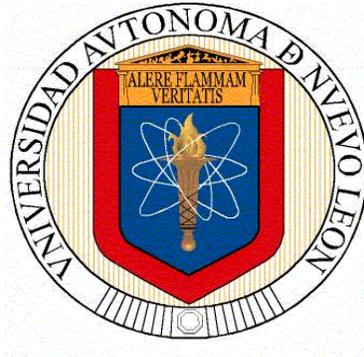


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

“EFECTO DE LA CENIZA VOLANTE CRIBADA COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS E INDICADORES DE DURABILIDAD EN MORTEROS EXPUESTOS A ATMOSFERAS DE CO₂”

POR:

LUIS HERRERA BARRIOS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

2020



Universidad Autónoma De Nuevo León

Facultad De Ingeniería Civil

Tesis

“Efecto de la ceniza volante cribada como sustituto parcial del cemento portland en las propiedades mecánicas e indicadores de durabilidad en morteros expuestos a atmosferas de CO₂”

Presentada por:

Luis Herrera Barrios

Como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en
Materiales de Construcción

Director de Tesis: Dr. José Manuel Mendoza Rangel

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

2020

Contenido

CAPITULO 1: Introducción	9
1.1 Introducción	9
1.1.1 Degradación de estructuras por carbonatación.....	9
1.1.2 Clasificación de atmósferas de acuerdo con la concentración de CO ₂	11
1.1.3 Uso de la ceniza volante como cementante suplementario.	13
1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Antecedentes.....	18
1.3.1 Propiedades Mecánicas e Indicadores de Durabilidad	18
1.3.5 Carbonatación.....	22
1.3.6 Potencial y velocidad de corrosión	24
1.4 Justificación	26
1.5 Hipótesis.....	27
1.6 Objetivos	27
1.6.1 Objetivo General	27
1.6.2 Objetivos Específicos.....	28
CAPITULO 2: Marco Teórico.....	29
2.1 Durabilidad	29
2.2 Carbonatación	34
2.3 Ceniza Volante.....	43
CAPITULO 3: Metodología experimental	49
3.1 Materiales.....	49
3.1.1 Cemento Portland.....	49
3.1.2 Ceniza Volante	50
3.1.3 Agregado Fino.....	51
3.1.4 Acero	52
3.2 Mezclas de mortero.....	52
3.3 Caracterización de Materiales.....	54
3.3.1 Cementantes	54
3.3.1.1 Densidad.....	54
3.3.1.2 Distribución de Tamaño de Partícula (DTP).....	55

3.3.1.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	56
3.3.1.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	57
3.3.1.5 Difracción de Rayos X (DRX).....	58
3.3.1.6 Índice de actividad a la Resistencia (IR).....	58
3.3.1.7 Pérdida por Ignición.....	59
3.3.2 Agregado Fino.....	60
3.3.2.1 Densidad.....	60
3.3.2.2 Análisis Granulométrico.....	60
3.4 Propiedades en estado fresco.....	61
3.4.1 Fluidez- extensibilidad.....	61
3.4.2 Masa unitaria.....	62
3.4.3 Contenido de aire.....	63
3.5 Propiedades mecánicas.....	64
3.5.1 Resistencia a la compresión.....	64
3.6 Indicadores de durabilidad.....	66
3.6.1 Porosidad abierta al agua.....	66
3.6.2 Resistividad Eléctrica Superficial.....	67
3.6.3 Permeabilidad al aire.....	69
3.6.4 Profundidad de carbonatación.....	72
3.6.5 Potencial y velocidad de corrosión.....	74
CAPITULO 4: Análisis y discusión de resultados.....	77
4.1.1 Cementantes.....	77
4.1.1.1 Densidad.....	77
4.1.1.2 Distribución de Tamaño de Partícula (DTP).....	78
4.1.1.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	81
4.1.1.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	82
4.1.1.5 Difracción de Rayos X (DRX).....	84
4.1.1.6 Índice de actividad a la Resistencia (IR).....	87
4.1.1.7 Pérdida por Ignición.....	88
4.1.2 Agregado Fino.....	89
4.1.2.1 Densidad.....	89
4.1.2.2 Análisis Granulométrico.....	89

4.2 Propiedades en estado fresco	91
4.2.1 Fluidez- extensibilidad	91
4.2.2 Masa unitaria	92
4.2.3 Contenido de aire	92
4.3 Propiedades mecánicas	93
4.3.1 Resistencia a la compresión	93
4.3 Indicadores de durabilidad	95
4.4.1 Porosidad abierta al agua	95
4.4.2 Resistividad Eléctrica Superficial	96
4.4.3 Permeabilidad al aire	98
4.4.4 Profundidad de carbonatación	100
4.4.5 Coeficientes de carbonatación	101
4.4.6 Potencial y velocidad de corrosión	104
CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES	113
BIBLIOGRAFIA	115
ANEXO A: Graficas de Profundidad de carbonatación vs Raíz cuadrada del tiempo ...	123

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de algunas atmósferas de acuerdo a la agresividad del ambiente.....	12
Tabla 2. Clasificación de coeficientes de carbonatación	42
Tabla 3. Rangos de sustitución de ceniza volante	47
Tabla 4. Mezclas de Mortero realizadas en la investigación.....	53
Tabla 5. Proporcionamiento de las mezclas de mortero para 1 m ³	54
Tabla 6. Clase de permeabilidad del concreto.....	71
Tabla 7. Criterios para evaluar Ecorr en el acero embebido en concreto	75
Tabla 8. Nivel de corrosión según Icorr	76
Tabla 9. Densidad de los materiales cementantes.....	77
Tabla 10. Composición química de los materiales cementantes	81
Tabla 11. Índice de Actividad a la Resistencia de los morteros	87
Tabla 12. Perdida por ignición de la ceniza volante.....	88
Tabla 13. Densidad y absorción del agregado fino	89
Tabla 14. Análisis granulométrico del agregado fino.....	90
Tabla 15. Fluidez de las mezclas de mortero.....	91
Tabla 16. Masa unitaria de las mezclas de mortero.....	92
Tabla 17. Contenido de aire de las mezclas de mortero	93
Tabla 18. Clasificación de coeficientes de carbonatación	101
Tabla 19. Coeficientes de carbonatación obtenidos.....	103
Tabla 20. Porcentajes de pérdida de masa del acero embebido.....	110

Índice de Figuras

Figura 1. Concentración atmosférica de CO ₂ en los últimos 650 mil años	10	
Figura 2. Emisiones brutas de CO ₂ históricas en Nuevo León en el periodo (1990-2025)..	13	
Figura 3. Mecanismo de difusión del dióxido de carbono en a) altas concentraciones de CO ₂ y b) bajas concentraciones de CO ₂	20	
Figura 4. Elementos que intervienen en el proceso de corrosión[13]	31	
Figura 5. Tipos de corrosión en el acero de refuerzo[36].....	32	
Figura 6. Modelo de vida útil propuesto por Tuutti [39].....	34	
Figura 7. Cribado de la ceniza volante a través de la malla #100.	50	
Figura 8. Agregado fino utilizado en la investigación	51	
Figura 9. Habilitado y preparación de las varillas de acero.	52	
Figura 10. Frasco de Le Chatelier	Figura 11. Picnómetro	55
Figura 12. Analizador de difracción láser para obtención de DTP	56	
Figura 13. Equipo utilizado para la obtención de FRX.	57	
Figura 14. Equipo de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) utilizado	58	
Figura 15. Mufla utilizada para la prueba de pérdida por ignición.	59	
Figura 16. Medición de extensibilidad en mezcla de mortero.....	61	
Figura 17. Llenado del recipiente de volumen y peso conocido para la determinación de la masa unitaria de la mezcla.....	63	
Figura 18. Cubo de 50 mm para ensayos a compresión de morteros	65	
Figura 19. Ensaye de resistencia a compresión según norma ASTM C-109	65	

Figura 20. Obtención de la porosidad abierta al agua mediante el procedimiento de la norma ASTM C 642-06. (a) Determinación de masa de probetas. (b) Secado al horno de probetas. (c) Determinación de masa sumergida de probetas.	66
Figura 21. Determinación de la resistividad eléctrica superficial por el método de cuatro puntos	68
Figura 22. Determinación de la permeabilidad al aire por el método Torrent. (a) Equipo de medición Torrent. (b) Medición de la permeabilidad al aire.....	70
Figura 23. Cámara de carbonatación utilizada en la experimentación.	73
Figura 24. Sección de mortero utilizada en mediciones de profundidad de carbonatación .	74
Figura 25. Probeta y método utilizado para medición de Ecorr e Icorr.....	75
Figura 26. Distribución de tamaño de partícula de los materiales utilizados.	78
Figura 27. Micrografía de la morfología y diámetro de las partículas de CV	79
Figura 28. Micrografía de la morfología y diámetro de las partículas de CV-100.....	80
Figura 29. Morfología del CPO.....	82
Figura 30. Morfología de CV	83
Figura 31. Morfología de CV-100.....	84
Figura 32. Difractograma del CPO.....	85
Figura 33. Difractograma de CV y CV-100	86
Figura 34. Granulometría del agregado fino	90
Figura 35. Resistencia a compresión	94
Figura 36. Porosidad abierta al agua.	96
Figura 37. Resistividad Eléctrica Superficial	97
Figura 38. Permeabilidad al aire.....	99
Figura 39. Profundidad de carbonatación.....	101

Figura 40. Potenciales de corrosión.....	104
Figura 41. Comparativa deterioro acero MREF (arriba)/ M3(abajo).....	106
Figura 42. Producto corrosión adherido a M3.....	106
Figura 43. Velocidad de corrosión	108

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Introducción

1.1.1 Degradación de estructuras por carbonatación.

El concreto reforzado es el material de construcción más utilizado en el mundo, su versatilidad, economía y alcance lo hacen un material único en su clase. Sin embargo, el concreto reforzado se deteriora al interactuar con el medio ambiente [1] . El deterioro de una estructura se ve intensificado por las atmósferas agresivas que predominan en la actualidad y en donde la corrosión del acero de refuerzo es la consecuencia más severa en el deterioro del concreto reforzado.

El fenómeno del cambio climático implica la elevación en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (GEI), los cuales han aumentado en su concentración en los últimos 150 años. La vida media de dichos gases es de decenas de miles de años, provocando que los efectos por el aumento de la concentración de dichos gases perduren en el tiempo. El dióxido de carbono es de los GEI que causa mayor deterioro en la capa de ozono, las emisiones de dicho gas aumentaron 80% entre 1970 y 2004, debido principalmente al uso de combustibles de origen fósil en las actividades económicas [2].

El cambio de concentración de CO₂ en la atmósfera ha pasado de 280 ppm (partes por millón) antes de la revolución industrial a 380 ppm en la actualidad, sin embargo la tasa de crecimiento en los últimos 10 años (2005-2015) es de 1.9 ppm y se prevé un

gran aumento de concentración de CO₂ para el año 2100 de entre 650 y 700 ppm, como se observa en la Figura 1 [3]:

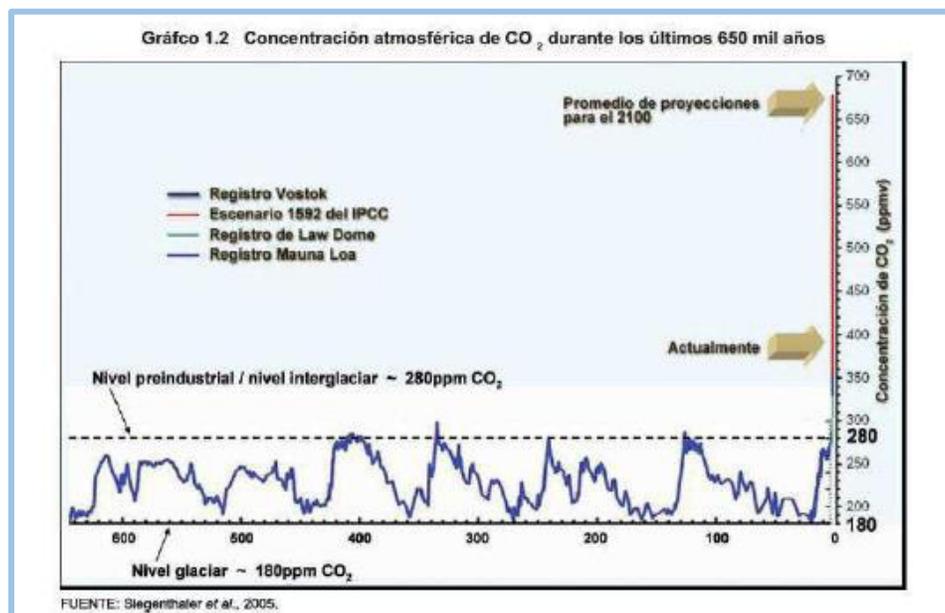


Figura 1. Concentración atmosférica de CO₂ en los últimos 650 mil años

En México, aunque ya se han publicado estudios del estado de degradación por corrosión [4], y exista la norma mexicana que estipule el tipo de concreto (mezcla de diseño), para la fabricación de estructura marina o terrestre resistente a la corrosión, no se ha profundizado lo suficiente en el tema. Para ello es necesario determinar, con base en estudios costeros y regionales del medio ambiente en concreto reforzado, su degradación, avance y cinética de daño en base a mezclas de concreto locales [5].

En realidad no existe una tendencia predecible o una uniformidad de severidad del ambiente en las diversas regiones del país, que permitan normalizar el tipo de concreto además de los aditivos y consideraciones por emplear en la construcción de obras de

infraestructura en cada zona, para que resistan adecuadamente a los problemas generados por la corrosión [5].

Debido a que las obras de infraestructura que se construyen en México deben obedecer a una normativa de tipo estructural, se requiere conocer la agresividad del medio ambiente que rodeará una estructura y su reacción con los agregados locales para tener obras de infraestructura que resistan los embates degradantes del ambiente, y pueda cumplir con la vida útil para la que fue proyectada [5].

1.1.2 Clasificación de atmósferas de acuerdo con la concentración de CO₂.

Existen diversas atmósferas en donde son distintas las concentraciones de CO₂, así como la temperatura y la humedad relativa, lo cual hace difícil precisar el desarrollo del proceso de carbonatación de manera general. Sin embargo, el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por sus siglas en inglés), ha clasificado ciertas atmósferas generales de acuerdo a la agresividad del ambiente, incluyendo la atmósfera de concentración promedio mundial de 400 ppm, tomada desde el observatorio de monitoreo atmosférico global en Mauna Loa, Hawái [3]. En la Tabla 1 [3], se muestran algunas atmósferas y su concentración, incluyendo la concentración de CO₂ de la ciudad de Monterrey al año 2016 (380 PPM).

Tabla 1. Clasificación de algunas atmósferas de acuerdo con la agresividad del ambiente[3]

Atmósfera	Concentración CO ₂ (PPM)	Concentración CO ₂ (%)
Rural	280	.0280
Promedio (Mauna Loa)	400	.04
Urbana (ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey)	300 – 500 (ZMM: 380)	.0380
Proyección al año 2100	680	.0680

De acuerdo a la base de datos de la Organización Mundial de la Salud sobre la calidad del aire [6], en 2016 reportó que Monterrey es la ciudad más contaminada de México, con 38 microgramos de partículas finas menores a 2.5 micras (PM 2.5) por metro cúbico, siendo seguro un nivel anual promedio de 10 microgramos por metro cúbico. Las causas principales de los altos niveles de partículas contaminantes y la mala calidad en el aire de Monterrey, son las emisiones de gases nocivos debido a las actividades industriales y amplio parque vehicular existente en la ciudad, teniendo actualmente una concentración de CO₂ promedio de 380 PPM [7].

En la Figura 2, se presentan las emisiones de GEI históricas y proyecciones en el estado de Nuevo León por sector económico, siendo la principal fuente de emisiones de GEI en el estado, el uso de energía. El uso de energía incluye actividades tales como la generación de energía, transporte, producción de combustibles fósiles y exploración, así como el consumo residencial, comercial e industrial de combustibles primarios (Ej. gasolina, diésel, carbón, gas natural, gas licuado de petróleo). En 2015 el sector energético representó el 80% de las emisiones por producción totales de GEI en el estado de Nuevo León [8].

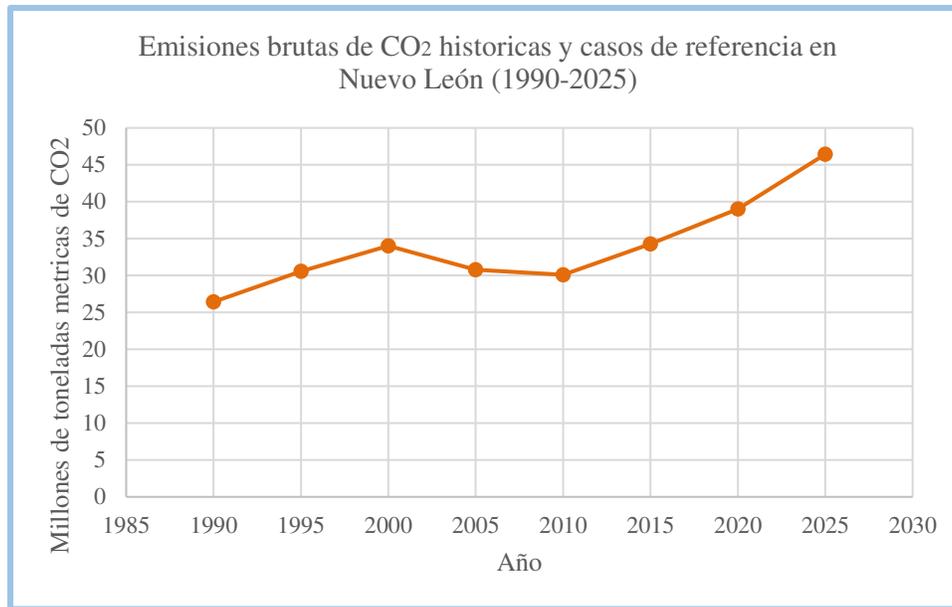


Figura 2. Emisiones brutas de CO₂ históricas en Nuevo León en el periodo (1990-2025)

El monitoreo de la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) es llevado a cabo por el Sistema Integral de Medio Ambiente (SIMA) desde el año de 1992, mediante una red de monitoreo de 10 estaciones y regidos bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-034-SEMARNAT-1993, la cual establece los métodos de medición para determinar la concentración de CO₂ en el aire ambiental [9].

1.1.3 Uso de la ceniza volante como cementante suplementario.

Algunas acciones que la industria de la construcción lleva a cabo actualmente para tener una menor acción contaminante y hacer más económico el proceso de elaboración del cemento , es el uso de diversos cementantes suplementarios, los cuales puedan reemplazar ciertos porcentajes de cemento por uno o la combinación de algunos de estos cementantes, tratando de tener resultados similares o mejores al que se obtendría usando solo Cemento Portland [5] . Estos cementantes provienen de

diversas fuentes, principalmente desechos de la industria. Algunos ejemplos son el humo de sílice, vidrios, escorias o la ceniza volante.

La ceniza volante se utiliza como material cementante suplementario en la producción de concretos y morteros. El uso de la ceniza volante como material para la construcción comenzó a mediados del siglo XX, y a través del tiempo se ha visto un crecimiento constante, hasta alcanzar los 15 millones de toneladas utilizadas en la industria del concreto durante 2010 [10].

Normalmente la ceniza volante se ha utilizado en rangos entre el 15% y 30% en masa del material cementante, sin embargo, la cantidad varía dependiendo la aplicación, propiedades de la ceniza, especificación, ubicación geográfica y clima. Se han utilizado en niveles más altos (30%-50%) en estructuras masivas como presas o rascacielos, para controlar el aumento de temperatura. En las últimas décadas la literatura ha demostrado que niveles altos de ceniza volante (40%-60%) se pueden utilizar en aplicaciones estructurales, produciendo concreto con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad [11].

Sin embargo el uso de niveles altos de ceniza volante puede traer problemas con el lento desarrollo de resistencia a edades tempranas y en la durabilidad del concreto respecto a la carbonatación [12]. Para mejorar el desempeño de la ceniza volante se utilizan algunas técnicas, mediante medios mecánicos o físicos, tales como el cribado, con el fin de reducir el tamaño de las partículas y eliminar el carbón contenido en la

ceniza, con lo cual se puede obtener mejor desempeño y utilizar sustituciones mayores de dicha puzolana.

Dependiendo de cada tipo de proyecto, habrá una cantidad óptima de ceniza volante que se puede utilizar en el concreto, la cual no afecte los tiempos de construcción o el rendimiento del concreto. Dicha cantidad estará dada en función de parámetros técnicos, ambientales y económicos particulares de cada proyecto en particular.

En este trabajo de investigación se evaluará el efecto de la ceniza volante en morteros con distintos porcentajes de sustitución (10%, 20% y 50%) y en los mismos porcentajes de sustitución de ceniza cribada por la malla #100. Se analizarán sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) e indicadores de durabilidad (porosidad abierta, permeabilidad al aire, resistividad eléctrica, profundidad de carbonatación, potencial y velocidad de corrosión) en condiciones de carbonatación acelerada, para 4 diferentes atmósferas (rural, promedio, urbana e industrial), con el fin de observar si existe un mejor desempeño en las propiedades evaluadas con la sustitución de ceniza tamizada ante la acción del dióxido de carbono.

1.2 Planteamiento del problema

En la industria de la construcción, la consecuencia más severa en el deterioro de las estructuras de concreto reforzado es la degradación del acero de refuerzo producto de la corrosión del mismo [13]. La corrosión se puede dar por diferentes procesos, entre ellos el ingreso del CO_2 por los poros de la matriz cementante, causando el fenómeno conocido como carbonatación, lo que disminuye el pH al interior del concreto, originando la despasivación del acero, y posteriormente iniciará el proceso de corrosión.

En la actualidad, debido al aumento en las emisiones de CO_2 , de las cuales la producción del cemento portland es responsable del 7% del total de ellas [12], y en la búsqueda de disminuir dichas emisiones, se ha vuelto común el uso de materiales cementantes suplementarios en el concreto, tales como la ceniza volante, debido a que mantiene buenas propiedades en la calidad del concreto a largo plazo. Sin embargo, debido a su composición, la ceniza volante no muestra buenos indicadores de durabilidad en carbonatación [12]. El buen desempeño de la ceniza destaca en las propiedades mecánicas, de ahí que cada vez exista un mayor interés por reemplazar niveles más altos de cemento portland con cenizas volantes, ya que significaría un ahorro económico al utilizar un subproducto de las plantas carboeléctricas y beneficio ambiental al reducir las emisiones de CO_2 .

