la medición de los potenciales de corrosión (E_{corr}), de acuerdo con el Manual de la Red Durar (CYTED-DURAR, 1998).

CONDICIÓN	POTENCIAL (E)(ESC)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
Estado Pasivo	(+0.200 a -0.200)	Ausencia de Cl pH>12.5 H ₂ O (HR +)	Despreciable
Corrosión Localizada	(-0.200 a -0.600)	Cl, O ₂ , H ₂ O (HR+)	Alto
Corrosión Uniforme	(-0.150 a -0.600)	Carbonatado O ₂ , H ₂ O, (HR+)	Moderado alto
	(+0.200 a -0.150)	Carbonatado O ₂ , seco (HR-)	Bajo
	(-0.400 a -0.600)	Cl ⁻ Elevado, H ₂ O Carbonatado H ₂ O, (HR+)	Alto
Corrosión Uniforme	(<-0.600)	↑Cl ⁻ , ↑H ₂ O (sin O ₂)	Despreciable

Tabla 16. Criterio de valoración de Potenciales del acero en hormigón vs Cu/CuSO₄. (CYTED-DURAR, 1998)

En la tabla siguiente se presentan los criterios de calificación de riesgo de los valores de i_{corr} o velocidad de corrosión en términos de vida útil de acuerdo con el Manual de la Red Durar (CYTED-DURAR, 1998).

i_{corr} (μA/cm ²)	Velocidad de Corrosión (mm/año)	Nivel de Corrosión
<0.1	<0.00116	Despreciable
0.1-0.5	0.00116 - 0.0058	Moderada
0.5 - 1	0.0058 - 0.0116	Elevada
>1	>0.0116	Muy Elevada

Tabla 17. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil. (CYTED-RED DURAR, 1998)

3.10. Pruebas por durabilidad en el concreto

La durabilidad del hormigón de cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir durante un tiempo determinado (vida útil) la acción de la meteorización, corrosión del acero de refuerzo, ataques químicos, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente. (ACI 201.2R-01, 2000)

A continuación, se presentan los distintos tipos de pruebas correspondientes a durabilidad, de acuerdo a las distintas clases de exposición a las cuales puede estar sujeto el concreto colocado en una estructura en ambientes agresivos.

MÉTODO DE PRUEBA	REFERENCIA	
	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM, ISO, EN
Método de prueba estándar para la solidez del mortero por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.	NMX-C-075-ONNCCE-2006	ASTM-C-88-2013
Método de prueba estándar para la determinación de absorción capilar, porosidad total y efectiva en especímenes de concreto.	NMX-C-263-ONNCCE-2010 Red Durar, 2000	ASTM-C-128-2001
Método de prueba estándar para la determinación de la profundidad de carbonatación.	Red Durar, 2000	ISO 1920-12-2015 EN13295
Método de prueba estándar para la determinación de permeabilidad rápida de cloruros.	NMX-C-530-ONNCCE-2017 Red Durar, 2000	ASTM-C-1202-2012
Método de prueba estándar para la resistencia del hormigón a la congelación rápida y descongelamiento.	NMX-C-205-ONNCCE, 2005	ASTM C666 / C666M - 2015

Tabla 18. Normativa vigente correspondiente a los métodos de prueba para durabilidad. (García Chávez, 2019)

3.10.1. Determinación de la resistencia del concreto a los sulfatos de sodio

Este método de ensayo proporciona un medio para evaluar la resistencia de concretos elaborados con cemento portland, mezclas de cemento portland con puzolanas o escorias y cemento hidráulico combinado.

El ataque por sulfatos se manifiesta por la pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación (cemento-agregados).

La prueba para determinar la resistencia del concreto bajo los efectos del sulfato de sodio o sulfato de magnesio simula las condiciones de exposición a sales a las que se encuentran sometidos en la mayoría de los casos los elementos de concreto en ambientes agresivos (marinos) los cuales sufren constantes cambios. “En ambientes agresivos y de climas extremos, algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto son los iones de sulfato del suelo, del agua de mar o del agua freática. El sulfato reacciona primero con el aluminato tricálcico (C_3A); una

reacción subsecuente con la cal libre (CaO) produce una masa voluminosa que agrieta al concreto y fomenta un ataque extra. El ataque por sulfatos se manifiesta por la pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Los productos expansivos generan agrietamientos por donde posteriormente ingresan otros agentes que pueden acelerar el deterioro, como, por ejemplo, los iones cloruro.” (Bernabé Reyes, 2015)

El concreto atacado por sulfatos tiene un aspecto blanquecino característico, el daño suele iniciarse en los bordes y los ángulos, va seguido por agrietamientos y pérdidas de material progresivas que reducen el concreto a un estado frágil o incluso blando. (Rivera, 2016)

Para este estudio, se utilizaron 3 rodajas (5cm x 10cm) para las distintas mezclas de estudio, un total de 54 muestras. Se realizó a edades >650 días. La prueba fue de manera repetitiva para las distintas muestras de concreto, bajo las mismas condiciones de curado y temperatura.

Las pruebas se realizaron con lo siguiente:

- 3 discos de concreto de una altura de 5cm x 10cm de diámetro, extraídos de la parte superior, media e inferior de un cilindro de concreto de 10cm de diámetro x 20cm de altura, para la edad especificada y por cada mezcla en estudio.
- Sulfato de sodio (Na_2SO_4)
- Balanza con aproximación al décimo de gramo
- Parrilla eléctrica
- Termómetro
- Guantes de látex
- Recipientes de 19L aproximadamente.
- Taladro con extensión de espas mezcladoras
- Recipientes de plástico de 40cm x 75cm con tapa hermética
- Rejillas de plástico de una superficie aproximada de 35cm x 70 cm
- Horno de secado
- Charolas de acero inoxidable

Procedimiento:

1. Se extrajeron de la pila de curado 18 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10cm de diámetro x 20cm de altura, un espécimen por cada una de las mezclas de estudio.
2. Se cortaron cada uno de los cilindros en 3 rodajas con ayuda de la cortadora de roca, teniendo como resultado 3 discos de concreto por mezcla, con dimensiones de 5cm de espesor x 10cm de diámetro. Teniendo un total de 54 especímenes.



Ilustración 28. Cortadora de roca para extracción de rodajas de 5cm x 10cm. (García Chávez, 2019)

3. Se introdujeron al horno de secado (a una temperatura constante de $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) los especímenes hasta obtener masa constante, lo cual fue en un periodo de 4 meses aproximadamente.



Ilustración 29. A la izquierda: Especímenes secando en horno a temperatura constante de 50°C , A la derecha: Monitoreo de pesos hasta obtener masa constante. (García Chávez, 2019)

4. Una vez alcanzada la masa constante en cada uno de los especímenes, se realizó una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana (NMX-C-075-ONNCCE, 2006), con una concentración de 350g de sulfato por cada litro de agua destilada. El proceso de preparación de la solución consiste en disolver el sulfato en agua a una temperatura máxima de 40°C , calentando previamente el agua con ayuda de la parrilla eléctrica y determinando su temperatura con el termómetro. Se mezcla la solución en las cubetas de plástico de 19 litros con ayuda del taladro como se muestra en la figura Ilustración 30, por un tiempo mínimo de 30 min, evitando que al final de este proceso quede polvo o material contaminante en el recipiente del mismo. Se deja reposar 48h antes de su empleo, esto con la intención de que se formen los cristales de Na_2SO_4 . Se parte la costra de sulfato que se forme en la superficie del líquido y se agita completamente la solución.

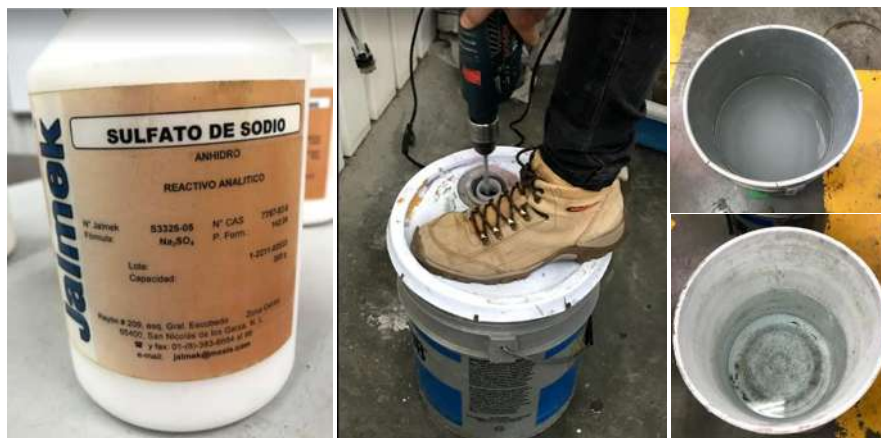


Ilustración 30. A la izquierda: Sulfato de sodio (Na_2SO_4). Al centro: Elaboración de la solución de Na_2SO_4 a temperatura $<40^\circ\text{C}$ con aspas mezcladoras. Derecha arriba: Solución de Na_2SO_4 sin disolverse en su totalidad. Derecha abajo: Solución de Na_2SO_4 con solución disuelta en su totalidad en el recipiente. (García Chávez, 2019)

5. De acuerdo a lo que demandaba la experimentación para 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes en solución de Na_2SO_4 , se prepararon 45 litros de solución, suficientes para la cantidad total de los ciclos de prueba.
6. Se preparan los recipientes de plástico (de 40cm x 75cm) colocándoles solución de Na_2SO_4 procurando mantener un tirante $>1.5\text{cm}$ por encima de la superficie de los especímenes y, además, verificando que éstos se encuentren apoyados sobre las rejillas de plástico (35cm x 70cm), esto con la intención de evitar que las rodajas de concreto tengan contacto directo con el fondo del recipiente de plástico, asegurando que los cristales de Na_2SO_4 puedan tener contacto directo con cada una de las caras de las rodajas. Una vez hecho esto, se colocan los especímenes (con masa constante) por encima de las rejillas de plástico, se coloca salmuera de Na_2SO_4 a un tirante $>1.5\text{cm}$ por encima de las rodajas y se tapan herméticamente para evitar pérdida de solución por evaporación y reducir la adición accidental de sustancias extrañas.



Ilustración 31. A la izquierda arriba: Preparación de recipientes de plástico con solución de Na_2SO_4 , A la derecha arriba: Colocación de rejillas de plástico para evitar contacto de las rodajas con el fondo del recipiente. Izquierda abajo: Colocación de los especímenes sobre la solución de Na_2SO_4 y de las rejillas de plástico. Derecha abajo: Colocación de Na_2SO_4 con un tirante $>1.5\text{cm}$ por encima de las rodajas, con la finalidad de que estas queden sumergidas en la salmuera. (García Chávez, 2019)

7. Los especímenes permanecen en la solución de Na_2SO_4 un intervalo de tiempo no menor de 16h ni mayor de 18h y a una temperatura ambiente de $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Una vez hecho esto, concluidas las 16 h, se extraen las rodajas con ayuda de los guantes de látex, retirando los cristales adheridos en la superficie de las muestras de concreto.



Ilustración 32. Extracción de los especímenes de la solución de Na_2SO_4 en un intervalo de tiempo entre 16h y 18h. (García Chávez, 2019)

8. Se secó superficialmente cada una de las rodajas y se llevó a cabo la prueba de Re, esto para determinar la porosidad vs ataque por sulfatos. Cabe mencionar que también se toma una evaluación de cómo se encuentra físicamente el espécimen analizado.



Ilustración 33. A la izquierda: Medición de la Re de los especímenes de estudio. A la derecha: Evaluación física del espécimen de estudio. (García Chávez, 2019)

9. Determinada una vez la Re, se colocan los especímenes en las charolas de acero inoxidable y se colocan en el horno de secado nuevamente a una temperatura constante de $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, monitoreando los pesos secos (Ws), y una vez estabilizando a una masa constante aprox. (intervalo de 1 semana de tiempo), se repiten los pasos del 7 al 9 hasta completar los 5 ciclos de prueba según la (NMX-C-075-ONNCCE, 2006).



Ilustración 34. Arriba izquierda: Colocación de las rodajas en charolas de acero inoxidable. Arriba derecha: Colocación de las charolas con los especímenes de estudio en el horno de secado hasta alcanzar su masa constante, Abajo: Monitoreo de Ws de cada uno de los especímenes hasta alcanzar masa constante. (García Chávez, 2019)

Observaciones y especificaciones:

Durante los ciclos de la prueba, las rodajas se sometieron al horno de secado durante 1 semana, la norma indica un tiempo de 24h, pero a una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, sin embargo; estudios recientes mencionan que a esas temperaturas se pueden romper los enlaces que conforman la matriz cementicia, es por eso que el tiempo de secado/ciclo fue de 1 semana a una temperatura constante de $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Al realizar los ciclos de prueba, debe tenerse el debido cuidado de no mezclar los recipientes en los que se contengan las muestras probadas, estas deben sumergirse siempre en su correspondiente recipiente y nunca en otro, aunque contenga solución preparada bajo las mismas condiciones. “Cuando la masa de los especímenes sea $>5\%$ se informa como pérdida de masa crítica y en ese momento se considera que el material es insuficiente, registrándose así, como su ciclo de falla”. (NMX-C-075-ONNCCE, 2006)

3.10.2. Determinación de la profundidad de carbonatación en concreto

La carbonatación, es la reducción de la alcalinidad normal (pH entre 12-14) del concreto por efecto del CO_2 que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO_2 reacciona con los álcalis (usualmente hidróxidos de calcio, sodio y potasio) neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10. (CYTED-RED DURAR, 1998)

La prueba para la determinación de la carbonatación en elementos de concreto, tiene como objetivo principal, estimar el avance de la carbonatación en el concreto por el método de vía húmeda con solución de indicador ácido-base. El contenido de humedad relativa del ambiente es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50%–70% aproximadamente, ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso.

Para este estudio, se utilizaron 3 rodajas por mezcla, las cuales, se colocaron a la intemperie en dirección de los vientos dominantes de la ciudad de Morelia, mismos que apuntan en dirección Suroeste.

Las rodajas se dejaron expuestas a la intemperie por más de 6 meses, que es lo que marca la Norma (ISO-1920-12, 2015). Las edades con que contaban los especímenes hasta el día de la prueba fueron >700 días.

Las pruebas se realizaron con lo siguiente:

- Máquina cortadora de roca.
- Solución de parafina y brea.
- Instrumentos de medición: escala de pH, vernier.
- Herramientas para escindir los especímenes: cincel y marro.
- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína.
- Atomizador.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de la pila de curado 18 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10cm de diámetro x 20cm de altura, un espécimen por cada una de las mezclas de estudio.
2. Se cortaron cada uno de los cilindros en 3 rodajas con ayuda de la cortadora de roca, teniendo como resultado 3 discos de concreto por mezcla, con dimensiones de 5cm de espesor x 10cm de diámetro. Teniendo un total de 54 especímenes. Una vez cortados, se cubrió el perímetro de la rodaja con parafina.



Ilustración 35. A la izquierda: cortadora de roca para extracción de rodajas. Al centro: cubierta de parafina en muestras. A la derecha: rodaja cubierta de parafina . (García Chávez, 2019)

3. Las 3 rodajas de cada mezcla de estudio (54 rodajas en total) se colocaron a la intemperie, al Suroeste de la ciudad de Morelia de acuerdo a la dirección de los vientos dominantes y, por lo tanto; la dirección más favorable para que sufrieran carbonatación.



Ilustración 36. A la izquierda: 54 rodajas de concreto con cubierta de parafina. A la derecha: rodajas expuestas a la intemperie en dirección suroeste para tener contacto directo con CO₂. (García Chávez, 2019)

4. Una vez alcanzada la edad de prueba (6 meses según la normativa) de cada mezcla en estudio, se cortaron del centro de la muestra de manera transversal con ayuda de un cincel y un marro sin dañar las caras exteriores de la muestra.



Ilustración 37. Corte transversal del espécimen con ayuda de marro y cincel. (García Chávez, 2019)

5. Después de que se realiza el corte transversal se limpió inmediatamente la cara interna de la muestra de forma que la cara de prueba quedara libre de polvo.



Ilustración 38. Rodaja libre de polvo y lista para analizar. (García Chávez, 2019)

6. A las rodajas se les aplicó con un atomizador de manera uniforme a cada una de las caras la solución de fenolftaleína, la cual se preparó previamente con una concentración de 2g fenolftaleína + 48ml alcohol + 50ml agua.



Ilustración 39. Preparación y colocación de la solución de Fenolftaleína a los especímenes de estudio. (García Chávez, 2019)

7. Una vez presentado el color característico del indicador de pH (color morado), se tomó la profundidad de carbonatación midiendo cada lado del corte con ayuda del vernier, obteniendo un valor promedio de la profundidad de carbonatación de cada lado para cada espécimen. La profundidad de carbonatación es la longitud en mm que no se pigmenta.



Ilustración 40. Medición de la carbonatación en mm, con ayuda de vernier. (García Chávez, 2019)

Se considera la edad de exposición que tuvieron los especímenes para hacer una proyección del daño (profundidad de carbonatación) en el transcurso del tiempo con la ecuación siguiente:

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

Ecuación 10. Constante de carbonatación promedio, en (mm/año^{0.5}).

Dónde:

- X_{CO_2} = profundidad de carbonatación, en mm
- t = tiempo de exposición en, años^{0.5}

Para obtener la profundidad teórica en (mm), se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Profundidad teórica (mm)} = \sqrt{t} * K_{CO_2}$$

Ecuación 11. Profundidad teórica de carbonatación, en (mm).

3.10.3. Determinación de la permeabilidad rápida de iones cloruro

Desde su lanzamiento, la prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido usada frecuentemente en la evaluación de la durabilidad en las estructuras de concreto, ya que se puede establecer, en un tiempo relativamente corto, la determinación de la permeabilidad del material, dentro de un nivel de calidad que permite comparar concretos en cuanto a esta característica.

El ataque por cloruros en una estructura de concreto reforzado se distingue por la corrosión del acero de refuerzo y, como consecuencia de ésta es que se daña el concreto circundante. (Neville, 1999)

El ataque por cloruros al concreto puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla (áridos contaminados, agua de mar, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al concreto, entre otros.

Existen dos tipos de iones cloruro: cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente con el aluminato tricálcico (C₃A) presente en la pasta para así formar cloroaluminatos cálcicos, compuesto conocido como “Sal de Friedel”, que, a diferencia de la etringita, no resulta ser expansiva. Por el contrario, los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo, donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo. (Otieno, M., & Beushausen, 2010)

La movilidad de los iones cloruro dentro del concreto está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación a/c, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. La presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y

reducen la permeabilidad, mejorando la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013)

Una prueba rápida para la permeabilidad de los iones cloruro dentro del concreto es prescrita por la norma (ASTM-C-1202, 2012), la cual, determina la conductancia eléctrica, expresada como la carga eléctrica total en coulombios (amperio-segundos) pasada durante un cierto intervalo de tiempo (6 horas) a través de un disco de concreto, entre soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio cuando se mantiene una diferencia de potencial 60 V, polarizando las dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruros a penetrar en el concreto.

La edad de los especímenes es un factor fundamental en los resultados de la prueba, las normas para pruebas de permeabilidad no indican una edad de manera estricta, pero es recomendable que se hagan a edades tardías de 90 días o más; debido a que en este periodo la reacción del Ca(OH)_2 con los cementantes, ha alcanzado un desarrollo óptimo, sobre todo cuando se contemplan adiciones minerales. Cuando son probados en especímenes de edades menores a los 28 días, se pueden producir incrementos súbitos en el amperaje y, con ellos, en la temperatura de las soluciones, modificando la velocidad de hidratación de los C-H-S y la naturaleza de la estructura porosa. (Martínez Sánchez, Flores Martínez, Uribe Afif, & Medina Hernández, 2003)

Dado lo anterior, en la presente investigación se contemplaron edades >600 días para las distintas mezclas de estudio. La prueba fue de manera repetitiva para las distintas muestras de concreto, bajo las mismas condiciones de curado y temperatura.

Las pruebas se realizaron con lo siguiente:

- 3 discos de concreto de una altura de 5cm y 10cm de diámetro, extraídos de la parte superior, media e inferior de un cilindro de concreto de 10cm de diámetro x 20cm de altura, para la edad especificada y por cada mezcla en estudio.
- Equipo automatizado (Perma2™)
- Báscula o balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Probeta graduada.
- Embudos pequeños.
- Solución de NaOH al 1.2%
- Solución de NaCl al 3%

Procedimiento:

1. Se extrajeron de la pila de curado 18 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10cm de diámetro x 20cm de altura, un espécimen por cada una de las mezclas de estudio.



Ilustración 41. Especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm de cada una de las mezclas. (García Chávez, 2019)

2. Se cortaron cada uno de los cilindros en 3 rodajas con ayuda de la cortadora de roca, teniendo como resultado 3 discos de concreto por mezcla, con dimensiones de 5cm de espesor x 10cm de diámetro. Teniendo un total de 54 especímenes. Una vez cortados, se sumergieron dentro de un contenedor para seguir con el proceso de curado, hasta el momento de la realización de la prueba.



Ilustración 42. A la izquierda: Cortadora de roca, A la derecha: Rodajas de 10cm x 5cm. (García Chávez, 2019)

3. Se prepararon dos soluciones: hidróxido de sodio (NaOH) al 1.2% y cloruro de sodio (NaCl) al 3%, ambas con un 100% de pureza. Lo equivalente a 12g de NaOH y 30g de NaCl por cada 100ml de agua destilada.



Ilustración 43. Solución de NaOH al 1.2% y, solución de NaCl al 3%. (García Chávez, 2019)

4. Se limpiaron las celdas y se colocaron empaques en los bordes de la pastilla de concreto para que no tenga pérdida de sustancias a la hora de la prueba. Las celdas se sujetaron con tornillos que están en las esquinas para confinar la pastilla. Con ayuda de dos embudos (cada uno para una solución distinta) se llenaron completamente las celdas, las cuales, en cada extremo cuentan con un orificio para la introducción de la solución (marcada en la celda).



Ilustración 44. A la izquierda: Tornillos para sujetar las celdas y mantener en confinamiento las pastillas, A la derecha: Embudos por los cuales se vertió cada una de las soluciones. (García Chávez, 2019)

5. Se conectaron las terminales positivo y negativo (rojo y negro respectivamente) a la fuente de carga, además de conectar un medidor de temperatura en donde está contenido el Hidróxido de Sodio (NaOH).



Ilustración 45. Terminales positivo y negativo respectivamente, así como medidor de temperatura en la solución de NaOH. (García Chávez, 2019)

6. Posteriormente, se inició el programa en el ordenador. Cabe mencionar que se conectaron 4 pastillas por prueba. El proceso requiere de 6 horas para realizar la prueba y, transcurrido este tiempo, se registra la lectura en Coulombs de cada una de las pastillas.



Ilustración 46. A la izquierda: 4 pastillas con el centro de control, A la derecha: programa del ordenador para llevar a cabo las lecturas. (García Chávez, 2019)

- Se llevará a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de evaluación de la Norma (ASTM-C-1202, 2012) para determinar la resistencia a la penetración por iones cloruro. Estos parámetros se evalúan en criterios de penetrabilidad de iones cloruro basada en la carga (C), como se especifica en la tabla siguiente:

Permeabilidad rápida de cloruros (ASTM C1202)	
Carga (Coulombs)	Penetrabilidad de iones cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Despreciable

Tabla 19. Criterio de Penetrabilidad de iones de cloruro basada en la carga, con base a la Norma (ASTM-C-1202, 2012).

Observaciones y especificaciones

Se tomó a consideración que una vez cortadas todos los discos en rodajas, se mantuvieron en una tina de curado a temperatura ambiente hasta el día de su prueba, con la finalidad de no alterar la saturación de los especímenes conforme a lo especificado en la Norma (ASTM-C-1202, 2012).



Ilustración 47. Tina de curado en la cual se mantuvieron las rodajas hasta el momento de su prueba. (García Chávez, 2019)

Para cada una de las rodajas, se llevó a cabo un análisis previo de R_e con la ayuda de un Resistómetro marca RCON™, con la finalidad de poder hacer una comparativa del comportamiento de permeabilidad vs porosidad. En la Ilustración 48, se muestra el procedimiento de la misma.

Primeramente, se humedecen dos esponjas y se colocan dentro de las placas de cobre que irán conectadas a las terminales (positivo y negativo) del aparato, seguido se seca superficialmente el espécimen a analizar y se sitúa al centro de las placas sobre las esponjas húmedas, las placas deben de emparejarse una sobre la otra y, una vez hecho esto, automáticamente el Resistómetro toma la lectura de la resistividad eléctrica con una frecuencia de 1.0 KHz. Cabe mencionar que al Resistómetro deben de adecuarse las medidas características de la probeta a analizar antes de llevar a cabo la prueba en cuestión.



Ilustración 48. Resistómetro (RCON™) para medir la R_e de los especímenes de estudio. (García Chávez, 2019)

Dentro de la norma (ASTM-C-1202, 2012) se encuentra una tabla de especificaciones, la cual menciona que, dependiendo del tipo de relación a/c con la que hayamos realizado nuestras mezclas, es el tipo de comportamiento que se presentará (aproximadamente) de las mismas. Dicho esto, esperaríamos un comportamiento conforme a la tabla de tipo de permeabilidad “Alta a Moderada”, o lo que es; entre 2000 a 4000 C, debido a las relaciones a/c utilizadas en las mezclas de estudio que varían entre 0.45 y 0.65.

Coulombs	Tipo de permeabilidad	Tipo de relaciones a/c
> 4000	Alta	>0.5
4000-2000	Moderada	0.4 a 0.5
2000-1000	Baja	<0.4
1000-100	Muy baja	concretos con látex
< 100	Despreciable	concretos con polímeros

Tabla 20. Tipo de permeabilidad por penetración rápida de ion cloruro. (ASTM-C-1202, 2012) (García Chávez, 2019)

4. Resultados

4.1. Resultados de caracterización de los materiales

El caracterizar el agregado no solo consiste en conocer las condiciones actuales en las que se encuentra el material a utilizar, si no también, para obtener un mejor diseño de mezclas y a su vez, un mejor desempeño de las mismas.

A continuación, se muestran las normativas vigentes con que se llevaron a cabo las pruebas a los materiales de agregado pétreo, ya sean finos o gruesos.

PRUEBAS DE LABORATORIO	NORMAS NMX	NORMAS ASTM
Prueba estándar para el muestreo de los agregados pétreos.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Prueba estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	NMX-C-170-ONNCCE
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-03	ASTM-D-2419-02

Tabla 21. Normativas vigentes con que se llevaron a cabo las pruebas a los materiales de agregado pétreo.

Si bien, por cuestiones de practicidad, no se explicarán cada uno de los procedimientos de las pruebas de caracterización realizadas a los materiales pétreos ya sean gruesos o finos, sin embargo, si se explicarán los resultados en las conclusiones de las pruebas más relevantes de la caracterización con base a los parámetros establecidos en la normatividad utilizada.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados pétreos de las diferentes pruebas de laboratorio.

Prueba	Especificación de Normativa	Arena de Joyitas	Grava convencional	Grava reciclada
M.V.S.S. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	No establece	1.34 g/cm ³	1.40 g/cm ³	1.15 g/cm ³
M.V.S.V. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	No establece	1.50 g/cm ³	1.54 g/cm ³	1.28 g/cm ³
Humedad de Absorción (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)	2 % - 4 %	3.50 % <i>media</i>	1.60 % <i>baja</i>	6.05 % <i>alta</i>
Densidad (NMX-C-165-ONNCCE, 2014)	> 2.15 g/cm ³	2.40 g/cm ³ <i>acceptable</i>	2.64 g/cm ³ <i>acceptable</i>	2.16 g/cm ³ <i>acceptable</i>
Contenido de material fino (pasa malla ASTM No. 200) (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)	5% máx	4.41% <i>acceptable</i>	0% <i>acceptable</i>	0.58% <i>acceptable</i>
Módulo de Finura (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)	2.3 – 3.2	2.7 <i>acceptable</i>	-	-
Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)	0.5-1% máx	0.65% <i>acceptable</i>	-	-
Equivalente de arena (NMX-C-416-ONNCCE, 2003)	85% mín	92.1% <i>acceptable</i>	-	-
Colorimetría (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)	No. 3 máx	No. 2 <i>acceptable</i>	-	-

Tabla 22. Resultados obtenidos de la caracterización de los agregados pétreos de las diferentes pruebas de laboratorio.

4.1.1.1. Granulometría en el agregado fino (arena) de Joyitas.

La siguiente gráfica muestra el análisis granulométrico de la muestra representativa de arena, la cual nos sirve para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura. El área delimitada por las líneas punteadas son las especificaciones dentro de las cuales deberá quedar la granulometría del material analizado para usarse en la fabricación de concreto hidráulico.

