



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA
EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR UNIDAD OAXACA**

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales
(Ingeniería)

**“EFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA EN LA
MICROESTRUCTURA Y DURABILIDAD DEL FERROCEMENTO”**

Tesis que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Marco Antonio Maldonado García

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Pedro Montes García

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 20 del mes de noviembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña en la microestructura y durabilidad del ferrocemento"

Presentada por el alumno:

Maldonado

Apellido paterno

García

materno

Marco Antonio

nombre(s)

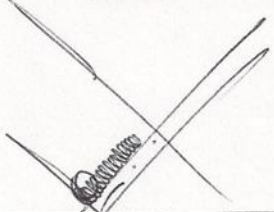
Con registro:


B	1	0	1	7	5	1
---	---	---	---	---	---	---

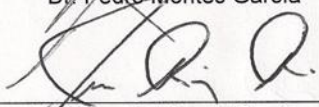
aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

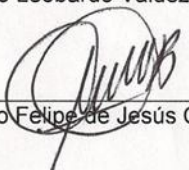
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.


LA COMISION REVISORA
Directores de tesis:


Dr. Pedro Montes García



Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez


Dr. Juan Rodríguez Ramírez


Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita


Dra. Lujata Laguarda Rivera

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


Dr. Rafael Pérez Pacheco



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 20 del mes noviembre del año 2012, el (la) que suscribe **Maldonado García Marco Antonio** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B101751**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Dres: Pedro Montes García y Pedro Leobardo Valdez Tamez y cede los derechos del trabajo titulado: “Efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña en la microestructura y durabilidad del ferrocemento”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó marco_mg.age@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Maldonado García Marco Antonio



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

RESUMEN

En esta investigación se evaluaron los efectos de la adición de ceniza de bagazo de caña (CBC) en las propiedades mecánicas y microestructurales de morteros y en la durabilidad de ferrocemento preparado con esos morteros. El trabajo experimental consistió en 3 fases. En la fase 1, se caracterizó la CBC mediante técnicas de análisis de composición química, difracción de rayos láser, adsorción física de gases (BET), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). En la fase 2, se elaboraron mezclas de mortero con sustitución de cemento Pórtland por 0, 10 y 20% de CBC y una relación agua/materiales cementantes de 0.63. Se determinó la fluidez, la temperatura, el peso volumétrico y el contenido de aire de las mezclas, y posteriormente se prepararon cilindros. Se obtuvo la resistencia a la compresión de los cilindros a 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días de edad y se caracterizaron los morteros microestructuralmente a 1, 7, 28 y 90 días por medio de DRX y MEB. En la fase 3, se continuó con una investigación anterior en la cual se utilizaron los mismos materiales y mezclas que en las fases 1 y 2, para la preparación de muestras en polvo y placas de ferrocemento. Se obtuvieron perfiles de difusión de cloruros ligados a 0, 7 y 28 días de curado y se continuó con el monitoreo de la corrosión de placas de ferrocemento hasta 1000 ciclos de humedecimiento-secado en un ambiente salino. Las pruebas realizadas a las placas fueron: inspección visual, potenciales de corrosión y resistencia a la polarización lineal. Los resultados, indican que la adición de 10 y 20% de CBC incrementa la resistencia a la compresión en un 19.7 y 7.2%, 11.0 y 3.0%, 13.8 y 14.8% a 28, 90 y 450 días, respectivamente. Los resultados muestran la formación de nuevos compuestos, tales como el silicato hidratado de calcio, el cual mejora la microestructura de los morteros con CBC. También se encontró que la adición de CBC disminuye aproximadamente el 50% los coeficientes de difusión de cloruros libres a 0, 7 y 28 días de curado. Sin embargo, aparentemente la CBC no contribuye al ligado de cloruros. Los resultados de las pruebas electroquímicas obtenidos durante el periodo evaluado sugieren un efecto benéfico del uso de 10 y 20% de CBC como sustituto parcial del cemento Portland para prevenir la corrosión del ferrocemento.

ABSTRACT

This study investigated the effects of the addition of sugar cane bagasse ash (SCBA) on the mechanical and microstructure properties of mortars. The durability of ferrocement prepared with these mortars was also monitored. This study was completed in 3 phases. In Phase 1, the SCBA used in this study was fully characterized. Chemical composition analysis, laser ray diffraction, physical adsorption of gas (BET), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques were used for this purpose. In Phase 2, mortar mixtures with 0, 10 and 20% of SCBA as cement replacement and a constant 0.63 water/cementitious materials ratio were prepared. Fluidity, temperature, volumetric weight and air content measurements of the mortars were obtained. Then mortars were then used to cast cylinders. The compression strength of the cylinders at 1, 7, 28, 56, 90 and 450 days was obtained, and the microstructural characteristics of mortars at 1, 7, 28 and 90 days were evaluated by XRD and SEM. In Phase 3 powdered samples and ferrocement specimens from previous research were used. The specimens had been prepared using the same materials and mixtures as in Phases 1 and 2. Free chloride diffusion coefficients at 0, 7 and 28 days of curing were estimated and the corrosion monitoring of ferrocement slabs continued during 1000 wettings and dryings cycles. Visual inspection of the slabs was carried out. Test for corrosion potential and corrosion current density were conducted. The results show that the addition of 10 and 20% of SCBA increased the compressive strength of mortars in 19.7 and 7.2%, 11.0 and 3.0%, 13.8 and 14.8% at 28, 90 and 450 days, respectively. The formation of new cementitious products such calcium silicate hydrate in the microstructure of the mortars was observed. The addition of SCBA decreased by approximately 50% the free chloride diffusion coefficients at 0, 7 and 28 days of curing; however, it was found the SCBA does not appear to bind chlorides. The results of the electrochemical tests obtained during the evaluation period suggest a beneficial effect on the use of 10 and 20% of SCBA as a partial replacement of Portland cement to prevent corrosion in ferrocement.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional y CIIDIR-Oaxaca por permitirme la realización de este proyecto de tesis. Así mismo por las facilidades académicas otorgadas.

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico brindado mediante los proyectos de investigación “Estabilización química y mecánica del adobe compactado” clave SIP 20100266, y “Ceniza de bagazo de caña de azúcar como adición mineral para mejorar las propiedades de materiales basados en cemento y contribuir a la reducción de emisiones de CO₂” claves SIP 20110104 y 20120783. Así mismo por la beca tesis otorgada por la Secretaría de Investigación y Posgrado. También a la Comisión de operación y Fomento de Actividades Académicas (COFFA), por la beca otorgada a través del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) durante el periodo agosto de 2010 a diciembre de 2012 y por los apoyos económicos otorgados para la presentación de artículos técnicos en el VI International Conference on Physical Engineering y en el V Congreso Nacional ALCONPAT durante mis estudios de maestría.

Al Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por todas las facilidades brindadas durante la estancia de investigación realizada en el periodo comprendido del 8 de agosto al 16 de diciembre de 2011, para la realización de pruebas de caracterización microestructural de materiales y morteros empleados en este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca nacional de nivel Maestría y por la beca de ayudante de investigador otorgada a través del Sistema Nacional de Investigadores (SNI)

Al Programa de Movilidad Estudiantil Nacional del Espacio Común de Educación Superior (ECOES), por la beca de movilidad nacional en el periodo agosto-diciembre de 2011.

A mis directores de tesis: Dr. Pedro Montes García y Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez, por brindarme la oportunidad de emprender el camino hacia la investigación científica a través de sus enseñanzas y conocimientos, también por su tiempo, apoyo, confianza y amistad brindados durante la elaboración de este trabajo.

A los miembros de la comisión revisora y jurado de examen: Dr. Juan Rodríguez Ramírez, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dra. Luicita Lagunez Rivera y Dr. Sadoth Sandoval Torres por sus recomendaciones para mejorar este trabajo.

A mis compañeros: Arturo Ramírez, Carolina Arenas, Eddisson Hernández, Floriberto Díaz, Venustiano Ríos, y M.C. Víctor Jiménez por su apoyo y gran amistad.

A Venustiano Ríos, Carolina Arenas, M.C. Víctor Jiménez y M.C. Ur Hernández por la ayuda brindada en la parte experimental de este trabajo.

Al M.C. Ur Iván Hernández Toledo por su amistad, asesoría y apoyo brindado para dar continuidad a la parte de durabilidad de este proyecto.

Al personal Docente del CIIDIR Oaxaca quienes intervinieron en mi formación académica

Al personal administrativo del CIIDIR Oaxaca por todo el apoyo brindado durante mis estudios de posgrado.

Al personal del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León quienes con su asistencia ayudaron a la realización de pruebas de caracterización microestructural de este trabajo.

Por todo, mil gracias

Marco Antonio Maldonado García

DEDICATORIA

A mis amados abuelos:
Onofre Maldonado Valencia y Felisa Nuñez Gijón
Por su guía y consejo en el sendero de la vida

A mis apreciados padres:
M. I. Marco Antonio Maldonado Nuñez y M. C. Saula García Gómez†
Por ser la inspiración y ejemplo a seguir

A mis queridas hermanas:
Angélica, Karen y Fernanda
Por todo el cariño y alegrías que me han dado

A mis estimados directores de tesis:
Dr. Pedro Montes García y Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez
Por su amistad, tiempo, consejo y conocimientos brindados durante mis estudios de posgrado

A mí querida amiga:
Adriana López Vichido
Por su tiempo, confianza, motivación,
por estar nuevamente conmigo y llenar mi vida de alegría...

A toda mi familia... por todo lo brindado

Por todo, muchas gracias

Marco Antonio Maldonado García

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Antecedentes	4
1.5 Objetivos	8
1.5.1 General	8
1.5.2 Particulares	8
1.6 Hipótesis	9
CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL	10
2.1 Marco Conceptual	10
2.1.1 El cemento	10
2.1.1.1 <i>Definición</i>	10
2.1.1.2 <i>Manufactura y componentes</i>	10
2.1.1.3 <i>Hidratación del cemento Pórtland</i>	12
2.1.1.4 <i>Tipos y clases de cemento Pórtland</i>	14
2.1.2 Materiales puzolánicos	16
2.1.2.1 <i>Definición</i>	16
2.1.2.2 <i>Clasificación</i>	16
2.1.2.3 <i>Ceniza volante (CV)</i>	17
2.1.2.4 <i>Ceniza de bagazo de caña (CBC)</i>	18
2.1.2.5 <i>Reacción puzolánica</i>	19
2.1.2.6 <i>Índice de Actividad Resistente (IAR)</i>	19
2.1.2.7 <i>Beneficios y desventajas del uso de materiales puzolánicos en concretos</i>	19
2.1.3 Técnicas para caracterización materiales	20
2.1.3.1 <i>Difracción Láser</i>	20
2.1.3.2 <i>Adsorción física de gases</i>	21
2.1.3.3 <i>Difracción de rayos X (DRX)</i>	22
2.1.3.4 <i>Microscopía electrónica de barrido (MEB)</i>	23
2.1.3.5 <i>Microanálisis elemental por rayos X (Espectroscopía por dispersión de energía, EDS)</i>	24
2.1.4 El Ferrocemento	25
2.1.4.1 <i>Definición e historia</i>	25

2.1.4.2 Componentes del ferrocemento	26
2.1.4.3 Características del ferrocemento	27
2.1.4.4 Aplicaciones del ferrocemento	27
2.1.4.5 Propiedades mecánicas	28
2.1.4.6.1 Compresión	28
2.1.4.6.2 Flexión.....	28
2.1.4.6.3 Tensión.....	28
2.1.4.6.4 Resistencia al impacto.....	29
2.1.4.7 Durabilidad del ferrocemento	29
2.1.5 Corrosión	30
2.1.5.1 Corrosión de metales en el concreto reforzado	30
2.1.5.2 Corrosión electroquímica	32
2.1.5.3 Corrosión ocasionada por cloruros	33
2.1.5.4 Tipos de corrosión en ferrocemento.....	33
2.1.5.5 Potencial electroquímico, potencial del electrodo y potencial de equilibrio	34
2.1.5.6 Polarización	35
2.1.5.7 Polarización por activación y polarización por concentración	35
2.1.6 Métodos y técnicas electroquímicas para evaluar la corrosión	36
2.1.6.1 Inspección visual	37
2.1.6.2 Potenciales de corrosión.....	37
2.1.6.3 Resistencia a la polarización lineal	38
2.2 Marco teórico.....	39
2.2.1 Aspectos químicos de la hidratación del cemento Portland.....	39
2.2.2 Aspectos químicos de la reacción puzolánica.....	40
2.2.3 Resistencia a la compresión	41
2.2.4 Índice de actividad resistente	42
2.2.5 Análisis de estructuras cristalinas	42
2.2.5.1 Difracción de rayos X y la ley de Bragg	42
2.2.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	43
2.2.6 Mecanismos de transporte (Difusión de cloruros)	44
2.2.6.1 Primera Ley de Fick.....	44
2.2.6.2 Segunda ley de Fick.....	44
2.2.7 El fenómeno de la corrosión	45
2.2.8 Potencial de corrosión	46

2.2.9 Densidad de corrosión	46
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	48
3.1 Diseño experimental.....	50
3.1.1 Diseño experimental para la fase 2	50
3.1.2 Diseño experimental para la fase 3	52
3.2 Métodos utilizados en la fase 1	54
3.2.1 Elección de Materiales	54
3.2.1.1 Materiales para la fase 2	54
3.2.1.2 Materiales para la fase 3	55
3.2.2 Caracterización de materiales	55
3.2.2.1 Análisis químico	55
3.2.2.2 Difracción láser.....	56
3.2.2.3 Área superficial por el método BET.....	56
3.2.2.4 Análisis de fases minerales por DRX	57
3.2.2.5 Análisis de forma y tamaño de partículas por MEB.....	57
3.3 Métodos utilizados en la fase 2	58
3.3.1 Diseño de mezclas	58
3.3.2 Elaboración de probetas de mortero	59
3.3.3 Pruebas de resistencia a compresión	60
3.3.4 Caracterización microestructural de morteros	60
3.3.4.1 Difracción de Rayos X (DRX)	61
3.3.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	62
3.4 Método empleados en la fase 3	63
3.4.1 Determinación de coeficientes de penetración de cloruros	63
3.4.2 Determinación del deterioro por corrosión	64
3.4.2.1 Inspección visual.....	65
3.4.2.2 Potenciales de corrosión	66
3.4.2.3 Resistencia a la polarización lineal (RPL).....	66
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
4.1 Resultados de la fase 1	67
4.1.1 Análisis químico.	67
4.1.2 Difracción de rayos láser.....	68
4.1.3 Área superficial por el método BET	70
4.1.4 Composición mineralógica por difracción de rayos X	70
4.1.5 Morfología y composición elemental por MEB/EDS	72
4.1.4.1 Cemento Portland Compuesto	72
4.1.4.2 Ceniza de bagazo de caña.....	73