La Asociación Americana de carreteras estatales y de transporte (AASHTO) requiere que la cantidad de carbono sin quemar en cenizas volantes, medido por la pérdida en

la ignición (LOI) no exceda 5% en peso. Sin embargo, a partir de mediados de los años 90, la instalación de equipos de control de gases por mandato en centrales eléctricas de carbón, aumentó el contenido de carbón de gran parte de las cenizas volantes. Algunas normativas de tratamiento adicionales para reducir gases de la planta de energía han provocado la contaminación de las cenizas volantes con otros químicos como amoníaco. Como una consecuencia, mientras que la comprensión de los beneficios de la utilización de cenizas volantes en concreto continúa aumentando, está disminuyendo la disponibilidad de las cenizas volantes de calidad adecuada, por lo que se han utilizado diversas técnicas, equipos de filtración o separadores con la finalidad de eliminar el carbón de la ceniza. En esta investigación se llevó a cabo un tratamiento físico que consistió en cribar la ceniza por la malla #100, debido a que es un proceso viable económicamente y demanda poco consumo de energía, esto con el fin de disminuir el contenido de carbón, reducir el tamaño de partícula y promover la mejora en sus propiedades de durabilidad [14].

Por lo anterior se espera, que este tratamiento físico resulte económico y ambientalmente viable para restaurar la calidad de las cenizas volantes disponibles en la región noreste del país, y se promueva beneficios en la densificación de la matriz cementante y que esto se vea reflejado en las propiedades mecánicas y de durabilidad para que sea utilizada en mayores porcentajes de sustitución en las estructuras de concreto sujetas a distintas atmósferas de CO₂.

1.3 Antecedentes

A continuación, se hace referencia de algunas investigaciones previas que han evaluado el efecto de la ceniza volante y, algunos de sus tratamientos en las propiedades mecánicas (Resistencia a la compresión) e indicadores de durabilidad (resistencia a la compresión, porosidad abierta al agua, resistividad eléctrica superficial, permeabilidad al aire, carbonatación) y potencial y velocidad de corrosión.

1.3.1 Propiedades Mecánicas e Indicadores de Durabilidad

Malhotra et al. [15] Investigó el efecto sobre las propiedades mecánicas de la sustitución de diversos cementantes suplementarios (entre ellos la ceniza volante) en mezclas de mortero en un plazo de 10 años. La mezcla con ceniza volante obtuvo la mayor resistencia a la compresión después de 28 días. También evaluó la carbonatación bajo condiciones naturales de exposición por 10 años. Sin embargo, se obtuvieron resultados poco concluyentes en todas las mezclas evaluadas, siendo necesario el análisis de manera acelerada, para obtener una modelación confiable en un menor tiempo.

Castellote et al [16] Examinó 3 concentraciones distintas de CO₂ (3%, 10% y 100%), evaluando los cambios en las fases químicas en la microestructura de la matriz cementante, confirmando que la concentración de 3% de CO₂ no modifica la microestructura, obteniendo un perfil similar al de una carbonatación natural. En la concentración de 10% de CO₂ se obtuvo la mayor velocidad de carbonatación de las

tres concentraciones evaluadas, además de formación de mayores productos de carbonatación en la matriz cementante , mientras que en la concentración de 100% de CO₂, se disminuyó la velocidad de carbonatación, ya que al consumirse el hidróxido de calcio el gel C-S-H desaparece, formando geles modificados de carbonato y calcio que densifican a la matriz cementante, provocando que el dióxido de carbono ya no pueda difundirse debido a la saturación de los poros y a su vez, disminuyendo la velocidad de carbonatación .

Cui et al. [17] Comparó entre 5 diferentes concentraciones de CO₂ (2%, 10%, 20%, 50%, 100%), investigando la relación entre la profundidad de la carbonatación y la cantidad de CO₂ a través del proceso de difusión y de la porosidad del concreto. Encontró que en la misma edad de carbonatación, los especímenes de entre 10% y 20% de CO₂ tuvieron una mayor profundidad de carbonatación, debido a que los productos generados en la carbonatación a altas concentraciones (50-100%) densificaban a la matriz cementante, reduciendo los poros y por lo tanto el dióxido de carbono no podía penetrar a mayor profundidad, reduciendo a partir del 20%, la velocidad de carbonatación. (Véase Figura 3).

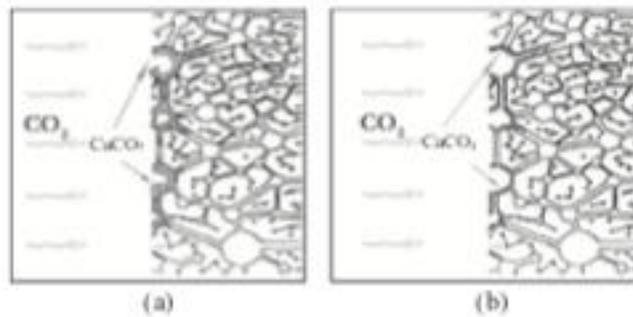


Figura 3. Mecanismo de difusión del dióxido de carbono en a) altas concentraciones de CO₂ y b) bajas concentraciones de CO₂

Valdez et al. [18] Estudió el efecto de la ceniza volante en la porosidad de morteros, la cual es menor en relaciones agua/cemento bajas debido a los productos de hidratación que se forman en la matriz cementante y en donde en la sustitución de 25% de ceniza volante se obtuvo una mayor densificación de la matriz cementante, siendo menos permeable que una matriz de referencia sin sustituciones de ceniza volante e impidiendo el ingreso del dióxido de carbono, además de señalar que se requiere un periodo de tiempo mayor a los 28 días para la total reacción puzolánica de la ceniza volante.

Younsi et al.[19] Evaluó el desempeño de las sustituciones de ceniza volante al 30% y 50% en la profundidad de carbonatación, este trabajo se evaluó respecto a los tipos de curado, en donde la profundidad de carbonatación fue entre 20% y 50% menor en los curados húmedos en comparación a los curados al aire, lo cual se atribuye principalmente a la saturación de los poros, los cuales impiden el proceso de difusión en el concreto. También se confirmó lo planteado con los anteriores autores, en relación al bajo contenido de hidróxido de calcio (Ca (OH)₂ en la ceniza volante,

donde la profundidad de carbonatación aumentaba, debido a la disminución del pH en el concreto y al uso de altas relaciones agua/ cementante.

Morandeu et al. [20] Realizó trabajo de investigación con las siguientes condiciones de exposición de CO₂ (10% CO₂, 25° C y 62% de HR) con morteros relación a/c de .45 y .60, e identificó que también la porosidad disminuye debido a un reordenamiento de la microestructura debido a la carbonatación y la creación de grandes poros capilares de la pasta con los más altos contenidos de cenizas volantes (60 %).

Quintero et al. [21] Realizó estudios enfocados a la relación de carbonatación con la porosidad y permeabilidad, en donde se coincide mediante distintas técnicas ,que un concreto con mayor relación agua cemento, será más poroso y tendrá una relación directa con una mayor permeabilidad.

Shi et al. [22] Revisó la influencia de la sustitución de volúmenes altos de ceniza volante (60% en masa), en la conductividad eléctrica de la solución de poro. El resultado fue que la conductividad eléctrica es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica; a mayor conductividad eléctrica habrá menor resistividad y viceversa. Los resultados indicaron que la sustitución de 60% de ceniza presento una reducción en la conductividad eléctrica a los 28 días respecto a la referencia del 5% y llegó a reducirse a 30% a los 90 días. Se especifica que la composición de la solución de poro depende del contenido de álcalis de la ceniza volante, ya que su el porcentaje de uso y su composición va a incrementar o disminuir la concentración de iones. El

uso de la ceniza principalmente disminuye los iones Ca^{2+} y OH^- , siendo los iones más conductivos de todos.

1.3.5 Carbonatación

Moreno et al. [23] Establece que la carbonatación provocada por el dióxido de carbono depende de varios factores, principalmente del tipo y cantidad de cemento, la porosidad del material y de la adición de puzolanas. En dicha investigación se concluyó mediante pruebas aceleradas y ensayos de profundidad de carbonatación a través de la prueba de fenolftaleína, que a menor contenido de cemento y mayor relación agua/ cemento, mayor profundidad de carbonatación y mayores coeficientes de carbonatación.

San Juan et al. [24] Concluyó que las pruebas de carbonatación acelerada en 7-15 días con una concentración entre 4-5% son parámetros adecuados para simular la profundidad de carbonatación en 1 año de exposición natural, sin embargo indica que su estudio se orienta a una atmósfera muy general sin las condiciones específicas de cada ambiente y al cambio de concentraciones de CO_2 . Las pruebas de carbonatación aceleradas a altas concentraciones se realizan principalmente para verificar enfoques de las propiedades mecánicas, durabilidad y cambios en fases químicas.

Chang et al. [25] Comprobó en base a análisis de laboratorio a 20% de concentración de CO_2 , que la profundidad de carbonatación aumenta en comparación a una

concentración de 4%, aunque ya no se reportó a concentraciones más altas de CO₂, donde los anteriores autores indican que la microestructura y la velocidad de carbonatación presentan cambios mínimos, asumiendo que en rangos cercanos al 20% de CO₂ es en donde se presentan la máxima profundidad y velocidad de carbonatación.

Ho et al.[26] , **Sulapha et al.** [27] y **Montemor et al.** [28] Realizaron investigaciones en condiciones de carbonatación acelerada y coinciden en que el reemplazo del cemento con ceniza volante incrementaba la profundidad de carbonatación. Esto se debe principalmente a que la reacción puzolánica de la ceniza volante, causa reducción en el Ca (OH)₂, lo cual incrementa la velocidad de carbonatación.

En estos trabajos se hace énfasis a investigar las sustituciones idóneas de ceniza volante particulares para cada sitio y mejoras en los indicadores de durabilidad del concreto, se puede reducir la profundidad de carbonatación.

Papadakis et al.[29] Reportó que al sustituir cemento con 10% ceniza de alto contenido de calcio, la profundidad de carbonatación se reduce, comparado a otras sustituciones con contenido menor de calcio (20% y 30%), usando relaciones agua/material cementante de 0.4 y un periodo de curado húmedo de 1 año. Concluye que un mayor contenido de Hidróxido de Calcio (Ca (OH)₂) se tendrá una matriz cementante menos porosa, lo cual hacía más difícil el proceso de difusión propio de la carbonatación.

Atis et al. [30] Investigó que en el concreto con 50%-70% de sustitución de ceniza volante y una relación agua-cemento baja comparada con un concreto base cemento , mostró una profundidad mayor de carbonatación comparada solo con el concreto sin adiciones. Sin embargo, los especímenes con curado húmedo y relación agua/cemento bajas se carbonataron menos, debido a la saturación de los poros, impidiendo la difusión de iones carbonato a través de la matriz cementante.

Khunthongkeaw et al. [31] Investigó el efecto de las sustituciones de ceniza volante con bajo contenido de calcio, donde se observó que la profundidad de carbonatación aumentaba cuando se incrementaba el contenido de ceniza volante. El autor le atribuyó a la reducción del Hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) por la disminución de contenido del Cemento Portland, aunque con el uso de ceniza volante de alto contenido de calcio aportó mayor cantidad de Hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), lo cual disminuía la porosidad del concreto, disminuyendo la profundidad de carbonatación.

1.3.6 Potencial y velocidad de corrosión

Glass et al. [32] Estudió mediante pruebas electroquímicas la relación de la carbonatación con la corrosión del acero de refuerzo a través de la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y la resistividad del concreto. Establece que factores tales como la humedad relativa y la contaminación por dióxido de carbono afectan a la velocidad de corrosión a través de su influencia sobre la resistividad del concreto, ya que se relacionaron diferentes profundidades de colocación de varillas y donde se

encontró que, en el momento de empezar el periodo de propagación de la corrosión, se incrementa exponencialmente el daño por corrosión.

Moreno et al. [33] Reportó el efecto de la ceniza volante en la alcalinidad del concreto, donde presenta una reducción menor en el pH de los concretos con ceniza volante, en comparación a los concretos que no contenían ceniza volante, además de que la alcalinidad aumenta, cuando la relación agua cemento disminuye. Sin embargo, por si solo el valor del pH de los concretos con ceniza volante era menor que el de los concretos sin sustituciones.

Yongsheng et al. [34] Comparó entre 4 distintas concentraciones de CO₂ (5%, 10%, 20% y 40%) y humedad relativa de 60% y 80%, las variaciones en el pH en los perfiles de carbonatación en especímenes de concreto, en donde para los primeros milímetros de estar carbonatados bajaban los niveles de pH a valores de entre 8 y 9, en comparación al interior de los especímenes, donde aún no se presentaba, ya que se mantenía el pH en valores típicos de 12-13. Las profundidades de carbonatación fueron de valores similares en ambas humedades relativas para la misma concentración de CO₂, existiendo una zona conocida como “semi-carbonatación”, la cual es mayor a mayor humedad relativa. Indica que es factible estudiar el proceso de carbonatación, mediante el proceso acelerado.

1.4 Justificación

Actualmente existe el interés de obtener mayor cantidad de información técnica y mejor rendimiento de la ceniza volante, con el fin de poder incrementar el porcentaje de reemplazo y enfocar el nuevo conocimiento hacia la durabilidad de las estructuras de concreto en las condiciones ambientales actuales y los agentes nocivos que se concentran en mayor cantidad año con año, debido a la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

La literatura ha demostrado el buen comportamiento mecánico y algunas propiedades de durabilidad a largo plazo de la ceniza volante en porcentajes bajos de sustitución (<25%) utilizando relaciones agua/ material cementante bajas y periodos largos de curados, sin embargo, las mezclas con ceniza volante pueden ser de calidad inferior respecto a mezclas sin sustitución de ceniza, ante el proceso de carbonatación [12]. Adicionalmente, existen ciertas recomendaciones en la ceniza volante para poder aumentar sus propiedades, entre ellas se encuentra la separación mecánica, ya sea mediante tratamientos físicos o químicos, con el fin de disminuir el contenido de carbono indicado en las normas, reducir el tamaño de partícula y área superficial y poder tener mejoras tanto sus propiedades mecánicas y en los indicadores de durabilidad.

Esta investigación está enfocada a estudiar el efecto que tienen diferentes sustituciones de ceniza volante (10%, 20% y 50%) sometida a un previo proceso

mecánico de separación (cribado por la malla #100) en morteros base cemento portland, y compararlas con mismas sustituciones de ceniza sin cribar, analizando su influencia en propiedades mecánicas e indicadores de durabilidad en carbonatación acelerada para 4 atmósferas distintas de la clasificación del IPCC.

1.5 Hipótesis.

El cribado de la ceniza volante como sustituto parcial del cemento portland, mejora las propiedades mecánicas e indicadores de durabilidad en morteros bajo condiciones de carbonatación acelerada, en comparación a los morteros con sustitución de ceniza volante sin cribar, debido a la reducción del tamaño de partícula y la disminución del contenido de carbón de la ceniza volante.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la reducción del tamaño de partícula y la disminución del contenido de carbón de la ceniza volante en sustituciones de 10%, 20% y 50%, mediante pruebas mecánicas e indicadores de durabilidad en morteros base cemento portland en condiciones de carbonatación acelerada al 20% de CO₂, con la finalidad de comparar su comportamiento con morteros con sustitución de ceniza volante sin cribar y la mezcla de referencia sin ceniza volante.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto del cribado por la malla #100 de la ceniza volante en la resistencia a la compresión de especímenes en las diferentes sustituciones estudiadas.
- Evaluar el efecto de la sustitución de ceniza volante cribada por la malla #100 en la resistividad, porosidad y permeabilidad al aire de los morteros.
- Determinar la profundidad de carbonatación en los diferentes especímenes de mortero y con las sustituciones de ceniza volante cribada por la malla #100 expuestos a carbonatación acelerada al 20% de CO₂.
- Evaluar el deterioro del acero de refuerzo en los especímenes de mortero sometidos a concentración de 20% de CO₂ en el proceso de carbonatación acelerada.
- Establecer los coeficientes de carbonatación de los morteros evaluados, para indicar si son de buena calidad para utilizarse en atmósferas con concentraciones de CO₂ distintas de la clasificación del IPCC.

CAPITULO 2: Marco Teórico

2.1 Durabilidad

En los años recientes, la durabilidad en estructuras de concreto reforzado ha sido un aspecto de mayor importancia debido al aumento en la concentración de agentes nocivos, como el dióxido de carbono (CO_2). Este gas está presente en un volumen de aproximadamente 0.03% del volumen del aire, siguiendo una tendencia a incrementarse [30] . Como consecuencia de esto, la carbonatación ha comenzado a ser uno de los problemas más críticos de durabilidad para estructuras de concreto en zonas urbanas. El proceso de carbonatación depende principalmente de la humedad relativa, concentración de CO_2 , la presión y la temperatura del ambiente donde se encuentra la estructura [30] .

En el concreto reforzado, el recubrimiento de concreto protege a las barras de acero de los agentes iniciadores de corrosión, funcionando como una barrera física de protección. El grado de protección que le pueda dar depende principalmente de su espesor y calidad. Siendo la carbonatación una de las causas principales por las que el concreto deja de proteger al acero [35] .

La contribución entre el concreto y acero se basa en la protección física y química que otorga el concreto 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 este continúe corroyéndose. A este fenómeno se le denomina pasivación. Esta alcalinidad se debe al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado durante la hidratación del cemento, situando el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 14. El concreto también funciona como barrera física contra los agentes ambientales (Oxígeno, agua, cloruros, CO_2) que puedan despasivar el acero e iniciar su corrosión [5].

2.1.2 Corrosión

La corrosión es un fenómeno que se lleva a cabo a través de un intercambio electroquímico por medio de una reacción de pérdida de electrones para que ocurra la oxidación [36]. La cual ocurre a través de un proceso anódico, que es la disolución de la capa protectora del acero debido a un ambiente ácido o a la penetración de algún agente nocivo y a través de un proceso catódico, que se produce cuando en la capa superficial del acero se disponen cantidades de oxígeno y agua, los cuales se combinan con los electrodos del ánodo, dan origen a la formación de iones hidroxilo [36].

La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales (Véase Figura 4) [13]:

- 1) Ánodo: Donde ocurre la oxidación.
- 2) Cátodo: Donde ocurre la reducción.
- 3) Conductor metálico: Donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- 4) Electrolito: Donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

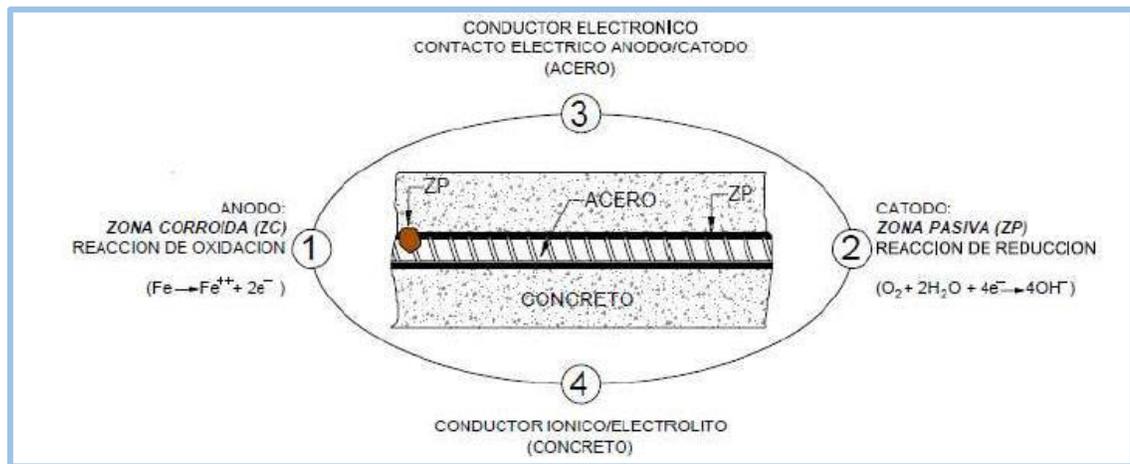


Figura 4. Elementos que intervienen en el proceso de corrosión[13]

Durante el proceso de corrosión en las estructuras de concreto reforzado, la zona anódica y catódica están sobre la superficie del acero y el concreto actúa como electrolito, completándose los elementos necesarios para formar la celda electroquímica [13] .

En un ambiente agresivo, agentes químicos como los cloruros, sulfatos del agua de mar o el CO₂ del ambiente, se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento hasta llegar a la varilla. Cuando la concentración de estos agentes químicos en la superficie del acero alcanza valores que exceden un nivel umbral, la protección de la armadura corre peligro de desaparecer y la corrosión puede desencadenarse [5] .

Cuando el acero embebido se corroe, se consume una capa de la superficie del acero y se forma una capa de productos de corrosión en el perímetro de la varilla. El

volumen ocupado por los productos de corrosión, es mayor que el del acero original, creando presiones contra el concreto que rodea al acero, causando la formación de grietas y desprendimientos, lo cual puede disminuir la resistencia estructural del elemento [5] .

Existen dos tipos principales de corrosión en las estructuras de concreto, dependiendo principalmente de las condiciones ambientales y agentes que actúan sobre las mismas. En el caso de los cloruros, la corrosión se presenta de forma localizada (picaduras) y es característica en estructuras cercanas al mar. En cambio, la corrosión por efecto de la carbonatación del concreto se manifiesta de forma uniforme en el acero, y puede ocurrir en estructuras ubicadas en cualquier lugar geográfico [37] . En la Figura 5 se ejemplifica el tipo de corrosión por cloruros y por la carbonatación.

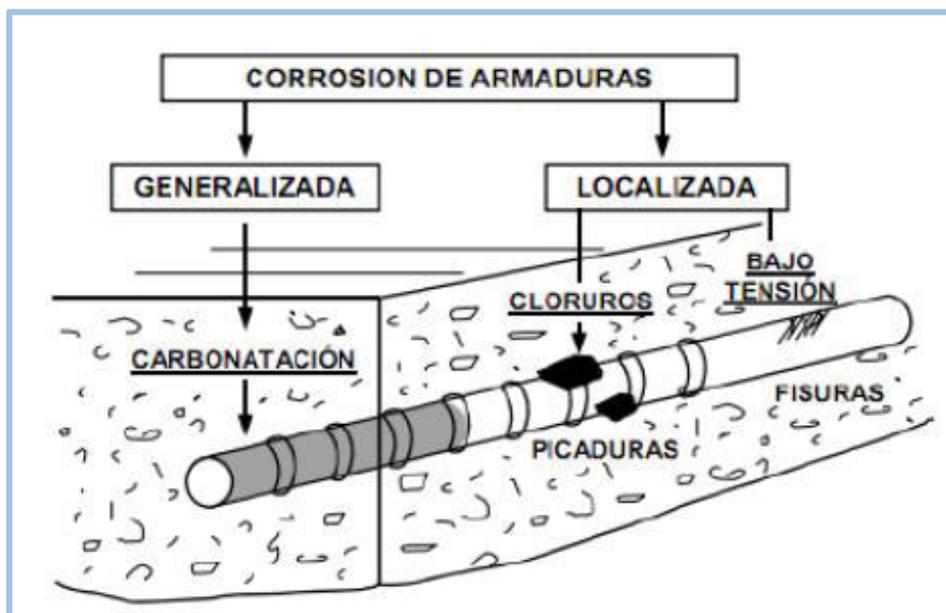


Figura 5. Tipos de corrosión en el acero de refuerzo[37].