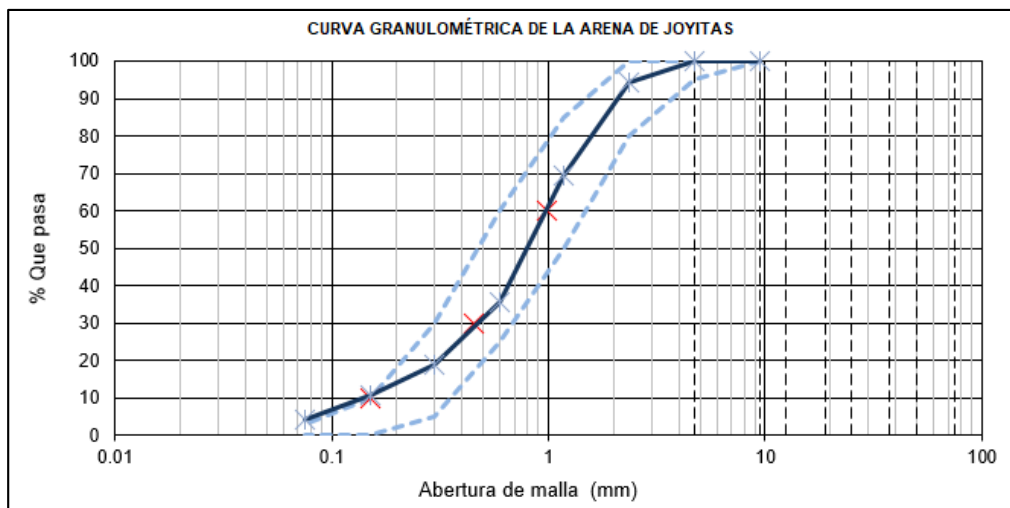


Ilustración 49. Curva Granulométrica de la Arena de Joyitas la Unión. (García Chávez, 2019)

Podemos observar que la composición granulométrica de la arena se encuentra dentro de los límites establecidos para agregados finos. El módulo de finura (M.F)=2.7 se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018)

Los puntos rojos marcados por una cruz, indican los tamaños de las partículas del 10, 30 y 60% en masa del material para calcular los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) y poder determinar la graduación y tipo de suelo de acuerdo a la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Con base a al manual (M-MMP-1-02, 2003).

Contenido de Arena =	95.6 %	Contenido de Finos =	4.4 %	Clasificación SUCSC Arena Bien Graduada (SW)
D10 =	0.2 mm	C_u =	6.60	
D30 =	0.5 mm	C_c =	1.36	
D60 =	1.0 mm			

Tabla 23. Clasificación SUCS de la arena de Joyitas La Unión. (García Chávez, 2019)

4.1.2. Granulometría en el agregado grueso (grava convencional T.M. ½")

La siguiente gráfica muestra el análisis granulométrico de la muestra representativa del agregado pétreo convencional de la empresa TRACSA, con un tamaño máximo de agregado (T.M.) = ½".

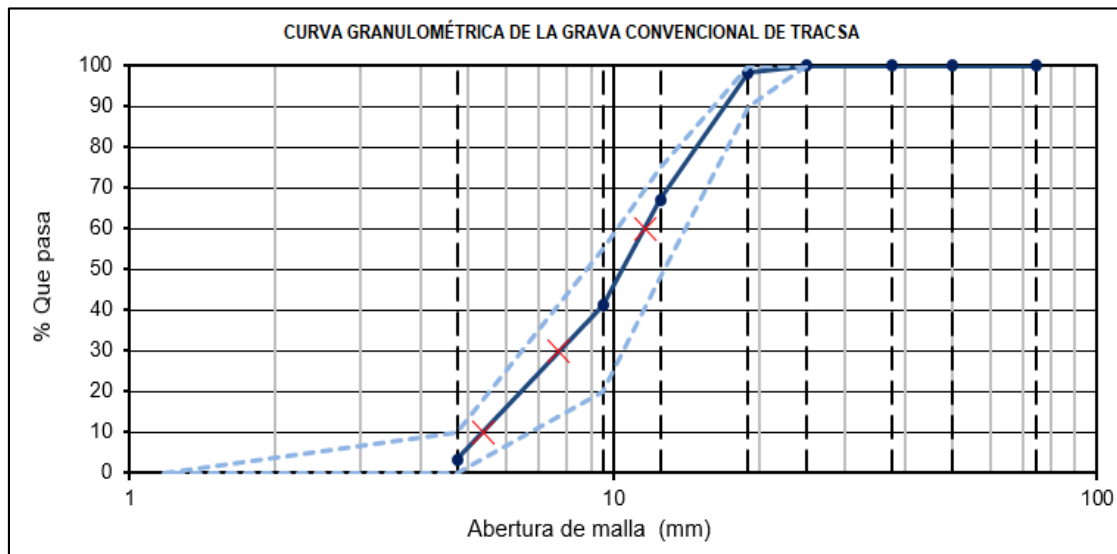


Ilustración 50. Curva Granulométrica de la Grava convencional de TRACSA. (García Chávez, 2019).

Podemos observar que la composición granulométrica de la grava se encuentra dentro de los límites establecidos para agregados gruesos.

De acuerdo a la clasificación SUCS y con base al manual (M-MMP-1-02, 2003) tenemos los siguientes resultados:

Contenido de Arena =	3.3 %	Contenido de Grava =	96.7 %	Clasificación SUCS Grava Mal graduada (GP)
D10 =	5.4 mm	Cu =	2.15	
D30 =	7.7 mm	Cc =	0.95	
D60 =	11.6 mm			

Tabla 24. Clasificación SUCS de la grava convencional de T.M.=1/2" de la Empresa TRACSA. (García Chávez, 2019)

4.1.3. Granulometría en el agregado grueso (grava reciclada T.M. $\frac{3}{4}$ ")

La siguiente gráfica muestra el análisis granulométrico de la muestra representativa del agregado pétreo reciclado de la torre demolida del IMSS, con un tamaño máximo de agregado (T.M.) = $\frac{3}{4}$ ".

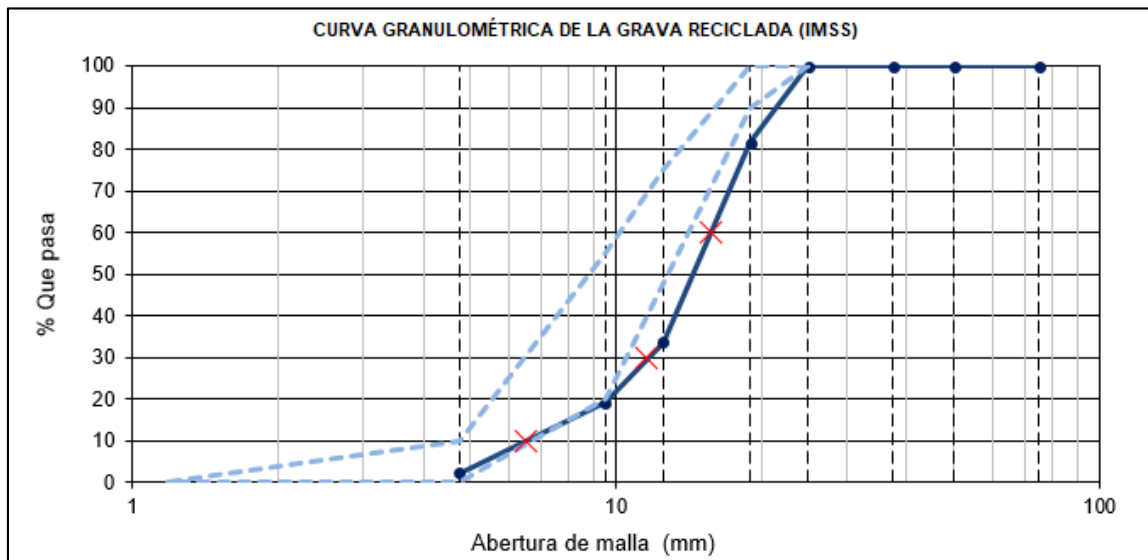


Ilustración 51. Curva Granulométrica de la Grava reciclada (IMSS). (García Chávez, 2019).

Podemos observar que la composición granulométrica de la grava se sale de los límites establecidos para agregados gruesos.

De acuerdo a la clasificación SUCS y con base al manual (M-MMP-1-02, 2003) tenemos los siguientes resultados:

Contenido de Arena = 2.3 %		Contenido de Grava = 97.7 %		Clasificación SUCS Grava Mal graduada (GP)
D10	= 6.5 mm	Cu	= 2.42	
D30	= 11.6 mm	Cc	= 1.32	
D60	= 15.7 mm			

Tabla 25. Clasificación SUCS de la grava reciclada de T.M.= $\frac{3}{4}$ " de la Torre del IMSS. (García Chávez, 2019)

4.1.4. Resultados del análisis del agua utilizada para la elaboración de mezclas de concreto

Muestra:	Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo			
Sitio de muestreo:	Laboratorio de Materiales			
Norma de referencia:	NMX-C-122-ONNCCE-2004			
Parámetro	Resultado	Límite Permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	3.37	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálrica	21	-----	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

Tabla 26. Resultados del análisis del agua para la elaboración de mezclas de concreto.

Los resultados obtenidos en este análisis muestran que el agua es apropiada para la elaboración del espécimen y la realización del curado ya que no posee un componente que pueda llegar a alterar la composición del mismo (Pedraza Pérez, 2014).

4.2. Resultados de las pruebas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microanálisis Químico Elemental vía EDS.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas con ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). Los valores 1, 2 y 3 en las imágenes del MEB indican los puntos en donde se llevó a cabo el Microanálisis Químico vía EDS (Sistema de Energía Dispersiva).

En los siguientes Microanálisis podremos observar del lado derecho la gráfica de elementos por medio del Microanálisis Químico Elemental vía EDS, el cual, presenta los % en cantidad de cada uno de los elementos químicos encontrados (véase Tabla 27).

TABLA DE % DE ANÁLISIS QUÍMICO VÍA EDS								
ELEMENTOS	CHT0.45	CHT0.65	CHR0.45	CHR0.65	CCT0.45	CCT0.65	CCR0.45	CCR0.65
C	1.65	5.41	4.73	2.68	3.01	0.48	0.00	0.48
O	93.98	81.05	62.62	29.80	65.43	80.92	90.52	84.05
Al	0.08	0.81	3.47	3.20	0.40	1.20	0.56	1.71
S	0.05	2.07	5.55	6.52	0.22	0.13	0.00	1.08
Ca	3.28	9.50	23.45	24.01	22.45	8.43	2.76	6.38
Si	0.36	0.34	0.18	0.22	6.65	5.46	3.21	4.14
Ni	0.00	0.00	0.00	32.52	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.61	0.83	0.00	1.04	1.83	2.45	2.15	1.87
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.36	0.30
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.43	0.00
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
Suma	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabla 27. Tabla de % de composición elemental de la prueba de Microanálisis Químico Elemental EDS. (García Chávez, 2019)

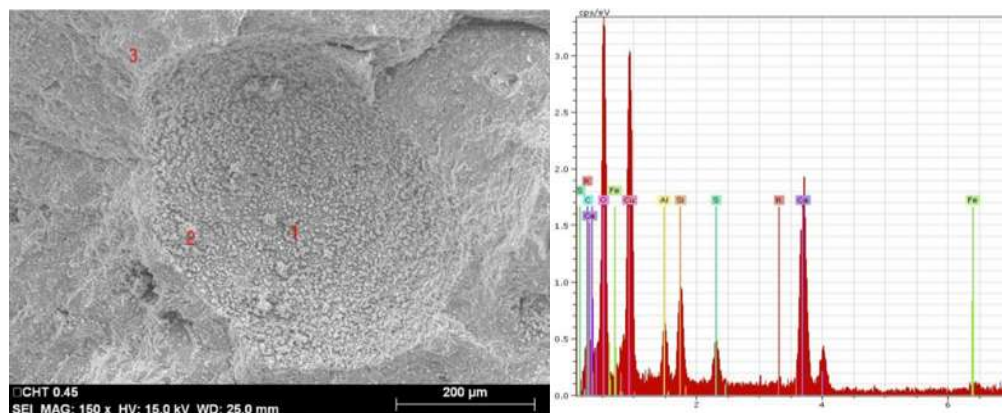


Ilustración 52. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHT0.45 con MEB a 150x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 52, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 150x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo convencional y CH como adición, con una relación a/c=0.45. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) contenidos de Aluminio (Al) en un 0.08%, Calcio (Ca) en un 3.28%, Oxígeno (O) en un 93.98% y Silicio (Si) en un 0.36% lo cual se puede traducir en contenidos de: Alúmina (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO) y

Óxido de Silicio (SiO_2). En el punto 2 encontramos características muy similares al punto 1 y en el punto 3 (que corresponde a la superficie de la matriz) encontramos más contenido de Si en un 0.78% y Ca en un 6.98%.

Podemos encontrar en el Microanálisis Electrónico de Barrido que las partículas de Alúmina (Al_2O_3), Cal (CaO) y Sílice (SiO_2) se encuentran morfológicamente distribuidas uniformemente dentro de todos los poros de la matriz cementicia.

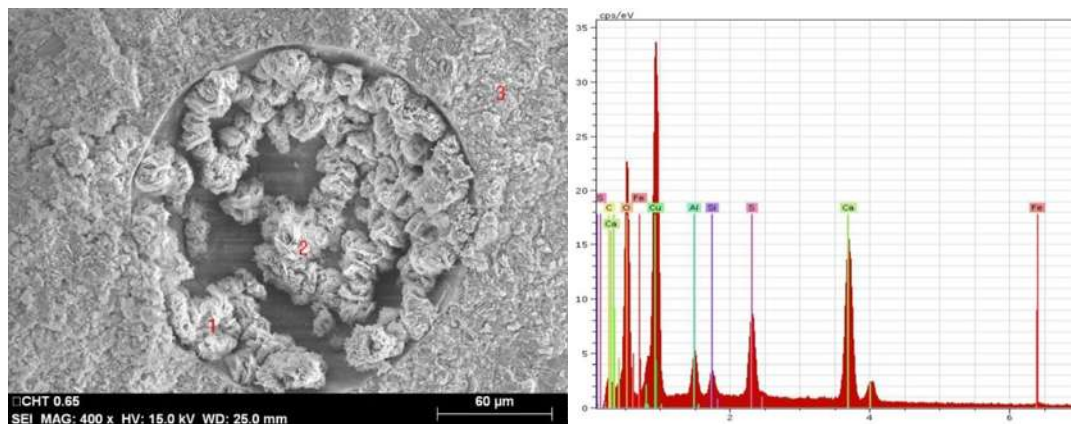


Ilustración 53. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHT0.65 con MEB a 400x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 53, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 400x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo convencional y CH como adición, con una relación $a/c=0.65$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) altos contenidos de Oxígeno (O) en un 81.05%, Calcio (Ca) en un 9.50%, Carbono (C) en un 5.41% y Silicio (Si) en un 0.34%. Lo cual se traduce en contenidos de: Cal (CaO), Carbonato de calcio (CaCO_3) y Sílice (SiO_2). Podemos observar que la distribución de las puzolanas en el poro se encuentran morfológicamente dispersas, sin embargo, contienen mayor contenido de Alúmina (Al_2O_3) que las relaciones $a/c=0.45$.

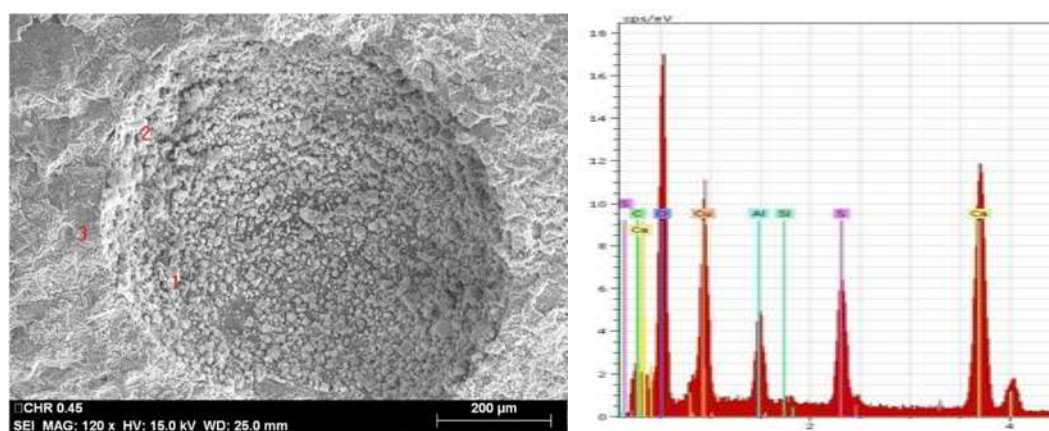


Ilustración 54. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHR0.45 con MEB a 120x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 54, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 120x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo reciclado y CH como adición, con una relación $a/c=0.45$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) altos contenidos de Aluminio (Al) en un 3.47%, Calcio (Ca) en un 23.45%, Oxígeno (O) en un 62.62% lo cual se puede traducir en altos contenidos de: Óxido de Aluminio (Al_2O_3) y Óxido de calcio (CaO).

Encontramos una mejor distribución de los elementos aluminosilíceos dentro de la estructura del poro y al mismo tiempo una mayor concentración de Alúmina (Al_2O_3), Cal (CaO) y Sílice (SiO_2).

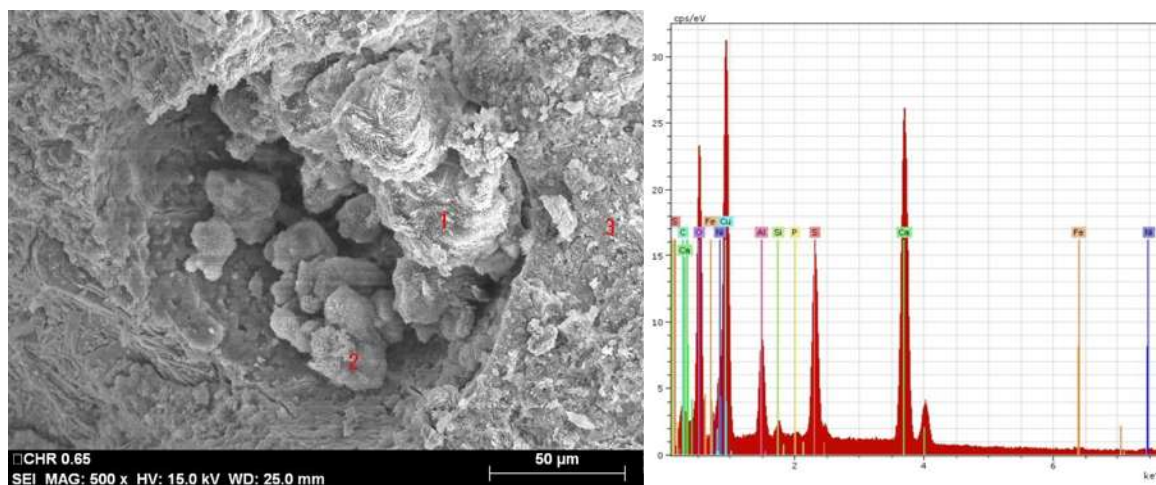


Ilustración 55. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CHR0.65 con MEB a 120x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 55, se llevó a cabo el Microanálisis on EDS a 500x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo reciclado y CH como adición, con una relación $a/c=0.65$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) altos contenidos de Aluminio (Al) en un 3.20%, Calcio (Ca) en un 24%, Oxígeno (O) en un 29.79% Y Níquel (Ni) en un 32.52% lo cual se puede traducir en contenidos de: Alúmina (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO) y Óxido de Silicio (SiO_2).

Podemos percibir que las partículas dentro del poro de la matriz cementicia se encuentran un poco dispersas, sin embargo, cuentan con altos contenidos de Alúmina (Al_2O_3), Cal (CaO) y Sílice (SiO_2).

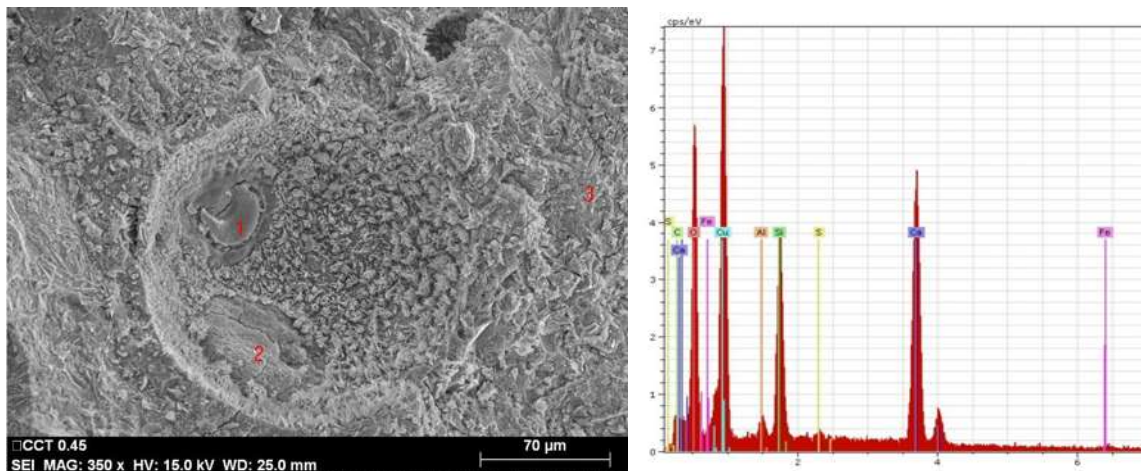


Ilustración 56. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.45 con MEB a 350x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 56, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 350x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo convencional y CC como adición, con una relación $a/c=0.45$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) contenidos de Aluminio (Al) en un 0.40%, Calcio (Ca) en un 22.5%, Oxígeno (O) en un 65.43%, Carbono (C) en un 3.01% y Silicio (Si) en un 6.65% lo cual se puede traducir en contenidos de: Óxido de Aluminio (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO), Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) y Óxido de Silicio (SiO_2).

Encontramos una mejor distribución de los elementos alumino-silíceos dentro de la estructura del poro y al mismo tiempo una mayor concentración de Alúmina (Al_2O_3), Cal (CaO), Carbonato de calcio ($CaCO_3$) y Sílice (SiO_2). Cabe mencionar que la estructura de la CC no se presenta en forma de lajas como se esperaba que fueran. Sin embargo, cumple con los requisitos que estamos buscando.

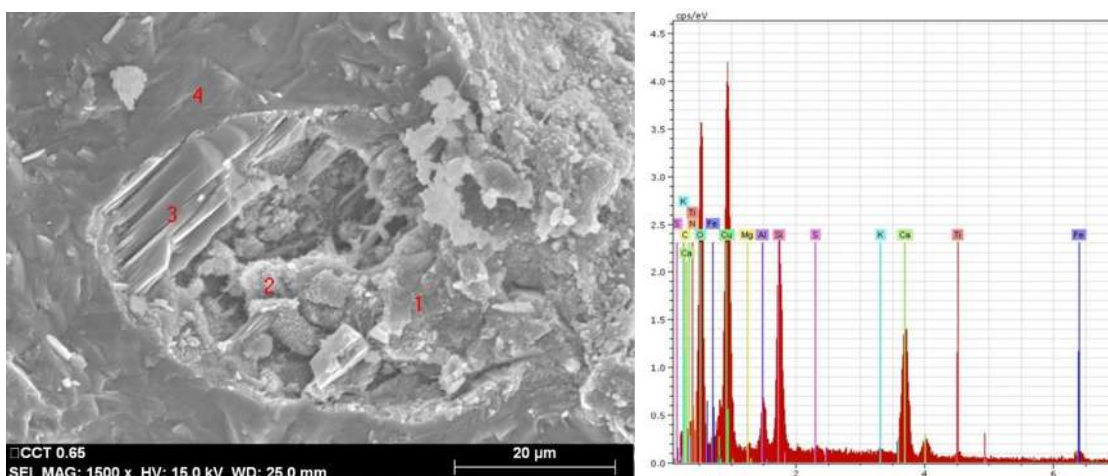


Ilustración 57. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 1500x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 57, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 1500x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo convencional y CC como adición, con una relación $a/c=0.65$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) contenidos de Aluminio (Al) en un 1.20%, Calcio (Ca) en un 8.43%, Oxígeno (O) en un 80.92%, Hierro (Fe) en un 2.45% y Silicio (Si) en un 5.46% lo cual se puede traducir en contenidos de: Óxido de Aluminio (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO), y Óxido de Silicio (SiO_2).

Si bien podemos observar dentro de la morfología una buena distribución de las partículas Aluminio-Silíceas, vemos mayor concentración de Sílice (SiO_2), lo que es posible debido a la relación a/c alta, por lo que se tiene mayor humectación de las partículas recordando que la microestructura de la CC tiene la capacidad de absorción de agua. Aunado a esto vemos altas concentraciones de Alúmina (Al_2O_3) y Cal (CaO), así como posiblemente el compuesto Ferritoaluminato tetracálcico ($Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$) que habitualmente se denomina Clinker siendo el compuesto de los cementos Portland.

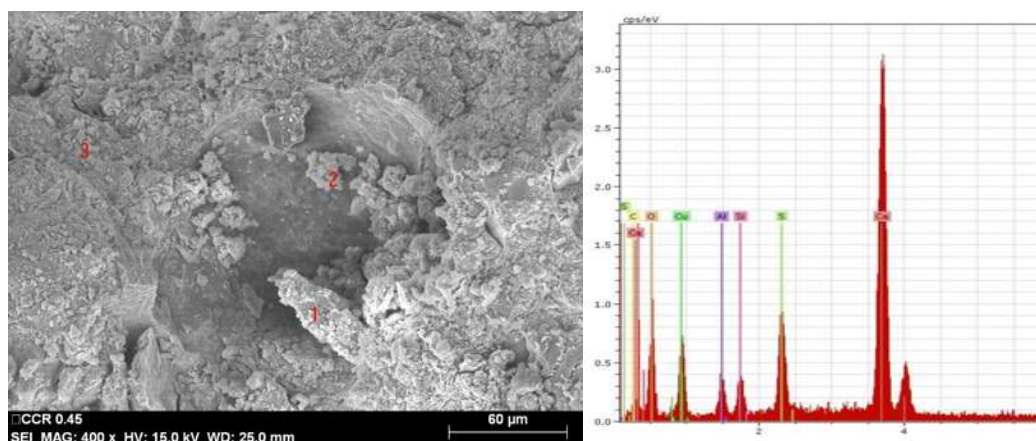


Ilustración 58. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 1500x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 58, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 400x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo reciclado y CC como adición, con una relación $a/c=0.45$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) contenidos de Aluminio (Al) en un 0.56%, Calcio (Ca) en un 2.76%, Oxígeno (O) en un 90.52%, Hierro (Fe) en un 2.15% y Silicio (Si) en un 3.21% lo cual se puede traducir en contenidos de: Óxido de Aluminio (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO), Óxido de Silicio (SiO_2) y Ferritoaluminato tetracálcico ($Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$).

Dentro de la estructura morfológica vemos una distribución pobre de estos elementos y compuestos.

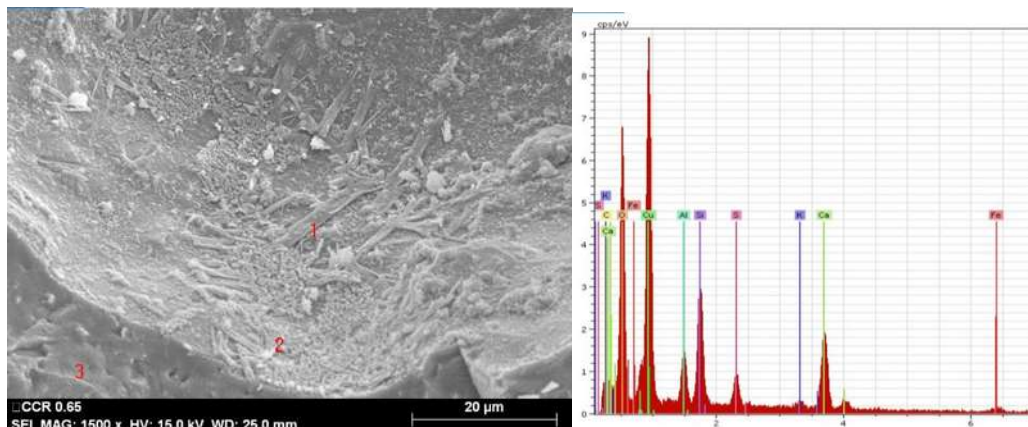


Ilustración 59. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 1500x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 59, se llevó a cabo el Microanálisis con EDS a 1500x de una mezcla de concreto, la cual contiene agregado pétreo reciclado y CC como adición, con una relación $a/c=0.65$. Como podemos observar, se tomó como referencia un poro, el cual contiene en su interior (punto 1) contenidos de Aluminio (Al) en un 1.71%, Calcio (Ca) en un 6.38%, Oxígeno (O) en un 84.05%, Hierro (Fe) en un 1.87% y Silicio (Si) en un 4.14% lo cual se puede traducir en contenidos de: Óxido de Aluminio (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO), Óxido de Silicio (SiO_2) y Ferritoaluminato tetracálcico ($Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$).

Dentro de la estructura morfológica vemos una distribución pobre de estos elementos y compuestos, en otros poros de la misma matriz cementicia vemos una composición morfológica similar a la CHR (véase Ilustración 60) en la cual presenta altos niveles en % de Aluminio (Al) en un 3.11%, Oxígeno (O) en un 64.30% y Calcio (Ca) en un 21.82%.

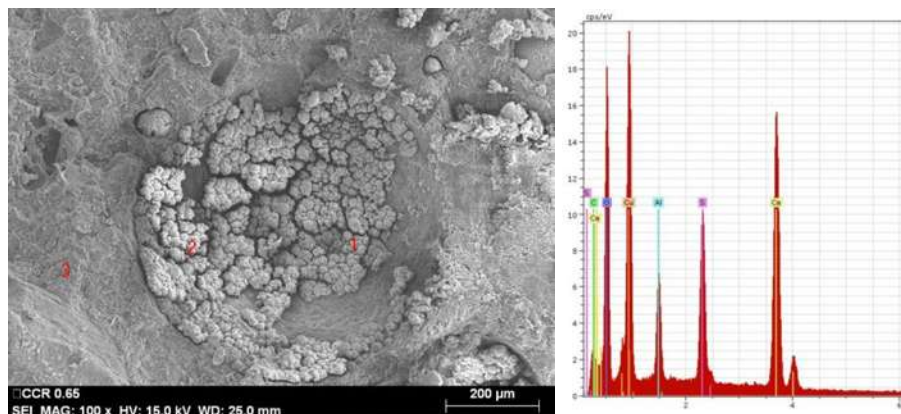


Ilustración 60. A la izquierda: Microanálisis de la mezcla CCT0.65 con MEB a 100x. A la derecha: Microanálisis Químico Elemental con EDS. (García Chávez, 2019)

4.3. Resultados de pruebas no destructivas

4.3.1. Resultados de Resistividad eléctrica (Re)

Para poder llevar a cabo una valuación de los resultados los cuales se obtuvieron con base a la Ecuación 2, se regirán con la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017), dentro de la cual se encuentran los criterios de evaluación de riesgo a la corrosión (véase Tabla 7).