4.1.4.3	<i>Ceniza Volante</i>	76
4.1.4.4	<i>Discusión de resultados del CPC y de las CBC y CV por MEB</i>	78
4.2	Resultados de la fase 2	78
4.2.1	<i>Resistencia a la compresión</i>	78
4.2.2	<i>Índice de actividad resistente</i>	80
4.2.3	<i>Caracterización microestructural de morteros</i>	80
4.2.3.1	<i>Análisis de fases cristalinas por DRX en morteros</i>	80
4.2.3.1.1	Mortero CBC0.....	80
4.2.3.2.1	Mortero CBC10.....	82
4.2.3.1.3	Mortero CBC20.....	83
4.2.3.1.4	Mortero CV20	84
4.2.3.2	<i>MEB / EDS en morteros</i>	86
4.2.3.2.1	Morteros CBC0	86
4.2.3.2.2	Mortero CBC10.....	89
4.2.3.2.3	Mortero CBC20.....	91
4.2.3.2.4	Mortero CV20	94
4.3	Resultados de la fase 3	96
4.3.1	<i>Coefficientes de difusión de cloruros libres</i>	96
4.3.2	<i>Estimación de cloruros ligados</i>	101
4.3.3	<i>Evaluación de la corrosión en el ferrocemento</i>	104
4.3.3.1	<i>Inspección visual detallada no destructiva</i>	104
4.3.3.2	<i>Potenciales de corrosión</i>	107
4.3.3.3	<i>Densidades de corrosión</i>	110
REFERENCIAS	113
ANEXOS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de hidratación del cemento.....	13
Figura 2: Volúmenes representativos de los compuestos principales en la microestructura de pastas de cemento Pórtland en procesos de hidratación	14
Figura 3: Micrografía de ceniza volante.....	17
Figura 4: Micrografías de CBC A) mezcla heterogénea y B) detalle de partícula prismática	18
Figura 5: Diagrama esquemático de los componentes típicos de un instrumento de difracción de rayos láser	21
Figura 6: Microscopio electrónico de Barrido	23
Figura 7: Imágenes por microscopía electrónica de barrido	24
Figura 8: Modelo de vida útil de Tuutti	32
Figura 9: Principio del método de la media celda.....	37
Figura 10: Representación esquemática de los mecanismos de hidratación en los sistemas C_3S -puzolana y C_3A -puzolana.....	41
Figura 11: Espacios interplanares de una celda unitaria	43
Figura 12: Difractograma, los números en paréntesis muestran los índices de Miller (h, k, l).....	43
Figura 13: Formación de productos de corrosión en el acero	46
Figura 14: Pendientes de Tafel.....	47
Figura 15: Metodología de la investigación.....	49
Figura 16: Analizador de distribución de tamaños de partículas Microtrac S3500.....	56
Figura 17: Equipo para fisisorción de gases de la marca Quantachrome Instruments	57
Figura 18: Difractómetro de rayos X Bruker AXS D8 advance	57
Figura 19: Recubridora y Microscopio electrónico de barrido	58
Figura 20: Pruebas en estado fresco.....	59
Figura 21: Probetas para experimentación	60
Figura 22: Ensayo de resistencia a compresión de cilindros.....	60
Figura 23: Muestreo para pruebas de DRX y MEB	61
Figura 24: Preparación de muestras para DRX	61
Figura 25: Muestras y ensayo de DRX	62
Figura 26: Preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido	63
Figura 27: Determinación de contenido de cloruros	64
Figura 28: Acondicionamiento del ambiente agresivo simulado para evaluar el deterioro por corrosión en placas de ferrocemento	64
Figura 29: Inspección visual no destructiva detallada de placas de ferrocemento.....	65
Figura 30: Realización de las pruebas electroquímicas en las placas de ferrocemento	66
Figura 31: Distribución de tamaños de partículas de los tres materiales cementantes empleados.....	69
Figura 32: Difractograma del CPC.....	70
Figura 33: Difractograma de la CBC	71
Figura 34: Difractograma de la CV clase F.....	72

Figura 35: Micrografía del CPC, conformado por partículas de formaciones irregulares angulosas	72
Figura 36: Análisis elemental por puntos de algunas partículas del CPC.....	73
Figura 37: Micrografías de la ceniza de bagazo de caña.....	74
Figura 38: Análisis elemental por área de CBC.....	74
Figura 39: Análisis Elemental por puntos de la CBC.....	75
Figura 40: Micrografías de la ceniza volante.....	76
Figura 41: Análisis elemental por puntos de la CV.....	77
Figura 42: Resistencia a compresión de mortero a 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días de edad.....	79
Figura 43: Difractogramas del mortero CBC0 a edades de 1, 7, 28 y 90 días.....	82
Figura 44: Difractogramas del mortero CBC10 a edades de 1, 7, 28 y 90 días.....	83
Figura 45: Difractogramas del mortero CBC20 a edades de 1, 7, 28 y 90 días.....	84
Figura 46: Difractogramas del mortero CV20 a edades de 1, 7, 28 y 90 días.....	85
Figura 47: Micrografías del mortero CBC0 a 1 día de edad.....	87
Figura 48: Micrografías de mortero CBC0 a 7 días de edad.....	88
Figura 49: Micrografías de mortero CBC0 a A) 28 y B) 90 días de edad.....	88
Figura 50: Micrografías de mortero CBC10 a 1 día de edad.....	89
Figura 51: Micrografías de mortero CBC10 a 7 días de edad.....	90
Figura 52: Micrografías de mortero CBC10 a edades de A) 28 y B) 90 días.....	91
Figura 53: Micrografías de mortero CBC20 a 1 día de edad.....	92
Figura 54: Micrografías de mortero CBC20 a 7 días de edad.....	92
Figura 55: Micrografías de mortero CBC20 a 28 días de edad.....	93
Figura 56: Micrografías de mortero CBC20 a 90 días de edad.....	93
Figura 57: Micrografías de mortero CV20 a 1 día de edad.....	94
Figura 58: Micrografías de mortero CV20 a 7 días de edad.....	94
Figura 59: Micrografías de mortero CV20 a 28 días de edad.....	95
Figura 60: Micrografías de mortero CV20 a 90 días de edad.....	95
Figura 61: Perfiles de penetración de cloruros libres en probetas de mortero (3réplicas).....	98
Figura 62: Perfiles de penetración de cloruros libres promedio en probetas de mortero.....	99
Figura 63: Coeficientes de difusión de cloruros libres en morteros a 63 días de edad.....	100
Figura 64: Perfiles de cloruros ligados (Cl-Lg) en probetas de mortero (3 réplicas).....	102
Figura 65: Perfiles de cloruros ligados promedio en probetas de mortero.....	103
Figura 66: Imágenes de la inspección visual detallada de las placas de ferrocemento después de 1000 ciclos de humedecimiento y secado en un ambiente agresivo simulado.....	105
Figura 67: Manchas de óxido localizadas en una de las réplicas del mortero CBC0 con 28 días de curado.....	106
Figura 68: Mancha de óxido localizada en una de las réplicas del mortero CBC10 con 7 días de curado.....	106
Figura 69: Mancha de óxido localizada en una de las réplicas del mortero CBC20 con 0 días de curado.....	107
Figura 70: Mancha de óxido localizada en una de las réplicas del mortero CV20 con 28 días de curado.....	107

Figura 71: Potenciales de corrosión promedio de las placas de ferrocemento (tres réplicas) después de 1000 de exposición al ambiente agresivo simulado 109

Figura 72: Densidades de corrosión promedio de las placas de ferrocemento (tres réplicas) después de 1000 de exposición al ambiente agresivo simulado 111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Compuestos principales del cemento Pórtland 11

Tabla 2: Propiedades físico-mecánicas de los compuestos principales del cemento 11

Tabla 3: Composición química de las principales fases del cemento 11

Tabla 4: Clasificación del cemento de acuerdo a la ONNCCE..... 14

Tabla 5: Composición de los cementos Portland según la norma N-CTN-2-02-001/02..... 15

Tabla 6: Valores de potenciales de corrosión para acero al carbono 38

Tabla 7: Condición de corrosión de metales con base en densidad de corrosión..... 38

Tabla 8: Diseño experimental de las fases 2 y 3 50

Tabla 9: Características y total de probetas para las fases 2 y 3 53

Tabla 10: Proporcionamientos de morteros por m³ 59

Tabla 11: Pruebas para detectar corrosión en especímenes de ferrocemento..... 65

Tabla 12: Composición química del CPC y de las CV y CBC. PXC = pérdidas por ignición..... 68

Tabla 13: Análisis puntual por EDS del CPC. Porcentajes en peso 73

Tabla 14: Análisis puntual por EDS de la CBC. Porcentajes en peso..... 76

Tabla 15: Análisis puntual por EDS de la CV. Porcentajes en peso 77

Tabla 16: Índices de actividad resistente de las tres mezclas con adiciones puzolánicas 80

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El ferrocemento es un tipo particular de concreto reforzado conformado por mortero y acero de refuerzo, se emplea en el sector de la construcción por sus diferentes características como versatilidad, disminución de costos de edificación, elementos más esbeltos y con la misma resistencia mecánica que un elemento de concreto reforzado, entre otros (Paul y Pama 1991, Wainshtok 1998, Ramli 2012). Dichas atribuciones se le han concedido al ferrocemento como resultado de diversas aplicaciones como por ejemplo: en estructuras marinas, viviendas, saneamiento, agricultura, pesca, reparación y rehabilitación de estructuras de concreto, especialmente en países en desarrollo (Rivas y Moreno 1994, Olvera et. al 1998, Escobar y Wainshtok 1998, Fernández y Montes 1998, Olvera 2002).

A pesar de las ventajas y diversas aplicaciones del ferrocemento, actualmente se tiene evidencia de daños en estructuras de ferrocemento ocasionados principalmente por la corrosión del acero de refuerzo (Montes et al. 2011). Existen diversas causas que promueven este fenómeno tales como: la penetración de iones cloruro y el dióxido de carbono, considerados agentes agresivos, los cuales penetran a través de la red de poros del mortero. El resultado es el decremento de la durabilidad del ferrocemento, lo cual podría provocar la falla de elementos estructurales y/o colapso de estructuras.

Existen diversas soluciones para prevenir el deterioro y decremento de la durabilidad del ferrocemento; entre ellas se puede mejorar las propiedades anticorrosivas del acero de refuerzo, o bien mejorar la matriz del mortero. La primera resulta en un considerable incremento en los costos de edificación y no garantiza mejorar la durabilidad mientras el mortero no trabaje adecuadamente protegiendo al acero. La segunda opción resulta ser más viable puesto que el mortero es la principal protección del acero de refuerzo.

Una opción para mejorar el mortero es utilizar materiales puzolánicos sustitutos del cemento. Estos materiales densifican la matriz cementante al reaccionar la sílice, la alúmina y el óxido de fierro con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. Al densificarse la matriz, el mortero podría tener mayor resistencia e impermeabilidad (Toutanji, 2004 Tobon 2006, Stark 2011) y por tanto impedir el acceso de agentes agresivos.

Actualmente se dispone de materiales puzolánicos de origen natural, mineral o agrícola. Aquellos de origen natural (cenizas volcánicas, suelos lacustres...) y mineral (ceniza volante, humo de sílice...) han sido evaluados en diversas investigaciones (Toutanji et al. 2004, Ghici et al. 2007, Chindaprasirt et al. 2007, Valdez et al. 2007, Ashraf 2009 et al., Ahmanruzzaman 2010) en donde mencionan beneficios al emplearlos como sustitutos

parciales del cemento en mezclas de concreto y mortero, tales como: incremento de resistencia a compresión, disminución de porosidad, incremento de resistencia al ataque de agentes y mejoras en durabilidad del material. Sin embargo, en algunas zonas como en el sur-sureste de México existe poca disponibilidad de algunos de ellos, principalmente los de origen mineral.

Los materiales puzolánicos de origen agrícola, tales como cenizas de cascarilla de arroz, hoja de pino, entre otros, al considerarse desechos de la agroindustria su obtención resulta ser menos contaminante que la producción del cemento, lo que ayuda a mitigar la problemática del cambio climático ocasionada en parte por la emisión de gases de efecto invernadero. Asimismo al darles un postratamiento óptimo (cribado, molido, calcinado, entre otros) pueden ser utilizados como materiales suplementarios del cemento ya que aportan ventajas tales como: disminución de la porosidad de la matriz cementante debido a la creación de nuevos productos cementantes como el C-S-H y por ende se tiene incremento en la durabilidad de estructuras, disminución de emisiones de CO₂ a la atmosfera debido a que se emplea menos cemento y se promueve la utilización de recursos sustentables (Ghrici et al 2007, Chindaprasirt et al. 2007, Hernández et al. 2010, Maldonado et al. 2012) entre otros.

Otro de los materiales de origen agrícola con potencial puzolánico es la ceniza de bagazo de caña (CBC), la cual resulta de la quema del bagazo de caña durante la obtención de azúcar. En la actualidad se estima que en México se generan aproximadamente 350 mil toneladas de esta ceniza (Hernández 2009) y la mayoría es desechada en tiraderos a cielo abierto, generando un problema ambiental, por tanto, es recomendable apoyar los procesos sustentables al utilizarla en la producción de concretos.

Hoy en día; investigadores de diversas partes del mundo han utilizado la CBC como sustituto parcial del cemento en mezclas de concreto (Ganesan et al. 2007, Morales et. al 2009, Cordeiro et al. 2010, Noor-Ul 2011, Cordeiro et al. 2012) y morteros (Hernández et al. 2010, Maldonado et al 2012,). Afirman no haber obtenido efectos negativos en aspectos mecánicos como la resistencia a compresión. Sin embargo ha sido poco estudiada en aspectos de durabilidad.

Tomando en cuenta la actual disponibilidad y potencial puzolánico de la CBC, en esta investigación se propuso emplear CBC como sustituto parcial del cemento en mezclas de mortero para evaluar sus efectos en la microestructura del mortero y en la durabilidad del ferrocemento.

1.2 Planteamiento del problema

El ferrocemento es un material que ofrece ventajas tales como: versatilidad, disminución de costos de edificación, entre otras, las cuales hacen que sea un material con diversas aplicaciones como la construcción de viviendas y estructuras para almacenamiento de agua. Sin embargo, actualmente se tiene evidencia de daños en estructuras de ferrocemento ocasionados principalmente por la corrosión del refuerzo de acero. Por ejemplo, en estudios realizados por Montes et al. (2011) se muestran altos riesgos de corrosión en micropresas de ferrocemento de la región de Valles Centrales de Oaxaca, México, las cuales solo tienen edades de entre 9 a 11 años.

Una de las causas que promueven el fenómeno de la corrosión es el ingreso de agentes agresivos tales como los iones cloruro y el dióxido de carbono, los cuales penetran a través de la red de poros del mortero hasta llegar a la interface con el acero provocando su despasivación y consiguiente deterioro. El ingreso de estos agentes se atribuye a diversas causas como el tiempo de curado, elección del agregado y la relación agua/materiales cementantes, entre otros. Todos ellos intervienen en la evolución de la microestructura de la pasta cementante y por consiguiente tienen efectos en las propiedades físicas del mortero, entre ellas la permeabilidad.

El resultado del ingreso de los agentes agresivos a través de un mortero permeable es la corrosión del refuerzo de acero y el decremento de la durabilidad del ferrocemento. Una posible solución a esta problemática es mejorar la microestructura del mortero para incrementar su impermeabilidad. Una alternativa para lograrlo es utilizar materiales suplementarios al cemento con potencial puzolánico, los cuales proporcionan ventajas al mejorar la densificación de la matriz cementante y al incrementar la producción de nuevos productos cementantes.

Uno de los materiales utilizados para este propósito es la ceniza de bagazo de caña, la cual posee potencial puzolánico para utilizarse como sustituto parcial de cemento en concretos (Villa-Cociña et al. 2003, Martirena et al. 2006, Ganesan et al. 2007, Morales et al. 2009, Frías et al. 2011) y en morteros (Hernández 2010, Hernández et al. 2010, Maldonado et al. 2012, Maldonado G. et al. 2012) sin mostrar efectos perjudiciales en las propiedades mecánicas. Sin embargo, se tiene poca información sobre el uso de esta ceniza y los efectos que produzca en la microestructura de concretos, morteros y en la durabilidad del ferrocemento.

1.3 Justificación

La presente investigación se justifica por:

- I. Generar conocimiento científico sobre el efecto de la adición de CBC como sustituto parcial de cemento en mezclas de mortero y sus efectos en la durabilidad del ferrocemento
- II. Apoyar los procesos sustentables al disminuir la contaminación al medio ambiente ocasionada por la actual disposición de la CBC; además, de que al sustituir parcialmente al cemento se reducen las emisiones gases de efecto invernadero generados por la manufactura de este último.
- III. Promover mediante la divulgación científica, los conocimientos generados en esta investigación acerca de los efectos, ventajas y/o desventajas del empleo de la CBC como sustituto parcial del cemento en el ferrocemento, especialmente como una alternativa de construcción en zonas donde los recursos económicos son escasos.