La corrosión del acero es una de las causas de deterioro de las estructuras de concreto que demanda más gastos de reparación y mantenimiento, donde se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas de infraestructura en EUA. De esta misma cantidad es posible evitar pérdidas por 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión [38] .

2.1.2 Vida útil

La vida útil se definió por 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 suficiente [5] . Este mismo concepto se ha definido también en función del cambio climático como la capacidad de un material de construcción, elemento o estructura de resistir las acciones físicas, químicas y biológicas vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviceabilidad y conservando su forma original, propiedades mecánicas y condiciones de servicio [39].

El modelo de Tuutti (1982) es uno de los modelos de vida útil más aceptados y utilizados, el cual relaciona la degradación por corrosión del acero de refuerzo en el concreto, en función del tiempo. En este modelo se identifican 2 etapas principales: iniciación (T1) y propagación (T2) [40] . (Véase Figura 6)

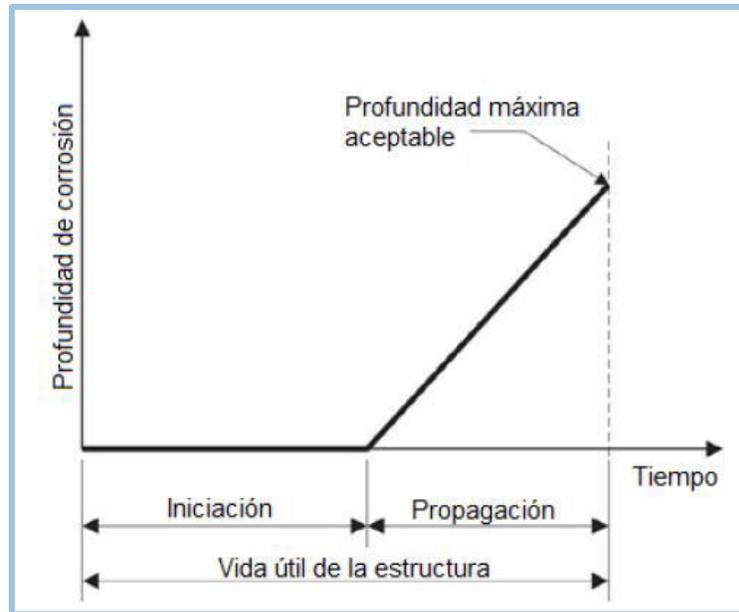


Figura 6. Modelo de vida útil propuesto por Tuutti [40]

Se define el periodo de iniciación (T_1) como el periodo de tiempo que tarda un agente nocivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación. Y se define al periodo de propagación (T_2) como el 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) [5].

2.2 Carbonatación

La carbonatación es un proceso natural, el cual consiste en un proceso de difusión del dióxido de carbono (como gas o de iones), el cual penetra en los poros capilares del concreto y reacciona con la humedad dentro de los poros, convirtiendo el hidróxido

de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de alto pH, a carbonato de calcio de pH neutro, originando la disminución del pH del concreto (desde valores entre 12-13 hasta de 8-9) [35].

Generalmente la carbonatación no representa deterioro en el concreto simple, sin embargo, la mayoría de las estructuras de concreto contienen acero de refuerzo, el cual se puede corroer cuando el concreto ha disminuido su pH, debido a la destrucción de la capa pasiva que protege al acero, resultando en problemas de durabilidad que pueden causar severos daños estructurales [41].

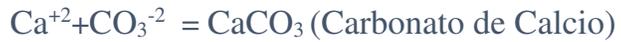
Este proceso se observa cuando los iones de carbonato y los iones de calcio presentes en la solución de poro precipitan y forman carbonato de calcio. En el concreto esto resulta en la disolución de todos los componentes que contienen calcio, para formar el carbonato de calcio.

La atmósfera contiene cantidades sustanciales de dióxido de carbono, sin embargo, el CO_2 presente en forma de gas no puede reaccionar directamente con las fases hidratadas del cemento, porque primero tiene que disolverse en agua y formar iones de carbonato que reaccionarán con los iones de la solución de poro.

La carbonatación puede representarse mediante las ecuaciones químicas 1 y 2 [41]:



Los iones de carbonato son los que reaccionan con los iones de calcio presentes en el hidróxido de calcio para formando carbonato de calcio, presentado en la ecuación 3:



Ecuación 3

Esta reacción causa una reducción en la concentración de calcio (Ca), lo cual, causará la disolución del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el carbonato de calcio (CaCO_3) precipitará y el proceso continuará hasta que todo el hidróxido de calcio sea consumido. Al consumirse todo el hidróxido de calcio, el pH y la concentración de los iones de calcio decrecen y el C-S-H comenzará a disolverse.

La carbonatación es un proceso de difusión del dióxido de carbono gaseoso con iones carbonatados. La difusión del gas es más rápida que los iones, por lo tanto, la velocidad de carbonatación depende de la humedad interna del concreto. En los concretos secos el dióxido de carbono puede penetrar a gran profundidad, pero no hay suficiente agua para que se lleve a cabo la reacción de carbonatación, por lo tanto, hay una condición de humedad óptima en la cual la velocidad de carbonatación está en su punto máximo.

También es resultado de las diferencias de concentraciones entre los ambientes que interactúan para el transporte de sustancias de un medio a otro. En este caso, el carbonato de calcio (CaCO_3) reacciona en la superficie del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Cuando la concentración de CO_3^{2-} es mayor a la concentración de Ca^{2+} y donde se formará una capa porosa de carbonato de calcio alrededor del hidróxido de calcio, lo cual retrasa la carbonatación. Sin embargo, si el Ca^{2+} es mayor, el CO_3^{2-} reacciona en la solución de poro, precipitando como cristales en el sistema capilar, lo que

provocará la reducción de la porosidad y densificación de la matriz cementante. Cuando el hidróxido de calcio sea consumido, se empezará a consumir el C-S-H, en donde los carbonatos consumen iones de calcio (Ca) liberados por el C-S-H, causando que el gradiente de iones de calcio disminuya y la difusión se volverá más lenta.

El concreto se carbonatará siempre que se encuentren disponibles, dióxido de carbono y agua. La velocidad de carbonatación dependerá de que tan rápido el dióxido de carbono se mueva a través de la superficie del concreto y reaccionen con la pasta de cemento. En un ambiente muy húmedo, se tendrá una lenta difusión de los iones carbonato, y una difusión rápida del dióxido de carbono en un sistema seco, sin embargo se ocupará agua para la formación de iones carbonato que causarán la carbonatación [41].

Para que este proceso se lleve a cabo requiere de ciertas condiciones:

- Contenido de humedad relativa ambiental (RH): Es el principal factor involucrado en el proceso de carbonatación, siendo en el rango del 60%-80% la que más favorece al desarrollo de la carbonatación. Ya que en ambientes demasiado secos o muy húmedos la velocidad de carbonatación disminuirá. Los ciclos de humectación y secado también favorecen a la carbonatación.
- Temperatura: La velocidad de carbonatación aumentará conforme aumente la temperatura.

- Contenido de material cementante: El proceso de carbonatación ocurre en el cementante y no en los agregados. Mientras se mantenga una relación agua-cementante constante, el contenido de cementante no afectará la velocidad de carbonatación.
- Calidad del concreto: Una relación agua- cementante más baja y un adecuado proceso de curado, resultará en una mezcla más densa con una baja porosidad. En un mal proceso de curado, resultará en una velocidad de carbonatación mayor, causado por la disminución del grado de hidratación.
- Adición de puzolanas: Es frecuente el uso de cementos compuestos de cemento portland y adiciones minerales, como yeso, caliza, escoria de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, etc. En el caso de la ceniza volante, su reacción puzolánica causará una disminución en el contenido de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y aumento en la cantidad de C-S-H. Menor cantidad de hidróxido de calcio incrementará la profundidad de carbonatación.

Para poder estimar los efectos de la carbonatación a largo plazo, se requiere seguir un modelo apropiado y fidedigno para poder expresar cuantitativamente el proceso de deterioro físico y químico del concreto, esta cuantificación es esencial para poder estimar la vida de servicio de las estructuras de concreto [42].

El modelo de la raíz cuadrada del tiempo (véase Ecuación 4), es la ecuación más utilizada debido a su simplicidad. Esta relación agrupa en el valor k las diferentes variables (parámetros climáticos y características del concreto) que afectan al proceso de carbonatación. Dicha ecuación se expresa como:

$$x = k\sqrt{t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

x= Profundidad del frente de carbonatación (mm)

k= Coeficiente de carbonatación (mm/año^{1/2})

t= Vida de servicio de la estructura (años)

Se ha verificado en estudios anteriores [31][43] que la profundidad de carbonatación tiende a variar linealmente con la raíz cuadrada del tiempo de exposición. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se utiliza dicha ecuación para relacionar la profundidad de carbonatación a cualquier edad con la carbonatación acelerada para las 4 atmósferas a evaluar.

Para concentraciones aceleradas hasta el 20% de CO₂, el coeficiente de carbonatación (k) se puede modelar con siguiente procedimiento matemático descrito en la ecuación 5 para el 4% de CO₂ [43] :

$$k_{4\%} = \sqrt{\frac{(x^2 - x_0^2)}{t}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$k_4\%$ = Coeficiente de carbonatación para una concentración de CO₂ de 4% (mm/año^{1/2})

x = Profundidad de carbonatación en tiempo t (mm)

x_0 = Profundidad de carbonatación inicial después del periodo de acondicionamiento (mm)

t = tiempo (años).

Posteriormente se obtiene el coeficiente de carbonatación promedio (k_{avg}) a partir de

la ecuación 6:

$$k_{avg} = \frac{\sum k_i \cdot (x_i - x_0)}{(\sum x_i - i \cdot x_0)} \quad \text{Ecuación 6}$$

El coeficiente de carbonatación (k) se modela a partir de la ecuación 7

$$k = \sqrt{\frac{2 D c}{M}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

k = Coeficiente de carbonatación

D = Coeficiente de difusión del concreto

c = Concentración de CO₂

M = Concentración de compuestos de calcio hidratados

Para posteriormente a partir de la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo, obtener la ecuación del tiempo de la profundidad de carbonatación en las 2 atmósferas (la promedio y a la que se expondrá), denominadas t_1 (Ecuación 8) y t_2 (Ecuación 9) respectivamente:

$$t_1 = x_c^2 \cdot \frac{M}{2Dc_1} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$t_2 = x_c^2 \cdot \frac{M}{2Dc_2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Resolviendo estas 2 ecuaciones para x_c^2 (véase ecuación 10) se obtiene:

$$x_c^2 = \frac{t_1 2Dc_1}{M} = \frac{t_2 2Dc_2}{M} \quad \text{Ecuación 10}$$

Después se resuelve para t_1 (véase ecuación 11)

$$t_1 = t_2 \frac{c_2}{c_1} \quad \text{Ecuación 11}$$

Sustituyendo los términos en la ecuación 10, resulta la ecuación 12:

$$x_c^2 = t_1 k_1^2 = t_2 k_2^2 \quad \text{Ecuación 12}$$

Posteriormente se igualan términos, obteniendo la ecuación 13

$$t_2 \frac{c_2}{c_1} k_1^2 = t_2 k_2^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Y resolviendo para k_1 , resulta la ecuación 14:

$$k_1 = k_2 \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Por último, los coeficientes promedio (k avg) obtenidos, se convierten a coeficientes atmosféricos (k atm), por la siguiente expresión (véase ecuación 15):

$$k_{atm} = k_{avg} \sqrt{\frac{c_{atm}}{c_{\%}}}$$

Ecuación 15

Donde:

k_{atm} = Coeficiente de carbonatación atmósfera promedio normal (.04%) (mm/año^{1/2})

k_{avg} = Coeficiente de carbonatación en la atmósfera que se expone (mm/año^{1/2})

c_{atm} = Concentración de CO₂ en la atmósfera promedio a evaluar (%)

$c_{\%}$ = Concentración de CO₂ en el medio evaluado, en esta investigación es 20% (%)

De acuerdo al valor de los coeficientes de carbonatación, se puede clasificar las mezclas de acuerdo a la Tabla 2 [4] [44], para poder determinar la calidad de la mezcla expuesta a la atmósfera en que se encuentra :

Tabla 2. Clasificación de coeficientes de carbonatación

Coeficiente	Representación
<3 mm/año ^{1/2}	Mezcla de alta calidad para su uso en la atmósfera evaluada.
3-6 mm/año ^{1/2}	Mezcla de mediana calidad para su uso en la atmósfera evaluada
>6mm/año ^{1/2}	Mezcla de baja calidad para su uso en la atmósfera evaluada

2.3 Ceniza Volante

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en las plantas generadoras de electricidad y es el material cementante suplementario más utilizado en América del Norte [12]. Cuando el carbón se quema a altas temperaturas las impurezas minerales son arrastradas en forma de cenizas por los gases producidos en la combustión del carbón. Posteriormente la ceniza se enfría y se solidifica en forma de partículas esféricas vítreas [45].

La ceniza se elimina del gas de combustión por medio de una serie de separadores, seguido de precipitadores electrostáticos o filtros de bolsa [45]. No todas las cenizas volantes son adecuadas para su uso en concreto, debido a que, en algunas plantas eléctricas, durante la depuración y la eliminación de las impurezas minerales y el azufre de las chimeneas, las cenizas se mezclan con diversos productos de lavado, resultando en cenizas volantes con contenidos de amoníaco y sulfatos. Dichos materiales no se pueden utilizar en el concreto, por lo cual es necesario hacer un análisis previo a su uso [46].

La ceniza volante es un vidrio de silicato que contiene dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3), compuestos que le dan la actividad puzolánica capaz de reaccionar con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar compuestos cementantes. También contiene hierro (Fe) y calcio (Ca). El magnesio (Mg), azufre (S), sodio (Na), potasio (K) y carbono (C), este último es generalmente interpretado como la pérdida por ignición, se encuentran en proporciones menores [12].

La especificación más utilizada para la ceniza volante es la ASTM C618 [47] .De acuerdo a esta especificación, la ceniza volante se clasifica en 2 clases de acuerdo a su fuente de origen y composición:

- Clase F: Ceniza Volante normalmente producida de la calcinación de antracita o carbón bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

Tiene que cumplir la siguiente condición: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$

- Clase C: Ceniza Volante que se produce a partir del carbón de lignito o sub-bituminoso. Esta clase de cenizas, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes. Algunas cenizas volantes de clase C pueden contener contenidos de cal superiores al 10%.

Tiene que cumplir la siguiente condición:

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$.

El tamaño predominante en las partículas de ceniza volante es de 30 μm y están formadas principalmente de partículas esféricas de vidrio. Algunas veces podemos encontrar esferas vacías, las cuales son llamadas cenizas esferas (completamente vacías) y pleno esferas (empaquetamiento con partículas pequeñas), esta forma de las

partículas ayuda a que el concreto con ceniza volante tenga mejor acabado y sea fácil de bombear, ya que las partículas de cemento tienen una forma angular.

La ceniza volante es un material puzolánico. Una puzolana, la define American Standard for Test and Materials (ASTM), como un material silíceo o silíceo-aluminoso que por sí mismo posee poca o nula reacción cementante, sin embargo finamente dividida y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar compuestos cementantes [48].

En presencia de humedad, los silicatos de aluminio de la ceniza volante reaccionan con los iones de calcio para formar silicatos de calcio hidratados C-S-H [45]. Las cenizas volantes con mayores cantidades de calcio tienen mayor comportamiento cementoso al reaccionar con el agua para aumentar la cantidad de C-S-H, mejorando la resistencia y reduciendo la permeabilidad de la matriz cementante.

El rendimiento de la ceniza volante depende fuertemente de sus propiedades químicas y mineralógicas, en donde es importante revisar la composición y tipo de carbón que contiene (antracita, bituminosas, lignito, etc.) dado que puede afectar las propiedades de la ceniza. Existen diversos métodos físicos y mecánicos para reducir el contenido de carbón. En este trabajo se realizó el cribado por la malla #100, ya que de acuerdo a trabajos previos [49] con el objetivo de reducir el tamaño de partícula, la ceniza volante se puede cribar con la malla #100 para remover partículas mayores a $150\ \mu\text{m}$, reduciendo el contenido del carbón sin quemar y disminuyendo el área superficial de

la ceniza volante, provocando una mayor reactividad de los silicatos contenidos en la ceniza y la mejorando en ciertas propiedades de las mezclas realizadas.

El contenido de Calcio (Ca) en la ceniza volante, es un factor importante que puede indicar su comportamiento en el concreto [50]. Las cenizas con bajo contenido de calcio (<8% CaO), son producidas a partir de carbón antracita o bituminoso, predominan silicatos y aluminatos con cantidades variables de cuarzo, mulita, hematita y magnetita. Fases que son inertes en el concreto, requiriendo una fuente que contenga hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), para formar compuestos cementantes y tener reacción puzolánica.

Las cenizas con altos contenidos de calcio (>20%) se producen a partir de lignitos o carbones sub bituminosos, formadas por una amplia variedad de cristales de calcio aluminio y silicio. Algunas fases reaccionan con el agua y más rápido que las cenizas de bajo contenido de calcio, siendo hidráulicas y puzolánicas. Incluso si el contenido es suficiente se puede hacer concreto de resistencia moderada utilizando solamente ceniza volante como material cementante [51]. El contenido de calcio también predice la eficiencia de la ceniza para reducir el calor de hidratación, controlar la expansión por la reacción álcali sílice y resistencia a los sulfatos.

Numerosas empresas productoras de concreto, utilizan ceniza volante como reemplazo parcial del cemento portland, beneficiando económicamente a las empresas concreteras, debido a que la ceniza tiene un costo menor que el cemento,

Sin embargo, la incorporación de la ceniza volante también afecta las propiedades del concreto fresco y endurecido como la resistencia, acabado, porosidad y durabilidad [46].

De acuerdo a la PCA[12], las sustituciones de ceniza volante se clasifican de acuerdo a la Tabla 3:

Tabla 3. Rangos de sustitución de ceniza volante

Clasificación	Porcentaje de sustitución de ceniza volante en masa de material cementante
Bajo	<15%
Moderado	15%-30%
Alto	30%-50%
Muy Alto	>50%

Las propiedades más valoradas de los concretos con sustituciones de ceniza volante en estado fresco, son su mayor docilidad, lo que permite la relación agua/cemento más bajas y la reducción en el calor de hidratación (disminución de agrietamientos) por la disminución del contenido de cemento. Al endurecerse desarrollan bajas resistencias a edades tempranas, pero su resistencia al largo plazo suele ser igual o mayor a la de los concretos equivalentes sin ceniza. Este se debe a la lenta velocidad de la reacción puzolánica de las cenizas, que va aumentando la formación de compuestos y densificado la microestructura a mediano plazo (28- 180 días) [12].

Actualmente existe una tendencia a sustituir en distintos porcentajes cada vez más altos de ceniza volante en lugar de cemento portland, debido a 3 aspectos principales:

- **Economía:** Ya que en la mayoría de los mercados la ceniza volante es más económica que el cemento portland y a medida que aumenta el nivel de reemplazo, el costo de producción del concreto disminuye.
- **Medio ambiente:** La ceniza volante es un subproducto industrial, la cual cuando no se utiliza en concreto, se depositan en vertederos, entonces al ser usada se dispone de mayor cantidad de material, evitando contaminar. También mientras mayor demanda tenga la ceniza, será menor producción de cemento y menos emisiones de CO₂.
- **Desempeño:** Los reemplazos de ceniza volante han mejorado el rendimiento de concretos base cemento portland, especialmente en indicadores de durabilidad. En la actualidad los porcentajes comúnmente usados de reemplazo de cemento portland por ceniza volante son de entre 15% y 30%, sin embargo, actualmente existe el interés de obtener mayor cantidad de información técnica y mejor rendimiento, con el fin de poder incrementar el porcentaje de reemplazo.

CAPITULO 3: Metodología experimental

3.1 Materiales

3.1.1 Cemento Portland

Se utilizó Cemento Portland Ordinario (CPO 40) según la normativa ASTM C150 [52] y NMX C-414 [53] , la cual lo define como Cemento constituido por clínker + yeso de 95% a 100% y otros minoritarios de 0 a 5 %, referenciados conforme a su porcentaje en masa. (Véase Figura 7)



Figura 7. Cemento Portland utilizado en la investigación.

3.1.2 Ceniza Volante

La ceniza volante (CV) utilizada en este proyecto proviene de la planta carboeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ubicada en Nava, Coahuila; México. Esta ceniza volante está clasificada por la ASTM C-618 [47] como clase F, debido a su bajo contenido de óxido de calcio.

Con el objetivo de reducir el tamaño de partícula, el contenido de carbón sin quemar y mejorar su desempeño, la ceniza también fue cribada manualmente a través de la malla #100 (CV-100) (véase Figura 8), removiendo las partículas con tamaños de partícula mayores a 150 μm .



Figura 8. Cribado de la ceniza volante a través de la malla #100.

3.1.3 Agregado Fino

El agregado fino (véase Figura 9) se obtuvo por trituración de piedra caliza de la región y cumpliendo los lineamientos de la norma mexicana NMX-C-111 [54], definiendo al agregado fino como como el material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de éstos u otros; que pasa por la criba 4.75 mm (malla No. 4) y se retiene en la criba 0.075 mm (malla No. 200).



Figura 9. Agregado fino utilizado en la investigación

3.1.4 Acero

El acero utilizado en la investigación fue varilla de acero al carbono con diámetro nominal 6 mm (1/4 in), para su uso en las pruebas electroquímicas fue cortado en tramos de 10 cm, para después ser preparado y limpiado de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM G1 [55] (véase Figura 10).



Figura 10. Habilitado y preparación de las varillas de acero.

3.2 Mezclas de mortero

Para esta investigación se decidió la utilización de mortero, debido a que la carbonatación, es un fenómeno que ocurre en los productos de hidratación del cemento (pasta) y no en los agregados. Sin embargo, no es conveniente elaborar especímenes de pasta porque los agregados tienen un papel importante al disminuir los macro y micro agrietamientos causados por las retracciones plásticas y por secado,

y cambios volumétricos que surgen en la pasta, los cuales disminuyen su durabilidad. Con la finalidad de poder visualizar de mejor manera el efecto de la carbonatación se optó por el uso de mortero.

Se elaboraron 7 mezclas de mortero (véase Tabla 4) , las cuales fueron fabricadas con una relación agua/ material cementante promedio de 0.5, se realizaron los procedimientos de mezclado acorde a las especificaciones de la norma ASTM C-305 [56] , estableciendo criterios de fluidez de 20 ± 2 cm en las mezclas y no se utilizaron aditivos químicos en su elaboración.