A continuación, en las siguientes gráficas, se mostrarán comparativas de la Resistividad eléctrica de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65) a edades tempranas (28, 45, 60, 90 días) y edades tardías (500 días).



Ilustración 61. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo convencional y con relación a/c 0.45 y 0.65.

En la Ilustración 61, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos convencionales y las dos diferentes relaciones a/c. en el cual, los dos concretos se comportan de manera similar a lo largo del tiempo. Las dos mezclas comienzan con una porosidad excesiva, cambiando este estado a una porosidad de consideración a partir de la edad de 90 días en adelante y/o edades tardías, considerándose dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como riesgo a la corrosión de consideración. Cabe mencionar que la tendencia de los especímenes como ya lo vimos en la gráfica anterior es la de disminuir su porosidad a raíz de que la edad de los especímenes va incrementando.

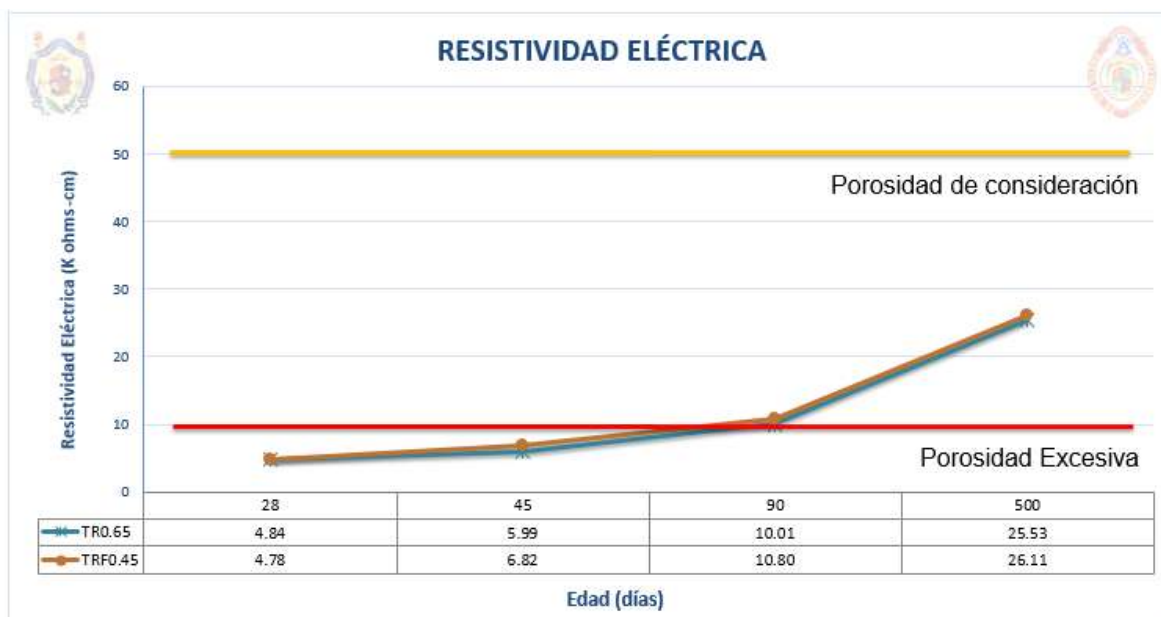


Ilustración 62. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado reciclado y relación $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 62, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos reciclados y las dos diferentes relaciones a/c . En el cual, los dos concretos se comportan de manera similar a lo largo del tiempo. En comparación del concreto reciclado y el concreto convencional podemos observar una reducción y/o mejora en el caso de la mezcla de con agregado pétreo reciclado en cuanto a los concretos con relaciones a/c bajas, para el caso de las relaciones a/c altas tiene mejor comportamiento los concretos con agregado pétreo convencional (véase Ilustración 61 e Ilustración 62).

Cabe mencionar que todos los concretos independientemente de las diferencias, comienzan con una porosidad excesiva, cambiando este estado a una porosidad de consideración a partir de la edad de 90 días en adelante y/o edades tardías, considerándose dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como riesgo a la corrosión de consideración. La tendencia de los especímenes como ya lo vimos en la gráfica anterior es la de disminuir su porosidad a raíz de que la edad de los especímenes va incrementando.

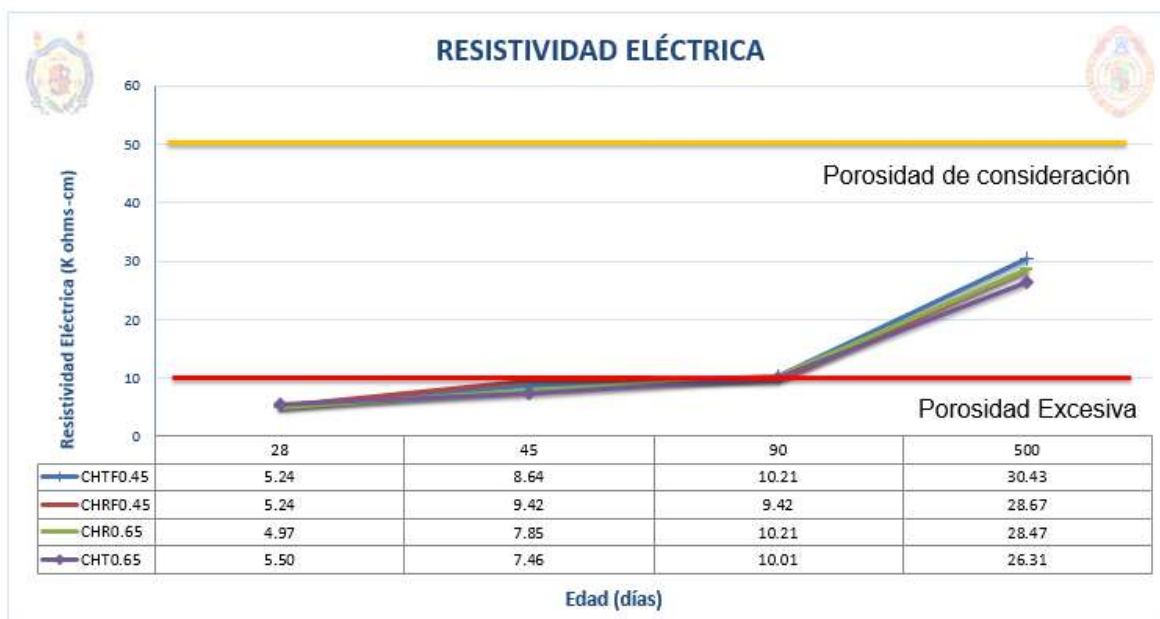


Ilustración 63. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CH, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 63, podemos observar la comparación de los concretos elaborados con CH, diferentes tipos de agregado pétreo y diferentes relaciones a/c .

Principalmente se puede observar un comportamiento a lo largo del tiempo de manera similar independientemente del tipo de mezcla, destacando entre ellas las mezclas con relación $a/c=0.45$.

En comparación de las CH con los concretos testigos (véase Ilustración 61, Ilustración 62 e Ilustración 63) podemos ver una diferencia mínima, destacando entre todos los concretos los siguientes: CHTF0.45, CHRF0.45, CHRO.65, TTF0.65.

Cabe mencionar que todos los concretos independientemente de las diferencias mínimas entre unas y otras, comienzan con una porosidad excesiva, cambiando este estado a una porosidad de consideración a partir de la edad de 90 días en adelante y/o edades tardías, mostrando ya un alcance de porosidad de consideración casi a los 45 días, cosa que no se veía en los concretos testigo, todo esto con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). La tendencia de los especímenes como ya lo vimos en la gráfica anterior es la de disminuir su porosidad a raíz de que la edad de los especímenes va incrementando. Como comentarios adicionales, no se muestra en la Ilustración 63 la edad de 60 días debido a que no en todas las mezclas de estudio se tomó esta edad y por lo tanto no puede haber comparación entre unas y otras.

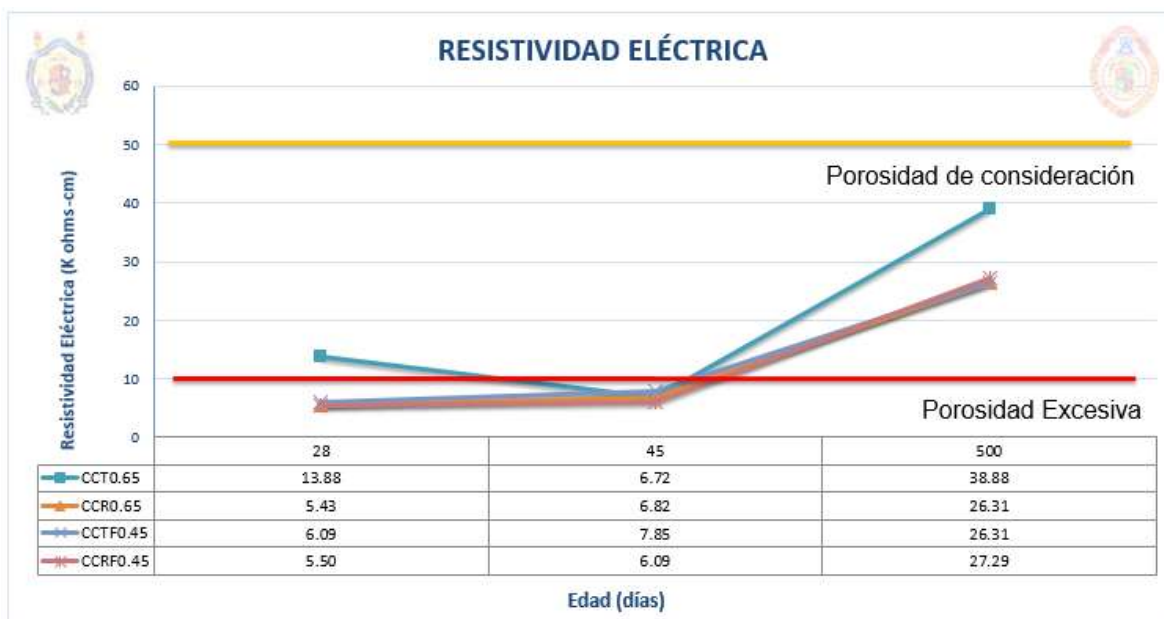


Ilustración 64. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CC, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 64, podemos observar la comparación de los concretos elaborados con CC, diferentes tipos de agregado pétreo y diferentes relaciones a/c .

Principalmente se puede observar un comportamiento variado en comparación con todas ellas. Mostrando más relevancia las siguientes mezclas: CCT0.65 y CCRF0.45.

En comparación de las CC, CH y los T (véase Ilustración 61, Ilustración 62, Ilustración 63 e Ilustración 64) podemos verificar una diferencia mínima, destacando entre todos los concretos los siguientes: CCT0.65, CHTF0.45, CHRF0.45, CHR0.65, TT0.65 y CCRF0.45.

Como se mencionó con anterioridad, todos los concretos independientemente de las diferencias mínimas entre unas y otras, comienzan con una porosidad excesiva, cambiando este estado a una porosidad de consideración a partir de edades tardías, todo esto con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). La tendencia de los especímenes como ya lo vimos en la gráfica anterior es la de disminuir su porosidad a raíz de que la edad de los especímenes va incrementando. Como comentarios adicionales, no se muestra en la Ilustración 64 la edad de 60 y 90 días debido a que no en todas las mezclas se llevó a cabo la prueba a estas edades y por lo tanto no puede haber comparación entre unas y otras.

4.3.2. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

Se llevará a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de la Norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) para determinar la VPU del concreto armado, cuya fórmula para determinación de los resultados está descrita en la Ecuación 3. Estos parámetros se evalúan conforme a la calidad del concreto y a los criterios de velocidad de propagación, como se especifica en la Tabla 8.

A continuación, en las siguientes gráficas, se mostrarán comparativas de la VPU de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65) a edades tempranas (28, 45, 60, 90 días) y edades tardías (500 días).

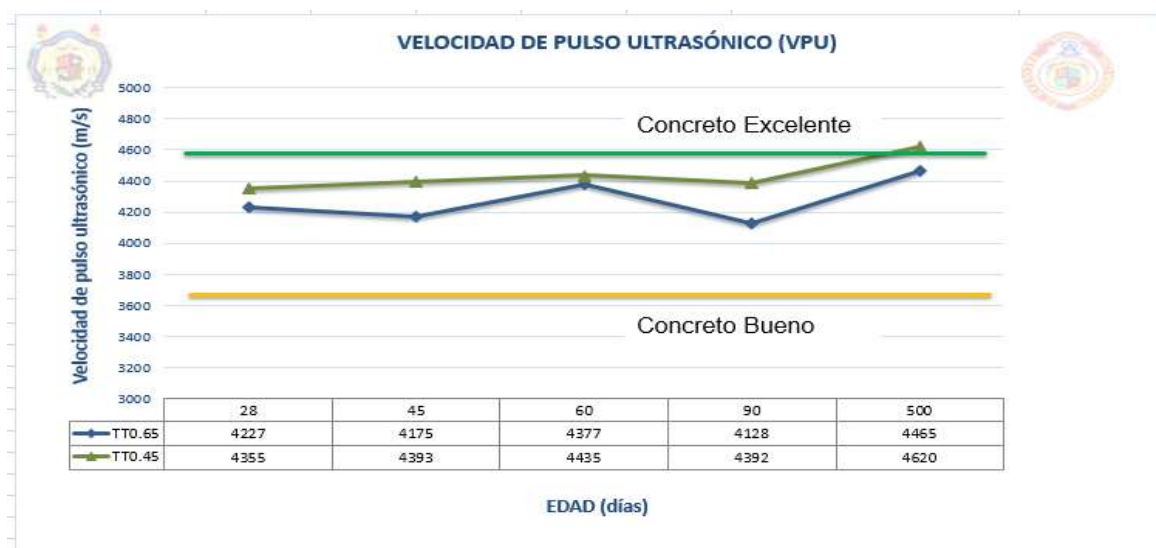


Ilustración 65. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo convencional con relación a/c=0.45 y 0.65.

En la Ilustración 65, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos convencionales y las dos diferentes relaciones a/c. en el cual, los dos concretos se comportan de manera similar a lo largo del tiempo. Las dos mezclas comienzan con una calidad del concreto considerada como buena, manteniéndose así a lo largo de las edades tempranas y a partir de la edad de 90 días (que es cuando el concreto alcanza su máxima resistencia) vemos que comienza a incrementar la VPU de los dos diferentes tipos de concreto.

Como diferencia podemos encontrar que los concretos con relaciones a/c altas mantienen su VPU en un nivel considerado como concreto de buena calidad con un valor máximo de 4465 m/s. Sin embargo para el caso de los concretos con relaciones a/c bajas podemos corroborar que el nivel de VPU sigue incrementando hasta llegar a una calidad del concreto considerada dentro de la Tabla 8 como concretos de excelente calidad con un valor de 4620 m/s. Existiendo una diferencia entre una y otra de 155 m/s. Todo esto se comparó con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

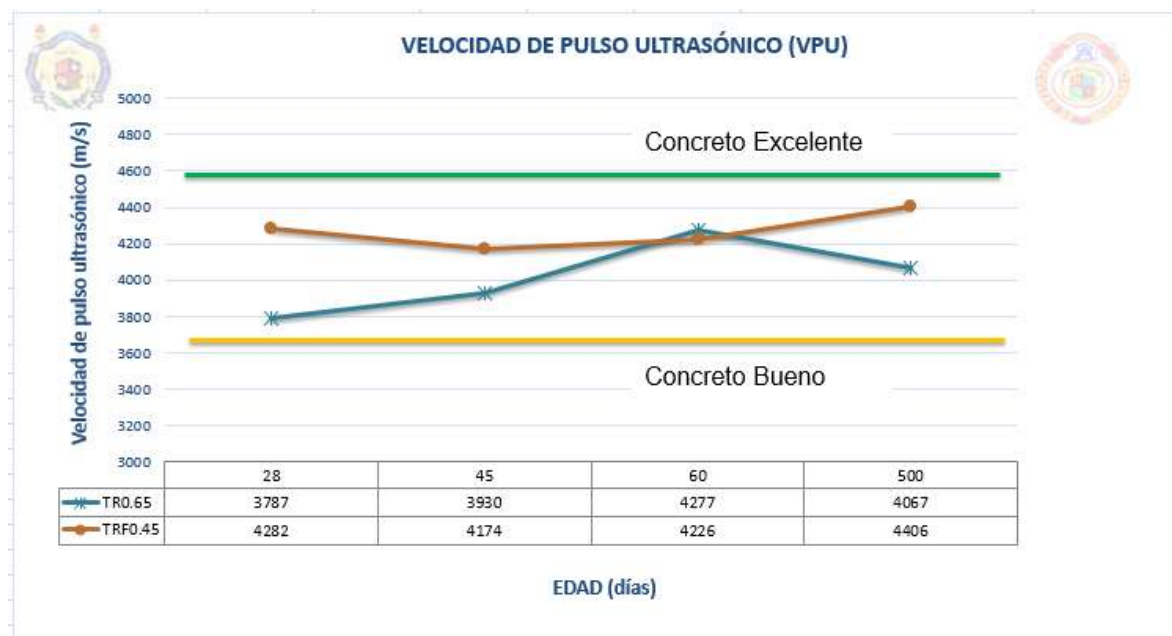


Ilustración 66. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo reciclado con relación $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 66, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos reciclados y las dos diferentes relaciones a/c . en el cual, los dos concretos se comportan de manera similar a lo largo del tiempo. Las dos mezclas de concreto se mantienen en un rango como concretos de buena calidad según la Tabla 8.

Como diferencia podemos encontrar que los concretos con relaciones a/c altas disminuyen un poco su VPU a partir de los 60 días, sin embargo, se mantienen en un nivel considerado como concreto de buena calidad con un valor máximo de 4067 m/s. Para el caso de los concretos con relaciones a/c bajas podemos corroborar que el nivel de VPU sigue incrementando, sin embargo, se mantiene en un nivel considerado como concreto de buena calidad con un valor de 4620 m/s. Existiendo una diferencia entre una y otra de 155 m/s. Todo esto se comparó con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). En comparación de los dos tipos de agregado (convencionales y reciclados) en las mezclas de concreto (véase Ilustración 65 e Ilustración 66) podemos decir que destacan los concretos con agregado pétreo convencional y las relaciones $a/c= 0.45$. Cabe mencionar que aun así, todas las mezclas mantienen una calidad del concreto entre buena y excelente, calificándolos como concretos de alta durabilidad según la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

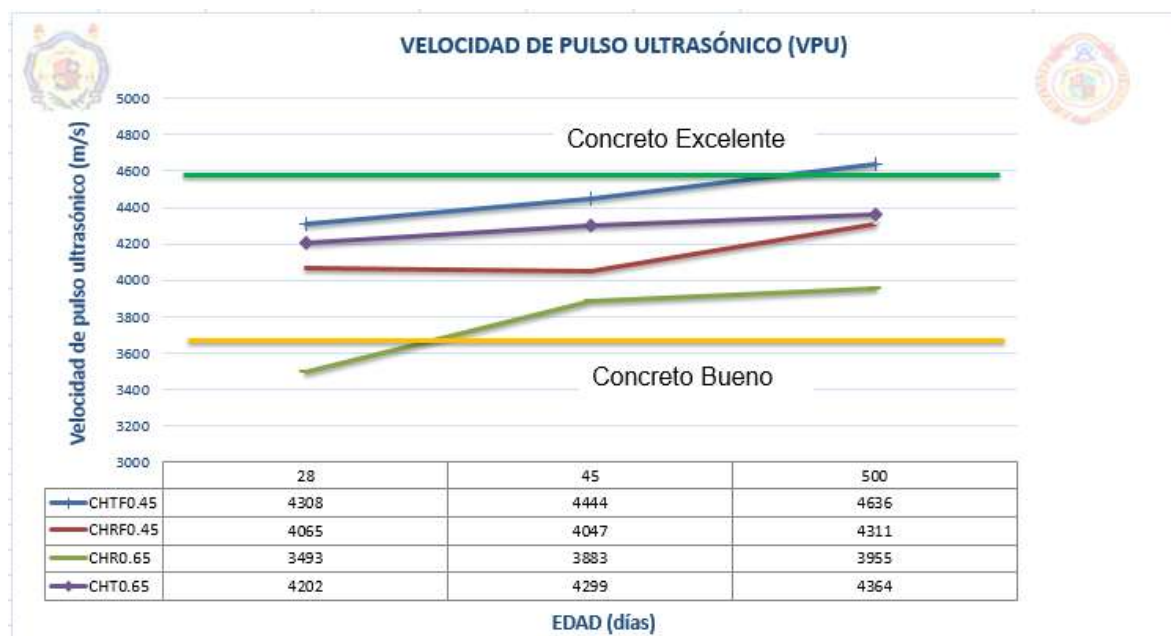


Ilustración 67. Comparación de especímenes de concreto elaborados con CH, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 67, podemos observar la comparación de los concretos elaborados con CH, diferentes tipos de agregado pétreo y diferentes relaciones a/c . La mayoría de los concretos se mantienen dentro del rango de concretos considerados dentro de la Tabla 8, destacando entre ellos la CHTF0.45 la cual incremento hasta un rango considerado como concreto de excelente calidad con un valor de 4636 m/s.

Como diferencia podemos encontrar que las mezclas con relaciones a/c bajas predominan sobre altas, y que los concretos con agregados pétreos convencionales predominan sobre los reciclados, sin embargo todos ellos se consideran como concretos de alta durabilidad conforme a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

En comparación de las CH, los dos tipos de agregado (convencionales y reciclados) y las diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65) en las mezclas de concreto (véase Ilustración 65, Ilustración 66 e Ilustración 67) podemos decir que destacan los concretos con agregado pétreo convencional y las relaciones $a/c=0.45$. Distinguiéndolas de la siguiente manera: CHTF0.45, TT0.45, TT0.65, TRF0.45. Cabe mencionar que aun así, todas las mezclas mantienen una calidad del concreto entre buena y excelente, calificándolos como concretos de alta durabilidad según la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

Como comentarios adicionales, no se muestra en la Ilustración 67 la edad de 60 y 90 días debido a que no en todas las mezclas de concreto se llevó a cabo la prueba a estas edades, por lo que no se tienen datos y por lo tanto no puede haber comparación entre unas y otras a estas edades.

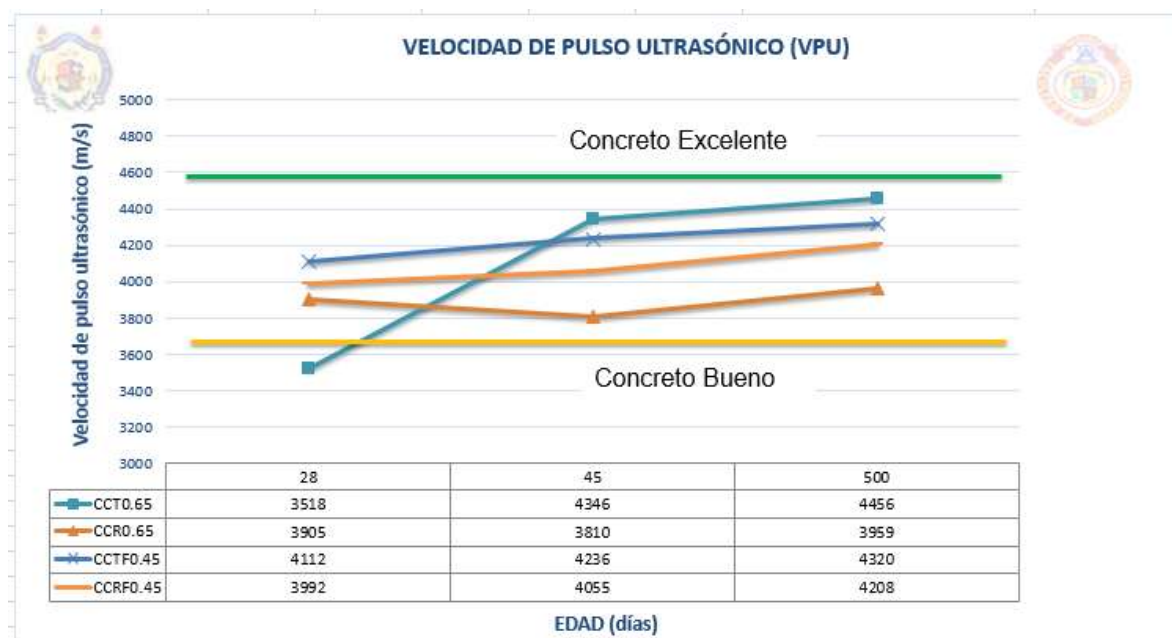


Ilustración 68. Comparación de especímenes de concreto elaborados con CC, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 68, podemos observar la comparación de los concretos elaborados con CC, diferentes tipos de agregado pétreo y diferentes relaciones a/c . Todos los concretos con adición de CC se mantienen dentro del rango de concretos de buena calidad considerados dentro de la Tabla 8. Destacando entre ellas la CCT0.65 con un valor de 4456 m/s. Como diferencia podemos encontrar que predominan los concretos con agregados pétreos convencionales, sin embargo todos ellos se consideran como concretos de alta durabilidad conforme a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

En comparación de las CC, CH, los dos tipos de agregado (convencionales y reciclados) y las diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65) en las mezclas de concreto (véase Ilustración 65, Ilustración 66, Ilustración 67 e Ilustración 68) podemos decir que destacan los concretos con agregado pétreo convencional y las relaciones $a/c=0.45$. Distinguiéndolas de la siguiente manera: CHTF0.45 con un valor de 4636 m/s, TT0.45 con 4620 m/s, TT0.65 con 4465 m/s, CCT0.65 con 4456 m/s y TRF0.45 con 4406 m/s.

Cabe mencionar que aun así, todas las mezclas mantienen una calidad del concreto entre buena y excelente, calificándolos como concretos de alta durabilidad según la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). Como comentarios adicionales, no se muestra en la Ilustración 68 la edad de 60 y 90 días debido a que no en todas las mezclas de concreto se llevó a cabo la prueba a estas edades, por lo que no se tienen datos y por lo tanto no puede haber comparación entre unas y otras a estas edades.

4.4. Resultados de pruebas destructivas

4.4.1. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión

A continuación, en las siguientes gráficas se mostrarán comparativas de la resistencia a la compresión de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65) a edades tempranas (28, 45, 90 días) y edades tardías (500 días).

La resistencia de proyecto del concreto para relaciones $a/c=0.45$ es: $f'_c = 30 \text{ MPa}$ o 300 kg/cm^2 (línea verde en gráficas).

La resistencia de proyecto del concreto para relaciones $a/c=0.65$ es: $f'_c = 18 \text{ MPa}$ o 180 kg/cm^2 (línea azul en gráficas).

Se probará la hipótesis de que; $a < a/c > \text{resistencia a compresión}$.

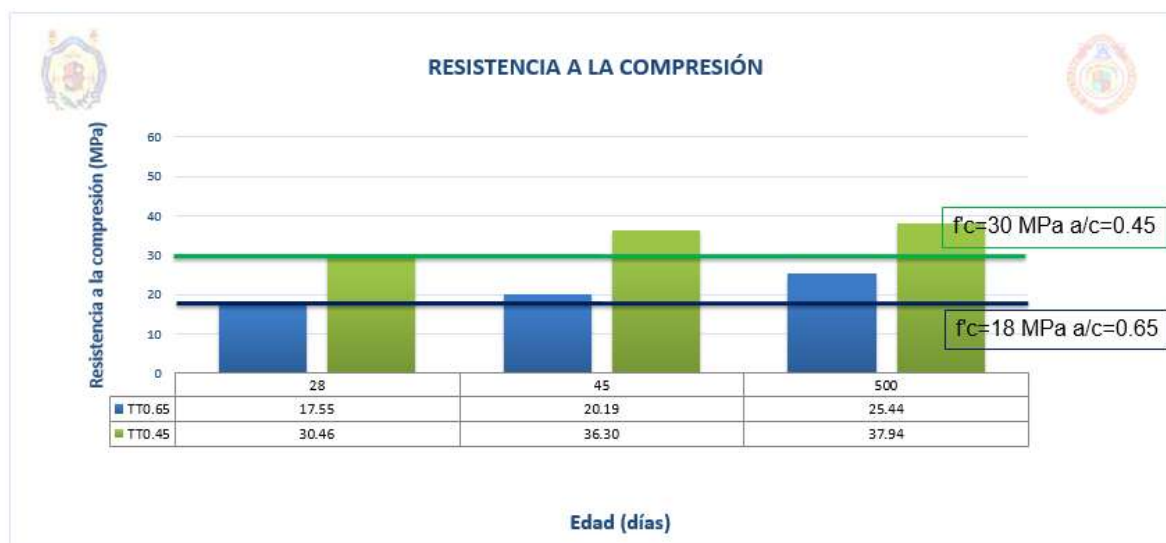


Ilustración 69. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado pétreo convencional y con relación $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 69, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos convencionales y las dos diferentes relaciones a/c . en el cual, vemos que los especímenes con relaciones a/c bajas presentan mejores resultados alcanzando desde los primeros 28 días 30.46 MPa e incrementando a edades tardías (500 días) hasta casi los 38 MPa, considerados estos valores dentro de la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) como un concreto de alta durabilidad.