1.4 Antecedentes

La corrosión es uno de los problemas más importantes que afectan la durabilidad de estructuras de ferrocemento, siendo los iones cloruro y el dióxido de carbono las principales causas que propician el fenómeno de la corrosión prematura en el refuerzo de acero. Algunos de los factores que influyen en este proceso y que están profundamente relacionados con el mortero, se refieren al espesor del recubrimiento, alcalinidad, grietas y características microestructurales de la matriz cementante (Vickridge 1998, Naaman 2000, Montes et al. 2011).

Una alternativa para mejorar el mortero y evitar el ingreso de sustancias agresivas causantes del deterioro por corrosión, es utilizar materiales puzolánicos suplementarios de cemento con la finalidad de que la matriz del mortero sea más densa. Dentro de estos materiales se encuentran aquellos de origen natural, mineral y agrícola. Algunos de estos materiales actualmente han sido evaluados y empleados en la fabricación de cemento, concreto y mortero, aunque los últimos en menor proporción. Por ejemplo, estudios realizados por Vickridge et al. (1998) muestran las bondades del uso de algunas puzolanas de origen mineral en la durabilidad del ferrocemento expuesto a cloruros. Los autores sustituyeron el cemento por 10, 30 y 50% de humo de sílice, escoria granulada de alto horno y ceniza volante, respectivamente. Los resultados que obtuvieron con base en pruebas de polarización lineal e inspección microscópica muestran al humo de sílice como la mejor opción, haciendo al

mortero más impermeable, por lo cual es capaz de prevenir y disminuir la tasa de ingreso de iones cloruro u otras soluciones que causan el deterioro por corrosión.

A pesar de las bondades que proporcionan los materiales puzolánicos de origen mineral al utilizarlos como adición en concretos, en algunas regiones, por ejemplo sur-sureste de México, son poco empleados debido a su insuficiente disponibilidad. Por tanto se debe considerar el aprovechamiento de otros recursos con mayor disponibilidad, tal es el caso de aquellos materiales de origen agrícola con potencial puzolánico.

Entre algunos materiales de origen agrícola recientemente evaluados se pueden mencionar las cenizas de cáscara de arroz, coco, hoja de pino, palma y bagazo de caña, que después de darles el tratamiento óptimo (cribado, molido, calcinado, entre otros) se pueden utilizar como materiales suplementarios para disminuir la porosidad de la matriz cementante (Hernández 2010) debido a su reactividad puzolánica. Por ejemplo, se cuenta con estudios sobre cenizas de palma y cáscara de arroz en donde al utilizarlas hasta en un 20% como materiales suplementarios en mezclas de concreto, la resistencia e impermeabilidad son superiores con respecto a mezclas sin adiciones puzolánicas a edades de 28 y 90 días y relaciones agua cemento de 0.7 y 0.8 (Chindaprasirt et al. 2007).

Otro de los materiales puzolánicos de origen agrícola que podría permitir mejoras en las propiedades mecánicas y de durabilidad es la ceniza de bagazo de caña (CBC). Este material es clasificado como un sub-producto de desecho agrícola, la cual es generada por la combustión del bagazo de caña en los procesos de obtención de azúcar de caña. Se estima que en 2009 la producción global de caña de azúcar fue 1661 millones de toneladas (Somna et al. 2012) y en México; cifras de la Unión Nacional de Cañeros reportan que durante el periodo 2010-2011, la producción fue aproximadamente 4 millones de toneladas y se incineraron 12.8 millones de toneladas de bagazo (UNC 2012). Después de la quema del bagazo se obtienen alrededor de 350 mil toneladas de ceniza (Hernández 2009) que es desechada en tiraderos o márgenes de ríos.

Una de las primeras investigaciones sobre la CBC realizadas por Martirena et al (1998) indican que podría clasificarse como posible puzolana, esta clasificación dependerá de las impurezas y el grado de cristalinidad del sílice que la CBC presente al ser calcinada. La reactividad puzolánica es importante puesto que provee de compuestos cementantes concreto subsiguientemente al proceso de hidratación del cemento, esta actividad podría densificar y mejorar la microestructura de la matriz cementante, ya que se crean compuestos de silicato y aluminato de calcio hidratados similares a los productos de hidratación del cemento. Posteriormente otros investigadores (Cordeiro et al. 2009, Morales et al. 2009) se enfocaron a evaluar el potencial puzolánico, características físicas y microestructurales de la CBC con la finalidad de poder aplicarla como sustituto parcial del cemento Pórtland en mezclas de concreto.

Cordeiro et al. 2009 evaluaron la actividad puzolánica de la CBC obtenida bajo procesos de calcinación controlados. Ellos calcinaron el bagazo de caña en un horno eléctrico controlando la velocidad de calentamiento, tiempo, y temperaturas de calcinado (de 400 a 800°C). Sus resultados indican que conforme incrementa la temperatura las pérdidas por ignición disminuyen, principalmente para temperaturas mayores a 600°C. Concluyen que la CBC producida a temperatura de 600°C contiene sílice en estado amorfo, bajo contenido de carbón, la mayor área superficial y el mejor índice de actividad resistente. Estas características proveen a la CBC de una actividad puzolánica considerable de acuerdo a pruebas mecánicas y químicas que efectuaron.

Morales et al. 2009 evaluaron las características microestructurales de la CBC calcinada a temperaturas de 800 a 1000°C mediante técnicas como DRX y microscopía electrónica de transmisión (MET). La calcinación de la CBC fue bajo condiciones controladas (en horno eléctrico a $\pm 5^\circ\text{C}$ por 20 min.). Sus resultados muestran que la calcinación de la CBC a 800 y 1000 °C provee de alta actividad puzolánica y concluyen que la temperatura de calcinado influye directamente en la activación puzolánica.

Algunos autores (Ganesan et al. 2007, Morales et al. 2009, Hernández et al. 2010, Noor-ul 2011, Maldonado et al. 2012, Cordeiro et al. 2012) que han evaluado la actividad puzolánica de la CBC y la han utilizado en la fabricación de concretos y morteros, afirman que al utilizar hasta un 20% en sustitución del cemento, no se tienen efectos negativos en las propiedades mecánicas de estos. Además afirman que podría mejorar la microestructura de materiales basados en cemento y por ende el incremento de la durabilidad de estructuras.

Ganesan et al. 2007 evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del concreto sustituyendo parcialmente el cemento por CBC. Mencionan que sustituir hasta un 20% de cemento por CBC no afecta negativamente las propiedades del concreto ya que se desarrolla alta resistencia a edades tempranas, se reduce la permeabilidad del agua y la penetración y difusión de iones cloruros.

Hernández et al 2010 evaluaron el efecto de la adición de CBC y tiempo de curado en la resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico de morteros. Mencionan que la adición de 10 y 20% de CBC y tiempo de curado de 28 días incrementa la resistencia a la compresión a 28 días de edad y que el uso de CBC disminuyó la velocidad de pulso ultrasónico en tiempos de curado cortos. Encontraron que existe correlación alta entre resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico cuando la humedad de las probetas de ensaye es similar, pero cuando varía la humedad la correlación es baja. Finalmente mencionan que el efecto de la humedad juega un papel importante al momento de los ensayos de resistencia a la compresión.

Noor-ul 2011 reporta los efectos en las propiedades físicas y mecánicas del concreto adicionados con CBC. La CBC empleada fue calcinada a 600°C por una hora con lo que las pérdidas por ignición fueron menores al 4.5%. Reporta que utilizando 5, 10, 15 y 20% de CBC y conforme incrementa el tiempo de curado (0, 7 y 28 días) se incrementa la resistencia a la compresión, pero con adiciones de 25 y 30% esta disminuye. La resistencia a la tensión a 28 días de curado incrementa adicionando hasta 20% de CBC, pero decrementa con 25 y 30% de adición. Las pruebas rápidas de permeabilidad de cloruros indican que existe decremento en el ingreso de cloruros conforme se incrementa el contenido de CBC hasta el 25%, lo que no sucede con la adición del 30%. Por tanto, concluye que sustituir hasta 20% de cemento por CBC no tiene efectos negativos en las propiedades del concreto.

Maldonado et al. 2012 evaluaron el efecto de la adición de CBC en la resistencia a la compresión, microestructura y permeabilidad de morteros. Sus resultados indican que la adición de 10 y 20% de CBC incrementa la resistencia a la compresión a 28 y 90 días. Se mejora la microestructura del mortero a 28 días debido a la creación de nuevos productos cementantes, como el C-S-H y el silicoaluminato de calcio hidratado, ambos a partir de la reacción puzolánica. Y finalmente se disminuye el ingreso de cloruros en más del 50%.

Cordeiro et al. 2012 investigaron la influencia de la CBC y ceniza de cascara de arroz en mezclas de concretos y concretos de altas resistencias binarios y ternarios. Ambas cenizas fueron recolectadas en las plantas de obtención de azúcar y arroz, respectivamente, en donde se calcinaron a temperaturas entre 700 y 900°C. Posteriormente aplicaron un tratamiento de molienda. En el caso de concretos binarios con reemplazos del cemento pórtland por 20% de CBC, mencionan que se tiene incremento en la resistencia a compresión y reducción en la viscosidad plástica para ambos concretos debido al alto contenido de partículas ultra finas comparado con la referencia (concretos sin adiciones de CBC). Además mencionan que al adicionar CBC se requiere utilizar aditivo superplastificante para observar los efectos positivos de las partículas de ceniza en la reología.

Finalmente; en estudios previos a esta investigación (Hernández 2010) se evaluó el índice de actividad resistente (IAR) de la CBC con distintos tratamientos, los cuales consistieron en cribado por las tamices No 8, 100 y 200 ASTM y cribado y molido. Los IAR's obtenidos indican que la CBC tiene mayor reactividad puzolánica cuando es cribada por el tamiz No 200, así mismo al ser cribada y molida, teniendo poca diferencia de IAR's entre ambos tratamientos y superando a lo establecido en la ASTM C 618.

Hernández (2010) con base en sus resultados de IAR's y menores requerimientos de energía para la activación puzolánica de la CBC, estableció evaluar la resistencia a la compresión y penetración de iones cloruros de morteros sustituyendo 10 y 20% de cemento por CBC solamente cribada por el tamiz No. 200. Los resultados que obtuvo indican que la adición de 10% de CBC y tiempo de curado de 28 días incrementa la resistencia a la

compresión en un 3%, mientras que el 20% de CBC y 28 días disminuye la resistencia a la compresión en un 11%. En cuanto a penetración de iones cloruro encontró que la adición de CBC disminuye en más de un 50% los coeficientes de difusión de cloruros totales en tiempos de curado de 0, 7 y 28 días.

Al analizar los resultados obtenidos por [Hernández \(2010\)](#) se puede inferir que la adición de 10 y 20% de CBC cribada por el tamiz No. 200 ASTM podría mejorar la microestructura del mortero y por ende el incremento en la durabilidad de estructuras a base de mortero como el ferrocemento, objeto de estudio de la presente investigación.

1.5 Objetivos

1.5.1 General.

Evaluar el efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña en la microestructura de morteros y en la durabilidad del ferrocemento.

1.5.2 Particulares.

- I. Estudiar la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña en la resistencia a la compresión de morteros a diferentes edades.
- II. Evaluar el efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña en la microestructura de muestras de mortero a diferentes edades, para identificar los compuestos formados como resultado de la reacción puzolánica de la ceniza.
- III. Analizar el fenómeno del ligado de cloruros de la ceniza de bagazo de caña en mezclas de mortero.
- IV. Evaluar la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña y del tiempo de curado en los potenciales y densidad de corrosión del ferrocemento.
- V. Estudiar el efecto de los cambios microestructurales de morteros adicionados con ceniza de bagazo de caña en la durabilidad del ferrocemento.

1.6 Hipótesis

- I. El reemplazo del cemento Pórtland por 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña en morteros incrementa su resistencia a la compresión.
- II. El uso de 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña como sustituto parcial del cemento Pórtland mejora la microestructura de mezclas de mortero.
- III. La adición de 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña e incremento del tiempo de curado influyen en la cantidad de cloruros ligados en mezclas de morteros.
- IV. El empleo de 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña como sustituto parcial del cemento Pórtland disminuye la probabilidad y densidad de corrosión en el ferrocemento.
- V. La modificación de la microestructura del mortero por la adición de ceniza de bagazo de caña y el incremento del tiempo de curado mejora la durabilidad del ferrocemento.

CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco Conceptual

En este capítulo se describen los aspectos más relevantes acerca del cemento Portland, materiales puzolánicos, técnicas para caracterización de materiales, ferrocemento, efectos del ingreso de cloruros en el concreto armado, corrosión en concreto armado, y técnicas electroquímicas para evaluar la corrosión. Lo anterior con la finalidad de comprender los conceptos que se emplean en el presente trabajo.

2.1.1 *El cemento*

El cemento comenzó a producirse hace aproximadamente 2000 años y desde entonces ha experimentado mejoras y desarrollos considerables encaminados a contribuir al desarrollo de las civilizaciones, principalmente como materia prima en la producción del concreto para acrecentar la infraestructura, brindar confort y seguridad al ser humano. Hoy en día la producción mundial anual de cemento ha alcanzado 2.8 mil millones de toneladas y se espera que aumente a 4 millones de toneladas por año. El mayor incremento en la producción se prevé en países como China, India y regiones del Medio Oriente y África del Norte (Schneider et al. 2011).

2.1.1.1 *Definición*

El cemento hidráulico, comúnmente conocido solo como cemento, se define como un conglomerante hidráulico o bien como un material inorgánico finamente molido, el cual amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación. Una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Al ser mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece adquiriendo consistencia pétreo, denominado concreto (Mehta-Monteiro 2006, ACI 116R-00).

2.1.1.2 *Manufactura y componentes*

El cemento Portland se fabrica a partir de calizas, arcillas y esquistos que proporcionan CaO , SiO_2 y Al_2O_3 respectivamente. El proceso de manufactura consiste en que estos materiales son molidos finamente, mezclados y calcinados en hornos rotatorios a temperaturas aproximadamente de 1400°C hasta obtener el clinker. Durante el proceso de calcinación, el calcio se combina con otros componentes presentes en la mezcla para formar cuatro compuestos principales (Tabla 1): silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) y aluminoferrito tetracálcico (C_4AF), los cuales corresponden

aproximadamente al 90 % de la masa total del cemento. De estos compuestos se considera que los silicatos son los más abundantes e importantes puesto que a ellos se les atribuye el incremento de la resistencia de la pasta cementante (Neville y Brooks 1998, Estrada 2005, Kosmatka et al. 2004, Nilson 2009). Además de estos cuatro compuestos también existen otros de manera minoritaria, tales como los álcalis y sulfatos. Los iones alcalinos, como el Na^+ , y K^+ , se presentan en concentraciones del 0.3 a 1.5% y provienen de las materias primas empleadas para la producción del clinker mientras que los sulfatos provienen del yeso adicionado o del combustible utilizado para el funcionamiento del horno (Moragues 2012).

Cada compuesto proporciona diversas propiedades físico-mecánicas de acuerdo a su composición química (Tablas 2 y 3), las cuales proporcionan diversas ventajas y dan surgimiento a diversos tipos de cemento que se adapten a las distintas necesidades de construcción (Tabla 2)

Tabla 1: Compuestos principales del cemento Pórtland

Fuente: Kosmatka et al. 2004.

Nombre compuesto	Composición química	Abreviatura	% en el cemento
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50-70
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15-30
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	5-10
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5-15

Tabla 2: Propiedades físico-mecánicas de los compuestos principales del cemento

Fuente: Estrada et al. 2005.

Compuesto	Propiedades físico-mecánicas
C_3S	Presenta endurecimiento rápido y alto calor de hidratación.
C_2S	Presenta endurecimiento lento pero de crecimiento sostenido y bajo calor de hidratación.
C_3A	En cantidades altas presenta endurecimiento rápido, fraguado rápido, alto calor de hidratación y tendencia al agrietamiento y fisuración, además de sensibilidad a los sulfuros
C_4AF	Presenta endurecimiento lento.