La mezcla de referencia (MREF) se elaboró sin sustitución de cemento por ceniza volante, 3 mezclas con sustituciones del 10%, 20% y 50% en masa (M1, M2 y M3) y 3 mezclas con sustituciones por ceniza cribada en la malla #100 (CV-100) con los mismos porcentajes de sustitución (M1-100, M2-100 y M3-100).

Tabla 4. Mezclas de Mortero realizadas en la investigación.

Mortero	CPO (%)	CV (%)
MREF	100	0
Mezcla	CPO (%)	CV (%)
M1	90	10
M2	80	20
M3	50	50
Mezcla	CPO (%)	CV–Cribada malla #100(%)
M1 -100	90	10
M2 -100	80	20
M3 -100	50	50

La proporción de la elaboración de mezclas de mortero se presenta a continuación en la Tabla 5:

Tabla 5. Proporcionamiento de las mezclas de mortero para 1 m³

Mortero	Cemento (kg/m ³)	Ceniza Volante (kg/m ³)	Agua total (lt/m ³)	Agregado fino (material seco) (Kg/m ³)
MREF	520	0	260	1460.80
M 1	468	52	260	1439.43
M 2	416	104	260	1418.05
M 3	260	260	260	1353.94
M 1-100	468	52	260	1439.43
M 2-100	416	104	260	1418.05
M 3-100	260	260	260	1353.94

3.3 Caracterización de Materiales

3.3.1 Cementantes

Se realizó la caracterización del cemento portland ordinario, la ceniza volante (CV) y la ceniza volante cribada por la malla #100 (CV-100), obteniendo sus propiedades físicas y químicas necesarias para el diseño de las mezclas y para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

3.3.1.1 Densidad

La densidad de estos materiales se obtuvo mediante el procedimiento descrito por la norma ASTM C-188 [57] , mediante el matraz de Le Chatelier y también se obtuvo por medio del picnómetro (véase Figura 11 y 12) .



Figura 11. Frasco de Le Chatelier



Figura 12. Picnómetro

3.3.1.2 Distribución de Tamaño de Partícula (DTP)

Se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (DTP) utilizando el analizador de difracción láser de la marca Microtrac S3500 (véase Figura 13). Esta prueba se realizó utilizando una solución de material en polvo y alcohol iso-propílico, con una pureza de 99.5%; sometiendo la solución a una dispersión con ultrasonido, para eliminar posibles aglomeraciones en el material.



Figura 13. Analizador de difracción láser para obtención de DTP

3.3.1.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Se utilizó esta técnica para determinar la composición química en forma de óxidos. En la técnica, las muestras son bombardeadas con protones de alta energía en forma de rayos X, que desplazan los electrones de capas internas del átomo, haciendo que los electrones externos ocupen los sitios vacantes emitiendo una radiación característica del elemento. El equipo utilizado en esta técnica fue uno del modelo Épsilon 3 de PANalytical (véase Figura 14).



Figura 14. Equipo utilizado para la obtención de FRX.

3.3.1.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

La Microscopia Electrónica de Barrido (SEM, siglas en inglés) fue utilizada para conocer características morfológicas de los materiales. Consiste en un haz de electrones que incide sobre el material, generando electrones secundarios y electrones retro dispersados. La señal generada por la interacción de los electrones que inciden sobre la muestra es detectada y transformada a una señal electrónica que se proyecta en un tubo de rayos catódicos, lo que da como resultado en la visualización de una imagen. El equipo utilizado fue un microscópico electrónico modelo JEOL JSM-6490LV (véase Figura 15). En conjunto con el SEM, se realizó la Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS, siglas en inglés) para identificar y cuantificar la composición elemental de las partículas observadas en las microscopías.



Figura 15. Equipo de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) utilizado

3.3.1.5 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) se utilizó para determinar las fases y compuestos cristalinos de los cementantes. En esta técnica un haz de rayos X monocromático incide sobre la muestra y los rayos X difractados por los cristales de la muestra son detectados, el ángulo de difracción es característico de cada fase cristalina. En esta técnica se utilizó un equipo de difracción de Rayos X Bruker D8.

3.3.1.6 Índice de actividad a la Resistencia (IR)

El índice de actividad a la resistencia es especificado en la norma ASTM C311 [58], brindando una evaluación indirecta de la reacción de las puzolanas con el hidróxido de calcio, evaluando la tasa de ganancia de resistencia a compresión de un mortero base cemento portland y sustitución de puzolana al 20% y un mortero elaborado solamente con cemento portland. Esta prueba se elaboró para la CV y CV-100 a las

edades de 7 y 28 días, evaluando los resultados de acuerdo a la norma ASTM C618 [47]. Los especímenes fueron ensayados a compresión con los procedimientos descritos en la norma ASTM C109 [59] .

3.3.1.7 Pérdida por Ignición

La prueba de pérdida por ignición (LOI, por sus siglas en inglés) se realizó solamente a las cenizas volantes (CV y CV-100) para revisar el porcentaje en masa perdida atribuida al contenido de carbón sin quemar, dicha prueba consistió en tomar dos muestras de 10 gramos de material secados a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente las muestras se calentaron en una mufla hasta 750 °C (véase Figura 16) y el porcentaje de pérdida por ignición se calculó de acuerdo a la norma ASTM C311 [58] .



Figura 16. Mufla utilizada para la prueba de pérdida por ignición.

3.3.2 Agregado Fino

3.3.2.1 Densidad

La densidad del agregado fino se determinó en lo establecido en la norma ASTM C128 [60] . Esta medición considera el peso del material por metro cúbico excluyendo los vacíos del agregado, esto se hace por medio de la saturación de los agregados por 24 horas y secándolos superficialmente para obtener su peso SSS y su volumen por medio de un picnómetro.

Para la evaluación de la densidad, se debe tener especial cuidado al igual que en la prueba de absorción, ya que el material puede pasar rápidamente del estado sobre saturado al insaturado y es de especial cuidado ya que la condición de importancia es la saturada superficialmente seca (SSS).

3.3.2.2 Análisis Granulométrico

La distribución granulométrica del agregado fino se realizó mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM C136 [61] . El tamaño de partícula de los agregados se determinó por medio de los tamices de malla de alambre indicados en la norma ASTM C33 [62] , los cuales van desde la malla No.100 (150 μ m) hasta la malla 3/8 (9.5 mm), se determina con el porcentaje de agregado fino que pasa la malla y se grafica para compararlos con los límites inferior y superior indicados en la norma.

3.4 Propiedades en estado fresco

3.4.1 Fluidéz- extensibilidad

La fluidez y la extensibilidad de los morteros fue evaluada por medio de los lineamientos marcados en la norma ASTM C230 [63] , para esta prueba se fijó una extensibilidad objetivo de $20\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$. Para medir la extensibilidad, el mini cono de revenimiento se colocó sobre la mesa de fluidez. Posteriormente se rellenó con mortero en 2 capas con 25 golpes de compactación entre ambas capas, después se levantó el mini cono y se dieron 25 golpes en la mesa en un tiempo de 20 segundos sobre la mesa de fluidez. Por último, se tomó la extensibilidad de la mezcla, como el promedio de 4 mediciones del diámetro del mortero extendido (véase Figura 17)



Figura 17. Medición de extensibilidad en mezcla de mortero

3.4.2 Masa unitaria

La medición de la masa unitaria de los morteros se realizó utilizando un recipiente de bronce de volumen y peso conocido (véase Figura 18). Se llenó el recipiente de mortero y se le dieron 15 golpes laterales con el mazo de goma, después se enrazó y se limpió el exterior del recipiente. Se determinó la masa del recipiente lleno con el mortero y se obtuvo la masa unitaria por medio de la Ecuación 16

$$M.U = \frac{Masa_{recipiente+mortero} - Masa_{recipiente}}{Volumen_{recipiente}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Masa recipiente + mortero: Masa del recipiente lleno con mortero

Masa recipiente: Masa del recipiente vacío

Volumen recipiente: Volumen del recipiente



Figura 18. Llenado del recipiente de volumen y peso conocido para la determinación de la masa unitaria de la mezcla.

3.4.3 Contenido de aire

Se obtuvo mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM C185 [64] , utilizando el mismo recipiente y muestra que la masa unitaria. Se calculó por medio de la ecuación:

$$\text{Cont aire}(\%) = 100 - 1(Wa/Wc) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

Wa: Masa unitaria medida

Wc: Masa unitaria teórica calculada libre de aire

3.5 Propiedades mecánicas

3.5.1 Resistencia a la compresión

Se determinó la resistencia a la compresión usando especímenes cúbicos de 50 mm (véase Figura 19). Para su fabricación, se llenaron los moldes y se compactaron de acuerdo a la norma ASTM C-109 [59] . Posteriormente se protegieron de la pérdida de humedad cubriéndolos con un plástico y se almacenaron en el cuarto de curado. A las 24 horas de curado, los especímenes fueron desmoldados y se depositaron en agua con hidróxido de calcio para evitar la lixiviación de álcalis. La resistencia a la compresión se obtuvo a las edades de 7, 28, 56, 90 y 180 días, utilizando 3 especímenes por cada edad.

El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo en una máquina universal de la marca INSTRON, siguiendo los requerimientos de la norma ASTM C-109 [59] para ensayos de cubos de 50 mm (véase Figura 20)



Figura 19. Cubo de 50 mm para ensayos a compresión de morteros



Figura 20. Ensayo de resistencia a compresión según norma ASTM C-109

3.6 Indicadores de durabilidad

3.6.1 Porosidad abierta al agua

Se determinó midiendo la porosidad total, densidad y absorción mediante el procedimiento de la norma ASTM C 642-06 [65] . El valor de la porosidad del concreto aporta indicaciones sobre la calidad del mismo y puede ser un índice indirecto de su permeabilidad. En este caso, los parámetros fueron obtenidos de igual forma en el laboratorio a partir de la masa seca al horno a 105 °C, masa sumergida de las probetas de 5 x 5 x 15 cm, y masa saturada antes y después de hervir. (Véase Figura 21).



(a)

(b)

(c)

Figura 21. Obtención de la porosidad abierta al agua mediante el procedimiento de la norma ASTM C 642-06. (a) Determinación de masa de probetas. (b) Secado al horno de probetas. (c) Determinación de masa sumergida de probetas.

Los cálculos se efectuaron con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Porosidad total} = \frac{C-A}{C-D} \times 100$$

Ecuación 18

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{B-D}$$

Ecuación 19

$$\text{Absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

Ecuación 20

Dónde:

A = peso seco al horno

B = peso saturado

C = peso saturado, después de hervir

D = peso sumergido

3.6.2 Resistividad Eléctrica Superficial

La resistividad del concreto es una propiedad independiente de la geometría, que describe la resistencia eléctrica, que es la relación entre un voltaje aplicado y su corriente. Resultante multiplicada por una dimensión longitudinal, es usualmente representada en unidades de $k\Omega$ cm.

Se utilizó un medidor de resistividad de cuatro puntos Wenner Resipod de la marca Proceq, con una separación de onda de 38 mm. Para esta prueba se elaboraron 3 cilindros de mortero por cada mezcla, de dimensiones de 10 cm diámetro y 20 cm de altura, los cuales se mantuvieron en el cuarto de curado durante el tiempo de experimentación. La medición se llevó a cabo en diferentes edades (7, 14, 28, 56, 90 y 180 días). Se registró la resistencia medida por edad como el promedio de 8 medidas

(2 mediciones por cada 90° de cilindro), siguiendo los lineamientos de la norma AASHTO TP95 [66]. (Véase Figura 22)



Figura 22. Determinación de la resistividad eléctrica superficial por el método de cuatro puntos

La resistividad eléctrica del concreto puede variar en un grado amplio, de 10^1 a $10^5 \Omega$ m, bajo la influencia del contenido de humedad en el concreto y la composición del mismo. En el concreto, la corriente es transportada por los iones disueltos en la solución de poro.

Para un contenido de humedad constante, la resistividad aumenta con la disminución de la relación agua-cementante, con mayor tiempo de curado y por la adición de materiales reactivos, ceniza volante y humo de sílice. También se presenta un aumento en la resistividad cuando el concreto se seca y cuando se carbonata.

3.6.3 Permeabilidad al aire

Los ensayos de Permeabilidad al aire se llevaron a cabo utilizando el Método Torrent, incluido en la Norma Suiza SIA 262/1-E: 2003 [67]. Se probaron 3 cubos de 15x15x15 cm por cada tipo de mortero a una edad de 28, 90 y 180 días.

Esta prueba se desarrolló cumplidos 60 días de secado al ambiente de laboratorio, con objeto de evitar problemas de resistividad por el contenido de humedad en las probetas.

El equipo de medición de permeabilidad al aire consiste en una celda con doble cámara, basado en el principio de anillo de guarda, el cual consiste en una cámara interna y una externa. Además de un regulador de presión, cuya función es mantener ambas cámaras siempre a la misma presión.

Este método se basa en crear vacío dentro de una celda colocada en la superficie del mortero y medir la velocidad con la que la presión retorna al valor atmosférico. (véase Figura 23).



(a)

(b)

Figura 23. Determinación de la permeabilidad al aire por el método Torrent. (a) Equipo de medición Torrent. (b) Medición de la permeabilidad al aire.

El modelo desarrollado para obtener el coeficiente de permeabilidad al aire, tiene fundamento en la Ley de Hagen-Poiseuille para fluidos compresibles, indicada en la ecuación 21 [68]:

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{l_n \frac{P_a + \Delta P_i}{P_a - \Delta P_i}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

kT = Coeficiente de permeabilidad al aire ($m^2 \times 10^{-16}$);

V_c = Volumen de la cámara interior de vacío (m^3);

A = Área de la sección transversal de la cámara interior de vacío (m^2);

μ = Viscosidad del aire ($2 \times 10^{-5} \text{ N s/m}^2$);

ε = Porosidad estimada de la superficie de concreto (asumida = 0.15)

P_a = Presión atmosférica (N/m²)

Δp_i = Presión alcanzada en la cámara interior de vacío en el t_f (N/m²)

t_f = Tiempo final de la prueba (s);

t_0 = Tiempo de inicio de la prueba (60 s).

La profundidad que se ve afectada por el ensayo (típicamente entre 10 a 70 mm), la cual aumenta con el valor de kT , también es indicada por el instrumento.

La permeabilidad al aire es muy sensible a la microestructura del recubrimiento, y el método permite detectar hasta 6 órdenes de magnitud (0.001×10^{-16} hasta 100×10^{-16} m²).

La Tabla 6 [68] muestra la clasificación de la permeabilidad del concreto basada en mediciones de kT realizadas entre los 28 a 180 días.

Tabla 6. Clase de permeabilidad del concreto.

Clase	kT (10⁻¹⁶ m²)	Permeabilidad
PK1	< 0.01	Muy Baja
PK2	0.01 – 0.10	Baja
PK3	0.10 – 1.0	Moderada
PK4	1.0 – 10	Alta
PK5	> 10	Muy alta

3.6.4 Profundidad de carbonatación

El ensayo de carbonatación acelerada mediante el uso de la cámara de carbonatación (véase Figura 24) es una herramienta importante que permite aproximar en periodos cortos las condiciones del avance de la carbonatación del concreto originados por el CO₂, cuya medición ensayos naturales abarcaría tiempos mayores.

Para definir la concentración de CO₂ en la cámara, se decidió con base a que la mayor velocidad de carbonatación se alcanza en concentraciones entre el 10% y 20% [17] [69].

Para realizar esta prueba se utilizaron especímenes prismáticos de cada mezcla de mortero de 50 x 50 x 250 mm, después de ser elaborados, se pusieron en el cuarto de curado por 28 días y después un periodo de 28 días en condiciones de laboratorio para después ser ingresados a la cámara de carbonatación acelerada bajo las siguientes condiciones:

Temperatura: 30° C ± 1° C

Humedad relativa: 65% ± 10%

Concentración de CO₂: 20%



Figura 24. Cámara de carbonatación utilizada en la experimentación.

Las mediciones de profundidad de carbonatación se realizaron cada 6 días hasta que se carbonataron por completo las últimas muestras de morteros (120 días). En cada edad se seccionó el prisma a 25 mm de longitud, realizando el corte con ayuda de un mazo y un cincel. Después se limpió la superficie para eliminar el polvo y se roció con un indicador al 1% de fenolftaleína. Por último, se registró la profundidad de carbonatación como el promedio de las lecturas tomadas en cada cara de la sección cortada. El resto del espécimen se colocó dentro de la cámara de carbonatación para mediciones posteriores. (véase Figura 25).



Figura 25. Sección de mortero utilizada en mediciones de profundidad de carbonatación

3.6.5 Potencial y velocidad de corrosión

Las mezclas elaboradas fueron evaluadas para ver su capacidad de protección al acero de refuerzo en contra de la corrosión. Para ello se elaboraron especímenes prismáticos de 8 cm x 5 cm x 2 mm, en donde se embebieron 2 tramos de 10 cm de longitud de varilla de acero al carbón con diámetro de 6 mm (1/4 in), midiendo el potencial y la velocidad de corrosión de dicho acero embebido en los morteros (véase Figura 26) . Después de ser elaborados y desmoldados los especímenes, se dejaron durante 28 días en el cuarto de curado en una solución de agua con hidróxido de calcio y se dejaron durante 28 días en condiciones de laboratorio para posteriormente ser introducidos en la cámara de carbonatación a una concentración de 20% de CO₂ por 180 días.

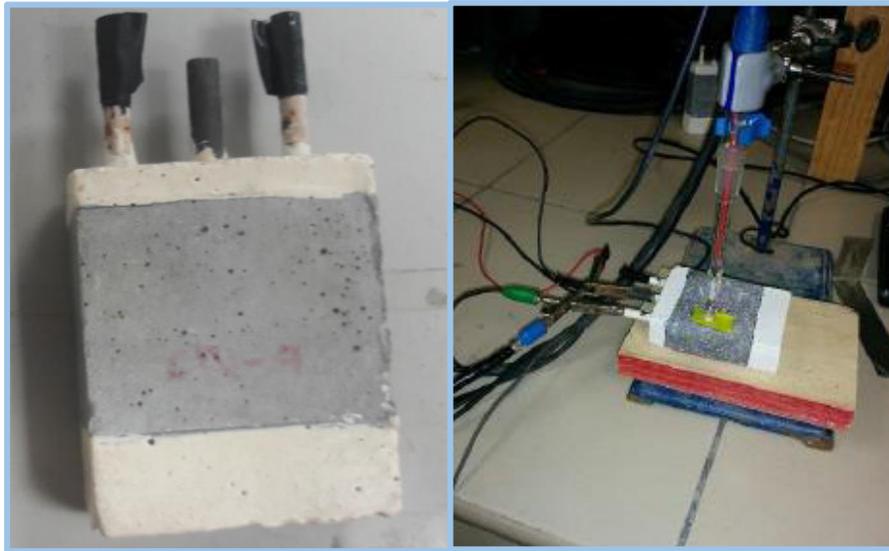


Figura 26. Probeta y método utilizado para medición de E_{corr} e I_{corr}

El potencial (E_{corr}) y velocidad (I_{corr}) de corrosión se realizaron empleando la técnica no destructiva de la resistencia a la polarización (R_p), en la que por medio de un potenciostato se aplica un potencial al acero, y por medio de su resistencia a cambiar su potencial de equilibrio, se determina un potencial y una velocidad de corrosión producido en el acero.

El potencial de corrosión brinda una información cualitativa de la probabilidad de que el acero esté sufriendo corrosión [70] (véase Tabla 7).

Tabla 7. Criterios para evaluar E_{corr} en el acero embebido en concreto

E_{corr} vs Electrodo de Calomel (mV)	Probabilidad de Corrosión
> -80	10% a que se presente
-80 a -230	Zona incierta
< -230	90% a que se presente
< -380	Corrosión severa

Mientras la velocidad de corrosión muestra de forma real la velocidad en que los procesos de corrosión se están dando en el acero por medio de la corriente generada en el mismo. (véase Tabla 8).

Tabla 8. Nivel de corrosión según I_{corr}

I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Bajo
0.5 a 1.0	Moderado
>1.0	Alto

Las mediciones de E_{corr} e I_{corr} , se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C876 [71], y se utilizó un equipo de potenciostato Interface1000 de Gamry, utilizando un electrodo de referencia de calomel.

CAPITULO 4: Análisis y discusión de resultados

4.1.1 Cementantes

4.1.1.1 Densidad

La densidad de los materiales cementantes es presentada en la Tabla 9, la cual se realizó de 2 formas: por medio del frasco de Le Chatelier de acuerdo al procedimiento ASTM C-188 [57] , y utilizando el picnómetro, presentando ambos análisis resultados con poca variabilidad en la densidad de materiales.

Tabla 9. Densidad de los materiales cementantes.

Material	Densidad (gr/cm ³)	
	Le Chatelier	Picnómetro
CPO	3.1	3.07
CV	2.0	2.02
CV-100	2.1	2.06

De acuerdo con los análisis presentados en la tabla anterior, la ceniza volante cribada por la malla #100 (CV-100) es ligeramente más densa que la ceniza antes de ser cribada (CV), y el cemento portland posee una densidad mayor a la que contienen ambas cenizas.

Los resultados se deben a que a menor tamaño de partícula en estos polvos cementantes se tiene una mayor área superficial ya que se retuvieron partículas de carbón de menor densidad que el cuarzo y mulita resultando una densidad mayor, lo

cual según investigaciones previas [14], repercute directamente en una mayor reactividad puzolánica.

4.1.1.2 Distribución de Tamaño de Partícula (DTP)

La Figura 27 presenta un claro refinamiento en toda la distribución del tamaño de las partículas de la ceniza volante cribada por la malla #100 (CV-100), comparada con la ceniza volante antes de ser cribada (CV). Antes de ser cribada la ceniza, aproximadamente 25% tiene un tamaño superior a 150 μm , mientras que al ser cribada por la malla #100, solamente el 4% supera 150 μm . Sin embargo, la CV-100, siguió teniendo un tamaño de partícula superior al del cemento portland.

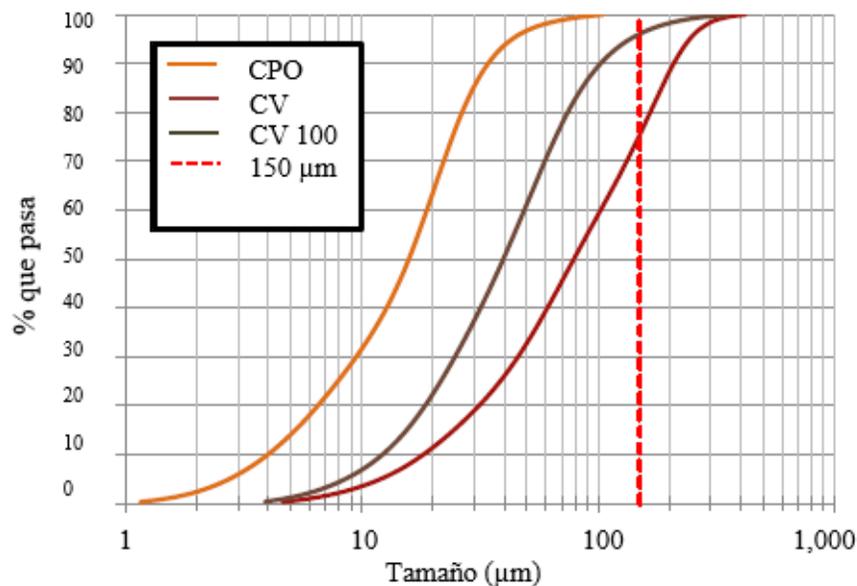


Figura 27. Distribución de tamaño de partícula de los materiales utilizados.