En el caso de las mezclas con relaciones a/c altas podemos observar que su comportamiento de incremento es poco a lo largo de las edades, comenzando con valores de 17.55 MPa hasta 20.19 MPa en edades tempranas e incrementando estas hasta 25.44 MPa en edades tardías, colocándose estos dentro de la norma como concretos de mediana durabilidad.

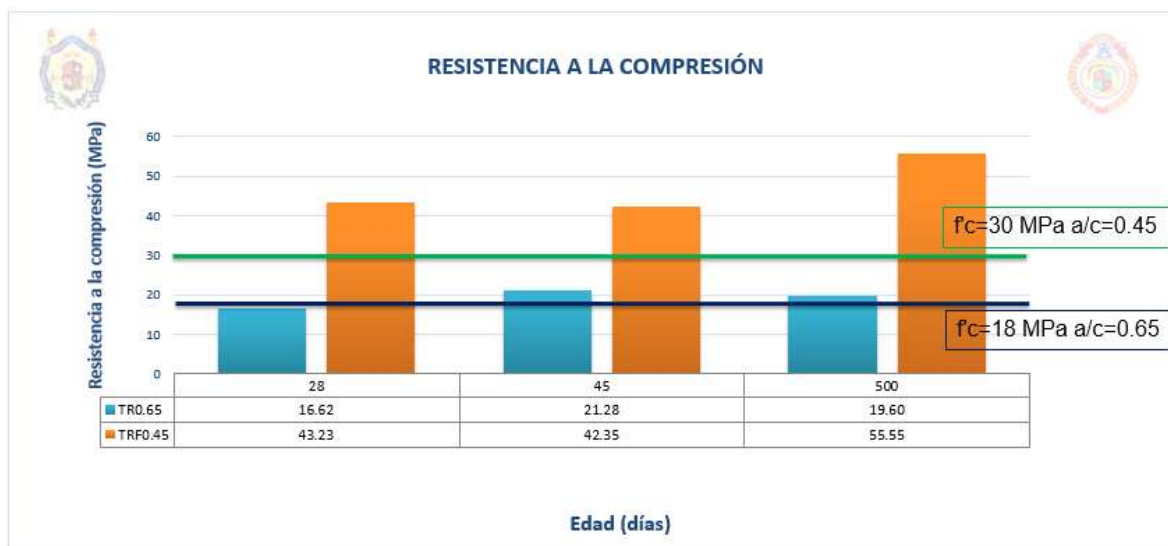


Ilustración 70. Comparación de especímenes elaborados de concreto con agregado reciclado y relación $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 70, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos reciclados y las dos diferentes relaciones a/c . en el cual, vemos que los especímenes con relaciones a/c bajas presentan mejores resultados alcanzando desde los primeros 28 días 43.23 MPa e incrementando todavía a edades tardías (500 días) hasta los 55.55 MPa, considerados estos valores dentro de la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) como concretos de alta durabilidad.

En el caso de las mezclas con relaciones $a/c= 0.65$ podemos observar que a los 28 días de edad se mantiene por debajo de los 18 MPa incrementando en edades subsecuentes hasta alcanzar 19.60 MPa en edades tardías, colocándose estos dentro de la norma como concretos de mediana a baja durabilidad.

En comparación del concreto reciclado y el concreto convencional podemos observar una reducción y/o mejora en el caso de la mezcla de con agregado pétreo reciclado en cuanto a los concretos con relaciones a/c bajas, para el caso de las relaciones a/c altas tiene mejor comportamiento los concretos con agregado pétreo convencional (véase Ilustración 69 e Ilustración 70).

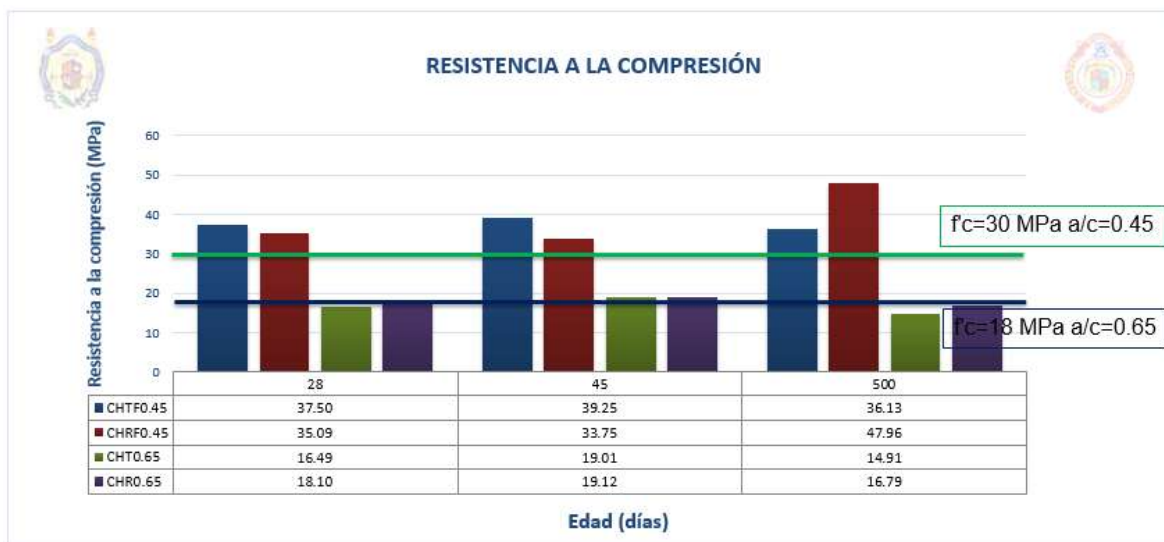


Ilustración 71. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CH, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c= 0.45 y 0.65.

En la Ilustración 71, podemos observar la comparación de los concretos elaborados con CH, diferentes tipos de agregado pétreo y diferentes relaciones a/c.

Las que presentan mejores propiedades son aquellas cuya relación a/c= 0.45 encontrándose dentro de la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) como concretos de alta durabilidad desde los primeros 28 días, destacando entre las dos la mezcla con agregado reciclado a edades tardías.

En el caso de las mezclas con relaciones a/c= 0.65 podemos observar que la mezcla que cumple con la resistencia de proyecto a 28 días es la que contiene agregado pétreo reciclado con una resistencia de 18.10 MPa e incrementando hasta alcanzar los 16.79 MPa colocándose esta como un concreto de alta resistencia, caso contrario para la mezcla con agregado pétreo convencional colocándose como un concreto de durabilidad media o baja.

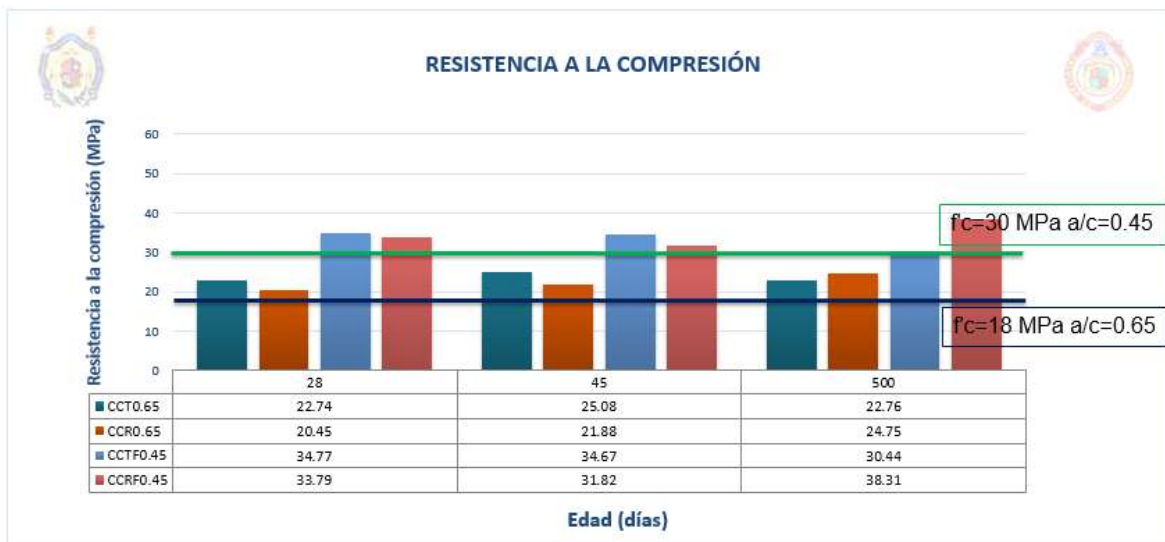


Ilustración 72. Comparación de especímenes elaborados de concreto con CC, agregado pétreo convencional y reciclado, y diferentes relaciones a/c= 0.45 y 0.65.

En la Ilustración 72, podemos observar la comparación de los concretos elaborados con CC, diferentes tipos de agregado pétreo y diferentes relaciones a/c.

Todas las mezclas cumplen con la resistencia de proyecto dentro de los primeros 28 días. Destacando las relaciones con agregado pétreo convencional, sin embargo, en las pruebas subsecuentes vemos un mayor incremento para los concretos con agregado pétreo reciclado.

Estas resistencias se encuentran dentro de la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) como concretos de alta durabilidad.

En comparación de las CH, CC y TT (véase Ilustración 69, Ilustración 70, Ilustración 71 e Ilustración 72) podemos identificar que los concretos que mejores propiedades ante la resistencia a la compresión son: TRF=0.45 con una resistencia de 55.55 MPa, CHRF0.45 con 47.96 MPa, CCRF0.45 38.31 MPa, TT=0.45 con 37.94 MPa, CHTF=0.45 con 36.13 MPa. Todas estas mezclas de concreto se encuentran dentro de la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) como concretos de alta durabilidad. Destacando entre la mayoría las CH, los agregados reciclados y las relaciones a/c bajas.

4.5. Resultados de Pruebas electroquímicas

Los resultados que se obtuvieron en base a la Ecuación 6, Ecuación 7 y Ecuación 9, se registrarán con la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) dentro de la cual se encuentran los criterios de evaluación de riesgo a la corrosión (véase Tabla 16 y Tabla 17).

A continuación, en las siguientes gráficas se mostrarán comparativas del Potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65) en un rango de 12 ciclos.

Como primicia debemos saber que el potencial de corrosión (E_{corr}) es inversamente proporcional a la densidad de corriente (i_{corr}) por lo que entre más negativo sea el E_{corr} mayor será la i_{corr} .

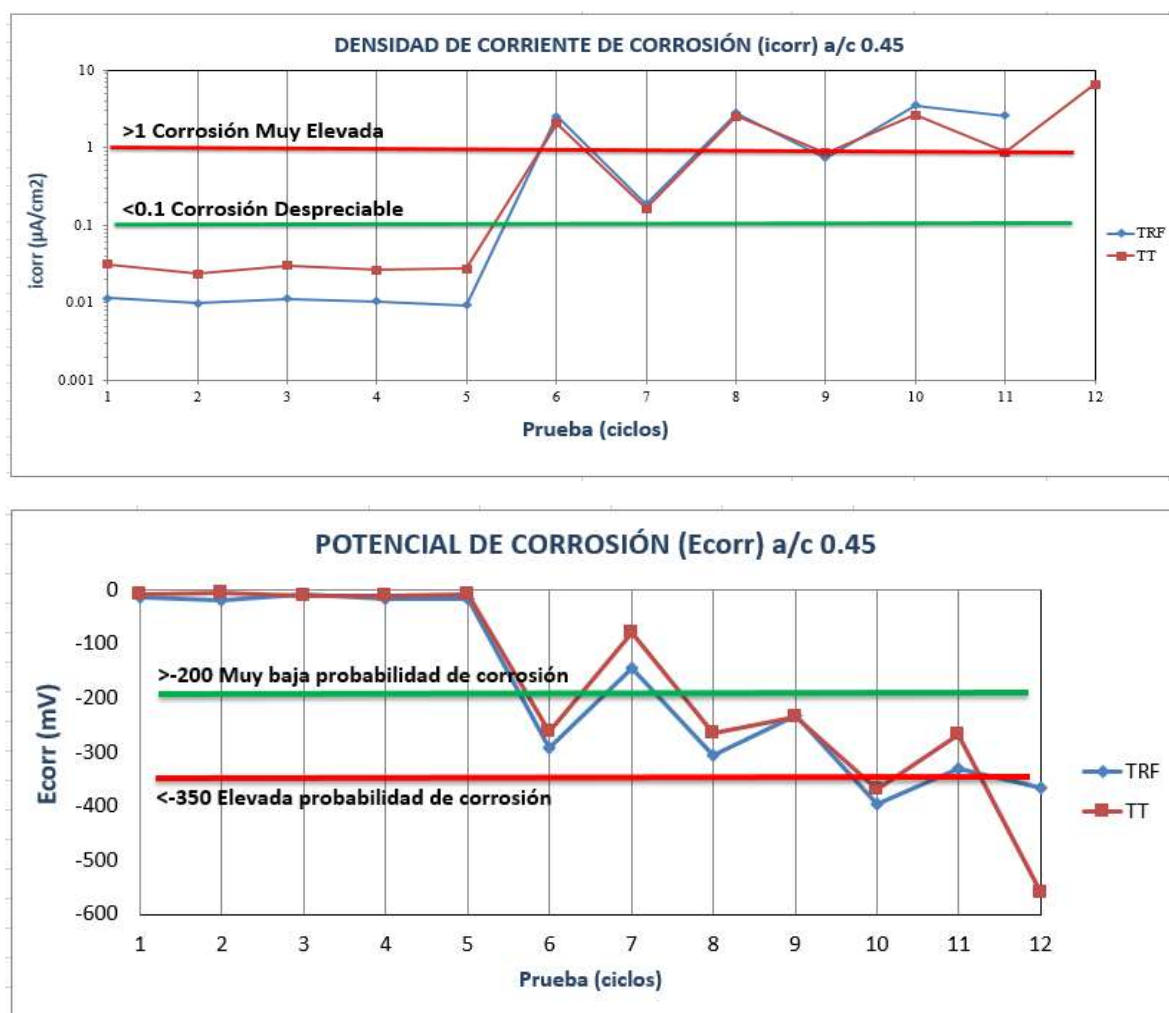


Ilustración 73. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una TT vs TRF con una relación a/c=0.45. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 73, se muestra el comportamiento de una mezcla de concreto TT vs TR de relación $a/c = 0.45$ sometidas a ciclos de humedecimiento y secado en cloruro de sodio (3.5%NaCl) en un lapso de 12 ciclos. Podemos observar para los dos concretos que dentro de los primeros 5 ciclos de prueba se tiene un comportamiento de E_{corr} cercano al cero (>-200 mV) con una probabilidad de corrosión muy baja. De igual forma podemos corroborar un comportamiento del i_{corr} con valores $<0.1 \mu A/cm^2$ considerándose dentro de la Tabla 17 como una corrosión despreciable, sin embargo, al sumergirse dentro de la solución de NaCl vemos un incremento en el E_{corr} con valores entre -200 a -350 mV considerada como moderada probabilidad de corrosión lo que refleja en un incremento en la i_{corr} con valores $>1 \mu A/cm^2$ considerada como muy elevada corrosión. Cabe mencionar que las variaciones que se aprecian en la gráfica es debido precisamente a los ciclos de humedecimiento y secado a partir del sexto ciclo.

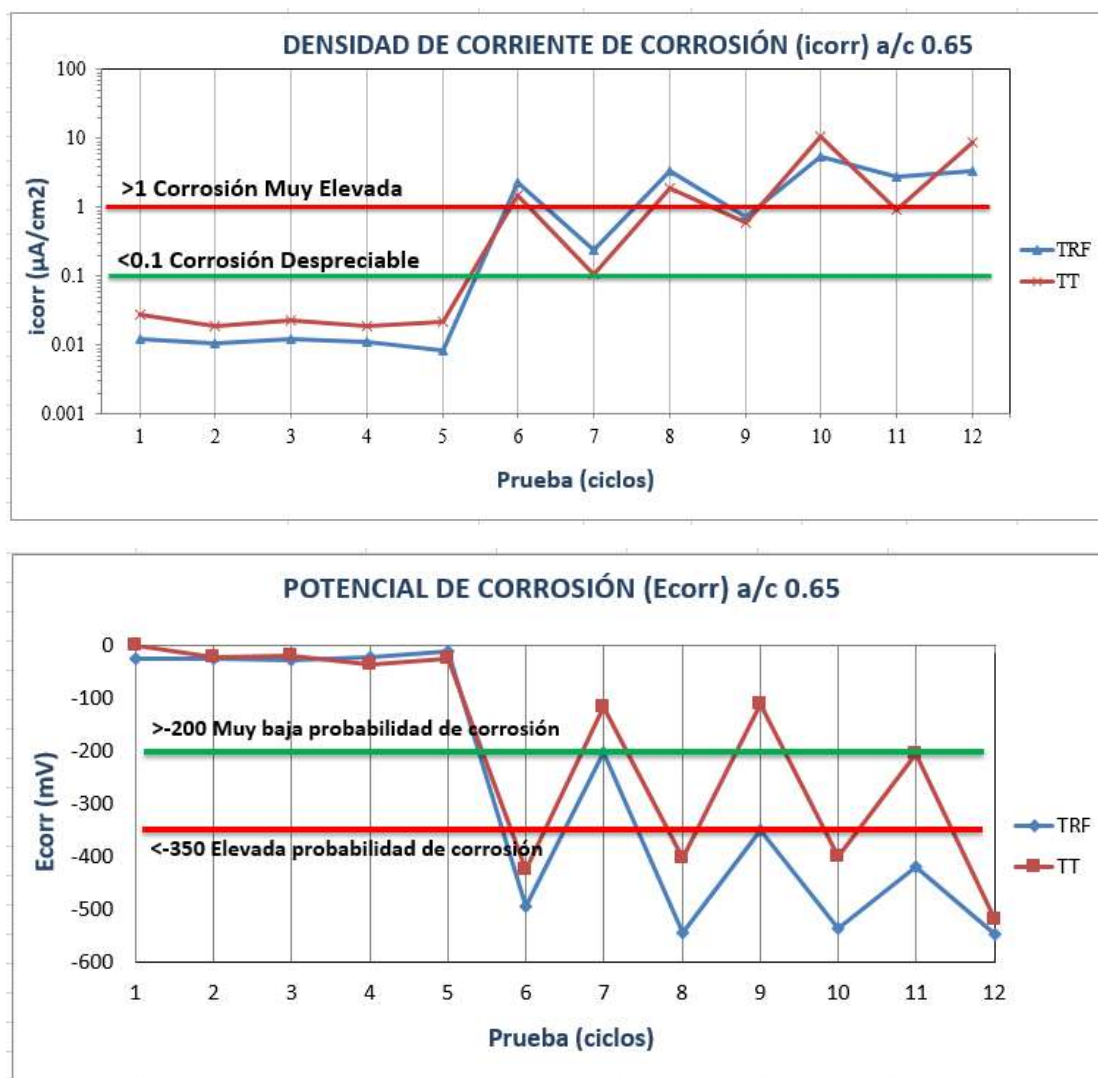


Ilustración 74. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una TT vs TRF con una relación $a/c=0.65$. (García Chávez, 2019)

Para el caso de las mezclas de concreto con relación a/c altas (0.65) vemos un comportamiento similar que las relaciones a/c= 0.45. En los primeros 5 ciclos los valores de E_{corr} y i_{corr} son mínimos debido a que se encuentran en un ambiente normal considerada como despreciable probabilidad de corrosión y por consiguiente baja corrosión. Al sumergirse en la solución de NaCl la E_{corr} es <-350 mV mostrando mayor probabilidad de corrosión y por consiguiente una $i_{corr} >1 \mu A/cm^2$ a partir del ciclo seis y subsecuentes. En comparación de las dos relaciones a/c, aunque parecieran tener un comportamiento similar, vemos que para el caso de las relaciones a/c= 0.45 los cloruros tardan un poco más llegar a despasivar el acero de refuerzo y por lo tanto en comenzar con el proceso de corrosión, caso contrario a las relaciones a/c= 0.65.

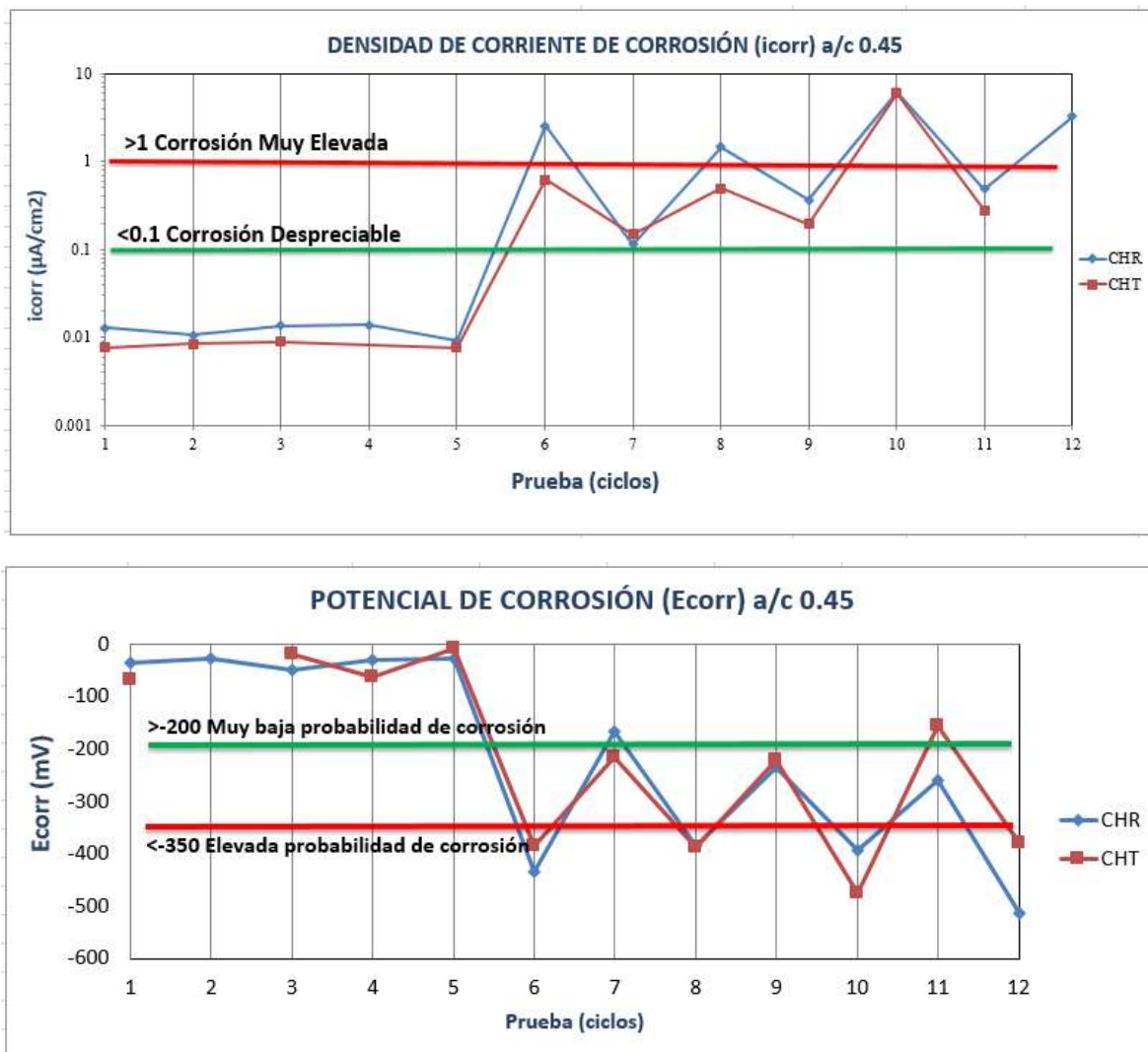


Ilustración 75. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CHT vs CHR con una relación a/c=0.45. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 75, se muestra el comportamiento de una mezcla de concreto CHT vs CHR de relación $a/c = 0.45$ sometidas a ciclos de humedecimiento y secado en cloruro de sodio (3.5%NaCl) en un lapso de 12 ciclos. Podemos observar para los dos concretos que dentro de los primeros 5 ciclos de prueba se tiene un comportamiento de $E_{corr} > -200$ mV con una probabilidad de corrosión muy baja. De igual forma podemos corroborar un comportamiento del i_{corr} con valores $< 0.1 \mu A/cm^2$ considerándose dentro de la Tabla 17 como una corrosión despreciable, sin embargo, al sumergirse dentro de la solución de NaCl vemos un incremento en el E_{corr} con valores entre -200 a -350 mV considerada como moderada probabilidad de corrosión lo que refleja en un incremento en la i_{corr} con valores $> 1 \mu A/cm^2$ considerada como muy elevada corrosión.

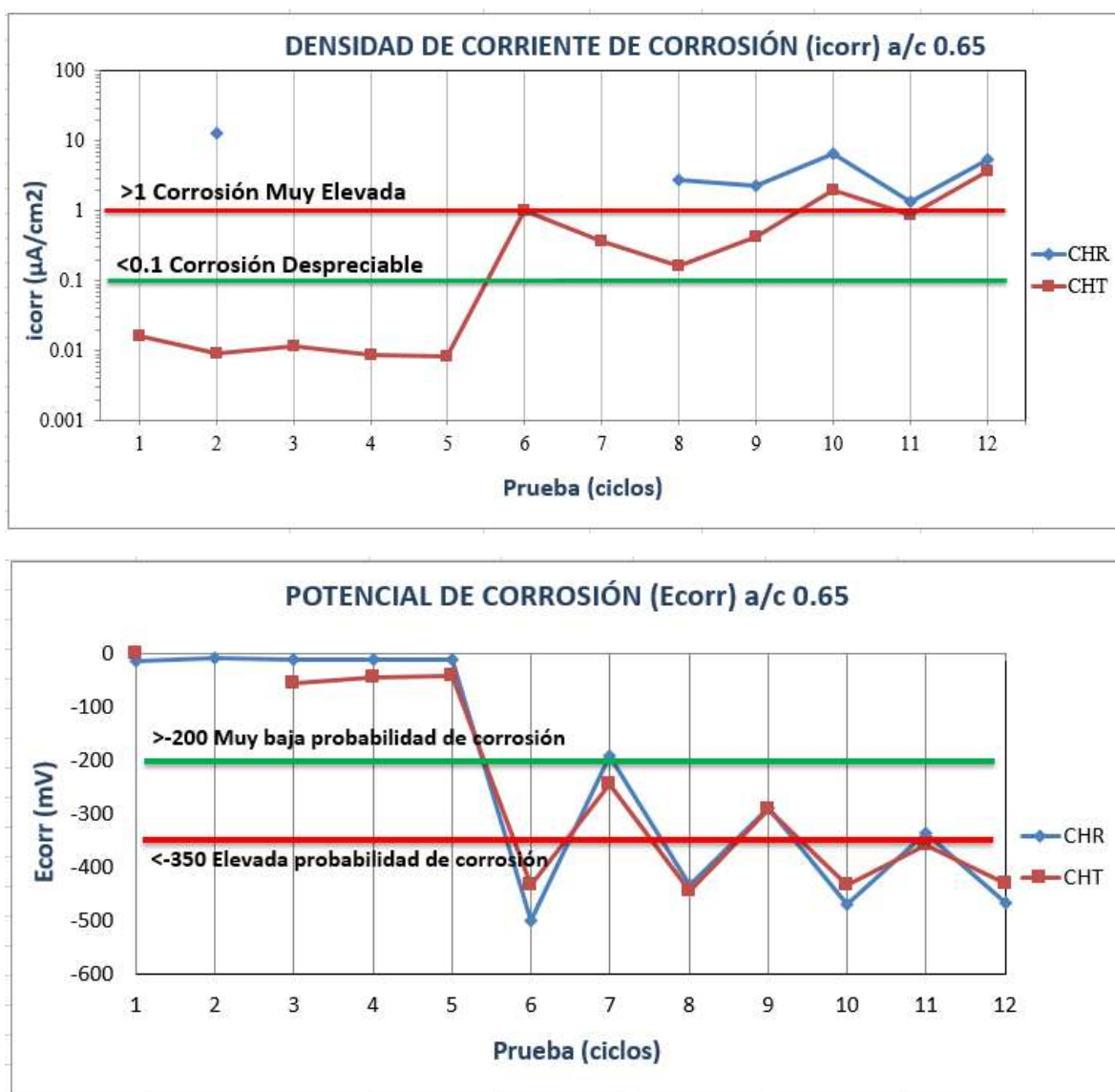


Ilustración 76. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CHT vs CHR con una relación $a/c=0.65$. (García Chávez, 2019)

En el caso de las mezclas de concreto con relación $a/c = 0.65$ vemos que en los primeros 5 ciclos los valores de E_{corr} y i_{corr} son mínimos con probabilidad de corrosión despreciable y por consiguiente baja corrosión. Al sumergirse en la solución de NaCl muestran una $E_{corr} < -350$ mV y por consiguiente una $i_{corr} > 1 \mu A/cm^2$ a partir del ciclo seis y subsecuentes. En comparación de las dos relaciones a/c , aunque parecieran tener un comportamiento similar, vemos que de las relaciones $a/c = 0.65$ la tendencia va incrementando alcanzando una corrosión muy elevada y para el caso de las $a/c = 0.45$ tienen un comportamiento estable con una corrosión moderada a elevada.