Tabla 3: Composición química de las principales fases del cemento

Fuente: Estrada et al. 2005, obtenido de ASTM C 150.

Compuesto	% CaO	% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3
Silicato tricálcico	73.7	26.3	0	0
Silicato Dicálcico	64.1	35.9	0	0
Aluminato tricálcico	62.3	0	37.7	0
Aluminoferrito tetracálcico	46.1	0	21	32.9

Finalmente el clinker se deja enfriar para posteriormente molerlo adicionando yeso (entre el 4 y 6% como fuente de sulfato de calcio) hasta lograr la finura requerida y comercializarlo como cemento Pórtland (Neville y Brooks 1998, Mehta-Monteiro 2006, Nilson 2009).

2.1.1.3 Hidratación del cemento Pórtland

El proceso de hidratación del cemento es la combinación de todas las reacciones físico-químicas secuenciales y simultáneas entre las partículas minerales del cemento (C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF) con el agua, yeso y otros aditivos (Giraldo y Tobon 2006, Stark 2011). Además deben considerarse aspectos como la aglomeración, adsorción, evaporación y liberación de energía térmica (Stark 2011), los cuales podrían afectar dicho proceso.

Para que ocurra el proceso de hidratación del cemento, se requiere aproximadamente de un 40 % de agua en relaciones agua/materiales cementantes de 0.40, si la relación es superior, el agua restante permanece en los poros capilares o se evapora. En el caso de que la relación agua/ materiales cementantes sea menor a 0.40, parte del cemento permanecerá anhídrido (Kosmatka et al. 2004).

Durante el proceso de hidratación se pueden distinguir 5 etapas (Figura 1) (UNIOVI 2012, Moragues 2012):

I.- Periodo de preinducción: Ocurre entre los 0 a 30 minutos después del contacto del cemento con el agua, es un periodo de hidratación inicial rápido donde ocurre disolución rápida de iones y se liberan grandes cantidades de calor.

II.- Periodo de inducción (durmiente): Comienza dos horas después de iniciado el proceso de hidratación, en este periodo ocurre disolución lenta de iones y formación de C-S-H temprano.

III.- Periodo de aceleración: Es la etapa donde inicia el fraguado inicial y ocurre aproximadamente a 7 horas de inicio del proceso de hidratación, se caracteriza por el rápido crecimiento permanente de productos de hidratación.

IV.- Periodo de desaceleración: Ocurre transcurridas 24 horas, en esta etapa disminuye la tasa de hidratación del cemento a medida que se hidrata, teniendo moderado crecimiento de los productos cementantes y desarrollo de la microestructura.

V.- Periodo de difusión estable: La hidratación ocurren lentamente hasta cumplir 40 horas, ya que las reacciones se limitan a las tasas de difusión de los iones dentro de la red de poros.

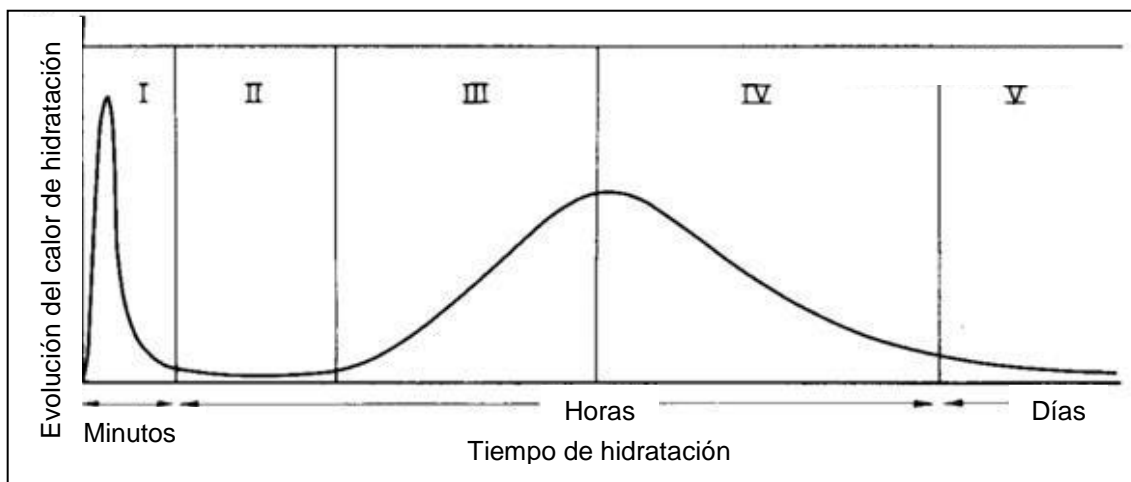


Figura 1: Etapas de hidratación del cemento.
Fuente: UNIOVI 2012.

Los principales productos de la hidratación del cemento son los silicatos hidratados de calcio (C-S-H), el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), y los sulfoaluminatos hidratados de calcio (Kosmatka et al. 2004, Mehta-Monteiro 2006). Los C-S-H e hidróxidos de calcio se obtienen a partir de la hidratación de los silicatos de calcio C_3S y C_2S , mientras que el C_3A reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado, y el C_4AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado (Kosmatka et al. 2004, Giraldo y Tobon 2006).

El C-S-H es el principal responsable del fraguado del cemento y del desarrollo de la resistencia en pastas, morteros o concretos (Stark 2011), el hidróxido de calcio tiene efectos positivos puesto que conserva el pH de la pasta en valores entre 12 y 13 actuando como una reserva alcalina manteniendo al concreto protegido de corrosión electroquímica (Giraldo y Tobon 2006).

La evolución de los productos de hidratación del cemento está ligada a la porosidad del concreto, en la Figura 2 se aprecia que a mayor edad de hidratación dichos productos incrementan y la porosidad disminuye, puesto que ocupan el espacio vacío de los poros dejados por el agua.

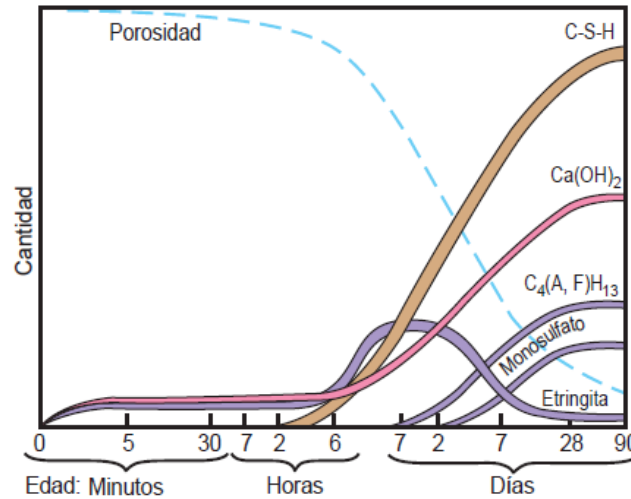


Figura 2: Volúmenes representativos de los compuestos principales en la microestructura de pastas de cemento Pórtland en procesos de hidratación

Fuente: Kosmatka et al. 2004.

2.1.1.4 Tipos y clases de cemento Pórtland

En México, la clasificación del cemento Pórtland está determinada y controlada por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (ONNCCE), la cual clasifica a los cementos mediante la norma NMX-C-414-ONNCCE y establece 6 tipos de cementos de acuerdo a su clase resistente y algunas características especiales (Tabla 4):

Tabla 4: Clasificación del cemento de acuerdo a la ONNCCE

Tipo	Denominación	De acuerdo a su Clase resistente	De acuerdo a sus Características especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS
CPP	Cemento Pórtland Pozolánico	30	Resistente a los Sulfatos
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno	30 R	BRA
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	Baja Reactividad Alcali Agregado
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 R	BCH
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno		Bajo calor de hidratación
			B
			Blanco

En cuanto a la clasificación por clase resistente, se entiende por resistencia normal de un cemento a la resistencia mínima a la compresión en cierto número de días en N/mm^2 por lo que:

- Una clasificación de 20: significa que un cemento alcanza una resistencia entre 204 y 408 kg/cm², a los 28 días.
- Una clasificación de 30: significa que un cemento alcanza una resistencia entre 310 y 520 kg/cm², a los 28 días.
- Una clasificación de 40: significa que un cemento alcanza una resistencia mínima de 408 kg/cm², a los 28 días.

En cementos de resistencia inicial o temprana, o resistencia a la compresión de 3 días (30R) se espera una resistencia mínima de más de 204 kg/cm².

La calidad y composición que deben cumplir todos los cementos Pórtland en México también es regulada por el ONNCCE y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a través de las normas NMX-C-414-ONNCCE y N-CTM-2-02-001/02 respectivamente. En la Tabla 5 se muestra la composición de los cementos Portland que estipula la norma N-CTM-2-02-001/02

Tabla 5: Composición de los cementos Portland según la norma N-CTM-2-02-001/02

Cemento Portland		Clinker Portland + Sulfato de calcio	Componentes principales (% en masa)				Componentes minoritarios**
Tipo	Denominación		Puzolanas*	Escoria granulada de alto horno	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95 – 100	-	-	-	-	0 – 5
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	50 – 94	6 – 50	-	-	-	0 – 5
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno	40 – 94	-	6 – 60	-	-	0 – 5
CPC** *	Cemento Pórtland compuesto	50 – 94	6 – 35	6 – 35	1 – 10	6 – 35	0 – 5
CPS	Cemento Pórtland con humo de sílice	90 – 99	-	-	1 – 10	-	0 – 5
CEG	Cemento Pórtland con escoria de alto horno	20 – 39	-	61 – 80	-	-	0 – 5

* Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes.

** Los componentes minoritarios pueden ser uno más de los componentes principales, salvo que estén incluidos ya como tales en el cemento.

*** El cemento Pórtland compuesto contendrá dos componentes principales como mínimo, excepto cuando se trate de caliza, la que puede ser el único componente principal.

2.1.2 Materiales puzolánicos

Los materiales puzolánicos se consideran como materiales alternativos al cemento Pórtland puesto que se pueden utilizar como materias primas en la fabricación este o como reemplazo total o parcial en mezclas de concreto debido a sus altos contenidos de SiO_2 . De tal manera que el utilizar estos materiales, ayuda a mejorar aspectos de la microestructura de los concretos y por ende a disminuir deterioro como por ejemplo: por la corrosión.

2.1.2.1 Definición

El término puzolana proviene de una ceniza volcánica extraída de Pozzuoli, un pueblo de Nápoles, Italia, como resultado de la erupción volcánica del Monte Vesuvio, en 79 DC (Kosmatka et al. 2004, Valdez et al. 2004). Se define como puzolana a un material silicio o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante, pero al molerla finamente y adicionándole agua reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Pórtland para formar compuestos con características cementantes (ACI 116R-00), tales como el silicato hidratado de calcio (C-S-H) y silicoaluminatos hidratados (C-A-H) que son insolubles al agua y tienen carácter de gel. Estos compuestos aportan mayor resistencia a compresión, entre otros (Lorenzo 1993, Giraldo y Tobon 2006, Stark 2011).

2.1.2.2 Clasificación

De acuerdo a su origen los materiales puzolánicos se pueden clasificar en tres grupos: *naturales*, como el caolín y el suelo lacustre, los cuales no necesitan algún tratamiento antes de ser empleados; *minerales*, como la ceniza volante y humo de sílice obtenidos de procesos químicos de la industria manufacturera; y *agrícolas*, como cenizas de cáscara de arroz, coco y bagazo de caña provenientes de desechos de la industria agrícola.

La norma ASTM C 618 clasifica a los materiales puzolánicos en tres distintas clases: N, F y C. Aquellos con clasificación N corresponden a cenizas naturales. Los de clase F y C corresponden a cenizas volantes, las CV clase F normalmente son producidas por calcinación del carbón bituminoso o antracitas y las CV clase C se obtienen a partir del carbón subbituminoso o lignito. Algunos parámetros importantes para esta clasificación son: el contenido de sílice y trióxido sulfúrico, el contenido de humedad, las pérdidas por ignición y la finura. En los siguientes apartados se describen las características de la ceniza volante (CV) y de la ceniza de bagazo de caña (CBC), por ser de interés en la presente investigación.

2.1.2.3 Ceniza volante (CV)

La ceniza volante es un material puzolánico mineral compuesto de pequeñas partículas esféricas de aluminosilicato (Figura 3), en ocasiones se presentan como cenósferas huecas o en forma de plenósferas que son esferas que contienen esferas de menor tamaño en su interior (ACI committe 232). La CV básicamente es un vidrio de silicato que contiene sílice, aluminio, hierro y calcio y en menor proporción magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Tiene una masa específica que varía entre 1.9 a 2.8, es de coloración gris o marrón es abrasivo y alcalino (Kosmatka et al. 2004, Jala y Dinesh 2006, Ahmaruzzaman 2010), tiene un área superficial generalmente entre 300 y 500 m²/kg y un tamaño promedio menor a 75µm (Ahmaruzzaman 2010) oscilando típicamente entre los 20 micrometros y solo del 10 al 30% es menor a 45µm (Kosmatka et al. 2004).

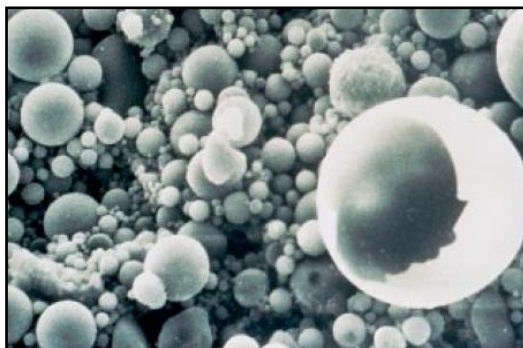


Figura 3: Micrografía de ceniza volante
Fuente: Kosmatka et al. 2004

La CV representa entre el 75 y 80% del total de cenizas de carbón producidas a partir de la combustión del carbón en centrales térmicas y obtenidas por diversos métodos como por ejemplo precipitadores electrostáticos (Jala y Dinesh 2006, Chindaprasirt P, et al. 2007, Kosmatka et al. 2004, Ahmaruzzaman 2010). Actualmente se dispone de aproximadamente 500 millones de toneladas de CV (Ahmaruzzaman 2010), por lo que se ha convertido en un material muy utilizado en la industria de la construcción, tanto en la fabricación de cementos como en la elaboración de concretos.

La norma ASTM C 618 – 05 clasifica a la ceniza volante en dos clases: F o C. La CV clase F se produce por la quema de carbón bituminoso o antracita, esta ceniza solo tiene propiedades puzolánicas. Es normalmente ceniza con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO) y contenido de carbón menor a 5% teniendo en algunas ocasiones hasta el 10% (Kosmatka et al. 2004). La CV clase C se obtiene por la quema de carbón de lignito o sub-bituminoso; esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas también tiene propiedades cementantes y se caracteriza por tener alto contenido de calcio (del 10 al 30%) y contenido de carbón menor al 2% (Kosmatka et al. 2004).

Al emplear la ceniza volante como adición en concretos, cambian las condiciones de la matriz conglomerante y por consecuencia el desarrollo de productos cementantes, por tanto también cambia la microestructura. A edades tempranas (entre 0 y 28 días) existen reacciones puzolánicas incipientes, por lo que la CV actúa como un material inerte, mientras que a edades tardías (a partir de 28 días aproximadamente) debido a la evolución la actividad puzolánica se produce un refinamiento de la estructura porosa y aumento de la densidad de la matriz cementante, por ende se tiene incremento de la resistencia mecánica y mayor resistencia ante el ingreso de agentes agresivos como los iones cloruro (Chindaprasirt P et al 2007). Al refinarse la estructura porosa se incrementa la resistencia mecánica, lo cual infiere mejoras de la microestructura que podrían incrementar la durabilidad (Lorenzo 1993).