Los resultados de la distribución de tamaño de partícula de las cenizas volantes se complementaron con micrográficas de SEM (Figura 28 y Figura 29) para corroborar el

diámetro y forma promedio de estos dos tipos de ceniza, mostrando que en la ceniza sin cribar (CV), presentan diámetros en rangos superiores a 150 μm e incluso 200 μm , contrastando con la micrografía de la ceniza cribada por la malla #100 (CV-100), en donde los diámetros promedios no pasan de los 100 μm .

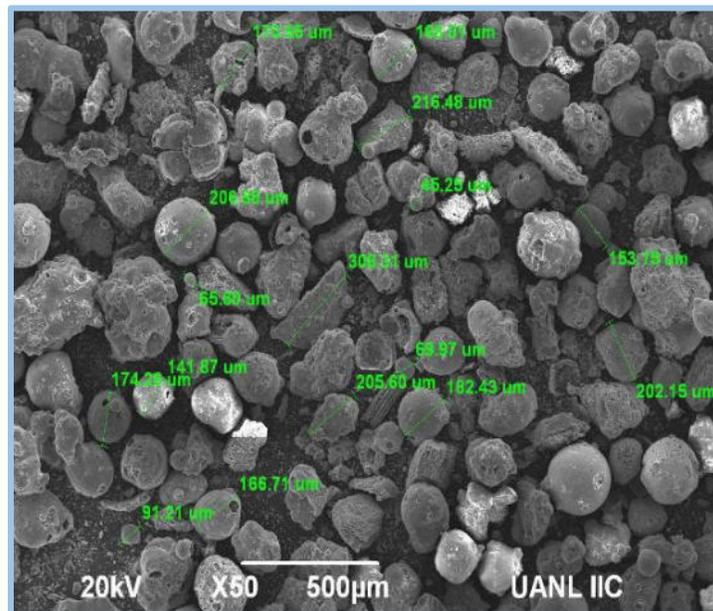


Figura 28. Micrografía de la morfología y diámetro de las partículas de CV

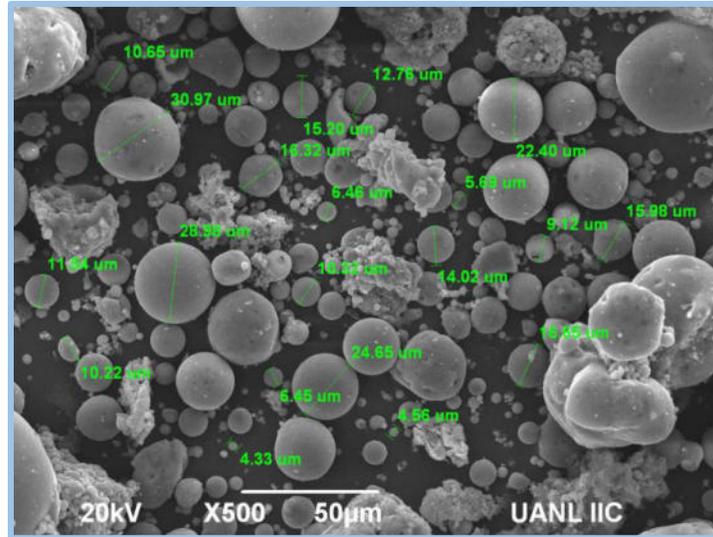


Figura 29. Micrografía de la morfología y diámetro de las partículas de CV-100

En el caso de las cenizas volantes con contenido normal de carbono y silicio, después del contenido de calcio, la distribución del tamaño de partícula es el parámetro más importante que rige la reactividad de una ceniza volante. Para las cenizas de contenido bajo de calcio, se encontró que la reactividad era directamente proporcional a la cantidad de partículas de un tamaño de $<10 \mu\text{m}$, e inversamente proporcional a las partículas de tamaño $> 45 \mu\text{m}$ [72].

El cribado por la malla #100, ayudo a reducir el tamaño de partículas en la ceniza volante, siendo un parámetro importante al incrementar la reactividad puzolánica de este material. Sin embargo, el cemento continuó teniendo un tamaño de partícula menor comparado con las cenizas.

4.1.1.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

En la Tabla 10 se muestra la composición química de los cementantes: cemento portland (CPO), ceniza volante antes de cribar (CV) y ceniza volante cribada por la malla #100 (CV-100). En el caso de las cenizas, la suma de óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) es mayor a 70%, lo cual es mayor a lo especificado en la norma ASTM C618 [47] y se clasifica a la ceniza como clase F.

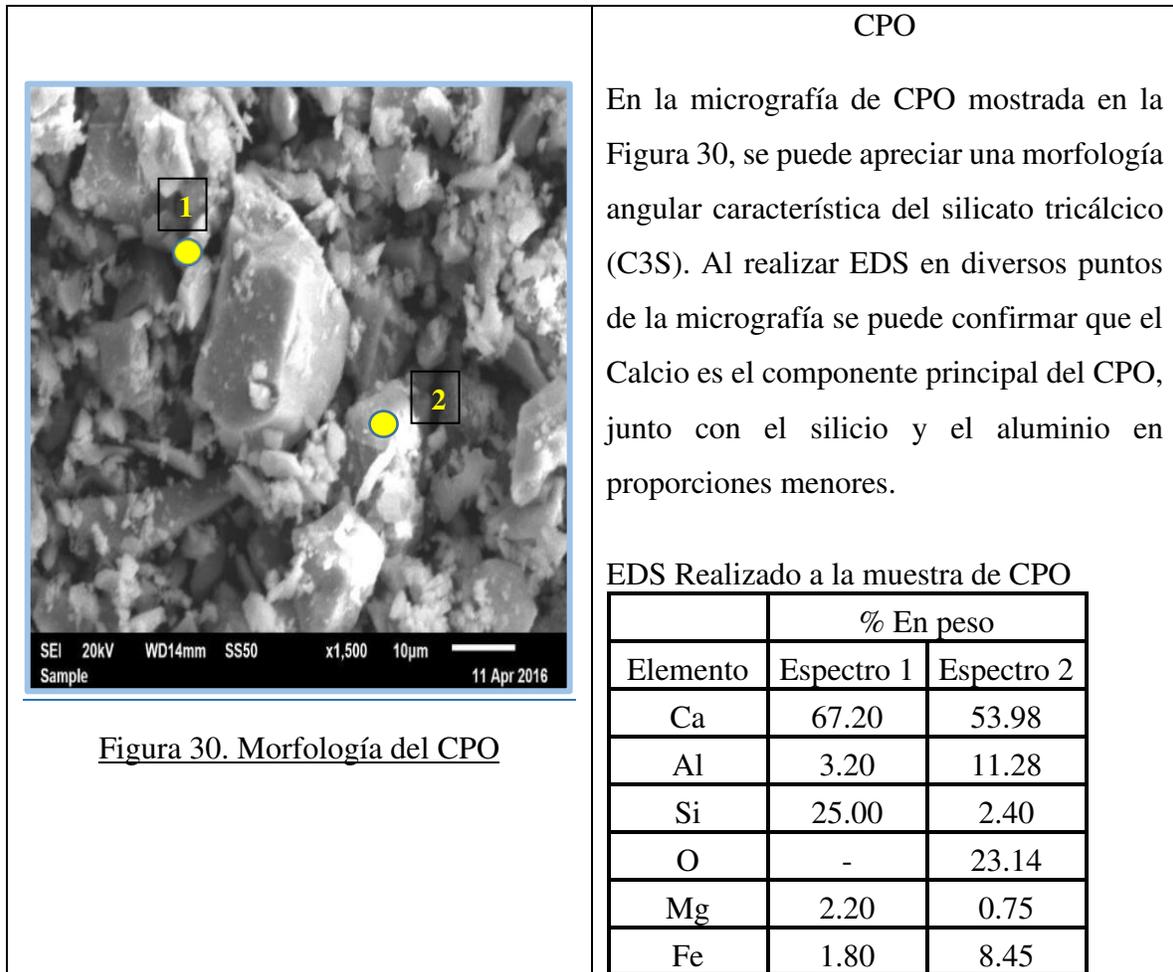
Tabla 10. Composición química de los materiales cementantes

Compuesto (%)	CPO	CV	CV-100
SiO_2 (%)	17.66	69.382	69.719
Al_2O_3 (%)	4.72	19.57	19.636
Fe_2O_3 (%)	2.26	4.948	4.728
CaO (%)	63.68	1.226	1.774
MgO (%)	1.2	0.582	0.588
SO_3 (%)	5.12	0.551	0.534
Na_2O (%)	0.66	0.219	0.225
K_2O (%)	0.74	1.553	1.486
TiO_2 (%)	0.24	1.068	1.027
P_2O_5 (%)	0.09	-	-
MnO (%)	0.08	-	-
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	93.9	94.083

Con excepción del contenido de calcio, las variaciones en los demás constituyentes químicos de cenizas volantes parecía no tener ningún efecto sobre su reactividad [72]. Siendo ligeramente superior el contenido de calcio en la CV-100, pudiendo formar mayores productos de hidratación en la matriz cementante.

4.1.1.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

En las siguientes figuras se muestran las micrografías correspondientes al CPO y a las cenizas volantes utilizadas (CV y CV-100) respectivamente:



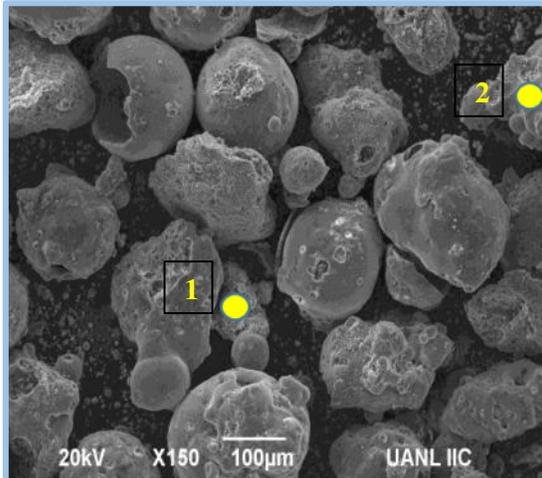


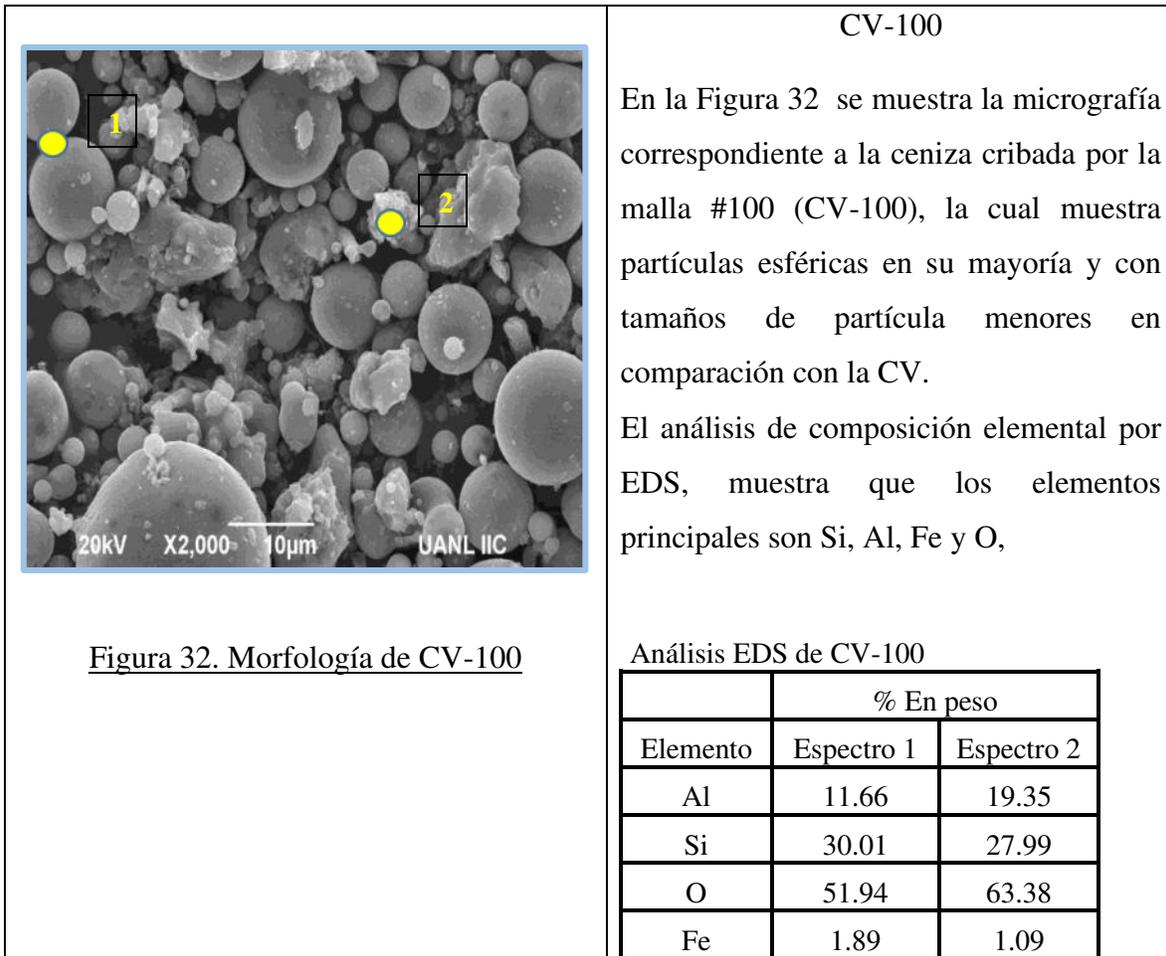
Figura 31. Morfología de CV

CV

La morfología de la ceniza volante sin cribar (CV) es mostrada en la Figura 31, donde se pueden apreciar algunas partículas de forma esférica de diámetros aproximados a las 100 µm, sin embargo también se logran identificar partículas amorfas de alta porosidad las cuales correspondieron a carbón sin quemar, las cuales fueron corroborados por análisis de EDS.

EDS Realizado a la muestra de CV

Elemento	% En peso	
	Espectro 1	Espectro 2
C	79.44	83.33
Al	1.91	0.87
Si	3.07	3.62
O	15.58	11.81
S	-	0.37



4.1.1.5 Difracción de Rayos X (DRX)

Las fases minerales del cemento obtenidas a través de la Difracción de Rayos X (DRX) se pueden apreciar en la Figura 33, en la cual se identifica claramente la presencia del silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) y el yeso en 2 de sus fases: hemihidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$) y anhidrita ($CaSO_4$).

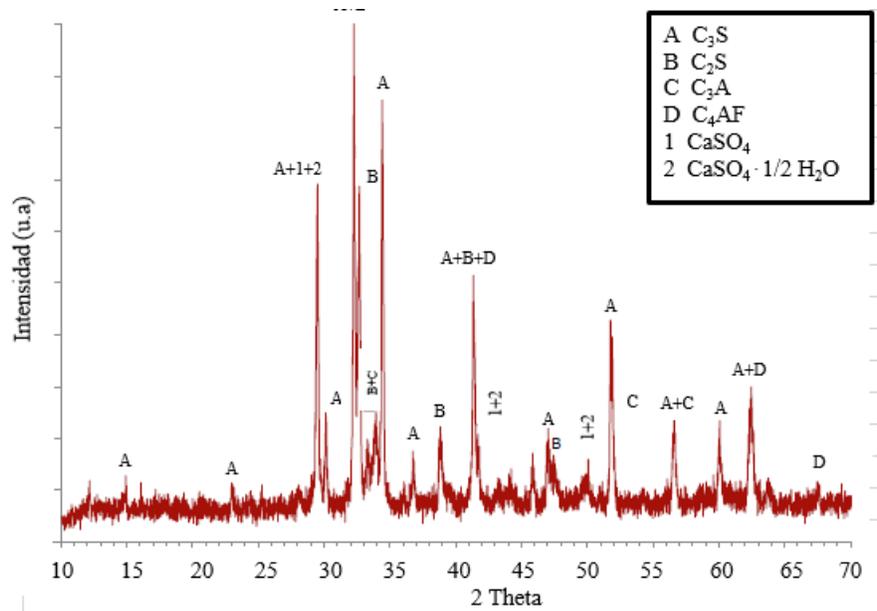


Figura 33. Difractograma del CPO

La Figura 34 muestra las fases minerales de la ceniza volante antes (CV) y después de ser cribada (CV-100). Se puede observar el halo más prominente 2θ en la ceniza CV-100, con que se puede asumir que parte del material removido en el proceso de cribado (partículas mayores a $150\ \mu\text{m}$), estaba formado por partículas cristalinas.

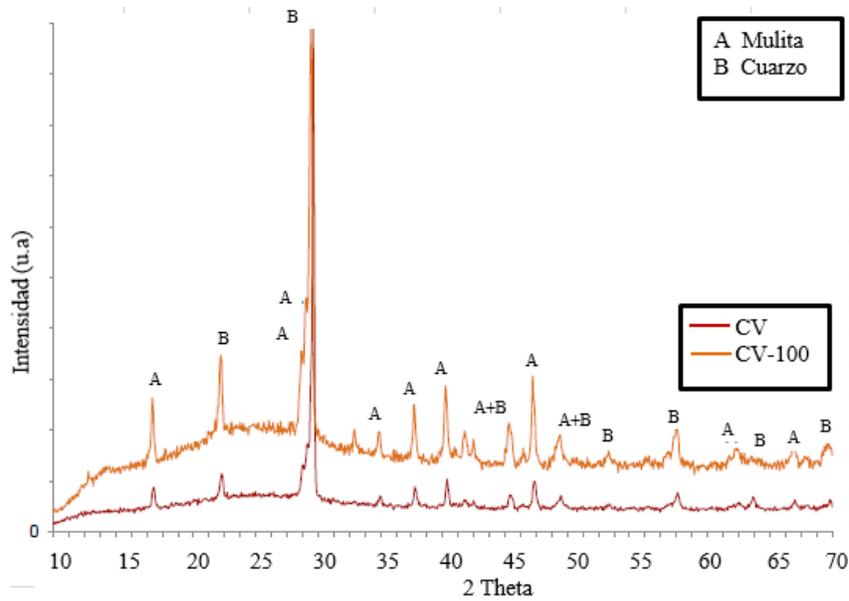


Figura 34. Difractograma de CV y CV-100

Trabajos de investigación previos [73], señalan que la mayoría de la ceniza volante contiene cuarzo (sílice cristalina) en proporciones que oscilan entre 2% y 25%. El cuarzo se encuentra en el carbón y también señala que aproximadamente la mitad de cantidad de SiO_2 podría ser cuarzo.

También el aluminosilicato en forma de cristal (mulita) existe en la mayoría de las cenizas volantes, principalmente en la de bajo contenido de calcio. La mulita es la principal fase contenedora de Al_2O_3 y se genera a partir de la cristalización del carbón fundido al enfriarse en el horno. Aproximadamente la tercera parte de Al_2O_3 podría pertenecer a la mulita, la cual es una fase no reactiva.

Se confirma en base al análisis de FRX y DRX, la presencia de SiO₂ y Al₂O₃ en ambas fases cristalinas de las cenizas volantes, con lo cual se puede asumir una reactividad de las mismas. Al hacer la comparativa entre ambas cenizas, se puede detectar menor cantidad de material cristalino en la ceniza CV-100, el cual fue removido durante el proceso de cribado en las partículas mayores a 150 µm.

4.1.1.6 Índice de actividad a la Resistencia (IR)

De acuerdo a la normativa ASTM C 618 [47], el Índice mínimo de reactividad de la ceniza es de 75%, sin embargo la ceniza volante sin cribar (CV), no cumple con este porcentaje, mientras la ceniza volante cribada por la malla #100 (CV-100), cumple ligeramente a los 7 días e incrementa a los 28 días. (véase Tabla 11).

Tabla 11. Índice de Actividad a la Resistencia de los morteros

Mezcla	Resistencia a compresión		Índice de Resistencia (IR)	
	7 días (MPa)	28 días (MPa)	7 días (%)	28 días (%)
MREF	42.63	45.51	100	100
M2	30.24	32.37	71	71
M2-100	32.39	35.56	76	78

El mejor desarrollo de resistencia de la CV-100 se podría atribuir además de la finura debido al tamizado, al menor contenido de carbón sin quemar, el cual presenta zonas de mayor porosidad en la pasta y al tener mayor carbón también se reduce su

resistencia mecánica [45]. También el tamaño de partícula más pequeño de ceniza volante tamizada, con un área superficie más alta y el contenido de fase vítrea, también mejoran la reacción puzolánica [14]. Resultados que coinciden con el difractograma de la figura 32, donde la presencia de material amorfo es mayor en la ceniza CV-100 resultando en un incremento del índice de resistencia (IR).

Al cribar la ceniza volante por la malla #100 se obtuvo una mejora en la resistencia a compresión, ligeramente mayor al 75% (mínimo requerido por la norma), con lo cual se dio un beneficio en la ganancia de resistencia, gracias a la reducción en el tamaño de partícula y la remoción de partículas de carbón sin quemar.

4.1.1.7 Pérdida por Ignición

Normalmente la pérdida por ignición estima la cantidad de carbón sin quemar presente en la ceniza volante. En la Tabla 12 se muestra que la ceniza volante antes de ser cribada (CV) tuvo una pérdida por ignición de 4.80%, mientras la ceniza volante cribada por la malla #100 tuvo una pérdida de 3.10%, por lo cual el cribado por la malla #100 redujo en aproximadamente 35% la pérdida por ignición.

Tabla 12. Perdida por ignición de la ceniza volante

Material	Masa pérdida a 750°C (gr) A	Masa de material seco (gr) B	LOI%= (A/B) X100
CV	0.48	10.0	4.80%
CV 100	0.31	10.0	3.10%

Al tener mayor pérdida de materia orgánica la muestra de CV, se atribuye que contiene mayor cantidad de carbono, por lo tanto, puede tener menor resistencia a la compresión y una mayor porosidad debido al mayor tamaño de partícula del carbón sin quemar.