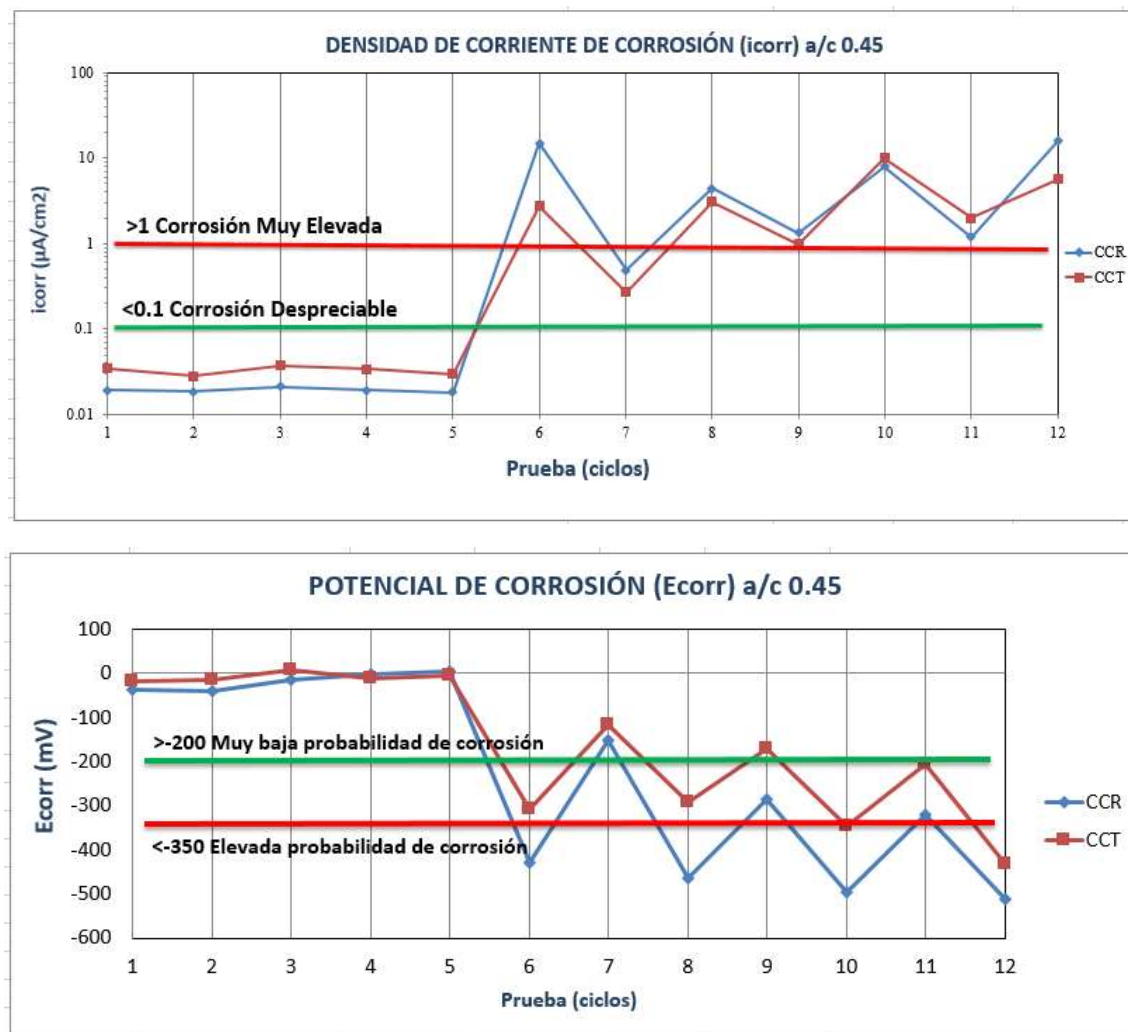


Ilustración 77. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CCT vs CCR con una relación $a/c = 0.45$. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 77, se muestra el comportamiento de una mezcla de concreto CCT vs CCR de relación $a/c = 0.45$ sometidas a ciclos de humedecimiento y secado en cloruro de sodio (3.5%NaCl) en un lapso de 12 ciclos. Podemos observar para los dos concretos que dentro de los primeros 5 ciclos de prueba se tiene un comportamiento de $E_{corr} > -200$ mV con una probabilidad de corrosión muy baja. De

igual forma podemos corroborar un comportamiento del i_{corr} con valores $<0.1 \mu A/cm^2$ considerándose dentro de la Tabla 17 como una corrosión despreciable. Al sumergirse dentro de la solución de NaCl vemos un incremento en el E_{corr} con valores entre <-200 a <-350 mV considerada como moderada y elevada probabilidad de corrosión lo que refleja en un incremento en la i_{corr} con valores $>1 \mu A/cm^2$ como muy elevada corrosión.

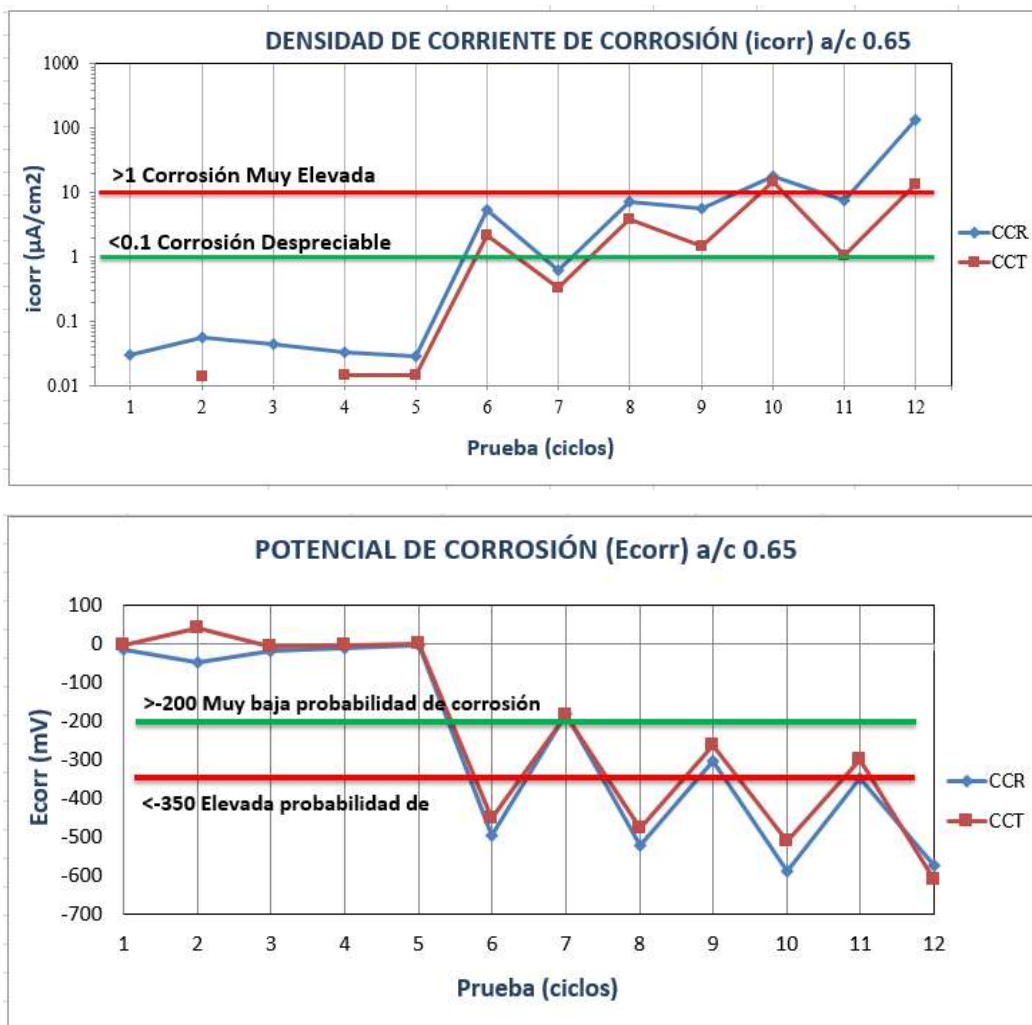


Ilustración 78. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de una CCT vs CCR con una relación $a/c=0.65$. (García Chávez, 2019)

En el caso de las mezclas de concreto con relación $a/c= 0.65$ vemos que en los primeros 5 ciclos los valores de E_{corr} y i_{corr} son mínimos con probabilidad de corrosión despreciable y por consiguiente baja corrosión. Al sumergirse en la solución de NaCl muestran una $E_{corr} <-350$ mV y por consiguiente una $i_{corr} >1 \mu A/cm^2$ a partir del ciclo seis y subsecuentes. En comparación de las dos relaciones a/c , aunque parecieran tener un comportamiento similar, vemos que de las relaciones $a/c= 0.65$ la tendencia va incrementando alcanzando una corrosión muy elevada y

para el caso de las $a/c = 0.45$ tienen un comportamiento estable con una corrosión moderada a elevada.

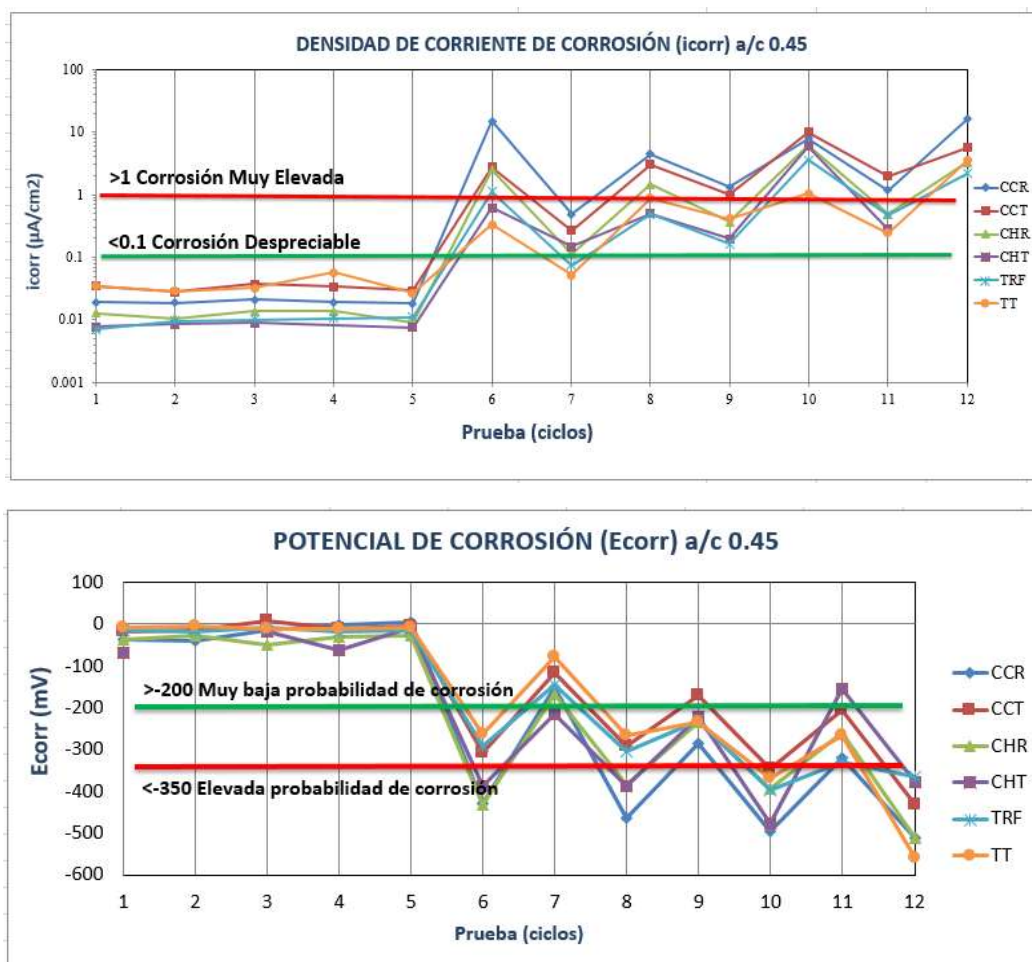


Ilustración 79. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de todas los concretos con una relación $a/c=0.45$. (García Chávez, 2019)

En la Ilustración 79, podemos observar la comparación del comportamiento de todas las mezclas a ciclos de humedecimiento y secado en cloruro de sodio (3.5%NaCl) en un lapso de 12 ciclos. Dentro de los primeros 5 ciclos se tiene un comportamiento de E_{corr} despreciable para todas las mezclas, sin embargo, al sumergirse dentro de la solución de NaCl a partir del ciclo seis vemos que todas las mezclas se encuentran con valores de $E_{corr} < -250$ mV y < -350 mV por lo que tenemos un incremento en la i_{corr} en la mayoría de los casos $>1 \mu A/cm^2$ que conforme a los criterios de evaluación (Tabla 17) tendríamos un nivel de corrosión entre Elevado y Muy elevado.

Podemos destacar entre las que presentan mejores propiedades o con menos probabilidad de corrosión a los siguientes concretos: TT0.45, CHT0.45, TRF0.45 y CCT0.45.

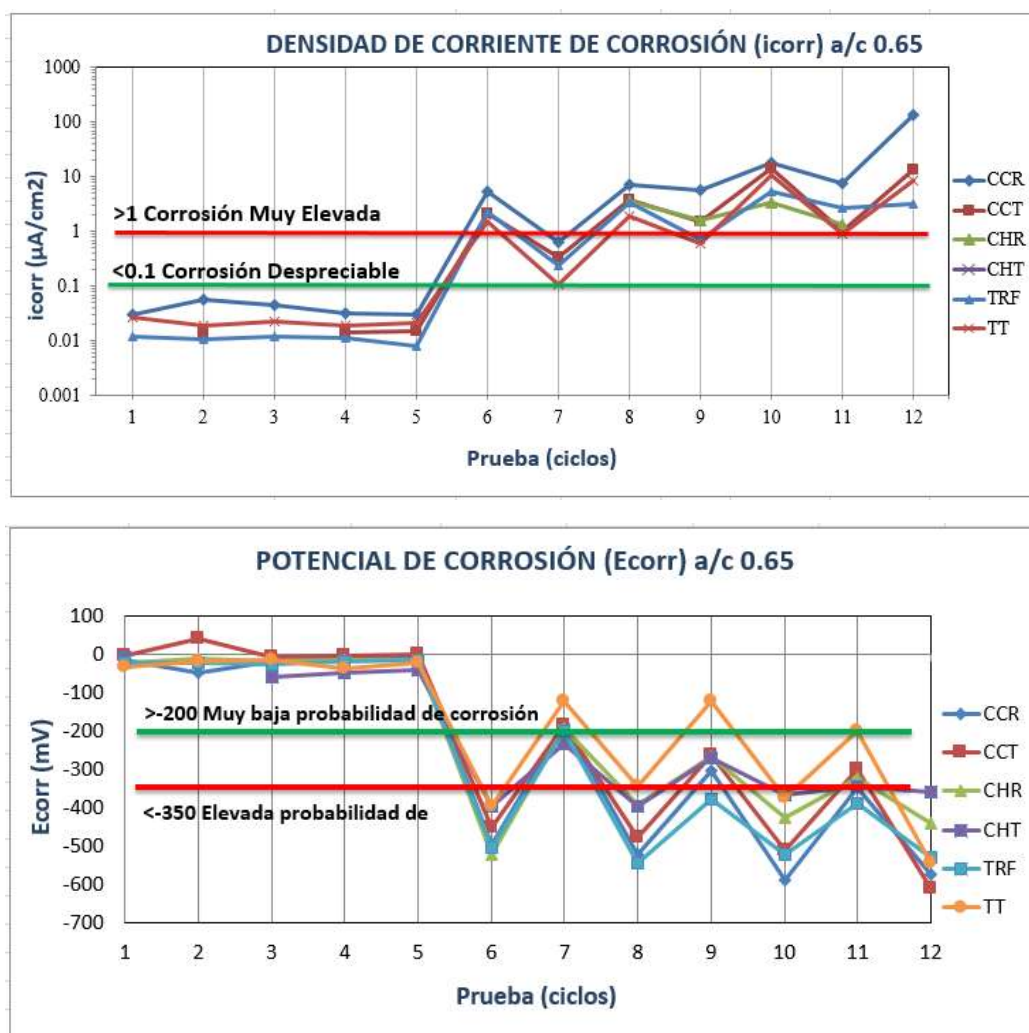


Ilustración 80. Comparación de Potencial de corrosión y Densidad de corriente de todas los concretos con una relación $a/c=0.65$. (García Chávez, 2019)

Para el caso de las mezclas de concreto con relación $a/c= 0.65$ vemos que en los primeros 5 ciclos los resultados de E_{corr} y i_{corr} son mínimos con probabilidad de corrosión despreciable y por consiguiente baja corrosión. Al sumergir los especímenes en la solución de NaCl todos los concretos muestran una $E_{corr} < -350$ mV y por consiguiente una $i_{corr} > 1 \mu A/cm^2$ a partir del ciclo seis y subsecuentes. En comparación de las dos relaciones a/c , aunque parecieran tener un comportamiento similar, vemos que en las relaciones $a/c= 0.65$ la tendencia va incrementando alcanzando una corrosión muy elevada y para el caso de las $a/c= 0.45$ tienen un comportamiento estable con una corrosión moderada a elevada.

Podemos destacar entre las que presentan mejores propiedades o con menos probabilidad de corrosión a los siguientes concretos: TT0.65, TR0.65 y CHT0.65

4.6. Resultados de Pruebas por durabilidad:

4.6.1. Resultados de la prueba de resistencia del concreto a los sulfatos de sodio

Como se mencionó con anterioridad, la prueba dentro del laboratorio simula mediante solución preparada de sulfato de sodio (Na_2SO_4), las condiciones de exposición a sales a las que se encuentran sometidos en la mayoría de los casos los elementos de revestimiento de concreto, ya sean suelos o nivel freático con alta presencia de sulfatos, así como a ambientes marinos, estos últimos sufren ciclos constantes de humedecimiento y secado, provocando en primer instancia el deterioro prematuro del revestimiento o del concreto, para finalmente reducir la vida útil del elemento de concreto reforzado.

“Cuando la masa de los especímenes sea $>5\%$ se informa como pérdida de masa crítica y en ese momento se considera que el material es insuficiente, registrándose así, como su ciclo de falla”. (NMX-C-075-ONNCCE, 2006)

Cabe mencionar que aunado a esta prueba también se llevó a cabo la prueba de Re, para poder llevar un análisis comparativo entre %pérdida de masa vs Re. Con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

Se utilizaron 3 rodajas (10cm x 5cm) para las distintas mezclas de estudio, un total de 54 muestras. Se realizó a edades > 650 días. La prueba fue de manera repetitiva para las distintas muestras de concreto, bajo las mismas condiciones de curado y temperatura.

A continuación, en las siguientes gráficas, se mostrarán comparativas del porcentaje (%) de pérdida de masa por acción del ataque por sulfatos de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65) con edades > 650 días desde su elaboración, y en un periodo de cinco ciclos.

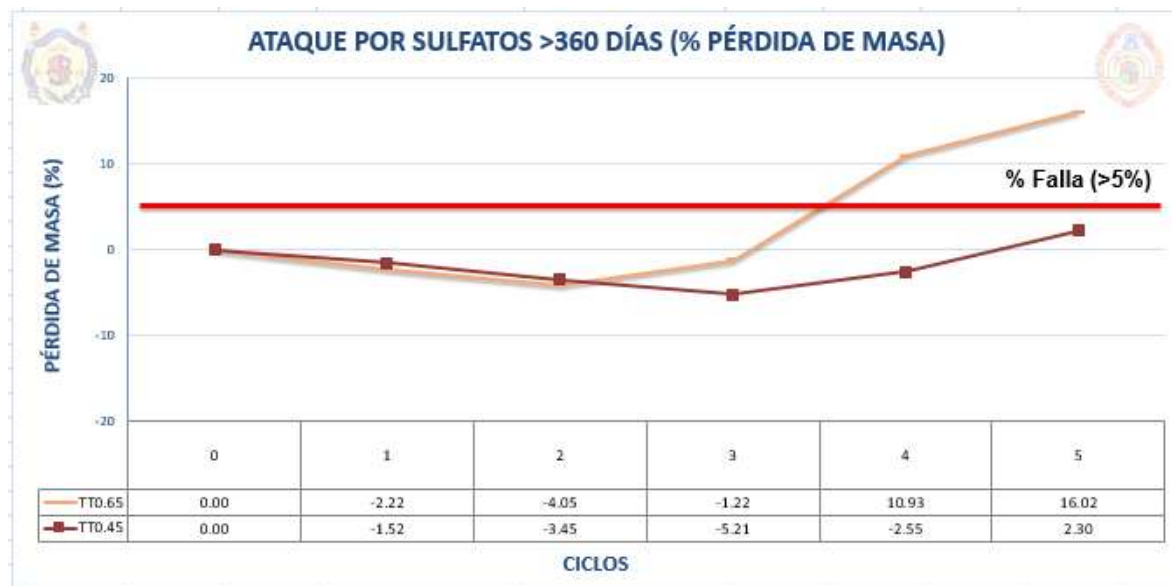


Ilustración 81. Comparación de testigos con agregados convencionales y diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 81, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos convencionales y las dos diferentes relaciones a/c. en el cual, la línea de tendencia de la mezcla con relaciones altas $a/c=0.65$ a partir del 3er ciclo tiende a comportarse de manera ascendente sobrepasando así la línea de falla ($>5\%$). La mezcla con relación baja $a/c= 0.45$ llevan una tendencia constante a lo largo de los 5 ciclos de prueba, a partir del 4to ciclo tiende a subir el % de pérdida de masa a un 2.30% sin embargo, no alcanza el nivel de falla, por lo que, se considera una mezcla resistente a los sulfatos.

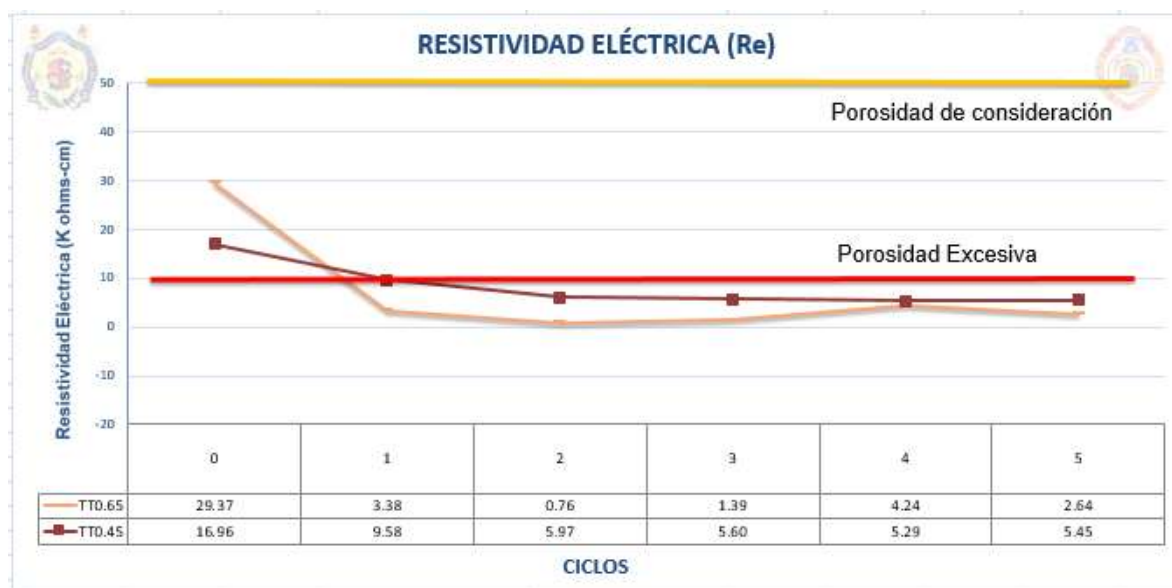


Ilustración 82. Re en mezclas testigo con agregados convencionales y con diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65.

En la Ilustración 82, podemos observar la comparación entre dos diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 con agregados pétreos convencionales, pero ahora comparando el % de pérdida de masa antes descrito (Ilustración 81) vs Re. Veíamos que la línea de tendencia de la mezcla con relaciones altas $a/c=0.65$ a partir del 3er ciclo tiende a comportarse de manera ascendente sobrepasando así la línea de falla ($>5\%$), en comparación con la Re podemos verificar un comportamiento <10 K Ω -cm considerado dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como porosidad excesiva. La mezcla con relación baja $a/c=0.45$ veíamos que se comportaba con una tendencia constante en cuanto a su % de pérdida de masa sin alcanzar la línea de falla a lo largo de los 5 ciclos de prueba, sin embargo, en comparación con la Re; vemos que se mantiene por encima del límite de la línea de porosidad encontrándose en un rango entre 10 a 50 K Ω -cm, considerado dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como porosidad de consideración. Podemos decir entonces que las relaciones bajas ayudan a mantener si bien no una porosidad baja, pero si detener la degradación del concreto por sulfatos dentro de un periodo >5 a ciclos.

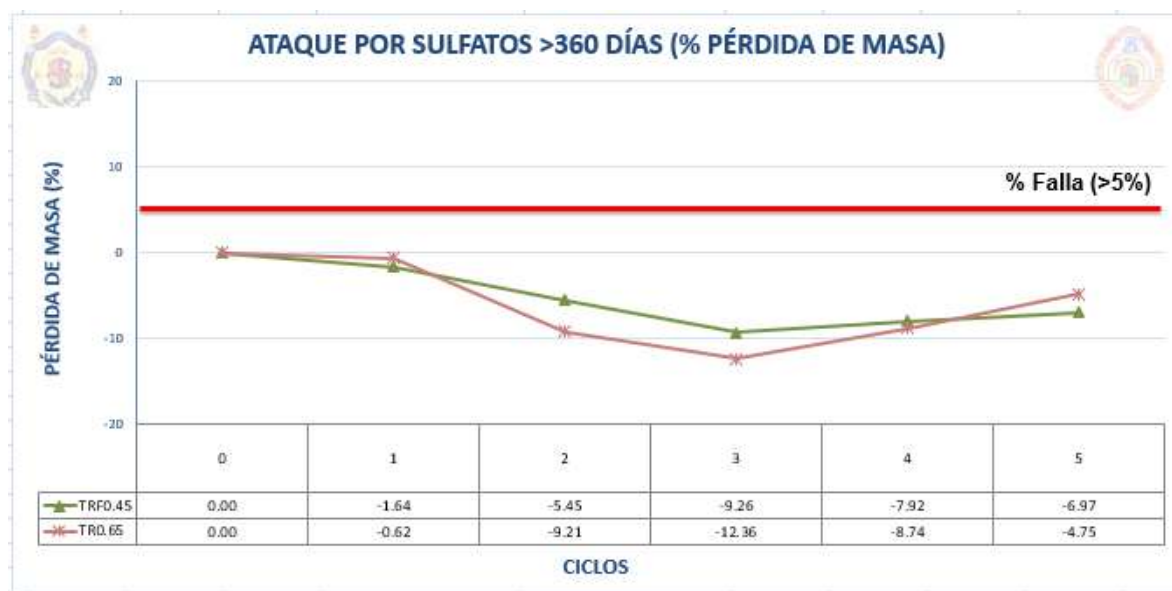


Ilustración 83. Comparación del % de pérdida de masa en concreto testigo con agregados reciclados y con diferentes relaciones a/c .

En la Ilustración 83, podemos observar la comparación entre los testigos con agregados pétreos reciclados con las dos diferentes relaciones a/c . en el cual, las dos líneas de tendencia de las mezclas se mantienen por debajo de la línea de falla ($>5\%$) situación que no se presentaba en las mezclas testigo con agregados pétreos convencionales (véase Ilustración 81), aunado a esto, al comparar las dos mezclas, vemos que, las mezclas con relación $a/c=0.45$ se mantiene un 2.22% por debajo de la mezcla con relación $a/c=0.65$, por lo que, aunque las dos mezclas con agregado reciclado se consideran resistentes a los sulfatos, las mezclas con relaciones a/c bajas, resisten un 2.22% más. En comparación de las mezclas con agregado pétreo

convencional y agregado reciclado, en el caso de las mezclas testigo con relación $a/c=0.45$ vemos una diferencia del 4.67%, y en el caso de las mezclas con relación $a/c=0.65$ vemos una diferencia de 11.27% otorgando mejoras al usar agregados pétreos reciclados.

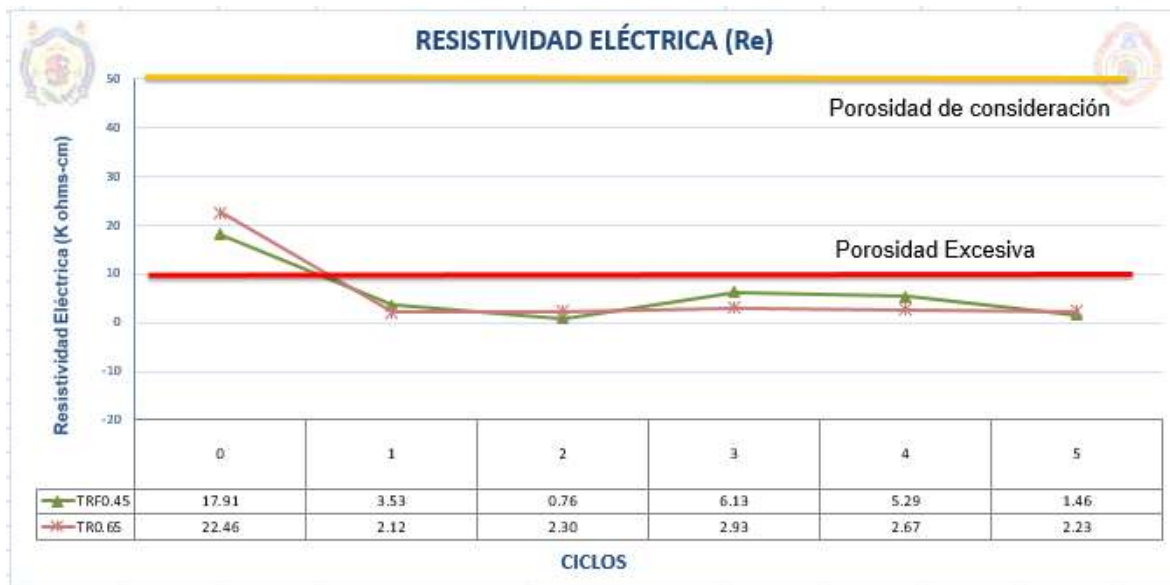


Ilustración 84. Re en mezclas testigo con agregados reciclados y con diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 84, podemos observar la comparación entre dos diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 con agregados pétreos reciclados, pero ahora comparando el % de pérdida de masa antes descrito (Ilustración 83) vs Re. Veíamos que la línea de tendencia de las mezclas con relaciones altas y bajas se mantiene por debajo de la línea de falla ($>5\%$) a lo largo de los 5 ciclos, considerándolos a las dos mezclas como concretos resistentes a los sulfatos. En comparación con la Re podemos verificar un comportamiento <10 KΩ-cm considerado dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como porosidad excesiva. En comparación de las Re de las mezclas con relación baja y alta, podemos diferenciar que la mezcla con relación $a/c=0.45$ comienza con una porosidad excesiva, subiendo en el 3er y 4to ciclo por encima del límite de la línea de porosidad encontrándose en un rango entre 10 a 50 KΩ-cm, considerado dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como porosidad de consideración, sin embargo, a partir del 4to ciclo de nuevo la tendencia es disminuir. Podemos decir entonces que las relaciones bajas y altas comparten una porosidad excesiva, pero aún con esta desventaja las mezclas con agregados pétreos reciclados disminuyen la degradación del concreto por sulfatos aún más que los testigos con agregados pétreos convencionales.