2.1.2.4 Ceniza de bagazo de caña (CBC)

La ceniza de bagazo de caña es un sub-producto de desecho agrícola obtenido por la calcinación del bagazo de caña en la industria azucarera y del alcohol. En México; se estima que producto de la obtención del azúcar de caña se generan aproximadamente 350 mil toneladas de CBC anuales (Hernández 2009), la cual en su mayoría es desechada a la intemperie ocasionando contaminación en suelos y ríos.

Uno de los primeros estudios acerca de la CBC realizados por Martirena et al. 1998, indica que la CBC se compone principalmente por sílice y óxidos de calcio, aluminio y hierro. Además afirman que la CBC se presenta como una mezcla heterogénea conformada por partículas con estructura porosa (Figura 4A). Posteriormente otros autores (Cordeiro et al. 2009) mostraron que la CBC también se conforma de partículas de forma prismática bien definidas compuestas principalmente por sílice (Figura 4B).

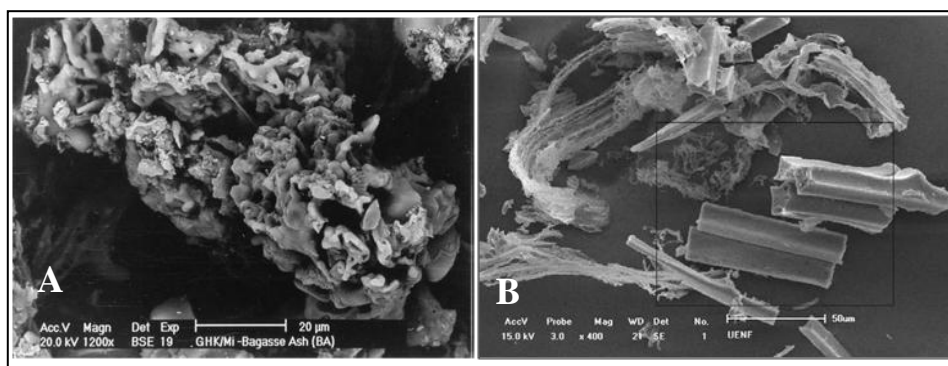


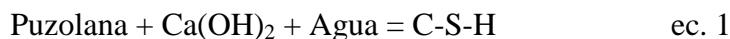
Figura 4: Micrograffias de CBC A) mezcla heterogénea y B) detalle de partícula prismática
Fuente: A) Martirena et al 1998 y B) Cordeiro et al 2009

Diversos autores (Cordeiro et al. 2008) mencionan que la CBC muestra alta actividad puzolánica (dependiendo de las condiciones de calcinado) para poder ser utilizada como

adición en la producción de cementos y como sustituto parcial del cemento para fabricar concretos y morteros (Ganesan et al. 2007).

2.1.2.5 Reacción puzolánica

Se conoce como reacción puzolánica a aquella que ocurre entre los minerales de sílice, aluminio y fierro provenientes de las puzolanas con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento Portland y agua. De esta manera se generan nuevos productos cementantes similares a los obtenidos durante la hidratación del cemento, entre ellos los silicatos hidratados de calcio (Escalante 2002) (ec.1). Estos nuevos productos llenan los espacios que anteriormente estaban ocupados por agua antes de la hidratación del cemento, de esta manera se reduce la porosidad del sistema cementante. Al reducirse la porosidad con productos cementantes resultantes de la reacción puzolánica se tienen mejoras en las propiedades mecánicas.



2.1.2.6 Índice de Actividad Resistente (IAR)

El índice de actividad resistente es un estándar (ASTM C 311) que determina la aceptación o rechazo de un material puzolánico usado como adición en mezclas de concretos. La aceptación depende del nivel de desarrollo de resistencia a compresión de las mezclas con adiciones puzolánicas respecto a una mezcla control (sin adiciones) a edades de 7 o 28 días.

2.1.2.7 Beneficios y desventajas del uso de materiales puzolánicos en concretos

El uso de puzolanas como adiciones minerales en concretos y morteros puede tener beneficios como: alta resistencia mecánica a edades tardías, alta resistencia a ataques de agentes agresivos causantes de deterioro de las estructuras, economía al reducir el uso del cemento, reducción en la generación del calor de hidratación, disminución del riesgo de daños ocasionados por reacción álcali-agregado y sulfatos, y mejora de la trabajabilidad, entre otros. (ACI 207.1R – 96). Además estas adiciones contribuyen a la disminución de emisiones de CO₂ debido a que se utiliza menos cemento (Ghrici 2007, Hernández et al. 2010), cuyo proceso de fabricación es más contaminante. Las puzolanas también proporcionan mejoras en la matriz cementante haciéndola más impermeable y esto puede incrementar la durabilidad de estructuras.

Sin embargo, como en el caso de otros materiales empleados en la manufactura de concretos y morteros (cemento Portland, polímeros, agregados), el uso de las puzolanas también puede tener ciertas desventajas como: baja resistencia mecánica a edades tempranas, pérdida en la trabajabilidad de las mezclas y efectos negativos en las propiedades mecánicas,

microestructurales y de durabilidad de los concretos cuando tienen altos contenidos de carbón. De las cuales algunas de ellas se pueden evitar con pretratamientos que permitan maximizar la reactividad puzolánica del material, con la combinación de dos o más puzolanas o con el uso de aditivos.

2.1.3 Técnicas para caracterización materiales

Uno de los aspectos más importante en los estudios de durabilidad de materiales es evaluar sus propiedades y características a nivel microestructural, con la finalidad de comprender diversos comportamientos físicos ocasionados por su producción y por los distintos tratamientos recibidos para su utilización en aplicaciones específicas. Para lograrlo existen diversos instrumentos y técnicas que son capaces de revelar la información sobre la constitución mineral y estructura interna de los materiales a escala cuantificable.

Entre las características principales de los materiales que se pueden determinar a nivel microestructural se encuentran: distribución de tamaños de partículas, área superficial, características en las interfases de los materiales, entre otras (Ramachandran y Beaudoin 2001). Para ello existen diversas técnicas. De entre ellas las más comúnmente utilizadas, conocidas como técnicas convencionales por su costo relativamente bajo y fácil interpretación son: difracción de rayos láser, fisisorción de gases, difracción de rayos X (DRX), y microscopía electrónica de barrido (MEB) con microanálisis elemental por rayos X (EDS), entre otras (Melgarejo et al. 2010).

2.1.3.1 Difracción Láser

Existen diversos métodos para obtener la distribución de tamaños de partículas de un material, entre ellos se encuentran: el tamizado, sedimentación gravitacional, Grinómetro Hegman, microscopía, conductividad eléctrica, métodos acústicos y difracción láser, siendo este último el más representativo (Jillavenkatesa et al. 2001).

La técnica de difracción de rayos láser es comúnmente empleada para determinar la distribución de tamaños de partículas de los materiales. Esta distribución es uno de los parámetros más importantes en la elaboración de materiales cerámicos, puesto que tiene efectos significativos en la resistencia mecánica, densidad, propiedades eléctricas y térmicas del objeto terminado (Jillavenkatesa et al. 2001). Un ejemplo es la manufactura del cemento Pórtland, la cual depende de muchos factores incluyendo la composición química de los materiales de origen, temperaturas de obtención y tamaños de partículas. Este último puede afectar la eficiencia de la calidad del producto final obtenido durante la molienda (Plantz 2008). Cuando el cemento es demasiado fino puede reaccionar rápidamente causando que la evolución del calor de hidratación sea excesiva y por lo tanto también afecta la expansión del sistema cemento-concreto, el cual al enfriarse puede agrietarse y perder resistencia. Por el

contrario, si las partículas de cemento son demasiado grandes no se tiene suficiente generación de calor de hidratación, lo que puede influir en las reacciones químicas en el proceso de fraguado (Plantz 2008).

La técnica de difracción de rayos láser radica en que las partículas dispersan en todas direcciones con un patrón de intensidad, el cual es dependiente del tamaño de la partícula.

Un equipo de difracción láser se compone de una fuente de luz láser de bajo consumo de energía (aproximadamente 10 mW con helio y neón), elementos ópticos para procesar el haz incidente, una celda de muestras donde se introduce el material a evaluar (Figura 5), algunas de estas celdas están equipadas con agitadores o ultrasonido para evitar la aglomeración de partículas puesto que los instrumentos de difracción láser no distinguen entre polvo y aglomerados, las celdas también poseen sistemas de bombeo para mantener la muestra en circulación.

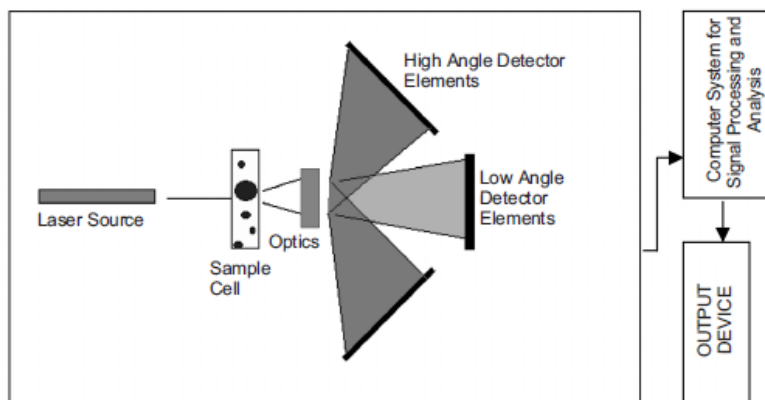


Figura 5: Diagrama esquemático de los componentes típicos de un instrumento de difracción de rayos láser
Fuente: Jillavenkatesa et al. 2001

2.1.3.2 Adsorción física de gases

El tamaño y calidad de superficie son los dos parámetros más importantes de los materiales sólidos y hacen referencia al área superficial que tiene un material para reaccionar. Estos dos parámetros son afectados por la cristalografía y propiedades físicas y químicas del material (Ramachandran y Beaudoin 2001, Flores 2009).

Se define como área superficial al área de superficie por unidad de masa, incluyendo las imperfecciones del material, generalmente se expresa en m^2/g . Esta área depende del tamaño, forma e imperfecciones de la partícula o defectos en la superficie ocasionados durante la producción del material (Ramachandran y Beaudoin 2001). En el caso de cementos o materiales puzolánicos para la fabricación de concreto y mortero, el área superficial es de

gran importancia puesto que afecta la tasa o velocidad de densificación de la matriz cementante, influyendo tanto en propiedades físicas como en propiedades de durabilidad.

Los dos métodos más empleados para determinar al área superficial en cementos y materiales con propiedades puzolánicas son permeabilidad al aire por el método Blaine y adsorción (fisorción) física de gases por el método BET (Brunauer-Emmet-Teller). El primero es recomendable para cementos y el segundo método para otros materiales con propiedades puzolánicas como la ceniza volante y el humo de sílice, entre otros (Ramachandran y Beaudoin 2001, Flores 2009).

El método BET consiste en la determinación gravimétrica de la presión relativa de un gas (comúnmente nitrógeno) y el volumen del gas adsorbido sobre la superficie sólida del material en estudio (Ramachandran y Beaudoin 2001, Lombardi et al. 2001).

2.1.3.3 Difracción de rayos X (DRX)

Los rayos X son una radiación electromagnética que tienen elevada energía y corta longitud de onda, del orden de los espacios interatómicos de los sólidos. Este fenómeno ocurre cuando una onda encuentra una serie de obstáculos capaces de dispersarla, estos obstáculos están separados por distancias comparables en magnitud a la longitud de onda, por tanto se puede afirmar que la difracción es consecuencia de relaciones entre fases específicas establecidas entre dos o más ondas dispersas por los obstáculos. Gran parte del conocimiento sobre la disposición atómica y molecular de los sólidos son resultado de las investigaciones hechas mediante la técnica de DRX, estos tienen gran importancia en el desarrollo de nuevos materiales.

La difracción de rayos X es una técnica que consiste en pasar un haz de rayos X monocromático a través de un cristal del objeto en estudio. El haz incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos de un cristal y por difracción, dando lugar a un patrón de intensidades que pueden interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal aplicando la ley de Bragg, la cual relaciona la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado (Ramachandran y Beaudoin 2001, Donald 1998).

Los resultados de la difracción de rayos X se presentan en un difractograma, el cual al ser interpretado aporta información sobre la estructura cristalina de un material, el tamaño y la geometría de la celda unitaria a través de los picos de difracción y la disposición de los átomos en la celda unitaria deduciéndolo a partir de la intensidad relativa de estos picos de cada compuesto mineral (Donald 1998, William 2009). En el ámbito de la construcción, la técnica de DRX se puede aplicar para identificar las fases cristalinas de materiales como el cemento

Pórtland, materiales puzolánicos, pastas, mortero y concretos (Ramachandran y Beaudoin 2001, Ashraf et al. 2009).

2.1.2.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Esta técnica es de las más útiles e importantes en la ciencia e ingeniería de materiales, es utilizada para conocer las características microscópicas de los materiales. La técnica consiste en que un microscopio electrónico de barrido (Figura 6) dirige un haz de electrones por medio de un cañón de electrones en una columna de vacío, dicho haz es dirigido y enfocado a un punto de la superficie de una muestra conductora, generalmente cubierta con oro u otro metal pesado para lograr una mayor resolución, después se recoge y muestran las señales electrónicas emitidas por la muestra en un tubo de rayos catódicos en forma de imágenes, mismas que pueden fotografiarse y por medio de ellas se representan las características superficiales de la muestra (William y Javad 2006, William D. 2009; Melgarejo et al. 2010).

Los modos de imagen comúnmente producidas por el MEB son por electrones secundarios y por electrones retrodispersados (Ramachandran y Beaudoin 2001). Las imágenes son monocromáticas ya que reflejan el flujo de electrones o rayos X que resulta de la interacción del haz con la muestra (FHWA 2006).

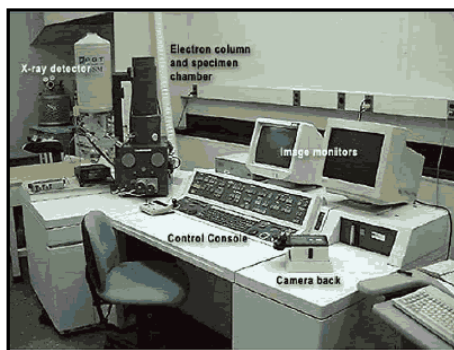


Figura 6: Microscopio electrónico de Barrido
Fuente: FHWA. 2006

Los electrones secundarios (ES) son electrones de baja energía (generalmente menor a 10 electrovoltios siendo la máxima 50 eV) producidos como consecuencia de una colisión inelástica de un haz de electrones primario con un electrón de átomo de la muestra (Ramachandran y Beaudoin 2001, Hawkes y Spence 2007, Melgarejo et al. 2010). La profundidad máxima de los ES se encuentra alrededor de 1 nanómetro (nm) en metales y 10 nm en materiales aislantes y puesto que su consumo de energía es bajo, se pueden obtener imágenes topográficas detalladas de la superficie de una muestra fracturada (Figura 7A) para utilizarlas en el estudio del tamaño de partícula, forma, rugosidad de la superficie y superficies de fractura. Por ejemplo, en las imágenes de superficies de fractura por ES de pastas de

cemento hidratado se muestra al silicato hidratado de calcio como una estructura laminar parecida al papel aluminio entre otros compuestos. Aunque las imágenes por ES son útiles para examinar la textura de superficies en pastas cementantes endurecidas se sabe que a medida que la pasta madura, el relleno de los vacíos elimina los cristales bien definidos que pueden ser observables a edades tempranas de endurecimiento, en este caso, imágenes por electrones retrodispersados y patrones de rayos X son de mayor utilidad para el análisis de microestructuras (FHWA 2006).