4.1.2 Agregado Fino

4.1.2.1 Densidad

La densidad y absorción del agregado fino utilizado en los morteros, se presenta a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13. Densidad y absorción del agregado fino

Material	Densidad (gr/cm ³)	Absorción (%)
Agregado Fino	2.64	2.0

4.1.2.2 Análisis Granulométrico

Los análisis de granulometría realizados al agregado fino se indican en la Tabla 14 y se comparan con los límites inferior y superior indicados en la norma ASTM C33 [62] (véase Figura 35).

Tabla 14. Análisis granulométrico del agregado fino.

Malla	Tamaño (μm)	% pasa
3/8"	9500	100
# 4	4750	100
# 8	2360	91
# 16	1180	63
# 30	600	40
# 50	300	25
# 100	150	15
# 200	75	11
Pasa #200	<75	0
Módulo de Finura	2.66	

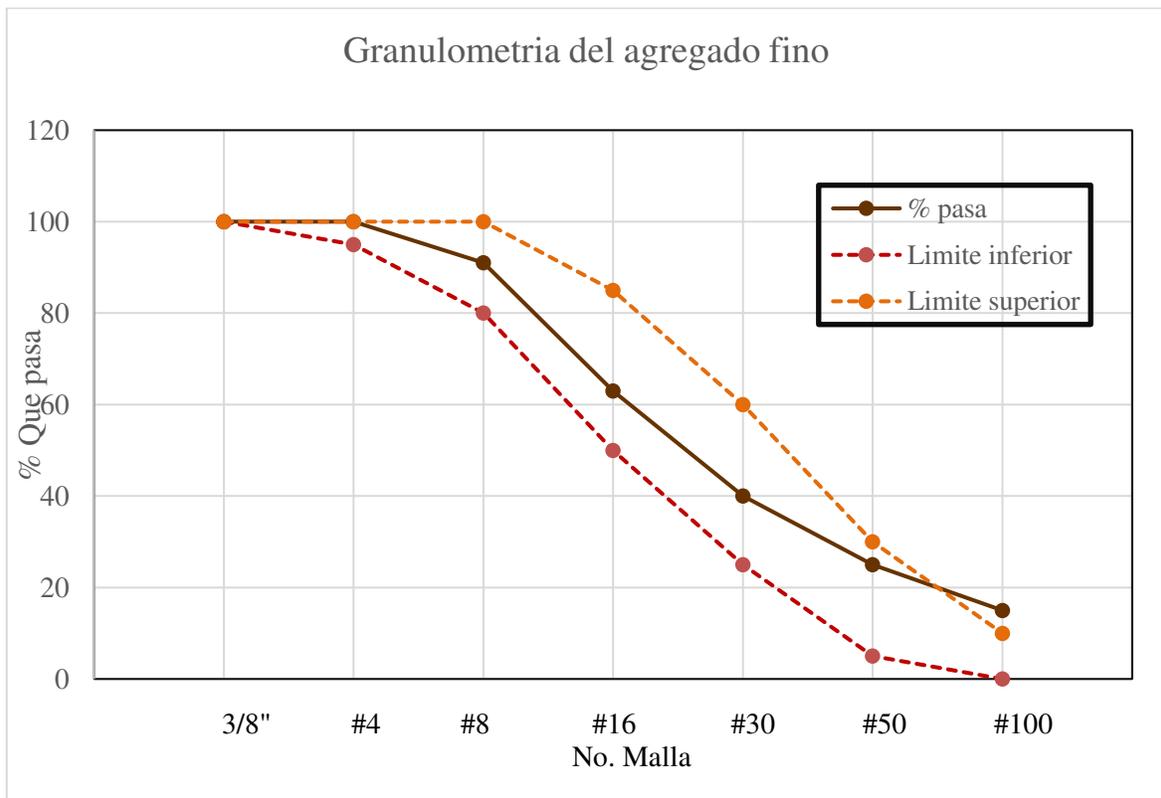


Figura 35. Granulometría del agregado fino

4.2 Propiedades en estado fresco

4.2.1 Fluidez- extensibilidad

Para todas las mezclas de mortero se indicó una fluidez objetivo de 20 cm \pm 1 cm, correspondiente a la mezcla de referencia, para lograr esa extensibilidad en las otras mezclas, sin alterar la relación agua /material cementante. (Véase Tabla 15).

Tabla 15. Fluidez de las mezclas de mortero

	MREF	M1	M1-100	M2	M2-100	M3	M3-100
Fluidez(cm) (20 cm \pm 1 cm)	20.40	20.75	20.70	20.80	20.80	20.60	20.65

Las mezclas con ceniza volante (CV y CV-100) en porcentajes de 10% y 20% de sustitución condujeron a una mayor fluidez respecto a la mezcla de referencia, esto se puede atribuir a que las partículas redondeadas de la ceniza volante reducen la fricción interna del mortero, causando que fluyan con mayor velocidad, ya que al sustituir porcentajes de menos de 30-35% cemento Portland por la ceniza volante ocurre este efecto [74].

Sin embargo, las mezclas M3 y M3-100 ambas con 50% de sustitución de ceniza volante, condujeron a una menor fluidez respecto a las otras series de mezclas, lo cual puede ser causado debido a que sustituciones significantes (>35%) de ceniza volantes, pueden propiciar a incrementos en la estabilidad y cohesividad de la mezcla, causando una menor fluidez y trabajabilidad.

Por otro lado, la adsorción de la ceniza volante también puede estar contribuyendo ya que al aumentar la dosificación de esta puzolana, la demanda de agua puede aumentar y la trabajabilidad disminuir [75].

4.2.2 Masa unitaria

Las masas unitarias (teórica y medida), disminuyeron conforme se sustituyó cemento por ceniza volante, siendo esperado este resultado, debido a la diferencia de densidades de los materiales. (véase Tabla 16).

Tabla 16. Masa unitaria de las mezclas de mortero

	MREF	M1	M1-100	M2	M2-100	M3	M3-100
Masa unitaria (kg/m ³)	2080	1952	1985	1911	1938	1888	1900

La masa unitaria tuvo un ligero aumento en las mezclas que contenían ceniza volante cribada con la malla #100 (CV-100), en comparación de las que tenían ceniza volante sin cribar (CV), lo cual se debe, de igual manera, a una mayor densidad en la ceniza CV-100, debido a que, al disminuir el tamaño de partículas de CV, se logra un mejor acomodo en la matriz cementante.

4.2.3 Contenido de aire

Se observó que la sustitución de cemento portland por ceniza volante (CV y CV-100) condujo a un aumento en el contenido de aire, y a mayor porcentaje de sustitución, fue mayor la cantidad de aire. (véase Tabla 17).

Tabla 17. Contenido de aire de las mezclas de mortero

	MREF	M1	M1-100	M2	M2-100	M3	M3-100
Contenido de aire (%)	3.00	5.20	4.50	6.10	5.50	7.80	7.20

Sin embargo, el contenido de aire disminuyó en las mezclas que contenían ceniza volante cribada con la malla #100 (CV-100), en comparación de las que tenían ceniza volante sin cribar (CV). Esto puede ser causado a un mejor empaquetamiento entre las partículas debido al menor tamaño de partícula de la ceniza, reduciendo la porosidad intersticial y pudiendo tener un mayor efecto de relleno o filler.

A los altos porcentajes de aire contenidos en las mezclas de las series M3, pudiera ser atribuido su mal desempeño en las propiedades mecánicas.

4. 3 Propiedades mecánicas

4. 3.1 Resistencia a la compresión

La Figura 36 muestra la resistencia a la compresión de las diferentes series de mortero. Donde la mezcla de referencia presenta mayores resistencias a edades tempranas, sin embargo, a edades posteriores la reacción puzolánica de la ceniza ocasiona ganancias de resistencia y a los 180 días la mezcla M1-100 con 10% de ceniza cribada es mayor a la de referencia.

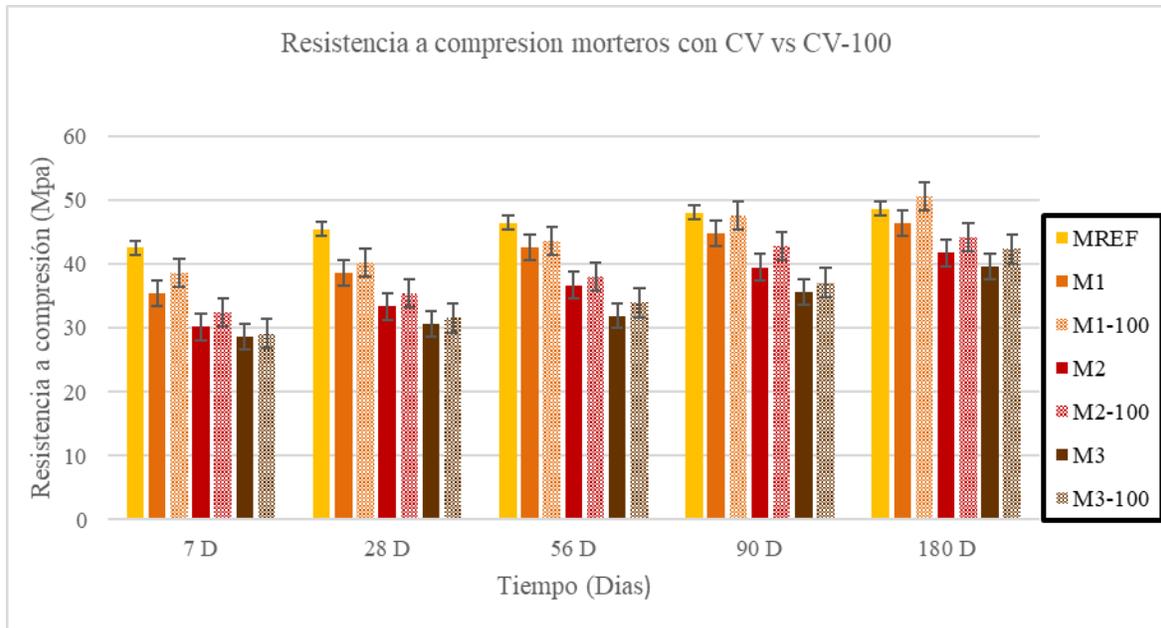


Figura 36. Resistencia a compresión

Cuando la ceniza volante se tamizó, la ganancia de resistencia a la compresión fue mejorada (en promedio 8%), coincidiendo con otros estudios reportados [14]. Este fue el resultado del efecto de empaquetamiento de la ceniza. Las pequeñas partículas esféricas de cenizas volantes reducen los vacíos o espacios aéreos y el aumento de la densidad en la matriz cementante, lo cual se traduce en una ganancia de resistencia a un mediano y largo plazo (90 y 180 días).

El mejor desempeño de resistencia a la compresión se obtuvo en la mezcla con 10% de sustitución con ceniza cribada (M1-100), la cual a la edad de 180 días dio una resistencia de 50.67 MPa, siendo mayor que la mezcla de referencia con resistencia a la compresión 48.75 MPa, esta tendencia se indica en la literatura [15] como un efecto puzolánico de la ceniza volante, el cual se da a largo plazo dicha reacción.

4.3 Indicadores de durabilidad

4.4.1 Porosidad abierta al agua

La Figura 37 presenta la porosidad abierta al agua a las diferentes edades (7, 28, 56, 90 y 180 días). Los resultados mostraron que la incorporación de cenizas volantes aumentó la porosidad total en las edades tempranas, sin embargo, a edades posteriores hubo una reducción en la porosidad en las mezclas M1 y M1-100 en comparación a la MREF, debido a la formación de productos de hidratación y al efecto filler de la ceniza.

La porosidad total de todos los morteros que contienen ceniza volante cribada por la malla #100 fue menor que el de la ceniza volante sin cribar, debido principalmente al tamaño de partículas de la ceniza cribada por la malla #100.

Se puede deducir también que existe correlación entre los resultados de la resistencia a la compresión y la porosidad, debido a que, en todas las mezclas de morteros, cuando la resistencia a la compresión aumentó, la porosidad abierta al agua disminuyó. Esto puede ser debido a la densificación de la matriz cementante resultado de la formación de productos de hidratación y al empaquetamiento de las adiciones de ceniza [14].

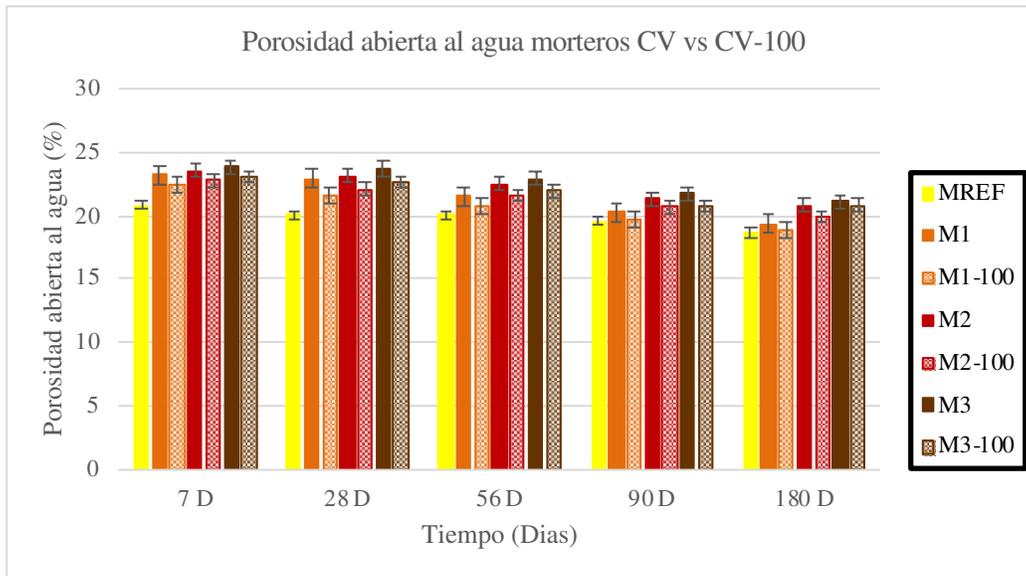


Figura 37. Porosidad abierta al agua.

4.4.2 Resistividad Eléctrica Superficial

En la Figura 38 se puede observar que la resistividad medida en los especímenes cilíndricos aumenta al incrementar la sustitución de cemento portland por ceniza volante. En estudios previos se ha observado la misma tendencia [22] [76] y ésta ha sido atribuida a que la resistividad eléctrica es una medida indirecta no solo de la porosidad, sino también de la difusividad, ya que el flujo de corriente eléctrica que pasa a través de la pasta hidratada de cemento es un proceso electrolítico; es decir, se debe principalmente al flujo de iones que pasan a través de la solución de poros (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}). El reemplazo del cemento por ceniza volante causa una disminución en la concentración de iones álcalis, lo cual ocasiona una menor conductividad eléctrica y por lo tanto, una mayor resistividad eléctrica.

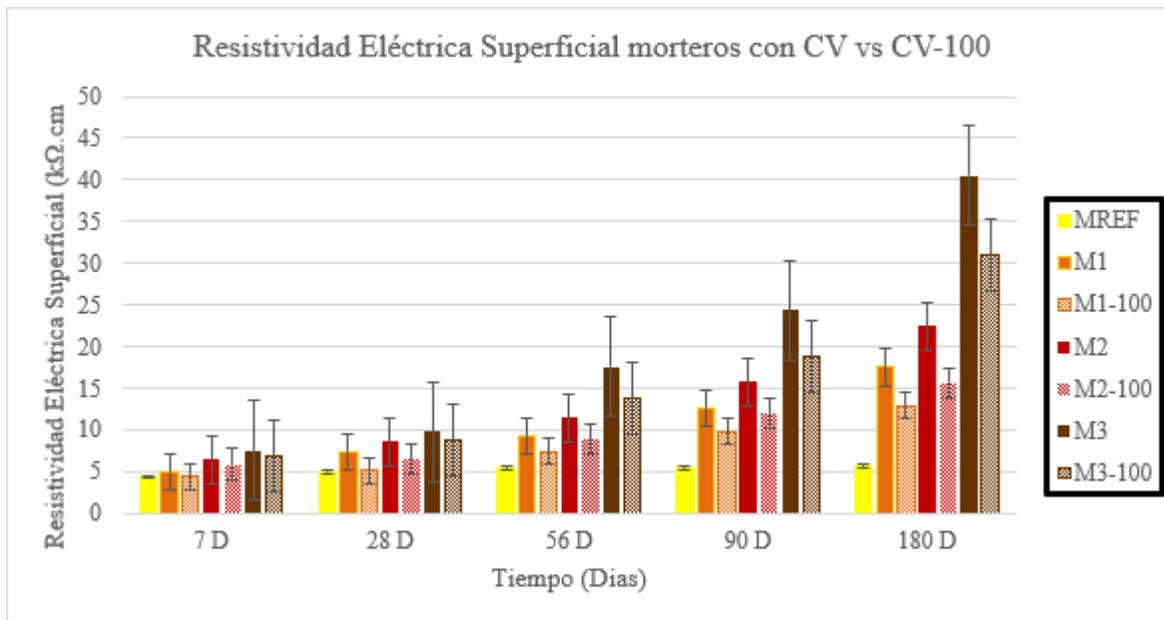


Figura 38. Resistividad Eléctrica Superficial

En la Figura 39 se presenta la correlación entre resistividad y resistencia a compresión, donde las mayores resistencias se relacionan con matrices cementantes más densificadas y con mayor cantidad de productos de hidratación del cemento y de las puzolanas, en donde la cantidad de álcalis presentes en las mismas representa un buen indicador del flujo de iones a través de los poros, teniendo una mayor resistividad las mezclas con una mayor cantidad de ceniza (M3 y M3-100) debido a que presentan menor cantidad de álcalis en la solución de poro, siendo también las que presentan los menores valores de resistencias a compresión y viceversa, la mezcla de referencia y las mezclas con 10% de sustitución de ceniza volante al tener mayor concentración de álcalis y un mejor empaquetamiento tuvieron una mayor resistencia a la compresión y una mejor conductividad eléctrica, lo que se refleja en una baja resistividad.

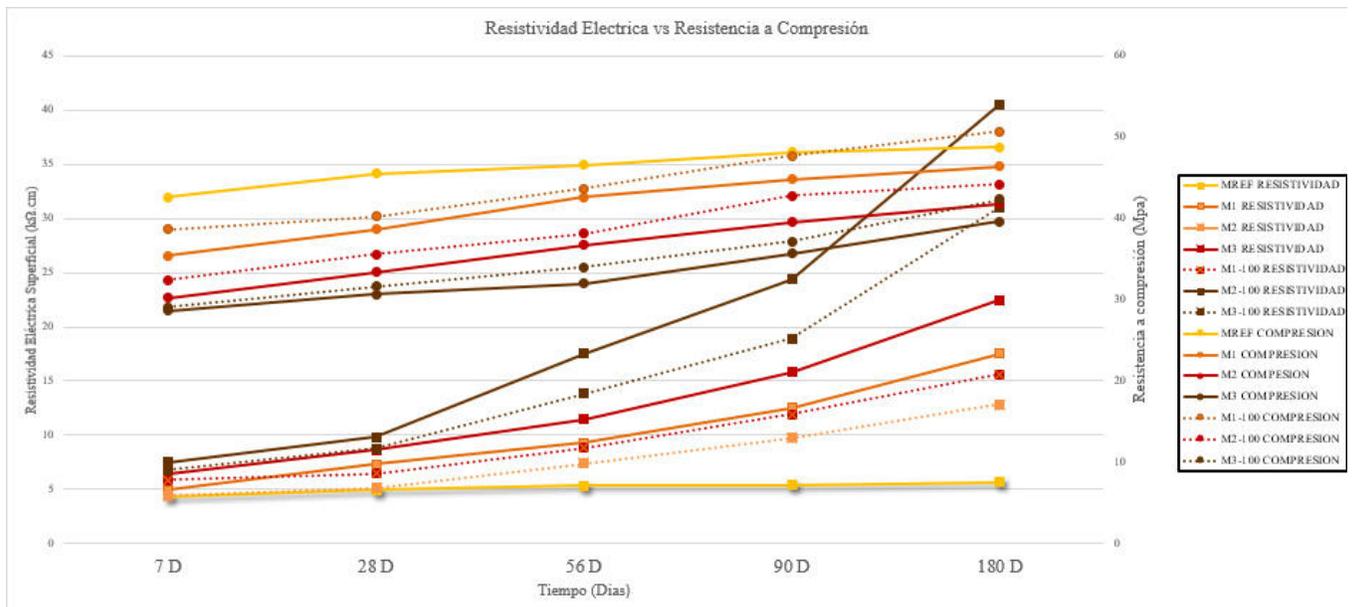


Figura 39. Resistividad Eléctrica Superficial vs Resistencia a compresión

Si bien, en la resistencia a la compresión las mezclas con 50% de sustitución de ceniza volante son las que presentan los valores menores durante el tiempo evaluado, al pasar a edades mayores va incrementando también su resistencia, asumiendo que existe parte reactiva de la ceniza volante, independientemente de tener una matriz cementante con menor cantidad de iones conductivos en la solución de poro, lo cual resultó en mayores valores de resistividad.

4.4.3 Permeabilidad al aire

La Figura 40 muestra los coeficientes de permeabilidad de Torrent, donde las mezclas con un coeficiente k_T mayor a 1 se considera una mezcla de pobre calidad para la permeabilidad de iones, siendo mayores a 1 las mezclas con 50% de ceniza volante en todas las edades, atribuida principalmente a una mayor porosidad en esta

mezcla. En edades posteriores a 90 días, las mezclas con las sustituciones de 10% y 20% logran ser de moderada calidad, debido a una mayor densificación de la matriz al paso del tiempo, resultado de un mejor acomodo de las partículas, al igual que la mezcla MREF en todas las edades, debido al menor tamaño de partícula del cemento con relación a la ceniza y a que en edades posteriores a 28 días ya se efectuó la reacción puzolánica en el cemento portland.

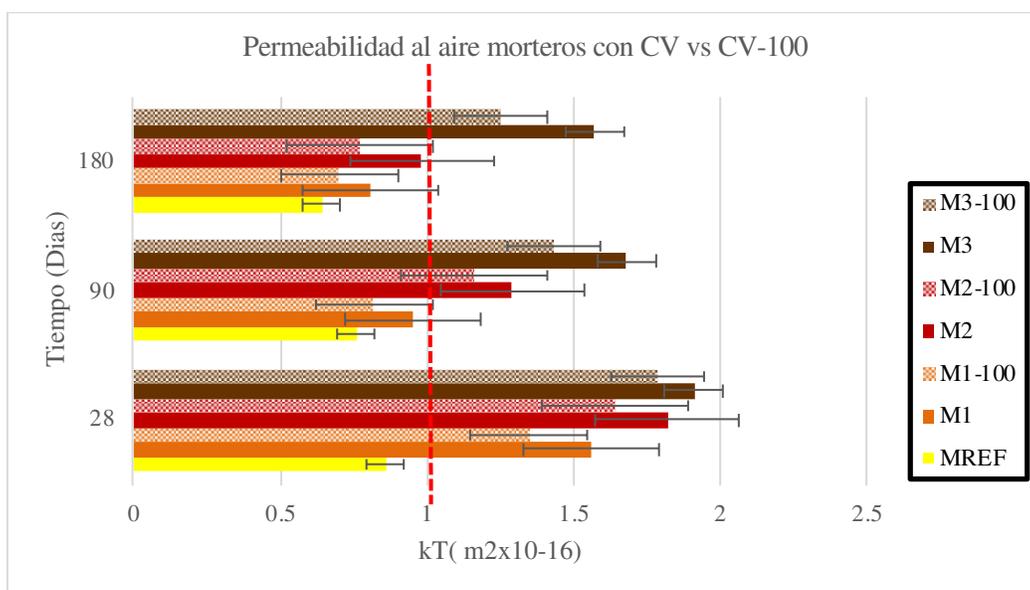


Figura 40. Permeabilidad al aire.