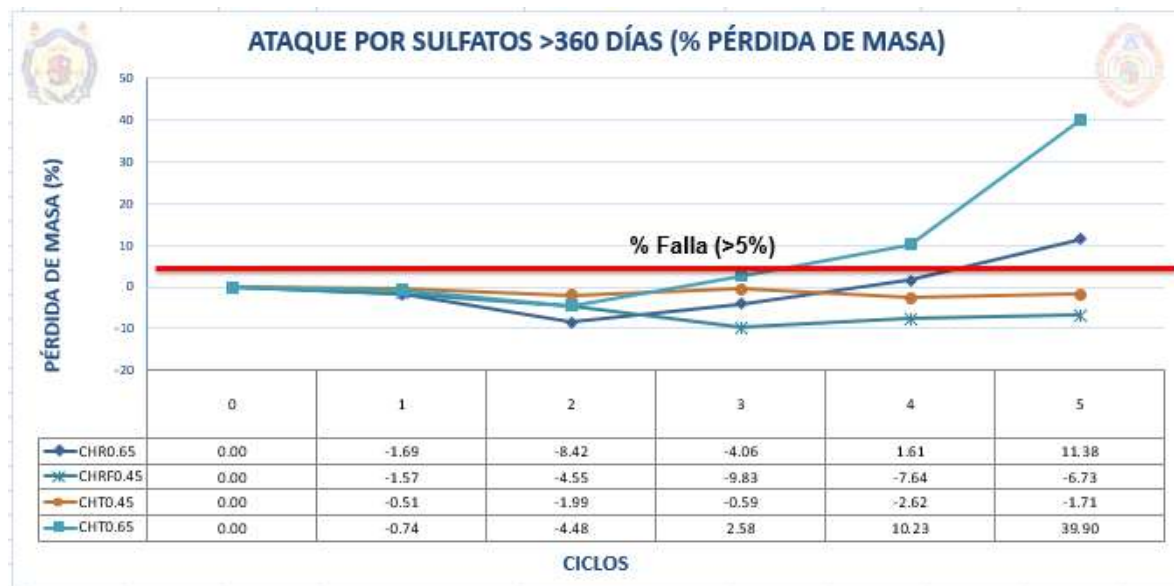


Ilustración 85. Comparación de mezclas con adición de CH, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 85, podemos observar la comparación entre las mezclas con adición de CH, con agregados pétreos convencionales y reciclados y las dos diferentes relaciones a/c. en el cual, la línea de tendencia de la mezcla con relaciones altas a/c= 0.65 a partir del 4to ciclo tienden a comportarse de manera ascendente sobrepasando así la línea de falla (>5%) La diferencia la marca el tipo de agregado en el cual el reciclado resulta menos agresivo con un % de pérdida de masa en el 5to ciclo de 11.38% a comparación del agregado convencional con una pérdida de masa de casi 40%. La mezcla con relación baja a/c= 0.45 llevan una tendencia constante a lo largo de los 5 ciclos de prueba, a partir del 3to ciclo tiende a subir el % de pérdida de masa de la mezcla con agregado convencional, sin embargo, no alcanza el nivel de falla ninguna de las dos mezclas, por lo que, se consideran las dos como concretos resistentes a los sulfatos.

En comparación de la CH con los testigos en cuanto a las mezclas con agregados reciclados y con relación a/c bajas vemos un comportamiento muy similar, esto quiere decir que la CH cumple con las expectativas de diseño. La diferencia se encuentra en las relaciones a/c altas en las cuales observamos una degradación del concreto por sulfatos mayor.

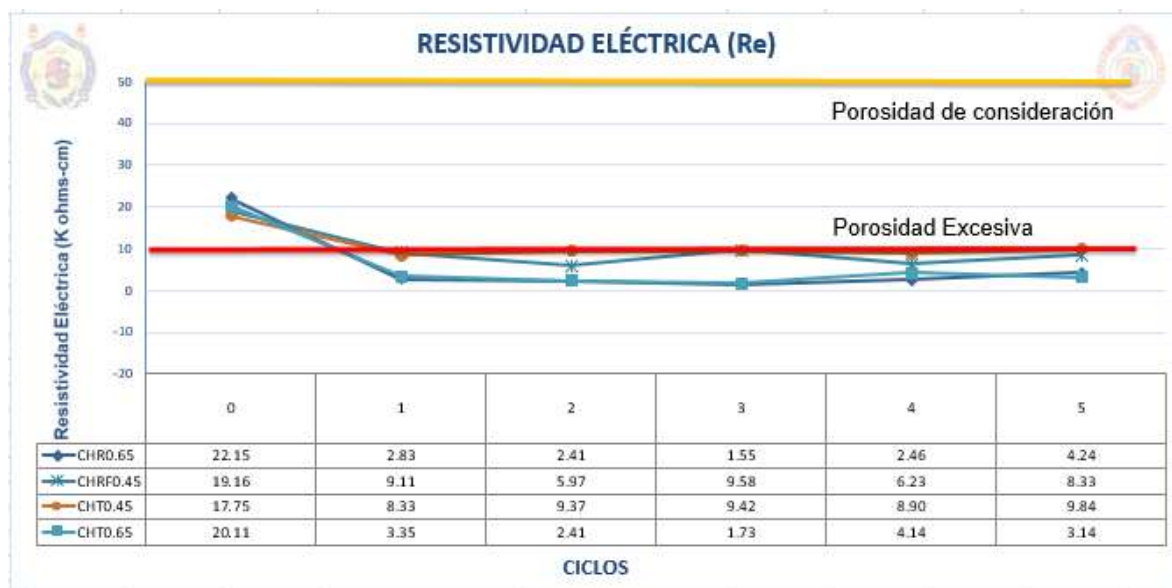


Ilustración 86. Re en mezclas con adición de CH, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 86, podemos observar la comparación entre dos diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 con agregados pétreos convencionales y reciclados, pero ahora comparando el % de pérdida de masa antes descrito (Ilustración 85) vs Re.

Como podemos observar, la Re de todas las mezclas se mantienen en un comportamiento $<10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$ considerado dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como porosidad excesiva. Sin embargo, vemos que las mezclas con relaciones a/c bajas en comparación con las relaciones a/c altas se mantienen cerca del límite ($10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$) con valores entre 8 y 9 $\text{K}\Omega\text{-cm}$. En el caso de las relaciones a/c altas ya sea con cualquier tipo de agregado disminuyen sus valores de Re entre valores de 3 y 4 $\text{K}\Omega\text{-cm}$. Cabe mencionar que comparadas las mezclas de CH con las TT mantienen un comportamiento similar en cuanto a Re (véase Ilustración 82 e Ilustración 84).

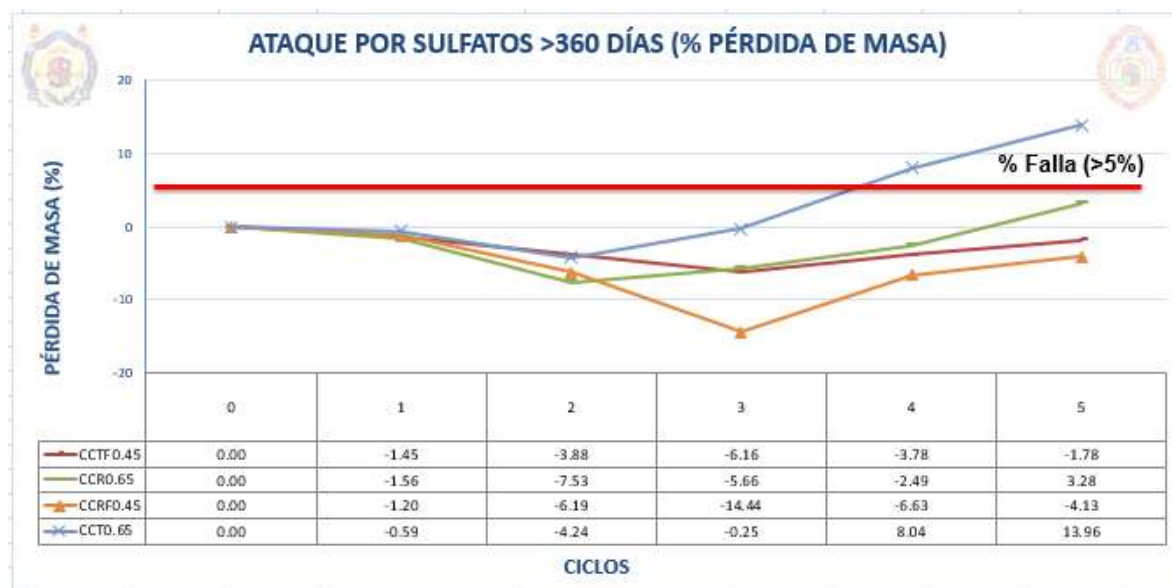


Ilustración 87. Comparación de mezclas con adición de CC, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 87, podemos observar la comparación entre las mezclas con adición de CC, con agregados pétreos convencionales y reciclados y las dos diferentes relaciones a/c. en el cual, la mayoría de las mezclas se mantiene por debajo de la línea de falla (>5%). La línea de tendencia de la mezcla con relaciones altas a/c= 0.65 a partir del 4to ciclo tienden a comportarse de manera ascendente sobrepasando en este caso sólo la mezcla con agregados convencionales, la diferencia la marca el tipo de agregado en el cual el reciclado resulta menos agresivo con un % de pérdida de masa en el 5to ciclo de 3.28% a comparación del agregado convencional con una pérdida de masa de casi 14%. La mezcla con relación baja a/c= 0.45 llevan una tendencia constante a lo largo de los 5 ciclos de prueba, a partir del 3to ciclo existe una diferencia muy marcada entre un tipo de agregado y otro, manteniéndose así el agregado reciclado como el que aporta mejores condiciones ante la pérdida de masa por ataque de sulfatos, sin embargo, cabe mencionar que ninguno de las dos mezclas alcanza el nivel de falla, por lo que, se consideran las dos como concretos resistentes a los sulfatos.

En comparación de la CC y la CH en cuanto a las mezclas con agregados reciclados y con relación a/c bajas vemos un comportamiento muy similar, esto quiere decir que la CH y la CC cumple con las expectativas de diseño, sobresaliendo entre ellas la CH. La diferencia se encuentra en que las relaciones bajas a/c= 0.45 tienen mejor comportamiento ante el desgaste por sulfatos que las relaciones a/c altas en las cuales observamos una degradación del concreto por sulfatos mayor. (véase Ilustración 84 e Ilustración 86)

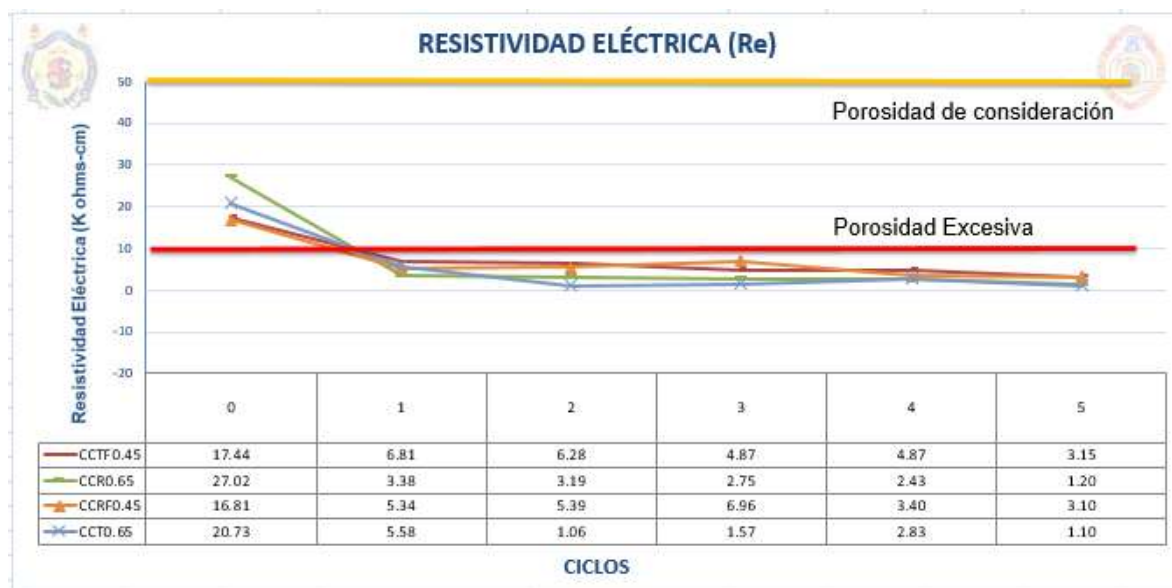


Ilustración 88. Re en mezclas con adición de CC, con agregados reciclados y convencionales, con diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 .

En la Ilustración 88, podemos observar la comparación entre dos diferentes relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 con agregados pétreos convencionales y reciclados, pero ahora comparando el % de pérdida de masa antes descrito (Ilustración 87) vs Re.

Como podemos observar, la Re de todas las mezclas se mantienen en un comportamiento $<10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$ considerado dentro de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017) como porosidad excesiva. En el caso de los concretos con relaciones $a/c=0.45$ ya sea con cualquier tipo de agregado mantienen sus valores de Re entre valores de $3 \text{ K}\Omega\text{-cm}$, a diferencia de los concretos con relaciones $a/c=0.65$ los cuales están entre 1.10 y $1.20 \text{ K}\Omega\text{-cm}$. Cabe mencionar que, comparadas las mezclas de CH, CC y TT, las mezclas con CH presentan mejores propiedades de resistencia a la degradación por sulfatos y se mantienen al límite de la línea de porosidad $<10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$. (véase Ilustración 82, Ilustración 84, Ilustración 86 e Ilustración 88).

4.6.2. Resultados de la prueba de profundidad de carbonatación en concreto

Como se mencionó con anterioridad, la prueba para la determinación de la carbonatación en elementos de concreto tiene como objetivo estimar el avance de la carbonatación en el concreto en mm/año. La edad de prueba es un factor fundamental en los resultados para conocer el tipo de permeabilidad a la que estará expuesta la estructura de concreto. Una vez calculada la profundidad de carbonatación con base a la Ecuación 10 y Ecuación 11 se llevó a cabo una proyección para estimar el tiempo que tardaría en penetrar el CO_2 por el recubrimiento de concreto hasta llegar al acero de refuerzo.

Se utilizaron 3 rodajas (5cm x 10cm) para las distintas mezclas de estudio, un total de 54 muestras. Las rodajas se dejaron expuestas a la intemperie por más de 6 meses, que es lo que marca la Norma (ISO-1920-12, 2015).

A continuación, en las siguientes gráficas, se mostrarán comparativas de la constante de carbonatación k en $\text{mm/año}^{0.5}$ de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65) con edades >700 días desde su elaboración.

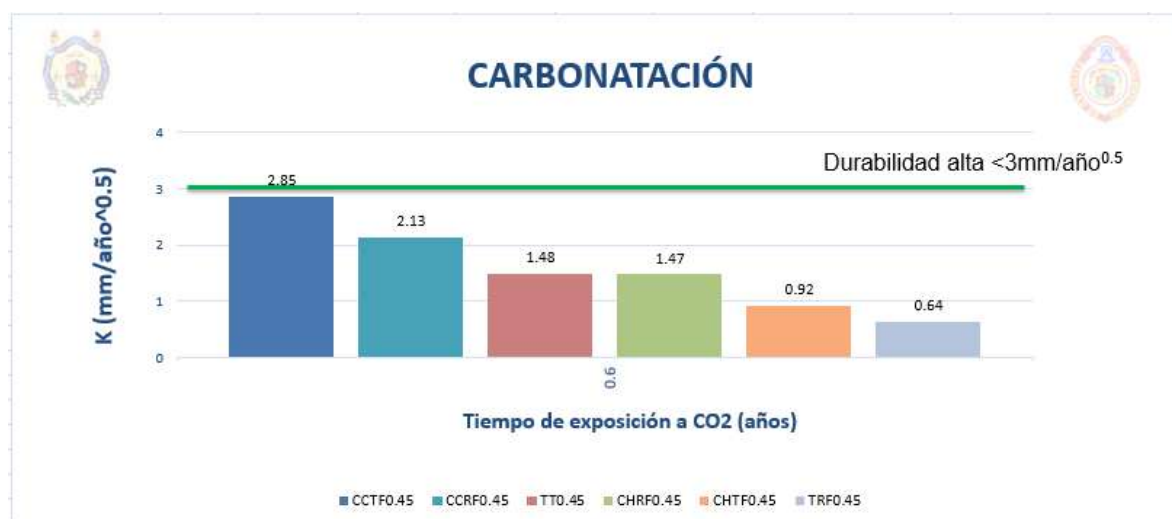


Ilustración 89. Comparación de profundidad de carbonatación de testigos con agregados convencionales y reciclados con una relación $a/c=0.45$.

En la Ilustración 89, podemos observar la comparación de la constante de carbonatación (k) entre los concretos testigos con agregados pétreos convencionales y reciclados con una relación $a/c= 0.45$.

Con base a la norma (NMX-C-515-ONNCCE, 2016) y a la constante de carbonatación (k en $\text{mm/año}^{0.5}$) referenciada en la Ecuación 10, vemos que todas las mezclas con relación $a/c= 0.45$ se encuentran con valores $<3 \text{ mm/año}^{0.5}$ encontrándose dentro de la norma como concretos de alta durabilidad. Aun así,

podemos observar que la mezcla TRF0.45 y la CHTF0.45 muestra mejores propiedades que las demás mezclas con $k = 0.64 \text{ mm/año}^{0.5}$ y $k = 0.92 \text{ mm/año}^{0.5}$ respectivamente.

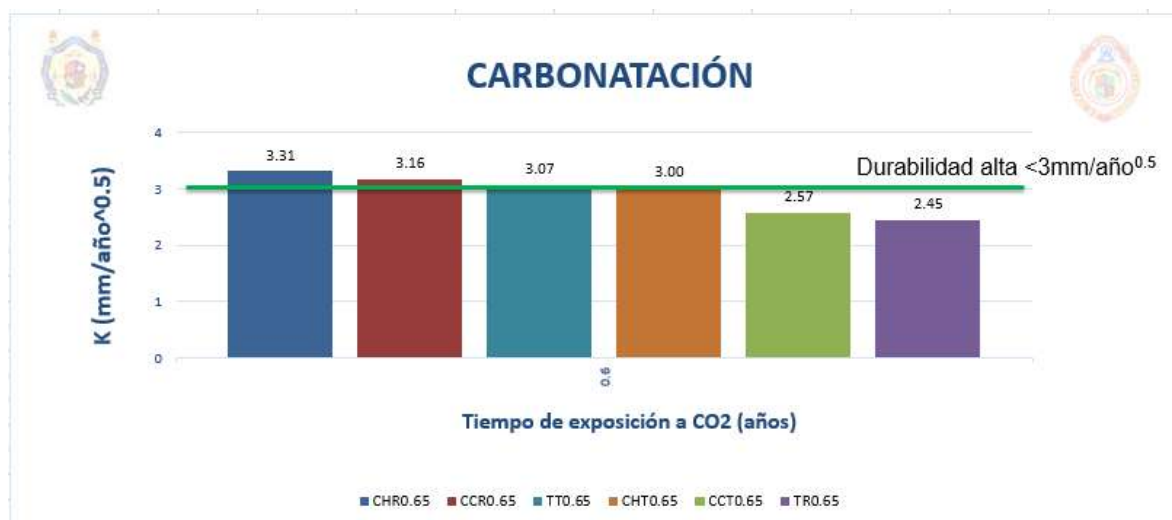


Ilustración 90. Comparación de profundidad de carbonatación de testigos con agregados convencionales y reciclados con una relación $a/c = 0.65$.

En la Ilustración 90, podemos observar la comparación de la constante de carbonatación (k) entre los concretos testigos con agregados pétreos convencionales y reciclados con una relación $a/c = 0.65$.

Podemos observar un comportamiento similar de las mezclas con relaciones a/c altas, manteniéndose valores de durabilidad media y alta con base a la norma (NMX-C-515-ONNCCE, 2016) y a la constante de carbonatación (k en $\text{mm/año}^{0.5}$) referenciada en la Ecuación 10, , destacando entre las mezclas las CCT0.65 y las TR0.65 con una $k = 2.57 \text{ mm/año}^{0.5}$ y $k = 2.45 \text{ mm/año}^{0.5}$.

4.6.3. Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de iones cloruro

Como se mencionó con anterioridad, la movilidad de los iones cloruro dentro del concreto está relacionada con su permeabilidad, algunos de los factores de mayor relevancia a cuidar son: la relación a/c, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. La presencia de adiciones puzolánicas ayudan a modificar la porosidad, reduciendo la permeabilidad y a su vez, mejorando la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto.

Se utilizaron 3 rodajas (5cm x 10cm) para las distintas mezclas de estudio, un total de 54 muestras. Se realizó a edades >600 días. La prueba fue de manera repetitiva para las distintas muestras de concreto, bajo las mismas condiciones de curado y temperatura.

La prueba para la determinación de la permeabilidad rápida de los iones cloruro dentro del concreto está sujeta bajo la norma (ASTM-C-1202, 2012). Y los resultados de durabilidad se registrarán con base a los criterios de penetrabilidad de iones cloruro por medio de la carga resultante en Coulombs (C) descrita con anterioridad en la Tabla 19.

A continuación, en las siguientes gráficas se mostrarán comparativas de la permeabilidad de los iones cloruro expresada en (C) de los diferentes especímenes con adiciones ecológicas (CC y CH), diferentes tipos de agregados (convencionales o reciclados) y distintas relaciones a/c (0.45 y 0.65).

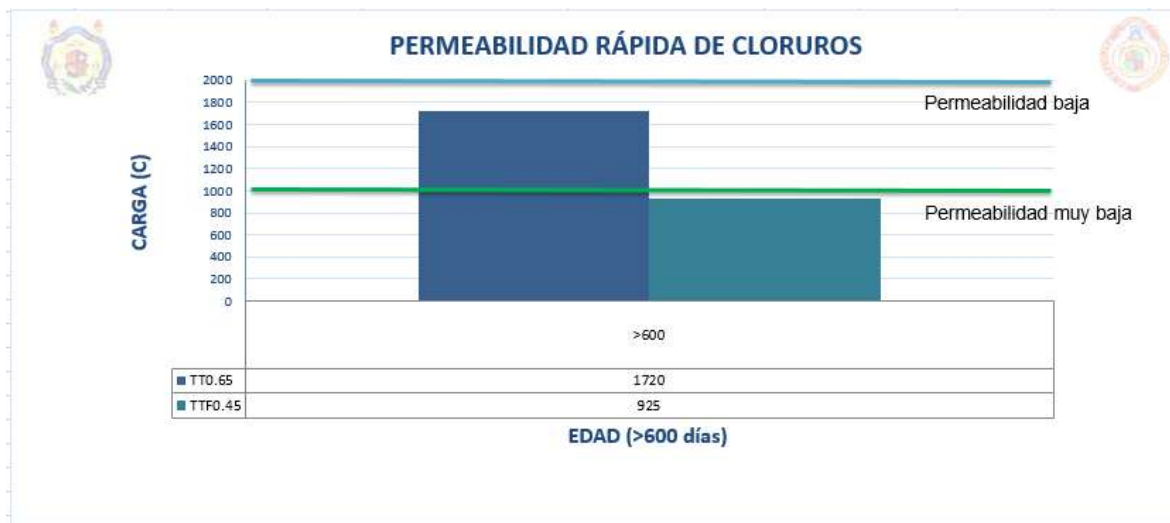


Ilustración 91. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros en concretos testigos con agregados convencionales y diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 91, podemos observar la comparación de permeabilidad rápida de cloruros entre los concretos testigos con agregados pétreos convencionales y las dos diferentes relaciones a/c. en el cual observamos que las dos mezclas de concreto tienen un comportamiento similar a lo largo de los 6 ciclos de prueba con una diferencia final de 722C entre ellas, encontrándose en el umbral designado

dentro de la Tabla 19 entre permeabilidad baja y muy baja, obteniendo mejores resultados de la mezcla con relación a/c baja en comparación con la relación a/c alta. En otras palabras, la TT0.45= 998C se clasifica como un concreto de permeabilidad muy baja, y la TT0.65=1720C se clasifica como un concreto de permeabilidad baja. Cabe mencionar que los dos se encuentran como concretos durables bajo los criterios de la norma (ASTM-C-1202, 2012).

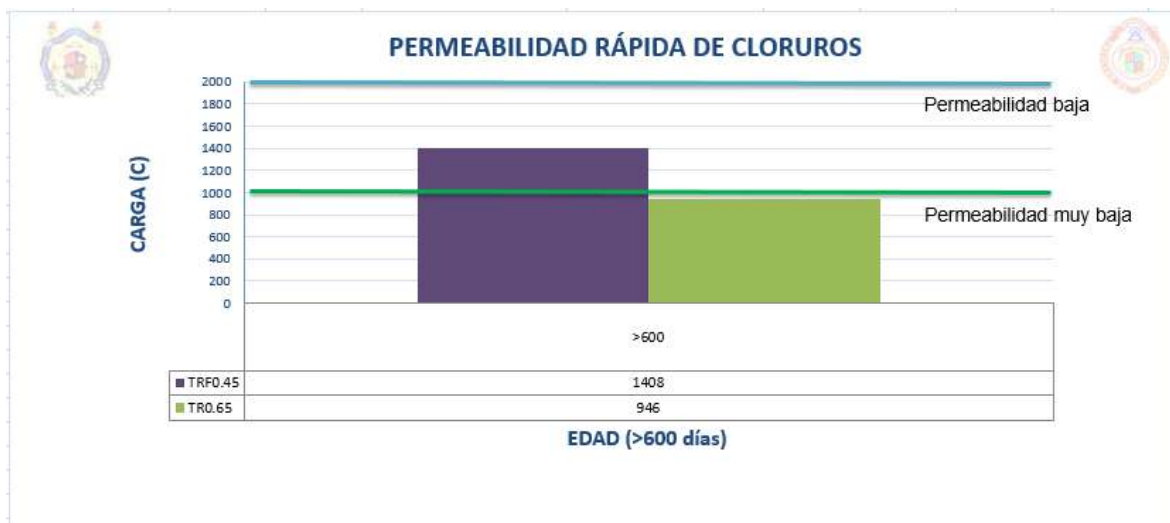


Ilustración 92. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros en concretos testigos con agregados reciclados y diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 92, observamos que las dos mezclas de concreto tienen un comportamiento similar a lo largo de los 6 ciclos de prueba con una diferencia final de 462C entre ellas, encontrándose en el umbral designado dentro de la Tabla 19 entre permeabilidad baja y muy baja, obteniendo mejores resultados de la mezcla con relación a/c alta en comparación con la relación a/c alta. Esto quiere decir que se obtuvieron mejores resultados de los concretos con agregados pétreos reciclados bajo relaciones de a/c bajas. Cabe mencionar que los dos se encuentran como concretos durables bajo los criterios de la norma (ASTM-C-1202, 2012).

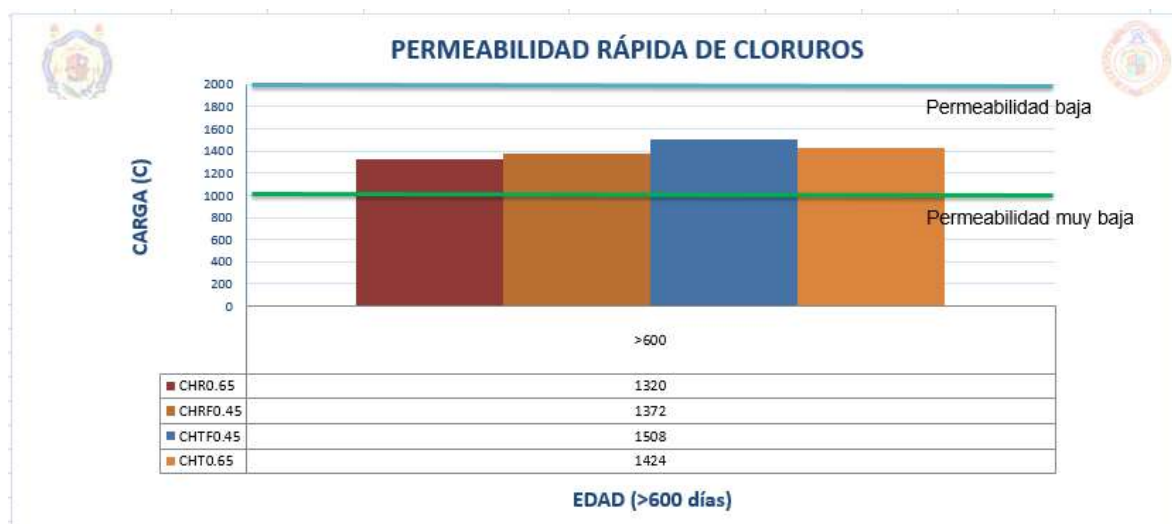


Ilustración 93. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros de los concretos con CH, agregados convencionales y reciclados y diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 93, observamos que las mezclas de concreto tienen un comportamiento similar a lo largo de los 6 ciclos de prueba, encontrándose en el umbral designado dentro de la Tabla 19 entre permeabilidad baja y muy baja, cabe destacar que las mezclas que presentan mejores resultados entre las CH son los concretos cuyas mezclas contienen agregados pétreos reciclados, sobresaliendo estos sobre los convencionales. Todos los concretos con sustitución de CH se encuentran como concretos durables bajo los criterios de la norma (ASTM-C-1202, 2012).