A diferencia de los ES, los electrones retrodispersados (ER) son electrones de alta energía (por lo general mayor de 50 electrovoltios) que han sido objeto de múltiples eventos de dispersión elástica dentro de una muestra plana o pulida, el contraste de la imagen con ER se genera por la composición de las distintas fases en relación con su número atómico promedio y es observado por el brillo diferencial de la imagen laminar (FHWA 2006, Hawkes y Spence 2007, Melgarejo et al. 2010) (Figura 7B). Los resultados revelan una gran interacción por volumen pero muestran una menor resolución espacial en comparación con imágenes de ES (FHWA 2006). Por ejemplo, en el cemento la fase aluminoferrita es más brillante que el aluminato tricálcico debido a la presencia de hierro cuyo número atómico es mayor que el del calcio o del aluminio. En mezclas de concreto las partículas del cemento sin hidratar son más brillantes en comparación que las de C-S-H (Ramachandran y Beaudoin 2001).

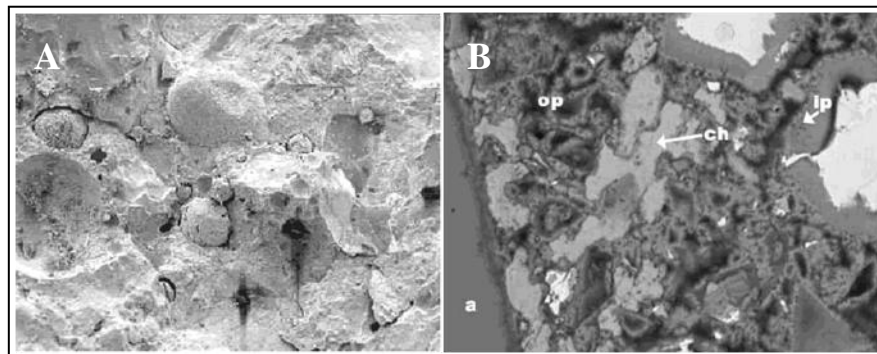


Figura 7: Imágenes por microscopía electrónica de barrido

A) Electrones secundarios y B) Electrones retrodispersados, a = agregado, ch = hidróxido de calcio, ip = silicato de calcio hidratado (productos interiores) op = silicato hidratado de calcio (productos exteriores)

Fuente: FHWA 2006

2.1.3.5 Microanálisis elemental por rayos X (Espectroscopía por dispersión de energía, EDS)

Durante las observaciones por medio de MEB es común el empleo de técnicas microanalíticas basadas en la detección de rayos X para analizar la composición del material (Melgarejo et al. 2010). El principio de la detección de rayos X por dispersión de energía consiste en que una muestra es bombardeada por electrones de alta energía, dichos electrones reemplazan a los electrones superficiales de la muestra (FHWA 2006) obteniendo así un

patrón de difracción que permite identificar cada elemento de la muestra analizada. Las técnicas más comunes de microanálisis por detección de rayos X son: espectroscopía por dispersión de energía (EDS), análisis por espectrometría de longitud de onda dispersa (WDS), análisis de elementos locales y difracción de electrones retrodispersados (EBSD) para caracterización cristalográfica (Hawkes y Spence 2007).

De las tres técnicas mencionadas el microanálisis por EDS es el más empleado en MEB. Este se basa en la detección de los rayos X emitidos por la muestra y que cada elemento tiene una emisión característica, para ello se utiliza un detector convencional hecho de litio-silicio que mantiene la muestra en estado criogénico. El microanálisis se puede realizar de forma a) puntual, para explorar un área en particular de interés o para el mapeo elemental y estudiar la distribución de la densidad de los diferentes elementos en una fase o región b) por área, para analizar la composición global de una región c) lineal, para determinar la variación en la concentración de uno o varios elementos a lo largo de una línea (Ramachandran y Beaudoin 2001).

2.1.4 El Ferrocemento

El ferrocemento es un material de construcción relativamente nuevo, el cual consiste en elementos estructurales esbeltos de rápida construcción y menores costos en comparación con estructuras de concreto reforzado.

2.1.4.1 Definición e historia

El ferrocemento es un tipo de concreto armado formado por mortero de arena reforzado con mallas de distintos diámetros subdivididas y distribuidas en la masa de mortero con espesores de 1 a 5cm (Wainshtok 1998, Bhikshma et al. 2011, Ramli 2012). Se considera como una forma altamente versátil que tiene ventajas como moldeabilidad, es decir, se puede construir en una sola pieza por lo que tiene buena elasticidad y resistencia al agrietamiento y a la corrosión (Paul y Pama 1991, Ramli 2012).

El comité 549 del ACI (American Concrete Institute) define al ferrocemento como un tipo de construcción de concreto reforzado de pared delgada donde usualmente el cemento hidráulico se refuerza con capas de mallas de diámetro constante y relativamente pequeño, las mallas de refuerzo pueden ser de material metálico u otro material sustituible.

El ferrocemento surge en el año 1848 cuando Joseph Louis Lambot construyó un bote de este material y fue exhibido en Paris (Wainshtok 1998, Naaman 2000). Pero fue a partir la década de los 40's del siglo pasado cuando se retoma y aplica a la construcción naval, en obras de ingeniería y arquitectura por su rapidez constructiva y belleza (Wainshtok 1998, Naaman

2000). Por ejemplo, en el año de 1958 se construyó en la ex Unión Soviética la primera estructura de ferrocemento con techo de bóveda sobre un centro comercial (Pama-Paul 1991).

Actualmente el ferrocemento ha incrementado su campo de aplicación debido a sus ventajas como la facilidad de construcción, el bajo costo y poco mantenimiento (Wainshtok 1998), teniendo más estructuras con este tipo de material en diferentes países, principalmente en desarrollo. En México se han construido viviendas prefabricadas de ferrocemento (Olvera et al. 1998), casas habitación, paredes y techumbres para edificios, tanques de almacenamiento, canales para abastecer agua (Olvera 2002) y micropresas de ferrocemento (Montes et al. 2011). Desafortunadamente en algunas estructuras de ferrocemento existen problemas de durabilidad atribuidas a diversas causas, por ejemplo; se tienen evidencias del deterioro por corrosión en micropresas de ferrocemento causadas principalmente por el espesor de los elementos estructurales, reducido recubrimiento y propiedades, tales como la porosidad de la matriz cementante (Montes et al. 2011).

2.1.4.2 Componentes del ferrocemento

El ferrocemento se compone básicamente de mortero y acero de refuerzo, siendo el mortero una mezcla de agua, arena y cemento, aunque actualmente se le agregan aditivos químicos y minerales. El comité ACI 116R-00 define el mortero como una mezcla de pasta de cemento y agregado fino.

A continuación se describen algunos detalles de cada componente del ferrocemento, incluyendo aditivos:

Agua: El agua debe ser potable, es decir ausente de materias orgánicas y sustancias nocivas que afecten las propiedades físico-químicas del mortero o que causen corrosión en el refuerzo.

Agregados: Los agregados se encuentran dispersos en toda la masa de mortero y ocupan de 60 al 70% de volumen del mortero (Paul y Pama 1991). Por tanto deben ser resistentes, impermeables y capaces de producir una adecuada trabajabilidad para lograr una buena penetración en las mallas de refuerzo en relaciones agua/cementantes mínimas (Wainshtok 1998).

Cemento: Generalmente se utilizan cementos Portland ordinario, puzolánicos, compuestos y resistentes a sulfatos. Sin embargo, también se puede sustituir un porcentaje del cemento por materiales con propiedades puzolánicas que ayuden a mejorar la matriz cementante.

Refuerzo: El refuerzo tienen como función soportar el mortero sin fraguar, dar forma a la estructura y absorber los esfuerzos de flexión que el mortero es incapaz de soportar. El refuerzo se puede clasificar en dos clases: armadura difusa y armadura discreta. La primera

clase está constituida por telas de malla de alambres de diámetro pequeño y distintas formas de aproximadamente 1.4 a 5.5mm. La segunda clase está constituida de alambres o barras de acero con diámetro pequeño y tubos de acero (Wainshtok 1998, Paul y Pama 1991).

Aditivos químicos: Los aditivos generalmente se utilizan para mejorar el comportamiento de la masa de mortero. En la actualidad existe una gama diversa y para diferentes usos, tales como los acelerantes o retardantes de fraguado y endurecimiento para mejorar la trabajabilidad, resistencia y durabilidad, así como aditivos para disminuir la permeabilidad.

Puzolana: El uso de puzolanas en el ferrocemento puede contribuir a mejorar la matriz cementante y por ende incrementar la durabilidad. Actualmente existen diversos tipos de puzolanas (ver sección 2.1.2) que comúnmente se utilizan como sustitutos parciales del cemento.

2.1.4.3 Características del ferrocemento

El ferrocemento es un material tecnológica y ambientalmente aceptable debido a sus diversas características, tales como:

- Facilidad de construcción y reparación
- Bajo costo de producción
- Poco mantenimiento durante su vida útil
- Resistencia al agrietamiento debido a la distribución del refuerzo
- Resistente a agentes mecánicos; por su flexibilidad puede resistir impactos sin destruirse (Wainshtok 1998).

2.1.4.4 Aplicaciones del ferrocemento

En el quinto simposio internacional del ferrocemento celebrado en 1994, Pama (1994) menciona que el ferrocemento se está convirtiendo en una forma atractiva de construcción de viviendas, particularmente en elementos como pisos, techos, losas y muros. Otras aplicaciones mayores incluyen sistemas de irrigación, tanques de almacenamientos de agua, construcción de embarcaciones menores, reparación y reforzamiento de estructuras de concreto e incluso fabricación de elementos prefabricados. Todas debido a su bajo costo de construcción, resistencia a la intemperie y durabilidad (Pama 1994).

Algunas otras aplicaciones del ferrocemento tales como construcción de albercas (Rivas y Moreno 1994), edificios de viviendas (Rivas et. al 1994, Escobar y Wainshtok 1998), el prototipo experimental de un auditorio expuesto en una región sísmica del estado de Oaxaca diseñado y construido por Fernández y Montes (1998), o estructuras intactas de ferrocemento

expuestas por Waldschlagel et al (1998), muestran la versatilidad y empleo de estructuras construidas a base de este material.

2.1.4.5 Propiedades mecánicas

El ferrocemento tiene propiedades mecánicas y de durabilidad relativamente mejores que las del concreto ordinario dentro de los límites de carga determinados, puesto que se comporta como un material elástico homogéneo y estos límites son más amplios que para el concreto. La distribución uniforme y cantidad en volumen que ocupa el refuerzo de acero da como resultado una mayor resistencia al agrietamiento, a la propagación de grietas y mayor carga de rotura, teniendo como resultado alta resistencia a la tensión (Wainshtok 1998, Pama 1994).

2.1.4.6.1 Compresión

Las propiedades de compresión del ferrocemento dependen y son controladas en gran medida por las características de la matriz de mortero en proporción directa al área de su sección transversal (Wainshtok 1998), por lo tanto parámetros como la relación agua/materiales cementantes que sirven para controlar la resistencia a compresión en concretos, son igualmente importantes para el ferrocemento. Los valores de resistencia a compresión típicos del ferrocemento oscilan entre 30 y 70 MPa comparables con los de concreto ordinario. Sin embargo, resultados obtenidos de pruebas en prismas de ferrocemento muestran bastante dispersión, algunas causas son el tipo, orientación y la cantidad de mallas de refuerzo (Naaman 2000).

2.1.4.6.2 Flexión

La resistencia a la flexión del ferrocemento no solamente depende de la superficie específica, sino también del tipo de malla, su orientación y su geometría intrínseca así como la presencia o no de acero de esqueleto como el alambón o barras de acero (Wainshtok 1998). Vickridge y Ranjbar (1998) realizaron estudios de flexión en placas de ferrocemento variando la relación agua/materiales cementante (0.35-0.60) sometidas a ambiente agresivo aplicando incrementos de carga hasta el momento de que el agrietamiento se hiciera visible, los resultados que obtuvieron muestran que al disminuir la relación agua /materiales cementantes incrementa la carga última de flexión.

2.1.4.6.3 Tensión

El esfuerzo a tensión del ferrocemento depende de la orientación y número de mallas de refuerzo, de esta manera si la carga aplicada es uniaxial o biaxial, puede ser del mismo orden como de su resistencia a la compresión (Naaman 2000).

2.1.4.6.4 Resistencia al impacto

Un problema complejo sobre elementos estructurales es la resistencia al impacto, el cual es influenciado básicamente por dos parámetros: estructurales y los materiales. Para medir la resistencia al impacto se pueden utilizar diversos instrumentos como el sistema de caída-peso o péndulos, donde los altos niveles de energía se consiguen utilizando grandes masas a velocidades de impacto relativamente bajas. La resistencia al impacto en el ferrocemento consiste en la resistencia a la desintegración del mortero, localización del daño y fácil reparación (Wainshtok 1998). Kenai y Brooks (1994) mencionan en sus estudios con elementos estructurales de ferrocemento sometidos a impacto, reforzados con malla de gallinero, que al aumentar el contenido de refuerzo conduce a una disminución en la desviación máxima dinámica y ancho de fisura por lo que la energía se disipa.

Paramasivam (1998) realizó experimentos para probar la resistencia al impacto de losas de ferrocemento, para ello construyó losas con las mismas medidas y proporcionamiento de materiales, la diferencia radicó en el número de capas de mallas de refuerzo, utilizando 2, 4 y 7 capas. Los resultados muestran que a mayor número de capas la resistencia al impacto se incrementa y el agrietamiento es menor. Una ventaja del ferrocemento es su fácil reparación debido a la distribución de las mallas de refuerzo, por lo que, al tener mayor número de mallas la resistencia al impacto es mayor facilitando la reparación.

2.1.4.7 Durabilidad del ferrocemento

Una de las medidas que pueden asegurar una buena durabilidad en concretos y ferrocemento es la compactación de la matriz cementante, con lo cual se disminuye la permeabilidad y porosidad, factores que evitan o disminuyen el acceso de sustancias corrosivas causantes de deterioro.

Una alternativa para incrementar la impermeabilidad es limitar el agua durante el proceso de mezclado, esto puede lograrse con relaciones agua/materiales cementantes entre 0.35 a 0.45, por lo que se consigue mayor densificación de la matriz cementante (Naaman 2000). Vickridge y Ranjbar (1998) realizaron pruebas en ferrocemento donde las variables fueron la relación agua/materiales cementantes (0.35-0.60) y tipo de acero (galvanizado o no galvanizado). Afirman que la relación agua/materiales cementantes juegan un papel importante en el contenido de iones cloruro y la durabilidad del ferrocemento.

Otra alternativa para incrementar la impermeabilidad de la matriz cementante es elegir el tipo de cemento adecuado tomando en cuenta el medio ambiente a que estará expuesta la estructura. Por ejemplo, para exposición en ambientes marinos el comité ACI 549 recomienda utilizar cemento ASTM tipo II o tipo V.

Además de las medidas de durabilidad requeridas en concretos, Naaman (2000) menciona tres factores adicionales que afectan de manera especial y única a estructuras de ferrocemento:

- 1.- Normalmente el recubrimiento del mortero para proteger la malla de refuerzo es de poco espesor (1 a 2 mm), por lo que es relativamente fácil que agentes agresivos alcancen el refuerzo.
- 2.- El área superficial del acero de refuerzo es alta por lo que el área de contacto para que ocurra la corrosión también es alta. Además la profundidad a la que ocurra la corrosión no tiene que ser muy grande para afectar significativamente la capacidad de resistencia a la tensión de las mallas de refuerzo.
- 3.- Aunque muchas mallas de refuerzo que se utilizan para el ferrocemento son galvanizadas con la finalidad de evitar la corrosión, el recubrimiento de zinc puede tener algunos defectos adversos como la generación de burbujas de gas.

La importancia de estos tres factores varía dependiendo de las condiciones ambientales a que se encuentre el elemento.

2.1.5 Corrosión

La corrosión es un problema de magnitud considerable en todo el mundo; por ejemplo, se estima que países industrializados gastan aproximadamente el 5% de su producto interno bruto para prevenir la corrosión, dar mantenimiento o reemplazar productos perdidos o contaminados por corrosión (William 2009).