Al ser mezclas con relación agua/material cementante de 0.5, se esperan mezclas de una permeabilidad regular, las mezclas MREF y las series con 10% y 20% de sustitución de ceniza volante logran cumplir con la normativa <1 , de acuerdo con la exposición ambiental, para carbonatación se requieren cumplir estos valores (entre .5 y 1), dando a largo plazo buena respuesta ante la exposición ambiental al dióxido de carbono.

4.4.4 Profundidad de carbonatación.

En la Figura 41 se muestran los resultados de las lecturas de la profundidad de carbonatación de los morteros con ceniza volante sin cribar y cribada por la malla 100 , donde la mezcla de referencia presentó las tasas más lentas de carbonatación en comparación a los morteros con ceniza volante, lo cual se puede deber a la mayor concentración de calcio, ya que la formación de hidróxido de calcio da lugar a un efecto de amortiguamiento (“buffering effect”) al retrasar la entrada del CO_2 [41].

También se observó un aumento en la profundidad de carbonatación al aumentar el nivel de sustitución de cemento Portland por ceniza volante, esto es consistente con estudios realizados previamente[14] [31] [77]. El aumento en la carbonatación se debe a que la reacción puzolánica de la ceniza volante causa una reducción en el contenido de hidróxido de calcio y esto incrementa la velocidad de carbonatación al propiciar la formación de carbonatos y la disminución del pH de la matriz cementante.

Por otro lado, la ceniza volante tamizada por la malla #100 presentó una ligera reducción en la profundidad de carbonatación, esta ligera reducción se puede atribuir a una menor cantidad de carbón, debido a un menor porcentaje presente en la ceniza cribada.

Los resultados de las pruebas demostraron que el mortero con una proporción de reemplazo mayor (M3 y M3-100) fue carbonatado más que los reemplazos menores de ceniza volante y en contraste, el 10% de reemplazo de ceniza en los morteros mostró una carbonatación más baja, pero sin ser mayor a la mezcla de referencia.

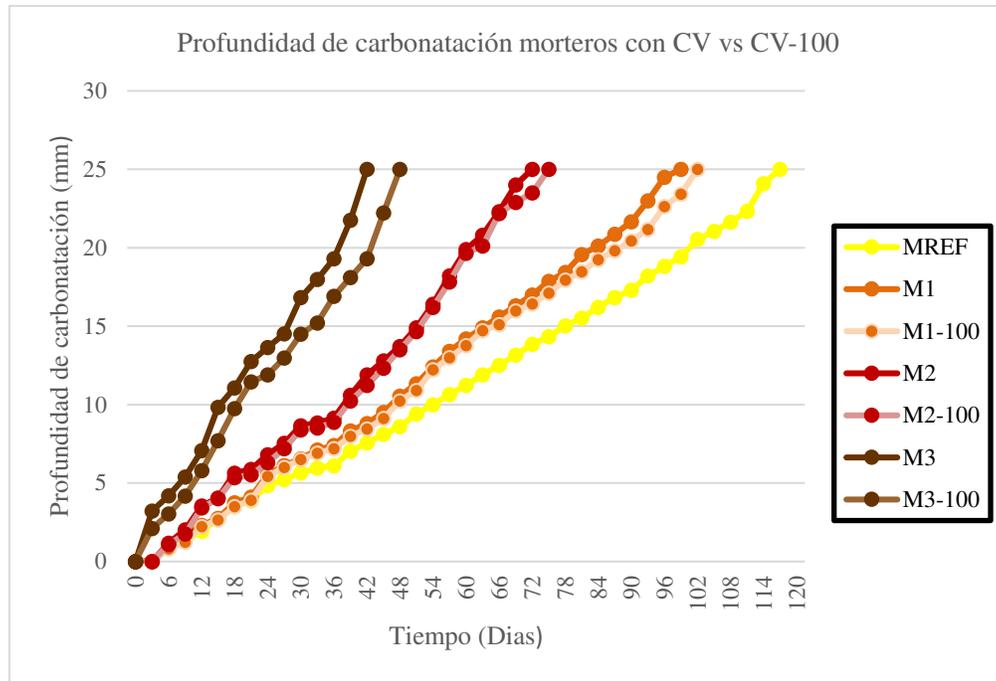


Figura 41. Profundidad de carbonatación.

4.4.5 Coeficientes de carbonatación

De acuerdo al valor de los coeficientes de carbonatación, se puede clasificar las mezclas de acuerdo a la Tabla 18 [44]:

Tabla 18. Clasificación de coeficientes de carbonatación

Coeficiente	Representación
$<3 \text{ mm/año}^{1/2}$	Mezcla de alta calidad para su uso en la atmósfera evaluada.
$3-6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Mezcla de mediana calidad para su uso en la atmósfera evaluada
$>6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Mezcla de baja calidad para su uso en la atmósfera evaluada

Para realizar el cálculo de los coeficientes de carbonatación para las atmósferas evaluadas, será mediante la ecuación 15, resultante del procedimiento matemático descrito en el marco teórico:

$$k_{atm} = k_{avg} \sqrt{\frac{c_{atm}}{c\%}} \quad \text{Ecuación 15}$$

En donde los coeficientes de cada atmósfera evaluada (k_{atm}), resultan de la pendiente de la recta de la gráfica de profundidad de carbonatación (mm) en el eje “Y” y la raíz cuadrada del tiempo (años ^{1/2}) en el eje “X” presentados en el Anexo A, con lo cual se obtiene el coeficiente para cada mezcla en mm/ años ^{1/2} (k_{avg}) y multiplicando por la raíz cuadrada de la concentración de CO₂ (c_{atm}) de la atmósfera (Rural = 0.028, Urbana = 0.038, Promedio = 0.04 y Proyectada a 2100 = 0.068) dividido entre la concentración de CO₂ en el medio evaluado (en este caso 20%).

En la Tabla 19, se observa que el coeficiente de carbonatación aumenta junto con el aumento del contenido de cenizas volantes, lo cual es consistente con la tendencia de las observaciones hechas por algunos investigadores [17] [43]. El incremento en el coeficiente de carbonatación es mayor cuando el contenido de cenizas volantes es superior al 20%. En las mezclas con contenido de cenizas volantes de 50%, el coeficiente de carbonatación es aproximadamente 80% mayor que el de la mezcla de referencia (véase Tabla 19). Esto se puede atribuir a que el uso de cantidades altas de ceniza volante, ocasiona una reducción de Ca(OH)₂, debido la reacción puzolánica de la ceniza volantes y por la reducción del contenido de cemento, que dominan sobre la

refinación de los poros. En una misma relación a/c, las cenizas volantes retrasan la hidratación y aumenta la porosidad del concreto, favoreciendo el ingreso de agentes agresivos en el concreto [31].

Tabla 19. Coeficientes de carbonatación obtenidos.

		Atmósfera CO ₂ (PPM)			
		Rural	Urbana	Promedio	2100
<3 mm/año ^{1/2}					
3-6 mm/año ^{1/2}					
>6 mm/año ^{1/2}		0.028	0.038	0.04	0.068
k avg (mm/año ^{1/2})		k atm (mm/año ^{1/2})			
MREF	48.519	1.815	2.115	2.170	2.829
M1	54.484	2.039	2.375	2.437	3.177
M2	61.277	2.293	2.671	2.740	3.573
M3	72.933	2.729	3.179	3.262	4.253
M1-100	53.039	1.985	2.312	2.372	3.093
M2-100	61.703	2.309	2.690	2.759	3.598
M3-100	69.575	2.603	3.033	3.111	4.057

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 19, para una atmósfera rural se cumplen los coeficientes de carbonatación en todas las mezclas, sin embargo, a medida que la concentración de PPM de CO₂ se incrementa, también los coeficientes aumentan, principalmente en las mezclas M3, las cuales pasan a ser de mediana calidad desde una atmósfera urbana. La mezcla de referencia MREF cumple el criterio de <3 mm/año^{1/2} en todos los casos. Mientras que las mezclas M1 y M2 son de buena calidad en atmosfera rural, urbana y promedio. En atmósfera proyectada hacia el año 2100, resultaron valores mayores a 3, pasando a ser consideradas regulares.

4.4.6 Potencial y velocidad de corrosión

La Figura 42 muestra los resultados de potencial de corrosión medidos a 180 días entre las mezclas de mortero, las cuales se colocaron dentro de la cámara de carbonatación a 20% de concentración de CO_2 durante 180 días. Esta gráfica muestra que la mezcla de referencia (MREF), pudo haber estado en proceso de pasivación debido a la tendencia que presentan sus potenciales mayores a -230 mV respecto al electrodo de calomel saturado, lo cual se traduce a una baja probabilidad de que presente corrosión, teniendo buena respuesta ante la carbonatación.

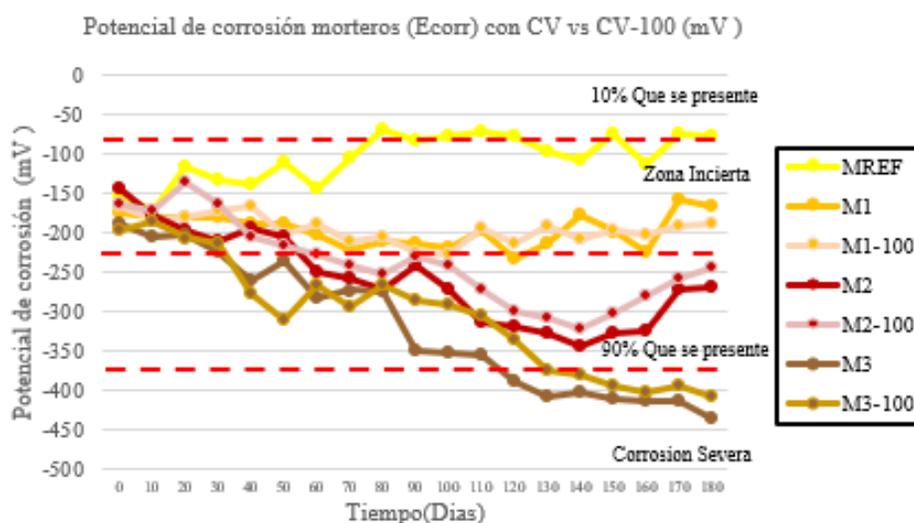


Figura 42. Potenciales de corrosión

Los morteros con 10% de sustitución de ceniza volante, presentan potenciales cercanos a los -230 mV, catalogados en una zona incierta de que se presente corrosión. El caso de las series de morteros M2, M2-100 con 20% de sustitución de ceniza volante, presentan potenciales con alta probabilidad de que se presente corrosión,

donde no se logra ver un equilibrio de los potenciales durante el tiempo de exposición y con los posteriores indicadores de velocidad y pérdida de masa se podrá corroborar la presencia de corrosión. En las mezclas con 50% de sustitución muestran los potenciales más negativos, el acero embebido en estas probetas no muestra pasivación, lo cual indica que es muy probable que esté ocurriendo un avanzado proceso de corrosión.

La literatura [33][34] ha reportado que el uso de ceniza volante en sustitución de cemento Portland, al tener una disminución en el contenido de Ca(OH)_2 en la matriz cementante, favorece la formación de carbonatos en un menor tiempo, entonces al incrementar la sustitución de ceniza volante, se tendrán una mayor cantidad de productos de carbonatación, bajando el pH en la matriz cementante y posteriormente desencadenar la corrosión en el acero de refuerzo, en esta investigación los potenciales más negativos se dan en las mezclas de mayor sustituciones de ceniza (50%), disminuyendo en las mezclas con 10% y 20%, siendo ligeramente mayores los potenciales con la ceniza cribada, lo cual se podría atribuir tener un porcentaje mayor de Ca(OH)_2 y una matriz más densa, tal como se vio en los ensayos de permeabilidad y porosidad.

Para complementar esta prueba, al término de los 180 días de exposición, se realizó la extracción del acero de las probetas, con la finalidad de obtener su pérdida de masa, en donde se encontró un visible deterioro del acero en las mezclas con sustitución del 50% de ceniza comparadas con la referencia, ya que presentaban productos formados

por la reacción de carbonatación en la superficie del acero. (véase Figura 43 y Figura 44).



Figura 43. Comparativa deterioro acero MREF (arriba)/ M3(abajo)



Figura 44. Producto corrosión adherido a M3

La velocidad de corrosión se presenta en la Figura 45, la cual fue medida hasta los 180 días y de acuerdo con los resultados de potencial de corrosión, la mezcla de referencia (MREF) presenta una despreciable velocidad de corrosión. Las mezclas con mayores reemplazos de ceniza volante presentaron mayores velocidades, siendo las mezclas M3 con 50% de ceniza las que incluso rebasaron el $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, la cual es considerada una velocidad alta, teniendo concordancia con los potenciales negativos presentados en el potencial de corrosión. Las mezclas con 10% y 20% presentaron velocidades bajas y moderadas a lo largo del tiempo de exposición, mostrando poca variabilidad entre las mezclas con ceniza cribada y sin cribar.

Al tener una matriz cementante con porcentajes mayores de porosidad y permeabilidad, las mezclas con 50% de sustitución de ceniza volante permiten la difusión del gas con una velocidad mayor, lo cual pudo desencadenar una mayor formación de carbonatos en un tiempo menor, ocasionando que el proceso de corrosión se produjera a una velocidad mayor, resultando en los valores de I_{CORR} más altos, los cuales van en descenso al disminuir la sustitución de cemento Portland por ceniza volante, ya que se van teniendo matrices más densas y que también cuentan con mayores cantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible, los cuales formaran productos de hidratación y se tendrán menores velocidades de corrosión al paso del tiempo.

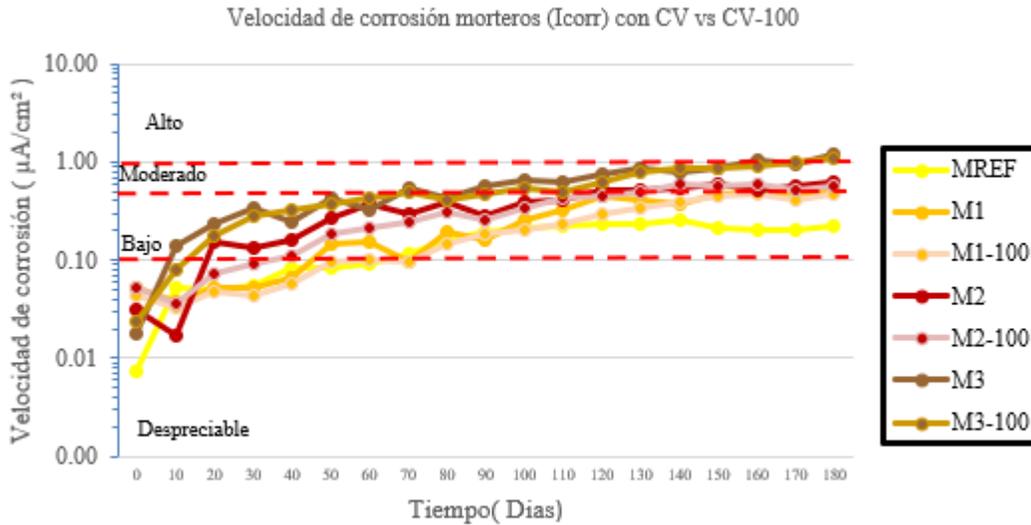


Figura 45. Velocidad de corrosión

La velocidad acumulada de corrosión se presenta en la Figura 46, donde se presentan sus valores durante los 180 días que duro la medición. Esta gráfica se utiliza para determinar de manera cualitativa en que tiempo se produce la despasivación del acero y el aumento de las tendencias en el tiempo de exposición de cada una de las mezclas [78][79]. En la gráfica se presenta un aumento equilibrado de I_{corr} al pasar el tiempo de exposición, en donde sobresalen las mezclas del 50% de sustitución de ceniza volante, las cuales llegan a valores a los 180 días de 10 $\mu A/cm^2$ en la mezcla con ceniza cribada y 11 $\mu A/cm^2$ en la mezcla sin cribar. Las mezclas con 20% de sustitución presentan velocidades acumuladas del rango de 6 $\mu A/cm^2$, siendo mayor la velocidad de corrosión en la ceniza sin cribar comparado con la mezcla cribada, siguiendo la misma tendencia la mezclas con 10% de sustitución. La mezcla de referencia presento los menores acumulados de velocidad de corrosión, debido a que

en las gráficas de E_{corr} e I_{corr} , se mantuvo en rangos de pasivación durante todo el tiempo de exposición.

En la gráfica se reconoce el aumento significativo y cambio abrupto en la pendiente de las mezclas al paso del tiempo. En la mezcla REF es un aumento equilibrado y no se visualiza un cambio exponencial, lo cual se puede deducir que el acero sigue en estado de pasivación, corroborando los resultados de las pruebas de E_{corr} e I_{corr} . En las mezclas con 10% ceniza volante M1, este cambio se logra ver alrededor de los 100 días, mientras que a mayor aumento de sustitución de ceniza, la despasivación del acero en la gráfica sucede en menor tiempo, las mezclas M2 con 20% de sustitución fue aproximadamente a los 60 días y en las mezclas con 50% de sustitución los cambios en la trayectoria de la curva se notan a partir de los 30 días de exposición.

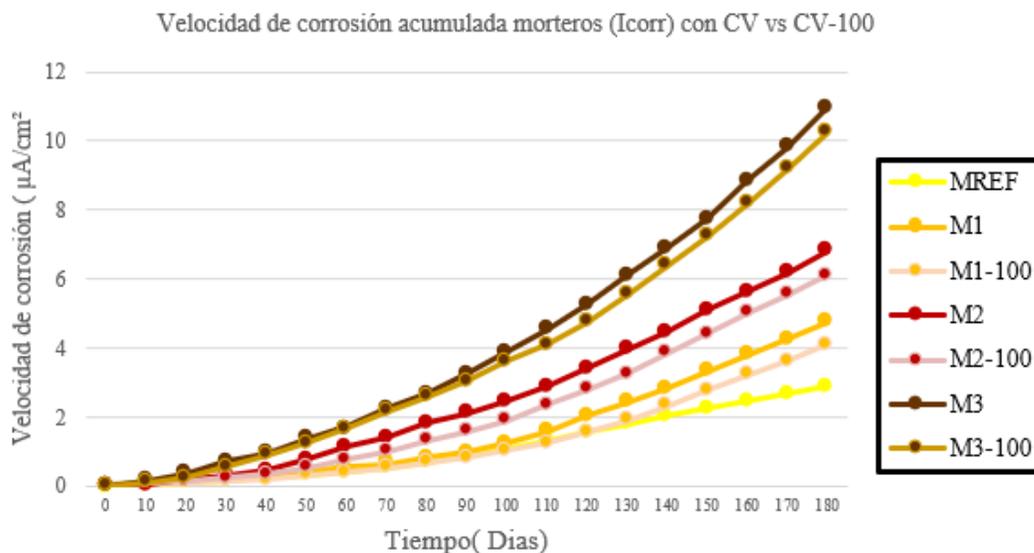


Figura 46. Velocidad de corrosión acumulada

Los porcentajes de pérdida de masa del acero embebido en las probetas se presenta en la siguiente tabla, en la cual las mezclas con mayores porcentajes de ceniza volante (M3 y M3-100) presentan las mayores pérdidas de masa, evidenciando un mayor deterioro causado por la carbonatación, esto confirma las mediciones de E_{corr} e I_{corr} , donde la probabilidad de que el acero presentara corrosión era mayor en las probetas con 50% de sustitución.

Tabla 20. Porcentajes de pérdida de masa del acero embebido.

Mezcla	Pérdida de masa (%)
MREF	0.33
M1	0.68
M2	0.77
M3	1.05
M1-100	0.63
M2-100	0.79
M3-100	0.97

En las mezclas con ceniza cribada, la pérdida de masa fue menor, comparándolas con las mezclas sin cribar, siendo consistentes con los resultados presentados en las gráficas de velocidad e intensidad de corrosión, en donde en ambos casos, los mayores índices se presentan en las mezclas que tienen cenizas sin cribar.

CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones sobre el efecto de las diferentes sustituciones de ceniza volante cribada en las propiedades mecánicas e indicadores de durabilidad descritos en la metodología experimental:

- El cribado de la ceniza volante resultó en un incremento en la resistencia a compresión en todas las edades evaluadas, comparado a las mezclas con ceniza sin cribar, e incluso con una resistencia mayor que la mezcla de referencia, en el caso de la mezcla M1-100 a los 180 días. Se atribuye este efecto al mejor acomodo de las partículas debido a la reducción del tamaño de estas, siendo matrices más densificadas y al menor porcentaje de carbón en la ceniza.
- Las mezclas con ceniza volante cribada obtuvieron menores porcentajes de porosidad y permeabilidad, debido a una matriz cementante densificada y menor tamaño de las partículas, lo cual hace más difícil el ingreso de agentes nocivos que deterioran el acero de refuerzo. Además, las mezclas con ceniza cribada tuvieron menor resistividad comparada con las mezclas con ceniza sin cribar, relacionada con una porosidad mayor y una menor concentración de álcalis debido a un mayor contenido de impurezas en la ceniza, ocasionando menor conductividad eléctrica.

- En general las mezclas con ceniza volante, al tener menos cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la matriz cementante, condujeron a velocidades de carbonatación más rápidas respecto a la mezcla de referencia, las cuales incrementaban al aumentar el porcentaje de sustitución de puzolana. El menor contenido de carbón y mayor porcentaje de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en las mezclas con ceniza cribada se reflejan en una menor velocidad de carbonatación respecto a las mezclas sin cribar, siendo las mezclas con ceniza sin cribar las que se carbonataron en tiempos menores.
- El deterioro del acero de refuerzo producto de la carbonatación, fue menor en las mezclas con ceniza cribada, debido a que presentaban las velocidades e intensidades menores, comparadas con las mezclas sin cribar, las cuales al ser mezclas con mayor tamaño de partícula y menor cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ favorecieron la formación de carbonatos, los cuales despasivaron el acero y presentaron condiciones más favorables para el desarrollo del proceso de corrosión.
- De acuerdo con los resultados de los coeficientes de carbonatación, reflejan que en general las mezclas con 10% y 20% de sustitución de ceniza volante son de buena calidad para utilizarse en concentraciones hasta de 0.04 PPM. En concentraciones más altas solo la mezcla de referencia cumple el indicador de

<3 mm/año ^{1/2} , sin embargo todas las mezclas llegan a ser de calidad regular en concentraciones altas de CO₂ , al estar entre valores de 3 a 6 mm/año ^{1/2} .

RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo desarrollado en este trabajo y considerando las áreas de oportunidad que se pueden revisar en trabajos futuros, se realizan las siguientes sugerencias y recomendaciones:

- Cribar la ceniza volante por un tamaño de malla más reducido, con la finalidad de analizar los tamaños de partícula resultante, y revisar si existe mayor reducción en el contenido de carbón, evaluando su desempeño en las propiedades mecánicas e indicadores de durabilidad.
- Enfocar investigaciones a porcentajes más específicos tanto de sustitución de ceniza volante cribada (<20%) y concentraciones de CO₂ entre (0-10%), revisando también en un ambiente natural a largo plazo para poder tener resultados considerables en este tipo de exposición.
- Realizar investigación con ceniza cribada en elementos de concreto reforzado, en donde se haga énfasis a pruebas mecánicas, complementando los resultados en dichas propiedades (flexión, esfuerzos), analizando los resultados en elementos reales.

- Evaluar el desempeño de estas mezclas con algún tratamiento de curado, ya que se reportan beneficios en propiedades mecánicas y en proteger el acero de refuerzo, al impedir la difusión de iones a través de la matriz cementante.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. I. Moreno, “Películas Barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado,” *Rev. Académica FI-UADY*, vol. 10–2, pp. 37–45, 2006.
- [2] Comisión Intersecretarial de cambio climático CICC (SEMARNAT), “Estrategia nacional de cambio climático,” 2007.
- [3] A. Pachauri, R. K.; Reisinger, “Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” 2007.
- [4] NMX-C-547, “Industria de la construcción – Durabilidad - Predicción de la despasivación del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Urbano Industrial Durante la Etapa de Inicio de la Vida de Servicio- Método de Aplicación,” pp. 4–7, 2005.
- [5] M. B. Polhs, “Plan Nacional de Evaluación de Puentes Federales: Cuantificación de Resultados,” 2010.
- [6] World Health Organization, “Ambient air pollution database,” 2016.
- [7] Gobierno del Estado de Nuevo León, “Reportes Mensuales de calidad del aire en el Estado de Nuevo León,” 2017. .
- [8] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, “Emisiones de gases de efecto invernadero en Nuevo León y proyecciones de casos de referencia 1990-2025,” 2010.
- [9] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, “Norma Oficial Mexicana NOM-034-SEMARNAT-1993,” 2003.
- [10] American Coal Ash Association, “2010 Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey,” 2011.
- [11] M. L. Marceau, J. Gajda, and M. G. VanGeem, “Use of Fly Ash in Concrete: Normal and High Volume Ranges,” *PCA R&D Ser. No. 2604*, 2002.

- [12] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese, and J. Tenesi, “Diseño y Control de Mezclas,” 2004.
- [13] Red DURAR, “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado,” 2000.
- [14] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 425–428, 2005.
- [15] V. Malhotra, M. Zhang, and P. Read, “Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength/high performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions,” *ACI Mater. J.*, vol. 97, no. 5, 2000.
- [16] M. Castellote, L. Fernandez, and C. Andrade, “Chemical changes and phase analysis of OPC paste carbonated at different CO₂ concentrations,” *Mater. Struct.*, vol. 42, pp. 515–525, 2009.
- [17] H. Cui, W. Tang, W. Liu, Z. Dong, and F. Xing, “Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 522–527, 2015.
- [18] P. L. Valdez-Tamez, A. Durán-Herrera, G. Fajardo-San Miguel, and C. A. Juárez-Alvarado, “Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Portland y ceniza volante Carbonatation Influence on Fly Ash and Portland Cement Mortars,” no. 1, pp. 39–49, 2009.
- [19] A. Younsi, P. Turcry, E. Rozire, A. Aït-Mokhtar, and A. Loukili, “Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 10, pp. 993–1000, 2011.
- [20] A. Morandea, M. Thiéry, and P. Dangla, “Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and

- moisture properties,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 153–170, 2014.
- [21] L. A. Quintero, J. Herrera, and L. Corzo, “Relationship Between Compressive Strength and Porosity of Concrete Evaluated From Ultrasonic Parameters,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, no. 1, pp. 69–76, 2011.
- [22] C. Shi, J. Stegemann, and R. Caldwell, “Effect of supplementary cementing Materials on the specific conductivity of pore solution and its implication on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 AND ASTM C1202 results,” *ACI Mater. J.*, vol. 95, pp. 389–393, 1998.
- [23] E. I. Moreno, G. G. D. Lara, E. J. C. Sarabia, and F. D. Gómez, “Efecto De La Relación Agua/Cemento En La Velocidad De Carbonatación Del Concreto Utilizando Una Cámara De Aceleración,” *Rev. Ing.*, vol. 8, no. 2, pp. 117–130, 2004.
- [24] M. . Sanjuan, C. Andrade, and M. Cheyrezy, “Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 15, pp. 171–180, 2003.
- [25] C.-F. Chang and J.-W. Chen, “The experimental investigation of concrete carbonation depth,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 9, pp. 1760–1767, 2006.
- [26] D. Ho and R. Lewis, “Carbonation of concrete and its prediction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 17, pp. 489–504, 2006.
- [27] P. Sulapha, S. Wong, and T. Wee, “Carbonation of concrete containing mineral admixtures,” *J Mater Civ. Eng*, vol. 15, pp. 134–143, 2003.
- [28] M. Montemor, M. Cunha, M. Ferreira, and A. Simoes, “Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, pp. 45–53, 2002.
- [29] V. G. Papadakis, “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress,” vol. 30, pp. 291–299, 2000.

- [30] C. D. Atiş, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, no. 3, pp. 147–152, 2003.
- [31] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 744–753, 2006.
- [32] G. K. Glass, C. L. Page, and N. R. Short, “Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars,” *Corros. Sci.*, vol. 32, pp. 1283–1294, 2011.
- [33] E. Moreno, “Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación . pH determination of concrete pore solution after an accelerated carbonation process .,” vol. 3, pp. 5–12, 2006.
- [34] Y. Ji, Y. Yuan, J. Shen, Y. Ma, and S. Lai, “Comparison of concrete carbonation process under natural condition and high CO₂ concentration environments,” *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 25, no. 3, pp. 515–522, 2010.
- [35] E. I. Moreno, “Effect of repair in carbonated concrete with high water / cement ratio and shallow concrete cover,” vol. 34, no. 3, pp. 224–227, 2011.
- [36] J. . Scully, *The fundamentals of corrosion*, 3rd ed. Oxford Pergamon Press, 1990.
- [37] C. Andrade and S. Feliu, “Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras,” Madrid, España, 1989.
- [38] E. F. Gundaker, “Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects,” in *2nd Latin American Region Corrosion Congress NACE*, 1996.
- [39] J. M. Mendoza-Rangel and P. Castro-Borges, “Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigon ante los efectos del cambio climtico global. Situacion actual,” *Mater. Construcción*, vol. 59, no. 296, pp. 117–124, 2009.

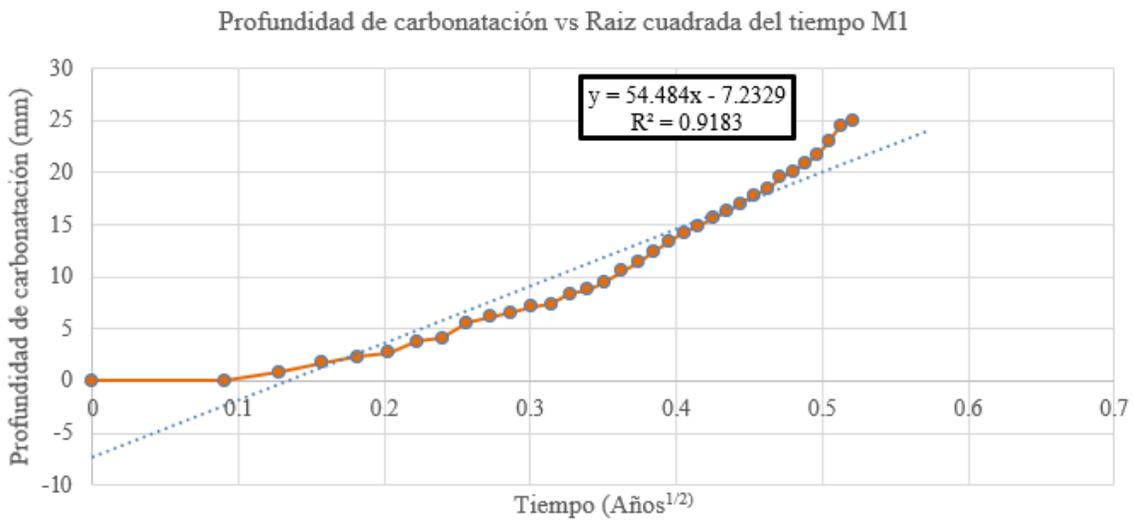
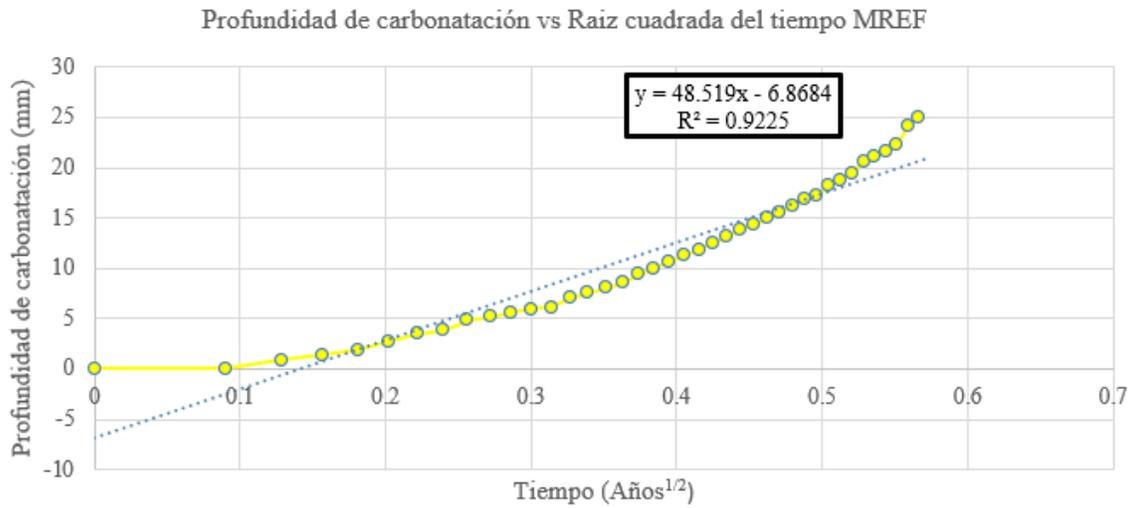
- [40] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [41] B. Lagerblad, *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art*, no. February. 2006.
- [42] A. Konin and R. Francoise, “Analysis of progressive damage to reinforced ordinary and high performance concrete in relation to loading,” *Mater. Struct.*, pp. 27–35, 1998.
- [43] E. I. Moreno, “Carbonation coefficients from concrete made with high-absorption limestone aggregate,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2013.
- [44] O. Trocónis-Rincón, A. Romero-Carruyo, and C. Andrade, *Manual for Inspecting, Evaluating and Diagnosing Corrosion in Reinforced Concrete Structures*, CYTED. 2000.
- [45] V. Malhotra and P. K. Mehta, “High performance, High volume Fly Ash Concrete”, *Suppl. Cem. Mater. Sustain. Dev.*, 2002.
- [46] S. Mindess, J. . Young, and D. Darwin, *Concrete, Second Edition*. 2003.
- [47] American Society of Testing and Materials, “ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use,” 2010.
- [48] American Society of Testing and Materials, “ASTM C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements,” 2013.
- [49] P. Chindraprasirt and K. Pimraksa, “A study of fly ash-lime granule unfired brick.,” *Powder Technol.*, vol. 182, pp. 33–41, 2008.
- [50] M. D. A. Thomas, M. Shehata, and S. G. Shashiprakash, “The Use of Fly Ash in Concrete: Classification by Composition.,” *Cem. Concr. Aggregates*, vol. 12, pp. 105–110, 1999.

- [51] D. Cross, J. Stephens, and J. Vollmer, “Field Trials of 100% Fly Ash Concrete,” *Concr. Int.*, pp. 47–51, 2005.
- [52] American Society of Testing and Materials, “ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement,” 2007.
- [53] NMX-C-414, “Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba.”
- [54] NMX-C-111, “Industria de la construcción – agregados para concreto hidráulico – especificaciones y métodos de prueba.”
- [55] American Society of Testing and Materials, “ASTM G1 - 03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens,” 2010.
- [56] American Society of Testing and Materials, “ASTM C305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency,” 2011.
- [57] American Society of Testing and Materials, “ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,” 2009.
- [58] American Society of Testing and Materials, “ASTM C311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.,” 2005.
- [59] American Society of Testing and Materials, “ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens),” 2010.
- [60] American Society of Testing and Materials, “ASTM C128 Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate,” 2010.
- [61] American Society of Testing and Materials, “ASTM C136 Standard Test

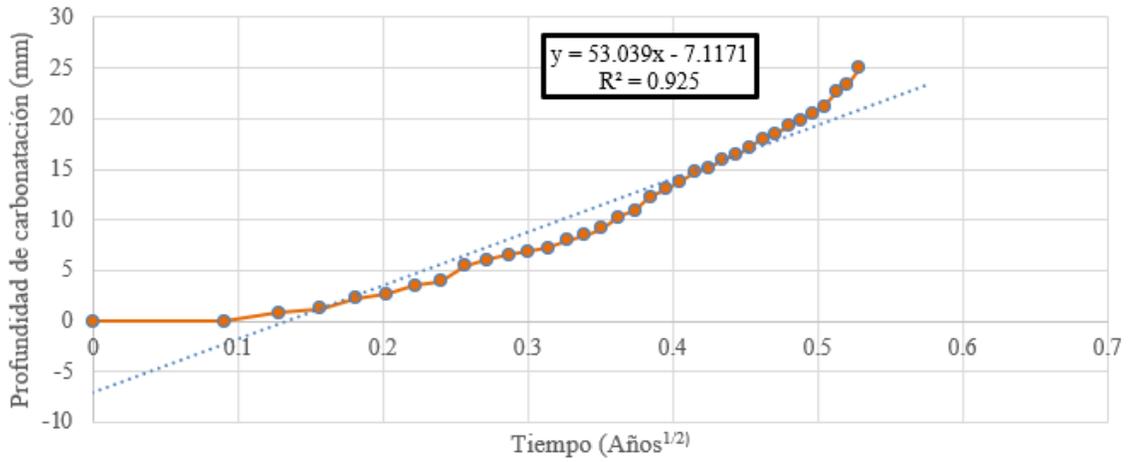
- Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” 2010.
- [62] American Society of Testing and Materials, “ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates,” 2003.
- [63] American Society of Testing and Materials, “ASTM 230 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1,” 2010.
- [64] American Society of Testing and Materials, “ASTM C185 Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar,” 2013.
- [65] American Society of Testing and Materials, “ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” 2008.
- [66] American Association of State Highway and Transportation Officials, “AASHTO TP95 Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration Surface Resistivity Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” 2013.
- [67] SIA 262/1 Norme Suisse, *Construction en béton – Spécifications complémentaires”, Annexe E: Perméabilité à l’air dans les Structures*. 2003.
- [68] R. Torrent, “Ensayo in - situ de Permeabilidad al Aire: Un medidor de Durabilidad,” no. April, 2014.
- [69] M. Thiery, G. Villain, P. Dangla, and G. Platret, “Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 7, pp. 1047–1058, 2007.
- [70] J. P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. 2007.
- [71] American Society of Testing and Materials, “ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete,” 1999.

- [72] P. K. Mehta, "Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 669–674, 1985.
- [73] R. . Chancey, "Characterization of crystalline and amorphous phases and respective reactivities in a class F fly ash," University of Texas at Austin, 2008.
- [74] D. . Bentz, C. . Ferraris, and K. A. Synder, "Best practices guide for high-volume flyash concretes: Assuring properties and performances.," *Natl. Inst. Stand. Technol. Note 1812*, 2013.
- [75] L. Yijin, Z. Shiqiong, and G. Yingli, "The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar and concrete," *Iowa State Univ. Cent. Transp. Res. Educ.*, 2015.
- [76] N. Chousidis, I. Ioannou, E. Rakanta, C. Koutsodontis, and G. Batis, "Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 86–97, 2016.
- [77] H. Ohga and S. Nagataki, "Prediction of Carbonation Depth of Concrete With Fly Ash," *Spec. Publ. Int. Concr. Abstr. Portal ACI.*, vol. 114, pp. 275–294, 1989.
- [78] I. L. . Hansson and C. M. Hansson, "Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 13, pp. 675–683, 1983.
- [79] J. M. Mendoza-Rangel, "Vida de servicio de estructuras de concreto reforzado influenciadas por el cambio climático global en ambiente tropical marino," Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional, 2009.

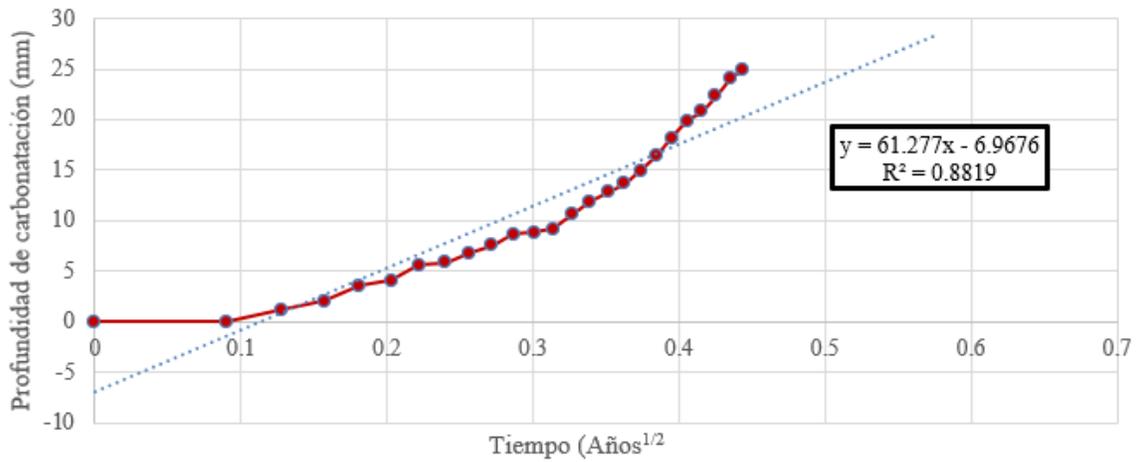
ANEXO A: Graficas de Profundidad de carbonatación vs Raíz cuadrada del tiempo



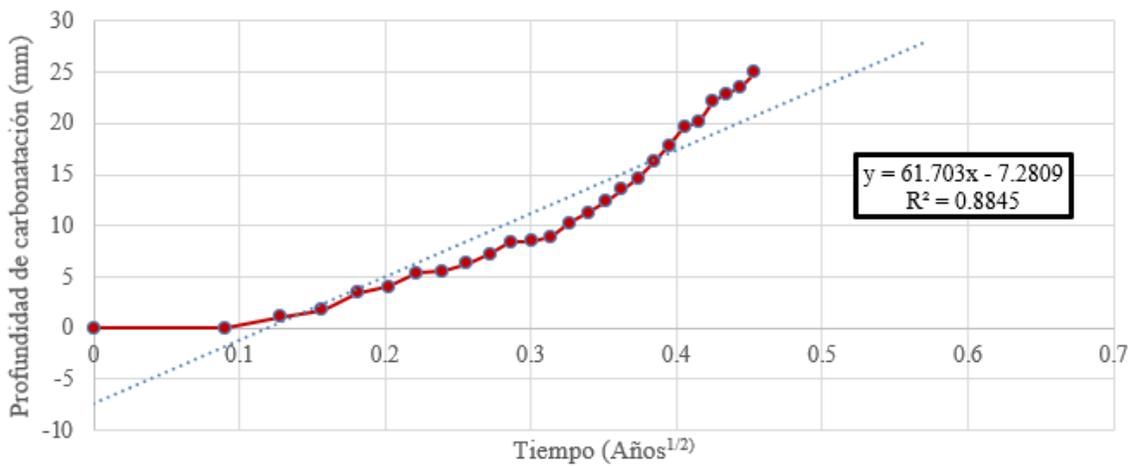
Profundidad de carbonatación vs Raíz cuadrada del tiempo M1-100



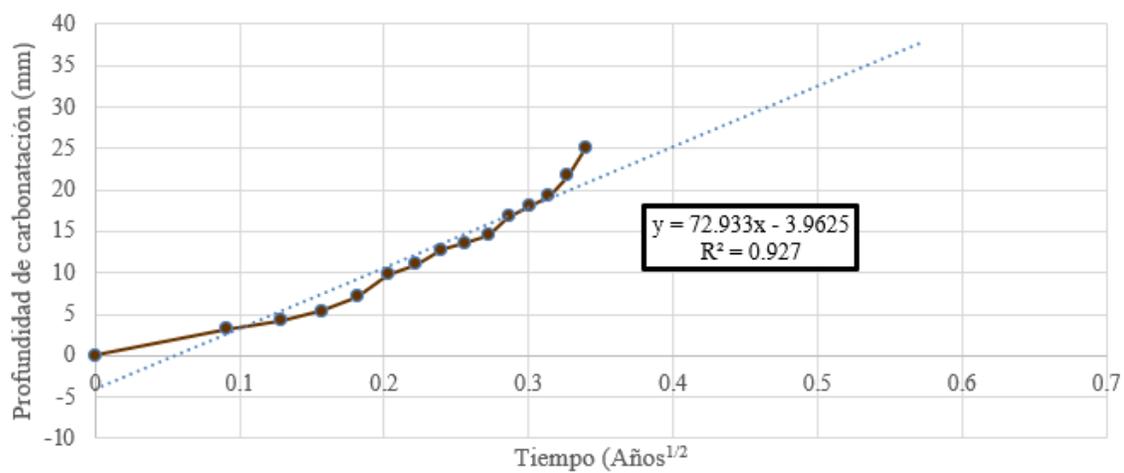
Profundidad de carbonatación vs Raíz cuadrada del tiempo M2



Profundidad de carbonatación vs Raíz cuadrada del tiempo M2-100



Profundidad de carbonatación vs Raiz cuadrada del tiempo M3



Profundidad de carbonatación vs Raiz cuadrada del tiempo M3-100