En comparación de las CH con los testigos de diferentes tipos de agregado pétreo (véase Ilustración 91, Ilustración 92 e Ilustración 93), podemos deducir que las mezclas que mejor comportamiento tienen hasta ahora son: las TR0.65 con una permeabilidad de 946 C, seguido de la TT0.45 con una permeabilidad de 998 C y la CHRO.65 con una permeabilidad de 1320 C.

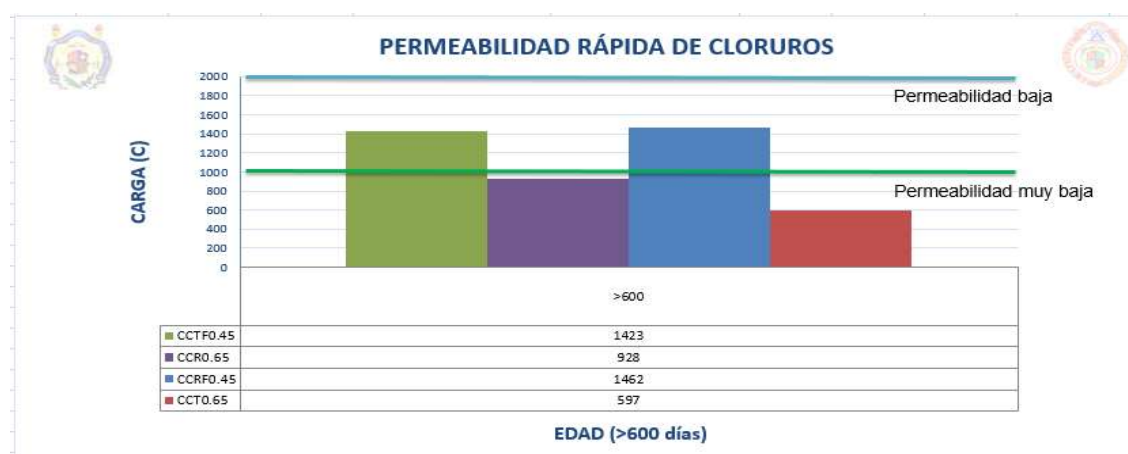


Ilustración 94. Comparación de la permeabilidad rápida de cloruros de los concretos con CC, agregados convencionales y reciclados y diferentes relaciones a/c.

En la Ilustración 94, observamos que las mezclas de concreto tienen un comportamiento similar a lo largo de los 6 ciclos de prueba, encontrándose en el umbral designado dentro de la Tabla 19 entre permeabilidad baja y muy baja, cabe destacar que las mezclas que presentan mejores resultados entre las CC son los concretos cuyas mezclas contienen relaciones a/c altas (0.65), sobresaliendo estas sobre las relaciones a/c bajas (0.45). Todos los concretos con sustitución de CC se encuentran como concretos durables bajo los criterios de la norma.

En comparación de los concretos con CC, CH y los Testigos con diferentes tipos de agregado pétreo (véase Ilustración 91, Ilustración 92, Ilustración 93 e Ilustración 94), podemos deducir que las mezclas que mejor comportamiento tienen hasta ahora ante la penetración de iones cloruro son: las CCT0.65 con una permeabilidad de 597 C, seguido de la CCR0.65 con una permeabilidad de 928 C, la TR0.65 con una permeabilidad de 946 C, la TT0.45 con una permeabilidad de 998 C y la CHR0.65 con una permeabilidad de 1320 C. Todas ellas encontrándose como concretos durables bajo los criterios de la norma (ASTM-C-1202, 2012).

4.7. Tabla General de Resultados

Se utilizó la clasificación de colores y valores de la siguiente tabla para poder determinar qué adiciones tienen las mejores propiedades ante el diseño por durabilidad. No se sumó la evaluación de la corrosión debido a que dependiendo la zona en que se realice la estructura de concreto reforzado se puede determinar el uso de estas mezclas de concreto o no, ya que para zonas urbanas tenemos una corrosión despreciable y para zonas costeras una corrosión elevada o muy elevada.

10	DURABILIDAD MUY ALTA
8	DURABILIDAD ALTA
6	DURABILIDAD MEDIA
4	DURABILIDAD BAJA
2	DURABILIDAD MUY BAJA

Tabla 28. Tabla de clasificación y evaluación con criterios de durabilidad para las diferentes mezclas de estudio.

TABLA GENERAL DE RESULTADOS												
Clave de Mezcla	PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS		PRUEBAS DESTRUCTIVAS	PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS				PRUEBAS POR DURABILIDAD			CALIFICACIÓN	
	Resistividad Eléctrica (Re)	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	Compresión simple a 28 días	Ecorr		Icorr		ATAQUE POR SULFATOS	PERMEABILIDAD RÁPIDA DE CLORUROS	CARBONATACIÓN (k)		
				1 a 5	6 a 12	1 a 5	6 a 12					
	K ohms-cm	m/s	MPa	mV		μA/cm2			C	mm/año*0.5	PROMEDIO	
TT 0.45	22.78	4620	30.46	>200	<-350	<0.1	>1	1.48	998	1.48	9	
TRF0.45	26.11	4406	43.23	>200	<-350	<0.1	>1	0.64	1408	0.64	8	
TT0.65	28.08	4465	17.55	>200	<-350	<0.1	>1	3.07	1720	2.78	6	
TR0.65	25.53	4067	16.62	>200	<-350	<0.1	>1	2.45	946	2.45	6	
CHTF0.45	30.43	4636	37.50	>200	<-350	<0.1	>1	0.92	1508	0.92	8	
CHRF0.45	28.67	4311	35.09	>200	<-350	<0.1	>1	1.47	1372	1.47	8	
CHT0.65	28.47	3955	16.49	>200	<-350	<0.1	>1	3.00	1424	3.00	5	
CHR0.65	26.31	4364	18.10	>200	<-350	<0.1	>1	3.31	1320	3.31	6	
CCTF0.45	26.31	4320	34.77	>200	<-350	<0.1	>1	2.85	1423	2.85	7	
CCRF0.45	27.29	4208	33.79	>200	<-350	<0.1	>1	2.13	1462	2.13	7	
CCT0.65	38.88	4456	22.74	>200	<-350	<0.1	>1	2.57	597	2.57	7	
CCR0.65	26.31	3959	20.45	>200	<-350	<0.1	>1	3.16	928	3.16	6	

Tabla 29. Tabla General de Resultados de todas las mezclas de estudio.

Como podemos observar las mezclas con mayor viabilidad de ser utilizadas para el diseño por durabilidad son:

TT0.45 con una calificación de 9 o durabilidad muy alta, TRF0.45, CHTF0.45 y CHRF0.45 con una calificación de 8 o durabilidad alta.

5. Conclusiones y Trabajo futuro

5.1. Conclusiones Particulares

5.1.1. Conclusiones de las pruebas de caracterización de los agregados pétreos.

Con base a la (Tabla 22) podemos concluir sobre los siguientes parámetros:

En la prueba de humedad de absorción vemos un caso crítico para el caso del agregado pétreo reciclado de T.M. de $\frac{3}{4}$ " con un valor $>6\%$, sin embargo, con ayuda de las adiciones ecológicas se pretende disminuir esta humedad de absorción. La arena muestra un % de Humedad media de 3.5% y la que mejor presentó propiedades fue la grava convencional de T.M. de $\frac{1}{2}$ " con un 1.6% .

Dentro de la prueba de densidad vemos en el caso de todos los agregados una densidad aceptable dentro de la normativa $>2.15 \text{ g/cm}^3$ esto coadyuvará a mejoras en las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto.

Podemos concluir que dentro del % que pasa la malla no. 200 los agregados gruesos y finos de estudio se encuentran en carácter de aceptable.

En la prueba de terrones de arcilla y partículas deleznales podemos concluir que nos encontramos en un rango aceptable el cual cumple con los requisitos de ser $<1\%$ según la norma (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).

Podemos concluir dentro de la prueba de Equivalente de arena que cumple con los parámetros establecidos por la norma (NMX-C-416-ONNCCE, 2003) con un valor $>85\%$.

Dentro de la prueba de colorimetría para verificar el contenido de impurezas orgánicas que produzcan una coloración más oscura que de la solución normalizada no. 3, vemos que el agregado fino cumple con este requisito con un valor de no.2, por lo tanto, la arena no tiene ningún problema para su empleo en elaboración de mezclas de concreto.

Granulometría en agregado pétreo fino. Pudimos observar una distribución granulométrica adecuada dentro de los límites establecidos por la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) Con un M.F. de 2.71 lo cual atribuye una composición granulométrica adecuada para el diseño del proporcionamientos del concreto hidráulico siendo este >2.3 y <3.1 .

En los parámetros de clasificación SUCS pudimos clasificar al agregado fino como una arena bien graduada (SW) con un contenido de arena de 95.6% y 4.4% de finos.

Granulometría en agregado pétreo convencional de T.M. de $\frac{1}{2}$ ". Podemos comprobar que la granulometría de la grava convencional presenta una distribución granulométrica adecuada, encontrándose dentro de los límites establecidos por la norma. En los parámetros de clasificación SUCS pudimos clasificar al agregado

grueso convencional como una grava mal graduada (GP) con un contenido de grava de 96.7% y 3.3% de arena.

Granulometría en agregado pétreo reciclado de T.M. de $\frac{3}{4}$ ". Podemos comprobar que la granulometría de la grava reciclada presenta una distribución granulométrica inadecuada, encontrándose con un contenido más de gruesos, provocando salirse de los límites granulométricos establecidos por la norma. En los parámetros de clasificación SUCS pudimos clasificar al agregado grueso reciclado como una grava mal graduada (GP) con un contenido de grava de 97.7% y 2.3% de arena. Sin duda alguna la mal distribución granulométrica en ausencia de arena puede provocar una porosidad excesiva en la matriz cementicia, sin embargo, las adiciones de cemento y cenizas puzolánicas ayudarán a completar la estructura.

5.1.2. Conclusiones de las pruebas de Microscopia de Barrido (MEB) y Microanálisis Químico Elemental vía EDS.

En los resultados de las pruebas de Microanálisis con ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y los resultados del Microanálisis Químico Elemental vía EDS pudimos observar la comparación entre todas las muestras de concreto cuya mezcla contenía sustitución a un 10% de cenizas puzolánicas (adición ecológica), en otras palabras; sólo se analizaron aquellas mezclas en las cuales se utilizó ceniza en sustitución para verificar y/o comprobar que realmente la matriz cementicia tuviera reacción formando compuestos químicos como el Óxido de Aluminio o Alúmina (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO) y Óxido de Silicio (SiO_2). Desconectando los poros que transportan los agentes que degradan al concreto y corroen al acero de refuerzo.

Podemos deducir que la edad de los especímenes va ligada directamente con la densificación de la matriz cementicia y con la madurez del concreto para alcanzar su máxima resistencia. Al ir densificando la matriz con el paso del tiempo consigo van cerrándose y/o desconectándose los poros interconectados que posiblemente se encuentren al momento de la elaboración de los especímenes de concreto, así como de igual forma se van evaporando las burbujas de aire que posteriormente quedarán como vacíos dentro del concreto. Estos vacíos que quedarán son los que nos interesa llenar de estas adiciones ecológicas para que junto con sus propiedades Alumino-Silíceas ayuden a mejorar las propiedades fisicoquímico-mecánicas de los concretos con acero de refuerzo.

En comparación con las CHT de diferente relación a/c (0.45 y 0.65) pudimos observar que las relaciones de a/c= 0.45 contienen una mayor distribución morfológica dentro de los poros a comparación de las mezclas con relaciones altas. Sin embargo, en el Microanálisis Químico Elemental podemos observar que las mezclas con relación a/c=0.65 contienen un mayor % de Si en un 2.07% y Al en un 0.81% (véase Tabla 27). Esto tal vez se deba a la mayor cantidad de agua, por lo que existe una mayor reacción entre las partículas. Cabe mencionar que a pesar de que la mezcla de concreto con relación a/c baja parece tener menor cantidad de

estos elementos su distribución morfológica es más distribuida, ocupando mayor área superficial en los poros de la matriz cementicia logrando a su vez densificarla. Esto lo podemos corroborar en los resultados de resistencia a la compresión.

En comparación de las cenizas de CHR con diferente relación a/c, podemos observar mayor contenido de Oxígeno (O) en un 62.62%, Aluminio (Al) en un 3.47%, Silicio (Si) en un 5.55% (véase Tabla 27) en el caso de las relaciones a/c bajas, sin embargo, morfológicamente, la distribución de los compuestos químicos como Al_2O_3 y CaO tienden a ser más uniformes en toda la zona del poro. Cabe mencionar que aun así con sus diferencias de distribución, las dos mezclas cuentan con presencia de estos compuestos en sus poros. Ahora bien, comparando las CHT con las CHR verificamos una distribución muy similar dependiendo de su relación a/c y podemos destacar que las mezclas con CHR triplican en la mayoría de los casos los % de cantidades dentro del Microanálisis Químico Elemental, esto quiere decir que los agregados pétreos reciclados tienden a mejorar las propiedades químicas llevando a cabo una mayor reacción.

En los microanálisis de las CCT de diferente relación a/c (0.45 y 0.65) pudimos observar que independientemente del tipo de relación a/c los poros de las matrices presentan una distribución morfológica uniforme dentro de los poros a comparación de las mezclas con CH. en el Microanálisis Químico Elemental podemos observar que las mezclas con relación a/c=0.65 tienden a tener mayor % de Al en un 1.20% y para el caso de las relaciones a/c= 0.45 mayor % de Si en un 6.65% (véase Tabla 27). Sin embargo, las características tienden a ser muy parecidas, esto se debe a la forma de partícula de la CC la cual recordemos que tiene una estructura en forma de laja por lo que existe una mayor reacción entre las partículas al tener esta mayor susceptibilidad de absorción. Encontramos también una mejor distribución de los elementos alumino-silíceos dentro de la estructura del poro y al mismo tiempo una mayor concentración de Alúmina (Al_2O_3), Cal (CaO), Carbonato de calcio (CaCO_3) y Sílice (SiO_2), así como posiblemente el compuesto Ferritoaluminato tetracálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) que habitualmente se denomina Clinker siendo el compuesto de los cementos Portland.

Dentro del microanálisis de las CCR de diferente relación a/c (0.45 y 0.65) pudimos observar que la composición morfológica de las cenizas no se distribuye por toda el área como es el caso de las CCT. En el Microanálisis Químico Elemental podemos analizar que tienen una composición similar (véase Tabla 27). Encontramos concentración de Alúmina (Al_2O_3), Cal (CaO), Carbonato de calcio (CaCO_3) y Sílice (SiO_2), así como Ferritoaluminato tetracálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

Cabe mencionar que la matriz cementicia de las CCR0.65 podemos encontrar otro tipo de formación morfológica muy parecida a las CHR, por lo que podemos concluir que el CPO de la estructura de los agregados pétreos reciclados reaccionan de una forma particular con los elementos alumino-silíceos de las adiciones ecológicas.

Dentro del Microanálisis de Barrido con MEB y el Microanálisis Químico Elemental, podemos decir que los elementos que se encuentran en la mayoría de los poros de las matrices estudiadas son: Aluminio o Alúmina (Al_2O_3), Óxido de Silicio o Sílice (SiO_2), Óxido de calcio o Cal viva (CaO), los cuales otorgan las siguientes propiedades a los concretos:

Los contenidos de Óxido de Aluminio o Alúmina (Al_2O_3) confieren propiedades cerámicas a la matriz cementicia como: alta dureza, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, alta resistencia mecánica.

Los contenidos de Óxido de Silicio o Sílice (SiO_2) en forma de gel de sílice confieren propiedades de un desecante, es decir, altos contenidos de absorción, bajo coeficiente de expansión térmica, aislante eléctrico, alta resistencia mecánica.

Los contenidos de Óxido de calcio o Cal viva (CaO) otorgan propiedades a de resistencia mecánica, es el principal compuesto del cemento.

5.1.3. Conclusiones de las pruebas no destructivas

5.1.3.1. Conclusiones de la prueba de Resistividad eléctrica (Re)

Dentro de los resultados de la prueba de Resistividad eléctrica pudimos observar la comparación entre dos diferentes relaciones a/c 0.45 y 0.65 con agregados pétreos convencionales y reciclados y con diferentes tipos de adiciones ecológicas CH y CC, a edades tempranas (28, 45, 60, 90 días) y edades tardías (500 días), en el cual, se discutió la comparación la porosidad interconectada de los diferentes concretos de estudio con base a los criterios de probabilidad de riesgo a la corrosión basados en la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). Según la norma antes mencionada, existen cuatro rangos de resistividad en los cuales cataloga a los concretos con la probabilidad que tienen estos por medio de un % de poros interconectados de dar paso a los agentes que corroen al acero de refuerzo. (véase Tabla 7)

En comparación de las CC, CH y los T (véase Ilustración 61, Ilustración 62, Ilustración 63 e Ilustración 64) concluimos que la mayoría de los concretos con todas sus diferentes propiedades y componentes muestran un comportamiento similar con diferencias mínimas entre ellas, comenzando con una porosidad excesiva en edades tempranas y como porosidad de consideración a edades tardías, siendo la edad de 90 días en la cual en la mayoría de los casos se presenta el cambio de un rango a otro, esto con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

Podemos verificar una diferencia mínima, destacando entre los que presentan mejores resultados los concretos siguientes: CCT0.65 con 38.88 kΩ-cm, CHTF0.45 con 30.43 kΩ-cm, CHRF0.45 con 28.67 kΩ-cm, CHR0.65 28.47 kΩ-cm, TT0.65 con 28.08 kΩ-cm y CCRF0.45 con 27.29 kΩ-cm. La tendencia de los especímenes como ya lo vimos anteriormente en las gráficas de resultados es la de disminuir su porosidad a raíz de que la edad de los especímenes vaya incrementando, se espera que este comportamiento siga en aumento a edades más tardías llegando inclusive a un rango como porosidad baja o extremadamente baja, considerándose así, como concretos de alta resistencia a la corrosión. Dicho lo anterior, podemos verificar que una de las mejoras es otorgada a la sustitución de adiciones puzolánicas, estas disminuyen la porosidad incrementando la resistencia del concreto al densificar la matriz cementicia, las CH y las CC fueron de las mezclas que presentaron mejores resultados de Re, esto quiere decir que realmente las propiedades puzolánicas de las sustituciones de cenizas coadyuvan a mejorar las características de los concretos.

5.1.3.2. Conclusión de la prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

Dentro de los resultados de la prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico pudimos observar la comparación entre dos diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65), con agregados pétreos convencionales y reciclados y con diferentes tipos de adiciones ecológicas CH y CC, a edades tempranas (28, 45, 60, 90 días) y edades tardías (500 días), en el cual, se discutió la comparación de la calidad de diferentes concretos de estudio con base a los criterios basados en la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). Según la norma antes mencionada, existen cinco criterios de clasificación de VPU en los cuales cataloga a los concretos midiendo la variación de la homogeneidad que tienen a lo largo del tiempo debido a la agresividad del medio que los rodea (véase Tabla 8).

En comparación de las CC, CH, los dos tipos de agregado (convencionales y reciclados) y las diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65) en las mezclas de concreto (véase Ilustración 65, Ilustración 66, Ilustración 67 e Ilustración 68) podemos decir que destacan los concretos con agregado pétreo convencional, las relaciones $a/c=0.45$ y las CH. Podemos verificar una diferencia mínima, destacando entre los que presentan mejores resultados los concretos siguientes: CHTF0.45 con un valor de 4636 m/s, TT0.45 con 4620 m/s, TT0.65 con 4465 m/s, CCT0.65 con 4456 m/s y TRF0.45 con 4406 m/s. Cabe destacar que todas las mezclas mantienen una calidad del concreto entre buena y excelente, calificándolos como concretos de alta durabilidad según la (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

Concluimos que la mayoría de los concretos con todas sus diferentes propiedades y componentes muestran un comportamiento similar con diferencias mínimas entre ellas, manteniéndose en un rango de calificación de buena calidad en edades tempranas y en la mayoría incrementando este nivel hasta alcanzar un rango de excelente calidad del concreto a edades tardías, siendo la edad de 90 días (que es cuando el concreto alcanza su máxima resistencia) con la que comienza a incrementar la VPU de los dos diferentes tipos de concreto de estudio. Todo esto con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017).

Una de las mejoras es otorgada a la sustitución de adiciones puzolánicas, estas disminuyen la porosidad incrementando la resistencia del concreto al densificar la matriz cementicia, las CH fueron de las mezclas que presentaron mejores resultados de la VPU, esto quiere decir que realmente las propiedades puzolánicas de las sustituciones de cenizas coadyuvan a mejorar las características de los concretos. Otra de las mejoras es atribuida a la relación a/c , en la cual veíamos que en la mayoría de los casos las relaciones con menor relación $a/c=0.45$ coadyuvan a disminuir su porosidad.

5.1.4. Conclusión de las pruebas destructivas

5.1.4.1. Conclusión de la prueba de resistencia a la compresión

Dentro de los resultados de la prueba de resistencia a la compresión pudimos observar la comparación entre dos diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65), con agregados pétreos convencionales y reciclados y con diferentes tipos de adiciones ecológicas CH y CC, a edades tempranas (28, 45, 90 días) y edades tardías (500 días) en el cual, se discutió la comparación de la calidad de diferentes concretos de estudio con base a los criterios basados en la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) y en la Tabla 9.

Todas las relaciones a/c bajas (0.45) aportan mejores resultados de resistencia >30 MPa desde los primeros 28 días e incrementando a edades tardías considerándose estos como concretos de alta durabilidad con base a la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015), en comparación de las relaciones a/c altas (0.65) que mantenían una resistencia similar a lo largo de las edades de prueba, encontrándose en la mayoría de los casos dentro de la norma como concretos de mediana a baja resistencia a la compresión o de baja durabilidad, todo esto debido a que la cantidad de agua utilizada en la fabricación de la mezcla es mayor aumentando consigo la relación de vacíos dentro de la matriz cementicia.

Las mezclas con agregados pétreos reciclados aportan mejoras en comparación con los agregados pétreos convencionales, una de las posibilidades es atribuida al tipo de cemento con el que está fabricado el agregado pétreo reciclado producto de la demolición de la torre del IMSS: Cemento Portland Ordinario (CPO), el cual contiene altos índices de sílice y calcio aportando mejoras en los agregados reciclados. Otra de las conclusiones es atribuida a las adiciones ecológicas CH y CC, las cuales contienen altos índices de sílice y alúmina, elementos que contribuyen a mantener unidos los agregados pétreos con la pasta cementicia, disminuyendo la porosidad e incrementando la resistencia del concreto al densificar la matriz, esto quiere decir que realmente las propiedades puzolánicas de las sustituciones de cenizas coadyuvan a mejorar las características de los concretos.

Otro aporte es el tipo de cemento utilizado para el diseño de las mezclas de concreto de estudio, se utilizó cemento tipo CPC30RRS (Cemento Portland Compuesto-Resistente a los Sulfatos), esta primicia de designar un concreto de resistencia de 30R nos garantiza una resistencia alta.

En comparación de las CH, CC y TT podemos identificar que los concretos que mejores propiedades ante la resistencia a la compresión son: TRF=0.45 con una resistencia de 55.55 MPa, CHRFO.45 con 47.96 MPa, CCRFO.45 38.31 MPa, TT=0.45 con 37.94 MPa, CHTF=0.45 con 36.13 MPa. Todas estas mezclas de concreto se encuentran dentro de la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) como concretos de alta durabilidad. Destacando entre la mayoría las CH, los agregados reciclados y las relaciones a/c bajas.

5.1.5. Conclusión de las pruebas electroquímicas (Corrosión)

Dentro de las pruebas electroquímicas encontramos que la variación del Potencial de corrosión (E_{corr}) y la Densidad eléctrica de corrosión (i_{corr}) depende del contacto directo que se tiene con la solución de NaCl al 3.5%. Si bien, observamos que dentro de los primeros 5 ciclos de prueba las muestras se encontraban en un estado completamente pasivo entre valores de $E_{corr} > -200$ mV y de $i_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$ considerados por la (CYTED-DURAR, 1998) con un nivel de corrosión despreciable. A partir del sexto ciclo que es cuando los especímenes entran en contacto directo con la solución de NaCl vemos como los E_{corr} incrementan rápidamente otorgando valores < -350 mV y con $i_{corr} > 1 \mu A/cm^2$ clasificando a estos valores con un nivel de corrosión Muy elevado. Ahora bien, cuando se retiraban de la solución y se medía el E_{corr} nos encontrábamos que éste incrementaba y por ende disminuía la i_{corr} manteniéndose para la mayoría de los casos entre valores entre -200 mV a > -200 mV considerados estos con un nivel de corrosión Moderado a Elevado.

Como primicia podemos concluir que estos tipos de adiciones ecológicas, así como el mismo testigo no nos funcionan para estructuras de concreto reforzado expuestos a ambientes marinos, sin embargo, si nos funcionan para las demás zonas donde no tenemos tanta presencia de cloruros. Retomando la prueba de Permeabilidad rápida de cloruros, veíamos que las muestras se encontraban con bajos niveles de permeabilidad con valores < 2000 C catalogándolos como concretos de baja y muy baja permeabilidad por lo que existe una discrepancia con estos resultados.

Transformando la Densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) a Velocidad de corrosión (V_{corr}) en mm/año, vemos que por máximo alcanzaron valores de 0.06 mm/año en condiciones sumergidas, 0.01 mm/año superficialmente secas y < 0.001 mm/año para condiciones secas.

Se concluye que para esta prueba las mezclas que muestran un mejor comportamiento ante la Velocidad de corrosión son las mezclas TT0.45 y las CHR0.45.

5.1.6. Conclusión de las pruebas por durabilidad en el concreto

5.1.6.1. Conclusiones de la prueba de resistencia del concreto a los sulfatos de sodio

Dentro de los resultados de la prueba de resistencia del concreto a los sulfatos de sodio pudimos observar la comparación entre dos diferentes relaciones $a/c = 0.45$ y 0.65 con agregados pétreos convencionales y reciclados, en el cual se discutió la comparación de los % de pérdida de masa para cada una de las mezclas con que se fabricaron los diferentes concretos.

Una de las mejoras es atribuida al tipo de cemento utilizado para el diseño de las mezclas de concreto de este estudio, se utilizó cemento tipo CPC30RRS esto coadyuva a obtener mejoras en cuanto al rendimiento ante el desgaste por pérdida de masa de ataque por sulfatos de sodio.

Concluimos que las mezclas con agregados pétreos reciclados aportan mejoras en comparación con los agregados pétreos convencionales, una de las posibilidades es atribuida al T.M. de partícula; el agregado convencional triturado fue de $\frac{1}{2}$ " a comparación del agregado reciclado de $\frac{3}{4}$ ". El T.M. de partícula contribuye a mantener un % de porosidad menor ocasionando una densificación de la matriz cementicia del concreto, aunado a esto podemos hacer hincapié en el tipo de cemento con el cual diseñaron el concreto utilizado en la estructura de la torre del IMSS: cemento tipo CPO, el cual contiene altos índices de sílice y calcio, aportando mejoras en los agregados reciclados utilizados en las mezclas de estudio. Otra de las conclusiones es atribuida a la CH y CC, las cuales contienen altos índices de sílice y alúmina, elementos que contribuyen a mantener unidos los agregados pétreos con la pasta cementicia, impidiendo la interconexión de los poros. Cabe mencionar que la CH resultó tener mejores propiedades que la CC en relaciones $a/c = 0.45$. Podemos decir que las relaciones a/c bajas (0.45) aportan mejores resultados colocándose por debajo de la línea de falla ($<5\%$ de pérdida de masa) considerándose como concretos de alta resistencia a los sulfatos o concretos de alta durabilidad ante el ataque por sulfatos, en comparación de las relaciones a/c altas (0.65) que a partir del 3er o 4to ciclo de prueba sobrepasan la línea de falla ($>5\%$ de pérdida de masa) considerándose como concretos de baja resistencia a los sulfatos o de baja durabilidad, todo esto debido a que la cantidad de agua utilizada en la fabricación de la mezcla es menor y por lo tanto la cantidad de vacíos de aire producto de la evaporación por consecuente resulta ser menor.

Por último y no menos importante, las formaciones de cristales producto de los sulfatos de sodio en los elementos de concreto ayudan también a disminuir la cantidad de poros interconectados interrumpiendo el paso a otros agentes externos como, por ejemplo; los iones cloruro. El problema persiste en la actuación del sistema de humedecimiento y secado en el cual, los cristales se secan, se fragmentan y al mismo tiempo degradan el concreto.