La corrosión se define como el deterioro de un metal por reacciones químicas, electroquímicas o electrolíticas producido por el medio ambiente al que esté sometido (ACI 116R-00). La velocidad a la cual ocurra la corrosión en la mayoría de los casos depende de la temperatura y de la concentración de reactivos y de los productos o agentes agresivos presentes (William y Javad 2006). En el caso del concreto reforzado un ejemplo de estos agentes es la penetración de los iones cloruro.

2.1.5.1 Corrosión de metales en el concreto reforzado

La corrosión de metales en concreto, específicamente el acero, ha recibido gran atención en los últimos años debido a su presencia generalizada en ciertas estructuras y por los altos costos de reparaciones. Los primeros reportes de corrosión del acero de refuerzo fueron observados en estructuras marinas y plantas de manufactura de productos químicos. Recientemente, hay evidencia de la ocurrencia de este deterioro en puentes, estructuras de

estacionamiento, cubiertas y otros tipos de estructuras expuestas en ambientes con cloruros (ACI 222R-2). Por tanto se considera que el ataque por iones cloruros es la principal causa de corrosión prematura del acero de refuerzo en estructuras de concreto armado.

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto se define como un proceso electroquímico que requiere de una *parte anódica* donde tenga lugar la oxidación y la *parte catódica* donde se lleve a cabo la reducción (ACI 201.2R-92). Para que la corrosión ocurra se debe formar una celda electroquímica, la cual consiste en otros dos elementos además del ánodo y cátodo: *un conductor metálico (refuerzo de acero)* donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones y *un electrolito (concreto)* en el cual la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso (Trocónis et al. 2000, Ahmad 2006).

Además de la celda electroquímica, también se deben considerar algunos de los siguientes escenarios para que ocurra la corrosión en el concreto reforzado: i) un pH menor a 8 y presencia de oxígeno y agua y ii) un pH mayor a 8 y presencia de oxígeno, agua y cloruros (Tricónis et al 2000). De esta manera el inicio de la corrosión y continuidad se atribuyen a diversas causas, las principales son: i) la reducción de la alcalinidad del concreto por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o por acción del dióxido de carbono y ii) acción electroquímica, en la cual intervienen los iones cloruro.

Finalmente el deterioro del concreto ocurre gracias a la acumulación de los productos resultares del proceso de corrosión del acero de refuerzo ya que ocupan un mayor volumen que el acero, por lo tanto; al ocupar mayor volumen ejercen esfuerzos adicionales, esto se manifiesta por agrietamiento y desprendimiento del concreto hasta concluir en el término de la vida útil de las estructuras.

Para predecir el tiempo de vida útil de una estructura con base en el deterioro por corrosión, *Tuutti* desarrolló un modelo simplificado en el cual se distinguen dos periodos (Figura 8): periodo de iniciación y periodo de propagación.

- 1) *Periodo de iniciación (T_o):* se refiere al tiempo en que tardan los agentes agresivos (cloruros o dióxido de carbono) en llegar hasta el acero de refuerzo y despasivarlo.
- 2) *Periodo de propagación (T_{cr}):* representa el tiempo en el cual el acero se corroe libremente hasta llegar a un grado de deterioro inaceptable.

El modelo de *Tuutti* es útil cuando se realizan pruebas de monitoreo de la corrosión tales como: potenciales y densidad de corrosión, en las cuales se pueden identificar los periodos de iniciación y propagación de la corrosión para posteriormente realizar un análisis que estime el agrietamiento por corrosión (Maaddawy 2007). Sin embargo el modelo no

considera factores humanos para extender la vida útil de la estructura, tales como la reparación.

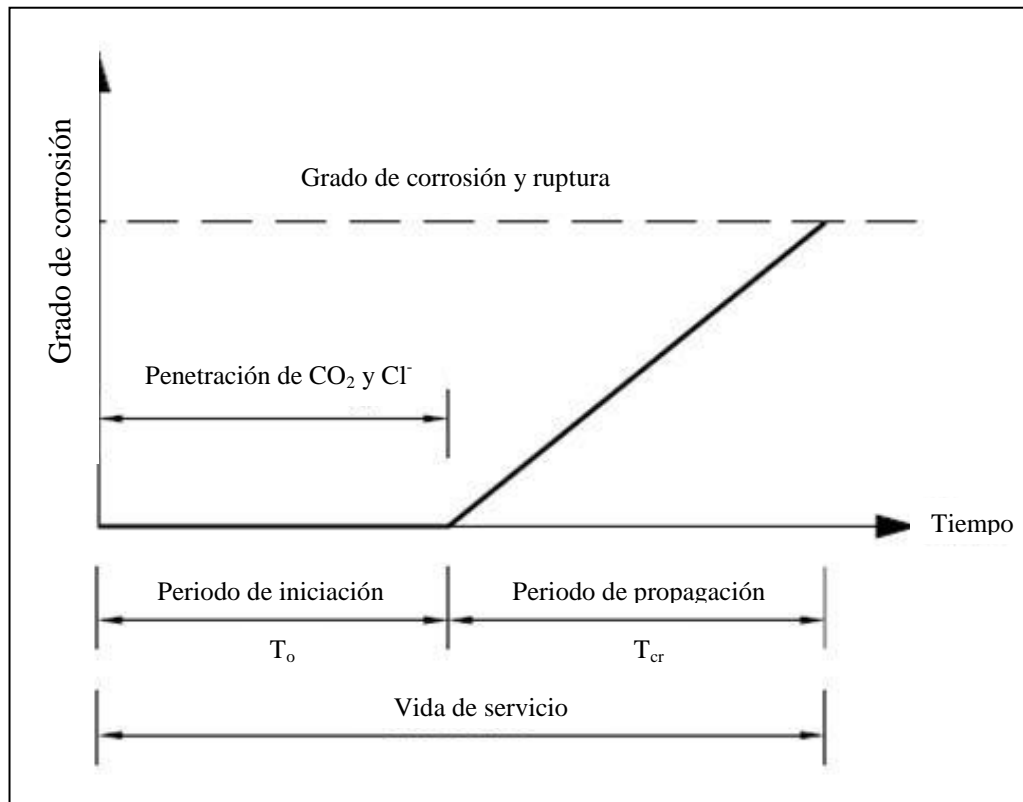


Figura 8: Modelo de vida útil de Tuutti

Fuente: Adaptado al español, Mencionado por Maaddawy 2007, obtenido de Tuutti 1980.

2.1.5.2 Corrosión electroquímica

La corrosión o ataque de tipo electroquímico se define como un proceso espontáneo de destrucción de los metales debido a su interacción fisicoquímica con el ambiente que los rodea. Incluye un electrolito por lo cual ocurren dos fenómenos (Figura 9): reacción anódica y catódica. La velocidad con que ocurren ambas reacciones depende del potencial del metal, el cual representa la energía libre de Gibbs, y la concentración de la sustancia oxidante respectiva.

La corrosión electroquímica es causante de la destrucción de metales expuestos a condiciones atmosféricas, suelo, distintos electrolitos acuosos (agua de mar, agua dulce, disoluciones de sales, ácidos y bases) y no acuosos (sales fundidas, electrolitos orgánicos). Las consecuencias son la formación de herrumbre en artículos metálicos, construcciones industriales y civiles, medios de transporte como tuberías, cables de comunicación y otras estructuras enterradas (Raichev et al. 2009).

2.1.5.3 Corrosión ocasionada por cloruros

Se sabe que el ingreso de iones cloruro en el concreto ocasiona la despasivación del acero de refuerzo provocando riesgo de corrosión (Castellote y Andrade 2001). Lo anterior ha sido objeto de estudio de muchas investigaciones en los últimos cincuenta años, en las cuales, basándose en la determinación de contenido de cloruros crítico, se han propuesto diversas técnicas de medición (Angst et al 2009).

Existen diferentes tipos de cloruros dentro de la pasta de cemento hidratada. Algunos son iones de cloruros libres disueltos en la solución de poros (considerados solubles en agua) y el resto son cloruros químicamente combinados o ligados con fases sólidas de cemento o adsorbidos físicamente. La sumatoria de ambos se considera como el contenido de cloruros totales (Castellote y Andrade 2001, RILEM TC 178- TMC).

Generalmente los umbrales de cloruros libres y totales se expresa en términos de peso de cemento, concreto, o por la concentración en la solución de poros (Angst et al. 2009). De ambos umbrales se considera que el de los cloruros libres es aquel que ocasionan riesgo de corrosión en el refuerzo de acero del concreto (Castellote y Andrade 2001-Part. 2, Lu et al. 2002, Mohammed y Hamada 2003, RILEM TC 178-TMC). Sin embargo, es muy común que el umbral de cloruros para iniciar la corrosión del acero de refuerzo sea expresado en términos de cloruros totales y en ocasiones específicas en términos de cloruros libres (Castellote y Andrade 2001.-Part 1, Mohammed y Hamada 2003). Algunas justificaciones son las siguientes: la determinación de cloruros libres requiere equipo especializado que en ocasiones no está disponible, la concentración de cloruros libres puede variar en el tiempo en función de las condiciones (temperatura, humedad, entre otros) a que sea sometida la estructura, no existen métodos estrictamente fiables para cuantificar cloruros ligados y la relativa facilidad de obtención del umbral y la vasta normalización existente para determinar cloruros totales (Castellote y Andrade 2001-Parts 1 y 2, RILEM TC 178-TMC).

2.1.5.4 Tipos de corrosión en ferrocemento

La corrosión en el ferrocemento se puede clasificar de acuerdo con el aspecto visual que presenta el metal al ser corroído, entre los tipos de corrosión en ferrocemento más comunes se tienen:

Corrosión por picaduras: Es un tipo de ataque corrosivo muy localizado que produce agujeros o pequeños hoyos en el metal desde su superficie horizontal hacia el interior en dirección casi vertical. Se trata de un tipo de corrosión bastante dañina para estructuras de ingeniería, además de ser difícil de detectar puesto que en ocasiones se cubre con los productos de corrosión provocando muy poca pérdida de material. En muchas ocasiones, cuando se detecta este tipo de corrosión es porque el material a fallado (Fontana 1986, Joseph 1989, William y Javad

2006, William 2009). Este tipo de corrosión resulta peligrosa puesto que es autocatalítica, esto quiere decir que se generan por sí mismas las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento (Fontana 1986, Troconis et al. 2000).

Corrosión uniforme: Es el resultado de pérdida generalizada de la capa pasivante del acero, debida a la acción de la carbonatación o presencia excesiva de iones cloruros (Troconis et al. 2000). Es una forma de corrosión electroquímica o química que actúa de forma uniforme sobre la superficie expuesta del metal y se manifiesta como escamas o deposito residual (Fontana 1986).

Corrosión galvánica: Ocurre entre dos metales distintos cuya diferencia de potencial electroquímico provoca la corrosión, un ejemplo es el caso el acero galvanizado con zinc empleado comúnmente en el ferrocemento. En el cual el recubierto de zinc actúa como elemento que se “sacrifica” para proteger al hierro (William y Javad 2006).

Corrosión en espacios confinados o por agrietamiento: Es una forma de corrosión electroquímica que se presenta en grietas o en superficies recubiertas donde puedan existir soluciones estancadas, para que ocurra, la grieta debe ser lo suficientemente ancha para que penetre el líquido con iones agresivos y debe ser lo suficientemente estrecho para mantenerlo estancado y provocar deterioro por corrosión. Es importante su estudio puesto que en estructuras de ingeniería ocurre en juntas, remaches, pernos y materiales porosos, incluso puede presentarse en aleaciones como los aceros galvanizados, inoxidable y titanio (Fontana 1986, William y Javad 2006). Jakobse y Maahn 2001 mencionan que este tipo de corrosión se debe al cambio gradual que ocurre en el medio ambiente donde se encuentra la grieta o confinamiento. Una mayor explicación sobre este proceso de corrosión la describen Crolet y Defranoux (1973).

Corrosión por erosión: Es provocada por la acción combinada del ataque químico y la abrasión mecánica como consecuencia del movimiento de un fluido (Fontana 1986). La velocidad con que el fluido se mueve influye en el cambio de velocidad de corrosión y se manifiesta por la aparición de huecos, picaduras, hoyos redondeados o valles en la superficie metálica en dirección del flujo del fluido corrosivo (William y Javad 2006, William 2009).

2.1.5.5 Potencial electroquímico, potencial del electrodo y potencial de equilibrio

Se le llama potencial electroquímico a la derivada parcial de la energía libre total requerida (G) de una especie con respecto al número de moles con los que participa cuando otros factores como la temperatura y presión son constantes. Este potencial es análogo al potencial químico de una especie pero en este caso están incluidas las contribuciones químicas y eléctricas en la energía libre de Gibbs (Raichev et al. 2009).

El potencial del electrodo se manifiesta cuando un metal se sumerge en un electrolito, dicho potencial es resultado del intercambio de cargas eléctricas en la interfase del metal-solución electrolítica (William y Javad 2006, William 2009, Raichev et al. 2009). Por ejemplo: en el transporte de cationes desde el metal hacia el electrolito y viceversa o en la adsorción de iones o moléculas polares de la solución sobre la superficie metálica, surge el potencial del electrodo o salto de potencial, su valor absoluto no se puede medir o calcular, por lo tanto es necesario armar una celda electrolítica de un electrodo y otro electrodo de referencia, para sumergirlos en el mismo conductor iónico y medir el voltaje del circuito formado (Raichev et al. 2009).

El potencial de equilibrio es el potencial estático del electrodo, cuando el electrolito y el electrodo se encuentran en equilibrio con respecto a una reacción electroquímica. Se puede medir formando un circuito electroquímico entre el electrodo de trabajo y un electrodo de referencia o calcularlo a partir de la ecuación de Nernst.

2.1.5.6 Polarización

Se conoce como polarización al desplazamiento de los potenciales de las regiones anódica y catódica del electrodo desde sus valores de equilibrio. En este proceso dichos potenciales se encuentran en desequilibrio y por lo tanto cambian de potencial para alcanzar un valor intermedio y lograr la creación de un flujo neto de corriente (Fontana 1986, Joseph 1989, William y Javad, 2006 William 2009).

La polarización de las reacciones electroquímicas se divide en dos tipos: *polarización por activación* y *polarización por concentración* (Fontana 1986, William 2009). Estos dos tipos de polarización ocurren en mezclas de concreto reforzado estimuladas por el medio en el que se encuentren. El tipo de polarización que se presente en las estructuras de concreto reforzado dependerá de las características del medio ambiente, como la temperatura y la exposición a un medio ambiente donde existan soluciones agresivas (CO₂, iones cloruro).

2.1.5.7 Polarización por activación y polarización por concentración

La polarización por activación ocurre cuando la velocidad de transporte de cargas en el proceso es la etapa más lenta en la superficie del electrodo (Fontana 1986 William 2009). En este caso, la polarización es directamente relacionada con las velocidades de las reacciones electroquímicas anódica y catódica (Raichev et al. 2009). Este fenómeno puede analizarse en términos de la energía necesaria para que el proceso electroquímico sobrepase la barrera energética creada en la interfase electrodo-electrolito. La polarización por activación depende de diversos factores como son: la velocidad de transporte de electrones al ión hidrógeno en la superficie metálica que depende de la concentración de iones hidrógeno y de la temperatura

del sistema, por lo que la velocidad de desprendimiento del hidrógeno es muy diferente para cada metal.

La polarización por activación puede ilustrarse considerando la reducción de los iones hidrógeno para formas gas hidrogeno en la superficie de un electrodo de zinc. Esta reacción transcurre por una secuencia de etapas de: adsorción en la superficie del zinc de los iones H^+ de la disolución, transferencia de e^- de zinc para formar un átomo de H (ec. 2), combinación de dos átomos de H para formar una molécula de H_2 (ec. 3) y coalescencia de muchas moléculas de H para formar una burbuja.