5.1.6.2. Conclusión de las pruebas por profundidad de carbonatación en el concreto.

Con los resultados de la prueba de carbonatación en el concreto observamos la comparación entre las dos diferentes relaciones $a/c = 0.45$ y 0.65 , con agregados pétreos convencionales y reciclados, y con las diferentes sustituciones de CH y CC. En el cual se discutió la comparación de la constante de carbonatación (k) en $\text{mm/año}^{0.5}$ para cada uno de los concretos de estudio.

La norma (NMX-C-515-ONNCCE, 2016) nos indica que con base a la k en $\text{mm/año}^{0.5}$ referenciada en la Ecuación 10 podemos evaluar si el concreto de estudio analizado se encuentra entre elevada ($<3 \text{ mm/año}^{0.5}$) o baja resistencia ($>6 \text{ mm/año}^{0.5}$) en términos de durabilidad. Dados los resultados, se puede concluir que la mezclas con relaciones $a/c = 0.45$ tienen un mejor comportamiento que las relaciones $a/c = 0.65$ destacando entre ellas las mezclas con agregado pétreo reciclado, con ceniza o combinación de estas dos, siempre y cuando hablemos de mezclas con relación a/c bajas. Si bien, entre las que presentan mejores propiedades se encuentran la TRF0.45 y la CHTF0.45 con $k = 0.64 \text{ mm/año}^{0.5}$ y $k = 0.92 \text{ mm/año}^{0.5}$ respectivamente.

En cuanto a las relaciones de $a/c = 0.65$ las mezclas que muestran un mejor comportamiento ante la carbonatación son las CCT0.65 y las TR0.65 con una $k = 2.57 \text{ mm/año}^{0.5}$ y $k = 2.45 \text{ mm/año}^{0.5}$. Cabe mencionar que todas las mezclas se encuentran en una calidad de durabilidad entre media y alta, sin embargo, lo que nos interesa conocer es el tiempo en el que el CO_2 penetrará en el recubrimiento del concreto hasta llegar al acero de refuerzo y comenzar con el proceso de despasivación por lo que procedimos a calcular el tiempo que le tomaría al CO_2 llegar a la barra de acero de refuerzo de cada una de las mezclas. Comparando los resultados, podemos concluir que en el caso de la mezcla con mayor tendencia a carbonatarse sería la CHR0.65 la cual tiene una $k = 3.31 \text{ mm/año}^{0.5}$ lo que le tomaría al CO_2 43 años llegar a la barra de acero de refuerzo. Por consiguiente, para el caso de la mezcla con la menor tendencia a carbonatarse sería la TRF0.45 y la CHTF0.45 con $0.64 \text{ mm/año}^{0.5}$ y $0.92 \text{ mm/año}^{0.5}$ tomándoles hasta más de 500 años llegar a la barra de acero de refuerzo, ofreciendo resultados de durabilidad elevados.

5.1.6.3. Conclusión de las pruebas de permeabilidad rápida de iones cloruro

En esta prueba se tuvo como objetivo determinar el comportamiento del concreto ante ambientes agresivos, simulando un ambiente marino para estructuras que se encuentran sometidas ante ciclos de humedecimiento y secado como por ejemplo los muelles. La movilidad de los iones cloruro a través del concreto se relaciona con su permeabilidad.

Con los resultados de la prueba de permeabilidad rápida de iones cloruro en el concreto observamos la comparación entre las dos diferentes relaciones $a/c = 0.45$ y 0.65 , con agregados pétreos convencionales y reciclados, y con las diferentes sustituciones de CH y CC. En el cual se pudo analizar que la mayoría de las mezclas de concreto se encuentran predominando en un umbral de acuerdo a la Tabla 19 entre permeabilidad baja y muy baja, lo cual se ve reflejado en cuanto a la capacidad que tienen los concretos de soportar la penetración de los iones cloruro, clasificándolos como concretos de alta durabilidad. Una de las mejoras es atribuida a la relación a/c , en la cual veíamos en el caso de las mezclas testigo (TT) con diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65) como las relaciones con menor relación a/c coadyuvan a disminuir su permeabilidad.

Concluimos que las mezclas con agregados pétreos reciclados aportan mejoras en comparación con los agregados pétreos convencionales en las cuales vemos gráficamente una disminución de la permeabilidad.

Otra de las mejoras es otorgada a la sustitución de adiciones puzolánicas, estas modifican la porosidad reduciendo así la permeabilidad y, a su vez, mejorando la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto. Los concretos con CHR, CCT y CCR, fueron las mezclas que presentaron mejores resultados ante la penetración de cloruros, esto quiere decir que realmente las propiedades puzolánicas de las sustituciones de cenizas coadyuvan a mejorar las características de los concretos.

5.2. Conclusiones Generales

El uso de alternativas innovadoras para el diseño de estructuras de concreto reforzado es uno de los grandes retos que tenemos los ingenieros civiles hoy en día. La vida útil o vida de servicio es el punto de enfoque en este proyecto ya que buscamos que las estructuras de concreto reforzado que sean diseñadas conserven las propiedades de seguridad, funcionalidad y estética, sin costos de mantenimiento inesperados. Innovar en el diseño de concretos de base cemento portland con adiciones ecológicas: ceniza de bagazo de caña (CC) y ceniza de horno producto de elaboración de ladrillo (CH) y diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65) en el cual se pretende sustituir un porcentaje de la cantidad total del cementante para intentar reducir las emisiones de carbono (CO_2) a la atmosfera, y a su vez incrementar las propiedades fisicoquímico-mecánicas de las estructuras de concreto reforzado. En la elaboración de los concretos se buscó introducir un material pétreo reciclado (R) de T.M.= $\frac{3}{4}$ " y un convencional (T) de T.M.= $\frac{1}{2}$ " y observar su comportamiento.

En los estudios de la granulometría en agregado pétreo fino pudimos observar una distribución granulométrica adecuada dentro de los límites establecidos por la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) con un M.F.= 2.71 lo cual atribuye una composición granulométrica adecuada para el diseño del proporcionamientos del concreto hidráulico. La (T) presenta una distribución granulométrica adecuada, encontrándose dentro de los límites establecidos por la norma. La (R) presenta una distribución granulométrica inadecuada, encontrándose con un contenido de mayor concentración de gruesos, provocando salirse de los límites granulométricos. En los parámetros de clasificación SUCS pudimos clasificar al agregado fino como una arena bien graduada (SW) y a los agregados gruesos como gravas mal graduadas (GP). Sin duda alguna la mal distribución granulométrica en ausencia de arena puede provocar una porosidad excesiva en la matriz cementicia, sin embargo, las adiciones de cemento y cenizas puzolánicas ayudaron a complementar la estructura cementicia. Con base a los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados pétreos de las diferentes pruebas de laboratorio pudimos corroborar que todos los agregados son viables de utilizar en la fabricación de concretos.

En los resultados de las pruebas de Microanálisis con ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y los resultados del Microanálisis Químico Elemental vía EDS sólo se analizaron aquellas mezclas en las cuales se utilizó ceniza en sustitución del cemento. Se comprueba que realmente las adiciones ecológicas reaccionan con el cemento formando compuestos químicos como el Óxido de Aluminio o Alúmina (Al_2O_3), Óxido de calcio (CaO) y Óxido de Silicio (SiO_2) los cuales coadyuvan desconectando los poros que transportan los agentes que degradan al concreto y corroen al acero de refuerzo y al mismo tiempo densifican la matriz cementicia.

Con relación a los ensayos de las pruebas no destructivas podemos concluir que en cuanto a la resistividad eléctrica (R_e) la mayoría de los concretos con todas sus diferentes propiedades y componentes muestran un comportamiento similar con

diferencias mínimas entre ellas, comenzando con una porosidad excesiva en edades tempranas y como porosidad de consideración a edades tardías, siendo la edad de 90 días en la cual en la mayoría de los casos se presenta el cambio de un rango a otro, esto con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). En la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) destacan los concretos con agregado pétreo convencional, las relaciones $a/c = 0.45$ y las CH. Cabe destacar que todas las mezclas mantienen una calidad del concreto entre buena y excelente, calificándolos como concretos de alta durabilidad según la antes mencionada.

Respecto a los ensayos de las pruebas destructivas a compresión, todas las relaciones a/c bajas (0.45) aportan mejores resultados de resistencia >30 MPa desde los primeros 28 días e incrementando a edades tardías (500 días) considerándose estos como concretos de alta durabilidad con base a la norma (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) en comparación de las relaciones a/c altas (0.65) que se encuentran en la mayoría de los casos dentro de la norma como concretos de mediana a baja resistencia a la compresión o de baja durabilidad, todo esto debido a que la cantidad de agua utilizada en la fabricación de la mezcla es mayor aumentando consigo la relación de vacíos dentro de la matriz cementicia.

Dentro de las pruebas electroquímicas encontramos que la variación del Potencial de corrosión (E_{corr}) y la Densidad eléctrica de corrosión (i_{corr}) depende del contacto directo que se tiene con la solución de NaCl al 3.5%. Si bien, dentro de los primeros cinco ciclos de prueba las muestras se encontraban en un estado completamente pasivo entre valores de $E_{corr} > -200$ mV y de $i_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$ considerados por la (CYTED-DURAR, 1998) con un nivel de corrosión despreciable. A partir del sexto ciclo que es cuando los especímenes entran en contacto directo con la solución de NaCl vemos como los E_{corr} incrementan rápidamente proporcionando valores < -350 mV y con $i_{corr} > 1 \mu A/cm^2$ clasificando a estos valores con un nivel de corrosión Muy elevado.

Con respecto a los ensayos de durabilidad se logró obtener altos índices de durabilidad en la mayoría de las mezclas.

En cuanto al ataque por sulfatos una de las mejoras es atribuida al tipo de cemento utilizado: CPC30RRS esto coadyuva a obtener mejor rendimiento ante el desgaste por pérdida de masa de ataque por sulfatos de sodio. Podemos decir que las relaciones a/c bajas (0.45) aportan mejores resultados colocándose por debajo de la línea de falla ($< 5\%$ de pérdida de masa) considerándose como concretos de alta resistencia a los sulfatos o concretos de alta durabilidad, en comparación de las relaciones a/c altas (0.65) que a partir del 3er o 4to ciclo de prueba sobrepasan la línea de falla ($> 5\%$ de pérdida de masa) considerándose como concretos de baja resistencia a los sulfatos o de baja durabilidad.

En cuanto a las pruebas por profundidad de carbonatación podemos concluir que las mezclas con relaciones $a/c = 0.45$ tienen un mejor comportamiento que las

relaciones $a/c = 0.65$ destacando entre ellas las mezclas con agregado pétreo reciclado, con ceniza o combinación de estas dos.

Respecto a las pruebas de permeabilidad rápida de cloruros en la mayoría de las mezclas de concreto se encuentran predominando con valores entre permeabilidad baja y muy baja, lo cual se ve reflejado en cuanto a la capacidad que tienen los concretos de soportar la penetración de los iones cloruro, clasificándolos como concretos de alta durabilidad. Una de las mejoras es atribuida a la relación a/c , en las cuales las relaciones con menor relación a/c coadyuvan a disminuir su permeabilidad.

Se concluye que las mezclas con mayor viabilidad de ser utilizadas para el diseño por durabilidad son: TT0.45 con una calificación de 9 o durabilidad muy alta, TRF0.45, CHTF0.45 y CHRF0.45 con una calificación de 8 o durabilidad alta.

Finalmente se lograron los objetivos de fabricar mezclas de concreto con buenas propiedades fisicoquímico-mecánicas y de durabilidad aceptable mejorando o superando las características de un concreto convencional. El uso de los ecomateriales además de proporcionar mejoras a los concretos coadyuva a disminuir las emisiones de CO_2 a la atmósfera producto de la fabricación del cemento y por ende el costo de la mezcla de concreto. En el análisis de vida útil o vida de servicio pudimos observar un comportamiento durable para varias mezclas de concreto al mejorar sus propiedades en la matriz cementicia proporcionándole mayor densificación y por lo tanto disminuyendo el paso a los agentes que degradan al concreto y corroen el acero de refuerzo.

5.3. Trabajo futuro

Se realizó la prueba de Fagerlund para analizar la porosidad total y efectiva de los concretos de estudio, en el cual podemos comprobar si las adiciones puzolánicas coadyuvaron a desconectar los poros interconectados que permiten el paso de los agentes que degradan al concreto y corroen el acero de refuerzo.

Se tiene en existencia más cilindros con las diferentes adiciones y agregados para realizar pruebas a edades más tardías y poder complementar aún más este trabajo de investigación. Así como también se cuenta con los prismas con acero de refuerzo embebido con los cuales se pueden seguir monitoreando los resultados y verificar el comportamiento a largo plazo.

Se cuenta con elementos tipo viga fabricados con estas diferentes adiciones ecológicas con los cuales se pueden realizar ensayos de tensión indirecta y el cálculo de módulos de elasticidad estático y dinámico para calcular la resistencia a la flexión y/o módulo de ruptura (MR) y comprobar si los concretos son viables para el uso en vialidades urbanas, carreteras y autopistas.

Se realizaron otro tipo concretos con adiciones de poliestireno en un 10% de sustitución al cemento, con diferentes tipos de agregado (convencional y reciclado) y diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65) para verificar el comportamiento fisicoquímico-mecánico en el cual podemos comprobar todos los parámetros de durabilidad al igual que las adiciones ecológicas de este estudio con las que se podría sustentar otra tesis de maestría y/o licenciatura.

5.4. Productos de la Investigación (Ponencias en congresos Nacionales e Internacionales)

XXVIII Congreso Internacional de Investigación de Materiales (IMRC) 2019

El cual se llevó a cabo el día 28 al 23 de agosto de 2019, en Cancún, México.

El IMRC ofrece una variedad de temas de simposios de interés para la comunidad de investigación de materiales en general. Se ha convertido en un popular destino de conferencias con alrededor de 1.700 asistentes de casi 60 países en 2018.

Se presentó el tema titulado: "DECREASE OF THE CORROSION BY AN ECOLOGICAL POZZOLANIC ADDITION FOR INCREASED DURABILITY IN HIGH SPECIFICATION STRUCTURES" en los Avances en La Investigación de Hormigón Durabilidad, Aditivos y Simposio Suplementario de Materiales Cementicios.



XXVIII INTERNATIONAL MATERIALS RESEARCH CONGRESS

MRS MATERIALS RESEARCH SOCIETY
Advancing materials. Improving the quality of life.



DECREASE OF THE CORROSION BY AN ECOLOGICAL POZZOLANIC ADDITION FOR INCREASED DURABILITY IN HIGH SPECIFICATION STRUCTURES

Josué de Jesús García Chávez¹, Víctor Alfonso Ramírez Carranza¹, Janette Duarte Montes de Oca¹, Diana Ivonne López Gómez¹, Noel Díaz Gonzalez¹, Elia Alonso¹, Wilfrido Martínez Molina¹, Hugo Luis Chávez García¹, Cindy Lara Gómez¹, Sandra del Carmen Arguello Hernandez¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Mexico.



Sociedad Mexicana de Materiales A.C.

Mexico City, March 30th, 2019

Josué de Jesús García Chávez
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

I am pleased to inform you that your contribution "DECREASE OF THE CORROSION BY AN ECOLOGICAL POZZOLANIC ADDITION FOR INCREASED DURABILITY IN HIGH SPECIFICATION STRUCTURES" by Josué de Jesús García Chávez, Víctor Alfonso Ramírez Carranza, Janette Duarte Montes de Oca, Diana Ivonne López Gómez, Noel Díaz Gonzalez, Elia Alonso, Wilfrido Martínez Molina, Hugo Luis Chávez García, Cindy Lara Gómez, Sandra del Carmen Arguello Hernandez, has been accepted in symposium E1, *Advances in Concrete Durability Research, Additives and Supplementary Cementitious Materials* at the XXVIII International Materials Research Congress, to be held in Cancun in August 18 - 23, 2019.

The presentation has been accepted in the **Poster** modality. Remember that in order to include your abstract in the program book you must register before June 10th, 2019.

Organizers of the Symposium
"Advances in Concrete Durability Research, Additives and Supplementary Cementitious Materials"

Roberto Uribe Afif, Alexandra Bertron, Luis Emilio Rendon Díaz Mirón, Dessi Koleva



Sociedad Mexicana de Materiales A.C.

August 2019

TO WHOM IT MAY CONCERN
Present

This is to certify that Josué de Jesús García Chávez, Víctor Alfonso Ramírez Carranza, Janette Duarte Montes de Oca, Diana Ivonne López Gómez, Noel Díaz Gonzalez, Elia Alonso, Wilfrido Martínez Molina, Hugo Luis Chávez García, Cindy Lara Gómez, Sandra del Carmen Arguello Hernandez presented the contribution: **DECREASE OF THE CORROSION BY AN ECOLOGICAL POZZOLANIC ADDITION FOR INCREASED DURABILITY IN HIGH SPECIFICATION STRUCTURES** as **Poster** modality, in the *Advances in Concrete Durability Research, Additives and Supplementary Cementitious Materials* Symposium at the XXVIII International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 18th to 23th, 2019.

Sincerely,


Heberto Balmori Ramirez
 President

XV Congreso Latino-Americano de patología de construcción (CONPAT 2019)

XVII Congreso de control de calidad en la construcción

El cual se llevará a cabo el día 8,9 y 10 de octubre de 2019, Chiapas, México.

Con el auspicio de ALCONPAT-INTERNATIONAL se analizarán las mejores estrategias y tecnologías para actuar en el sector de la construcción/rehabilitación, con la presentación de estudios de casos y conferencias; será un importante foro internacional del sector de la construcción.

Se presentará el tema titulado: "DISMINUCIÓN DE LA CORROSIÓN MEDIANTE UNA ADICIÓN PUZOLÁNICA ECOLÓGICA PARA EL INCREMENTO DE LA DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE ALTAS ESPECIFICACIONES"

No de identificación (ID): 124

		XV CONGRESO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN XVII CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN 8, 9 y 10 DE OCTUBRE DE 2019		
CARTA DE ACEPTACIÓN				
Estimado(s) autor(es) Presente				
Reciba del Comité Organizador del XV CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN y XVII CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, CONPAT 2019 , un cordial saludo.				
Me dirijo a usted para informarle que el trabajo presentado a este congreso de su autoría ha sido APROBADO para formar parte de las ponencias y de las memorias del congreso, cuya información se define a continuación:				
Título del trabajo:	"DISMINUCIÓN DE LA CORROSIÓN MEDIANTE UNA ADICIÓN PUZOLÁNICA ECOLÓGICA PARA EL INCREMENTO DE LA DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE ALTAS ESPECIFICACIONES"			
Autor (es):	JOSUÉ DE JESÚS GARCÍA CHÁVEZ, ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN, LUIS ALBERTO GONZÁLEZ LUNA, EDUARDO TAFOLLA MARTÍNEZ, VÍCTOR MANUEL BÁEZ ÁNGEL			
Número de ID:	124			
Le felicitamos y solicitamos confirmar su participación y realizar su proceso de inscripción al congreso antes del 31 de julio para aprovechar la tarifa especial (este requisito es necesario para la presentación de su ponencia en el congreso). Tenga en cuenta que el tiempo asignado para la presentación oral es de 20 minutos . La fecha límite para enviar su trabajo en extenso, por medio de la plataforma, es el 31 de julio. Aquellos trabajos que sean recibidos antes de esta fecha podrán ser postulados para recibir un reconocimiento, con base a la evaluación del comité científico del congreso, en alguna de las siguientes categorías: Control de Calidad (Premio A), Patología (Premio B), y Recuperación (Premio C) http://alconpat.org/contenido/premios_ai/p_x_trabajo.php .				
Información adicional del evento podrá encontrar en el sitio http://conpat2019.com				
Les envío una cordial felicitación por la calidad de su trabajo y será un gusto recibirle en México,				
 Dr. Francisco Javier Oguin Coca Presidente Comité Científico CONPAT 2019 <i>México a miércoles, 6 de febrero de 2019</i>				

Bibliografía

- ACI 201.2R-01. (2000). *Guía para la Durabilidad del Hormigón*.
- Aguirre, A. M., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). *Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions*.
- Álvarez, A. M. (1991). The use of fly ash in concrete blocks. *Materiales de Construcción*, 41.
- Andrés A. Torres Acosta, A. d. (2005). *“Plan Nacional de Evaluación de Puentes Federales, Libres de Peaje, Dañados por Corrosión (2000-2005). Una Cuantificación de Resultados, Proyectos y Colaboraciones”*. Pedro Escobedo, Querétaro, México: IMT .
- ASTM C618. (2017). Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.
- ASTM-C-1202. (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. EE.UU.
- ASTM-C618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM-C876. (s.f.). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, USA.
- ASTM-G106. (2004). Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements.
- ASTM-G3. (2004). *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*.
- ASTM-G3. (2004). Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.
- ASTM-G5. (2004). *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*.
- ASTM-G5. (2004). Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*.
- ASTM-G59. (2003). *Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*.

ASTM-G59. (2003). Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.

Bernabé Reyes, C. (2015).

Bernabé Reyes, C. (2015). *Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación*. Morelia.

CANACEM. (2016). *Producción del cemento en México*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/>

Cement Sustainability Initiative [CSI]. (2012). *Global Cement Database on CO2 and Energy Information*. Obtenido de <http://www.wbcsdcement.org/>

Charles, J. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Estados Unidos: McGraw-Hill.

Corral, H. (2013). agregado grueso de concreto reciclado para la fabricación de concretos con características de sustentabilidad.

Costa Serpa , N., Alves Fernandes, G., Lucia Dayrell, M., & Santoro, A. (2018). RECYCLED CONCRETE ARTIFACTS: TOWARDS SUSTAINABILITY OF CIVIL CONSTRUCTION. *INDEPENDENT JOURNAL OF MANAGEMENT & PRODUCTION (IJM&P)*, 9.

CYTED-DURAR. (1998). En *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (SEGUNDA ed., pág. 128).

CYTED-RED DURAR. (1998). *“Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”*. (S. X. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Ed.) Venezuela: 2da Edición.

Darwin, D., Young, J., & Mindess, S. (2003). *Concrete*.

Díaz González, N. (Feb 2014). *“Inspección y análisis por condiciones de durabilidad; propuesta de rehabilitación del puente El Teolán, localizado en el km 47+900 en la carretera Playa Azul – Manzanillo, Michoacán, México”*. Morelia, Mich.

EcoSurouth. (2018). <http://www.ecosur.org/>. Obtenido de <http://www.ecosur.org/index.php/publicaciones/ecomateriales>

Federación Interamericana del Cemento [FICEM]. (2013). Bogotá, Colombia.

Feliu, S., Gonzalez, J., Miranda , J., & Feliu, V. (2005). Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. En *Corrosion Science* (págs. 237-238).

- Fontana, M. (1986). *"Corrosion engineering"*. Nueva York, Nueva York, EUA: 3er. Edición Mc GrawHill.
- Garcés, P., Zornoza, E., Baeza, F., Galao, O., & J., P. (2012). ¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?. *Alconpat*, 2.
- García Chávez, J. d. (2019). Elaboración propia. Morelia, Michoacán, México.
- García Delgado, M. (2014). *"Modificación del Sistema de concreto-acero de refuerzo mediante la adición de fibras de bagazo de caña para facilitar su protección anticorrosiva"*. Instituto Politécnico Nacional (IPN), Altamira, Tamaulipas.
- González Castro, E. (2016). *"Empleo puzolanas como sustitución parcial de cemento Portland (CP) en la elaboración de concreto pretendiendo incrementar sus propiedades mecánicas"*. Morelia, Mich.
- González Fernández, J. &. (2007). *Corrosión en las Estructuras de Hormigón Armado: Fundamentos, Medidas, Diagnóstico y Prevención*. España: Gráficas Varona.
- IMT-pt-380. (2011). *P.T. No. 380. Evaluación Electroquímica de Cables de Preesfuerzo para Aplicación Estructural en el Sector Transporte 2a Etapa*. Sanfandila, Querétaro.
- IPCC . (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- ISO-1920-12. (2015). *Determinación de la carbonatación por medio de la resistencia del hormigón-Método de carbonatación acelerado*.
- Lau, B. a. (s.f.). *High Performance Concrete: Fundamentals and Application* . Cambridge, Massachusetts 02139.
- Leung, C. K., Yu, J., & Mishra, D. K. (2017). *Very high volume fly ash green concrete for application in Indian*.
- Linwen Yu, R. F. (2015). *"Structural performance of RC beams damaged by natural corrosion under sustained loading in a chloride environment"*. L. Yu et al. / *Engineering Structures* 96 .
- Madhavi, T. C., & Swamy Raju L., D. M. (2014). Durability and strength properties of high volume fly ash concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 2.
- Malhotra, V. M. (1990). Durability of concrete incorporating high-volume of lowcalcium (ASTM Class F) fly ash. *Cement &Concrete Composites*, 12.
- Martínez Sánchez, B., Flores Martínez, J., Uribe Afif, R., & Medina Hernández, O. (2003). La prueba de permeabilidad rápida a cloruros como índice de la durabilidad de las estructuras de hormigón. *Centro de Tecnología, Cemento y Concreto, CEMEX*.

- Medina Custodio, O. (2006). *Tesis: Análisis del deterioro por corrosión microbiológica en un acero al bajo carbono*. México: UNAM.
- M-MMP-1-02. (2003). *MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES (Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos)*. SCT.
- Molina, B. O. (2008). La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento pórtland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del ión cloruro y el dióxido de carbono. *Encuentro del Grupo Español de Fractura*.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. México, D.F.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento para Albañilería (mortero) - Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- NMX-C-071-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES*. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA*. México: ONNCCE.
- NMX-C-075-ONNCCE. (2006). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la sanidad por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS PARA CONCRETO-PARTICULAS MAS FINAS DE LA CRIBA 0,075 mm (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO*. México: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino*. México: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción-Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción- Agua para Concreto-especificaciones*. México.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-METODO DE PRUEBA*. México: ONNCCE.

- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE-2016. (s.f.). Industria de la construcción-Cementantes hidráulicos-Especificaciones y métodos de ensayo.
- NMX-C-416-ONNCCE. (2003). *Muestreo de estructuras térreas y métodos de prueba.* .
- NMX-C-515-ONNCCE. (2016). Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Durabilidad -Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico – Especificaciones y Método de Ensayo.
- NMX-C-530-ONNCCE, 2017. (s.f.). *Industria de la Construcción – Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones.*
- Orozco Cruz, C. F. (2007). *Revista de divulgación Científica Veracruzana. En Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico (Vol. XX).* Veracruz.
- Otieno, M., M., A., & Beushausen, H. (2010). *Transport mechanisms in concrete. Corrosion of steel in.* University of Cape Town.
- Pedraza Pérez, A. C. (2014). Tesis: Comportamiento físico-mecánico de morteros de abañilería para la construcción. Morelia, Michoacán, México.
- Pérez, T. (2002). *Aplicación de la Técnica Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto.* Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Poupard, O., L’hostis, V., Catunaud, & Petrelazar, I. (2006). Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. En *Cement and Concrete Research* (págs. 504-520).
- PT no.559 IMT. (2018). CONCRETOS HÍBRIDOS DURABLES Y SUSTENTABLES, CON CONTENIDOS DE CENIZA VOLANTE.
- Publicación Técnica #128, IMT. (1999). *SELECCIÓN DEL TREN MOTRIZ DE VEHÍCULOS PESADOS (CARGA Y PASAJEROS) DESTINADOS AL SERVICIO PÚBLICO FEDERAL.*
- Reglamento de construcción del Estado de Michoacán.* (s.f.).
- Rivera, G. (2016). Durabilidad del concreto.
- Rodríguez Gómez, F. (2000). Resistencia a la Polarización. En D. I. Metalúrgica. UNAM.

- Rojas Martínez, L. A. (1998). *Corrosión de las estructuras de concreto reforzado*. Escuela Nacional de Estudios Profesionales ACATLAN, UNAM.
- Roland Stulz, S. K. (1997). *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales revisado edición ampliada*. London WC1B 4HH, UK: IT Publications. Obtenido de <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm>
- Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1).
- Sanytsky, M., Rusyn, B., Halbiniak, J., & J., S. (2013). Influence of ultrafine ground fly ash on the microstructure and properties of cementitious materials. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*, 2.
- Sepulcre Aguilar, A. (2005). *INFLUENCIA DE LAS ADICIONES PUZOLANICAS EN MORTEROS DE RESTAURACION*. MADRID.
- Sepúlveda Bello, A. (S.F.). *FACTORES DETERMINANTES DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO*. Colombia.
- SIPUMEX-SCT. (2005). *Conservación y mantenimiento de Puentes en México, Dirección General de Conservación de Carreteras, Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.
- Torres Acosta, A. a. (2003). "Residual life of corroding concrete structures in marine environment". ASCE.
- Torres Acosta, A. A., & Martínez Madrid, M. (2001). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON CRITERIOS DE DURABILIDAD*.
- Tórres Gómez, R. A. (2010). *STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS*. Dyna(164).
- Tórres Gómez, R., Aperador, W., Vera, E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). *STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS*. Dyna(164), 52-59.
- Tres G., & E. Saborio. (2004). Corrosion Rate Evaluation of de Copper Cable Used in Grounding Systems at the ICE- Costa Rica . En *Portugaliae Electrochimica Acta* (págs. 345-360).
- Tuutti, K. (1982). "Corrosion of steel in concrete". Estocolmo, Suecia: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Uysal, M., & Akyuncu, V. (2012). Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. *Construction and Building Materials*, 34.

- Valdez Tamez, P. L., Das Roy, T. K., & Rivera Villareal, R. (2004). Evaluación de la velocidad de Hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. En *Ciencia UANL* (Vol. VII, págs. 190-195).
- Vargas, J., & Halog, A. (2015). Effective carbon emission reductions from using. *Journal of Cleaner Production*, 103.
- Villabona Ortiz, A., Tejada Tovar, C., & Villabona Durán, Y. (2013). Determinación electroquímica de la corrosión en el hormigón armado en solución salina. *Ingenium*, 35-39.