La polarización por concentración ocurre cuando el transporte por suministro o conducción de cualquier especie que participa en el proceso de corrosión es la etapa más lenta, por lo que surge una polarización en el electrodo causada por cambio en la actividad iónica del electrolito (Fontana 1986, Raichev et al. 2009, William 2009). Durante los procesos de polarización por concentración cualquier cambio en el sistema que sea capaz de aumentar la velocidad de difusión de los iones en el electrolito podrá disminuir los efectos de la polarización por concentración e incrementará la velocidad de la reacción. Por consiguiente la agitación del electrolito reducirá el gradiente de concentración de iones positivos, con lo cual aumentará la velocidad de la reacción.

2.1.6 Métodos y técnicas electroquímicas para evaluar la corrosión

Los métodos y técnicas electroquímicas permiten evaluar el deterioro por corrosión en estructuras de concreto reforzado. Existen diversos métodos para la evaluación de la corrosión tales como la inspección visual y diversas técnicas electroquímicas como son el potencial de corrosión (E_{corr}) y resistencia a la polarización lineal (RPL). La inspección visual es la evidencia física de deterioro mientras que con las técnicas electroquímicas se puede estimar los daños por corrosión. Estas últimas son muy utilizadas puesto que la mayoría de las reacciones de corrosión son de origen electroquímico (William y Javad 2006). Es decir, se trata de reacciones químicas en donde ocurre una transferencia de electrones de una especie química a otra (William 2009). En esta investigación además de realizar inspecciones visuales para determinar los efectos de la corrosión en el ferrocemento, también se emplean las técnicas de E_{corr} y RPL para determinar la probabilidad y para estimar la densidad de corrosión.

2.1.6.1 Inspección visual

Este método permite identificar de manera rápida y sencilla el deterioro en las estructuras de concreto armado ocasionado por la corrosión del acero. La inspección visual puede realizarse de manera no destructiva y destructiva. La primera es la evaluación del deterioro externo sin ocasionar daños al concreto y consiste en identificar anomalías que infieran daños tales como: eflorescencias, agrietamientos y manchas por corrosión. La segunda es un tipo de inspección en el cual al tener suficiente evidencia de daños por corrosión, ya sea por medio de la inspección visual no destructiva o por alguna técnica de evaluación electroquímica, se procede a la ruptura o extracción de una parte de la estructura para evaluar daños internos.

2.1.6.2 Potenciales de corrosión

El potencial de corrosión permite evaluar la tendencia de un metal a formar iones en soluciones acuosas mediante una media celda. De esta manera se puede obtener el riesgo de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, posteriormente se puede estimar de manera empírica la probabilidad de corrosión del metal (Broomfield 1997). La media celda consiste en un arreglo que permite medir el voltaje generado por la circulación de electrones desprendidos por el metal más electronegativo. Lo anterior utilizando un electrodo de referencia que puede ser de plata-cloruro de plata, mercurio-cloruro de mercurio o cobre-cloruro de cobre (Figura 9).

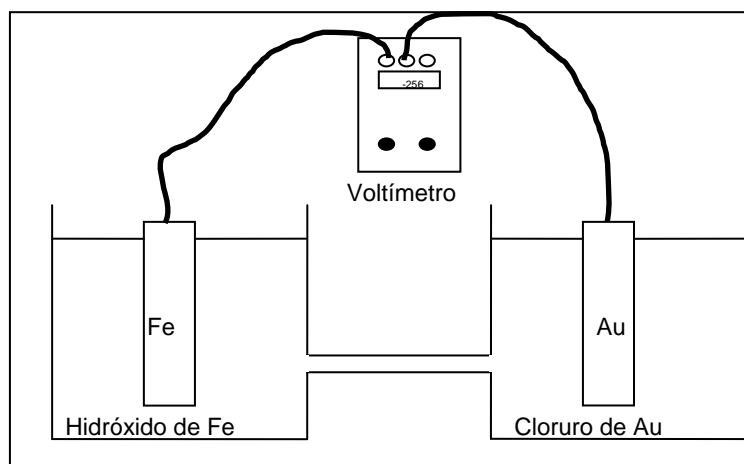


Figura 9: Principio del método de la media celda

Para evaluar los potenciales de corrosión, la norma [ASTM C 876](#) (Standard Test Method for half-cell potentials uncoated reinforcing steel in concrete), muestra los valores aceptables y una clasificación de riesgos de corrosión (Tabla 6), la cual permite estimar el grado de deterioro.

Tabla 6: Valores de potenciales de corrosión para acero al carbono

Cobre/sulfato de cobre	Plata/cloruro de plata/4M KCL	Electrodo de hidrógeno estándar	Calomel	Condición de corrosión
> -200	> -106	> +116	> -126	Baja (10% de riesgo de corrosión)
-200 a -350	-106 a 256	+116 a -34	-126 a 276	Riesgo de corrosión intermedio
> -350	< -256	< -34	< -276	Alta (>90% de riesgo de corrosión)
< -500	< -406	< -184	< -426	Corrosión severa

2.1.6.3 Resistencia a la polarización lineal

La prueba de resistencia a la polarización lineal se emplea para determinar la velocidad de corrosión de metales en sistemas como el concreto. Para realizar la prueba se requiere polarizar el metal mediante la aplicación de un pequeño potencial ($\Delta E \pm 25 \text{ mV}$), el cual depende de la corriente (Δi) con la cual el potencial es lineal, a una velocidad de barrido de 5 a 10mV/min (Ahmad 2006). De esta manera se obtiene una curva que relaciona el ΔE contra el Δi de la cual se obtiene una pendiente de resistencia a la polarización (R_p) que permite calcular la intensidad de corrosión (I_{corr}) en μA , misma que al considerarla junto con el área (cm^2) del metal en estudio define la densidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (Broomfield 1997).

Las lecturas de RPL también permiten estimar la corrosión total acumulada con base en la norma ASTM G 109-99^a, la cual muestra un método adecuado para la evaluación de la corrosión en acero embebido en concretos.

Para interpretar la condición de corrosión del acero de refuerzo con base a densidades de corrosión, Broomfield (1997) con base en investigaciones de campo y laboratorio utilizando un anillo de guarda establece 4 condiciones (Tabla 7).

Tabla 7: Condición de corrosión de metales con base en densidad de corrosión
Fuente: Broomfield 1997.

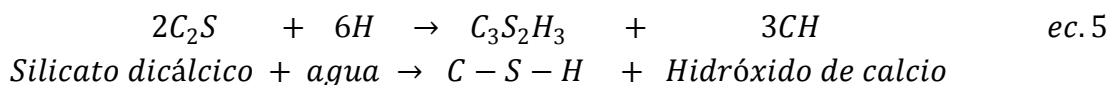
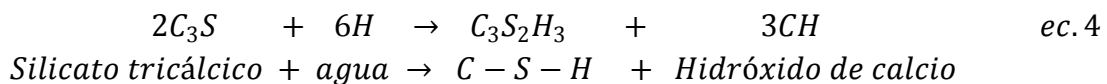
Condición	Densidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Pasiva	< 0.1
Corrosión baja a moderada	0.1 a 0.5
Corrosión moderada a alta	0.5 a 1
Alta velocidad de corrosión	> 1

2.2 Marco teórico

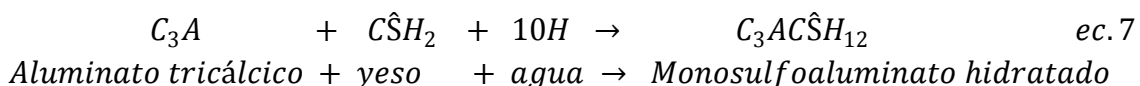
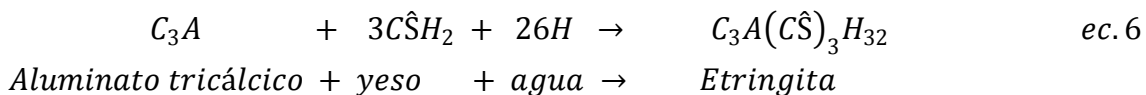
Para interpretar los resultados obtenidos en la etapa experimental es necesario el conocimiento de las leyes y principios que rigen cada fenómeno evaluado. En esta sección se presentan de forma resumida las teorías, principios y leyes para cada fenómeno, entre las que se encuentran: aspectos químicos de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica, principios de esfuerzo y compresión, análisis de estructuras cristalinas, mecanismos de transporte para la difusión de cloruros, conductividad eléctrica, potencial y densidad corrosión.

2.2.1 Aspectos químicos de la hidratación del cemento Portland

Como ya se estableció en las secciones 2.1.1.2 y 2.1.1.3 el endurecimiento del cemento Portland ocurre como resultado de las reacciones entre los componentes que conforman el cemento con el agua. Los principales componentes del cemento que intervienen en las reacciones son el C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF , los cuales proporcionan diversas propiedades a la pasta endurecida (ver sección 2.1.1.3). Los productos de hidratación de los C_3S y C_2S son el hidrato microcristalino $C_3S_2H_3$ (C-S-H) y CH cristalino y solo difieren en la cantidad de CH producida (Malhotra and Ramezaniapour 1994, Neville y Brooks 1998) (ecs. 4 y 5).



La reacción del C_3A con agua es muy rápida y podría conducir a fraguado instantáneo (Neville y Brooks 1998) e involucra reacciones con iones sulfatos obtenidos por la disolución del yeso (Malhotra and Ramezaniapour 1994) (ecs. 6 y 7)



El C_4AF forma productos de hidratación similares a los de la reacción del C_3A , pero con sustituciones parciales de fierro por alúmina en las estructuras cristalinas de etringita y monosulfoaluminato hidratado (Malhotra and Ramezaniapour 1994).

2.2.2 Aspectos químicos de la reacción puzolánica

Tal como se abordó en la sección 2.1.2.5 la reacción puzolánica ocurre entre algunos minerales (silicio, aluminio y fierro) de las puzolanas con el hidróxido de calcio y agua. Para explicar las reacciones puzolánicas, Malhotra and Ramezaniyanpour 1994 citan a Takemoto y Uchikawa 1980 quienes proponen de manera esquemática como mecanismo de la reacción puzolánica una disolución por difusión, en el cual describen las reacciones que ocurren entre las fases de C_3S y C_3A con la puzolana.

De acuerdo con los autores, en el sistema C_3S -puzolana, los iones de calcio son disueltos del C_3S y absorbidos por las partículas de la puzolana formando el C-S-H, el cual precipita con alta relación Ca/Si sobre la superficie de grano del C_3S y como hidrato con baja relación Ca/Si en la superficie de las partículas de la puzolana. Estos hidratos en la superficie de la puzolana forman una capa amorfa rica en Si y Al a partir de la disolución de Na^+ y K^+ con agua. La disolución de los iones Na^+ y K^+ incrementa la concentración de OH^- y acelera la disolución SiO_4^{4-} y AlO_2^- los cuales se combinan con el Ca^{2+} para incrementar el espesor de la capa amorfa. Debido a la presión osmótica, la capa amorfa crece gradualmente y se forma un vacío entre esta capa y la partícula de la puzolana. Cuando la presión en el vacío rompe la capa, los iones SiO_4^{4-} y AlO_2^- se difunden en la solución rica en Ca^{2+} . Finalmente se forman nuevos productos de C-S-H y aluminatos de calcio (Ca-Al).

De acuerdo con Takemoto y Uchikawa 1980 para el sistema C_3A -puzolana, la presencia de la puzolana acelera la hidratación del C_3A debido a la absorción del Ca^{2+} de la fase líquida y por proveer sitios de precipitación para la etringita y otros hidratos. La reacción de este sistema ocurre de forma similar a la del sistema puzolana- C_3S , explicada anteriormente. En este sistema C_3A -puzolana se forman la etringita, el monosulfoaluminato hidratado, el hidrato de aluminio de calcio y los silicatos hidratados de calcio sobre la capa exterior a las partículas de la puzolana o sobre la capa hidratada del C_3A , dependiendo de las concentraciones de Ca^{2+} y SO_4^{4-} en la solución.

En la Figura 10 se muestran los esquemas de los mecanismos de la hidratación de los sistemas C_3S -puzolana y C_3A -puzolana.

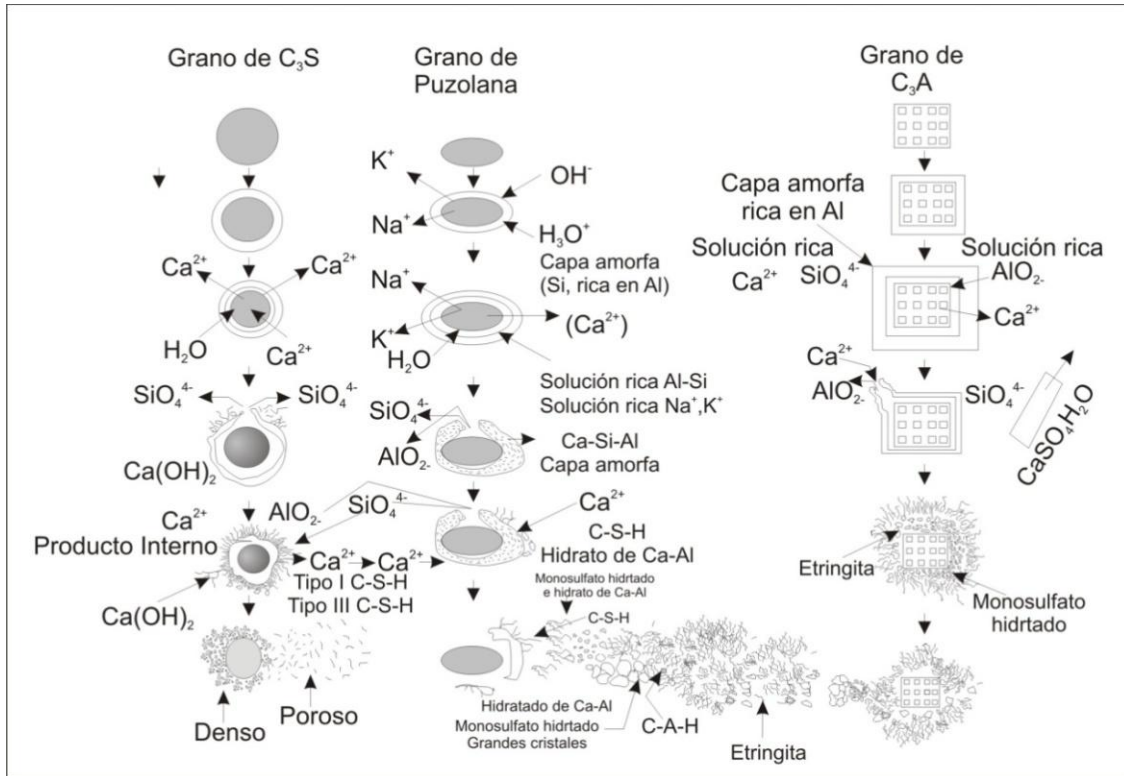


Figura 10: Representación esquemática de los mecanismos de hidratación en los sistemas C₃S-puzolana y C₃A-puzolana.

Fuente: Malhotra and Ramezianipour 1994, obtenido de Takemoto y Uchikawa 1980

2.2.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión se considera como el esfuerzo último alcanzado por un material al aplicarle una carga hasta llegar a su falla o colapso. Tiene su fundamento en la ley de Hooke para materiales homogéneos e isotrópos, la cual establece una relación directamente proporcional entre la fuerza aplicada y la deformación unitaria. Con base en lo anterior la resistencia a compresión en ingeniería queda definida en la norma ASTM C 109/C 109 M de la siguiente manera (ec. 8):

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (\text{ec. 8})$$

donde:

f_m = Resistencia a la compresión (kg/cm² ó MPa)

P = Fuerza total aplicada (kg, N)

A = Área de la sección transversal (cm², mm²)

2.2.4 Índice de actividad resistente

El índice de actividad resistente es un parámetro que permite estimar la actividad puzolánica en mezclas de concreto en donde el cemento ha sido parcialmente reemplazado por alguna puzolana. La norma ASTM C 311 menciona que el IAR se puede calcular relacionando la resistencia a compresión a una misma edad (7 o 28 días) de una mezcla con adiciones contra una mezcla control, esto puede ser expresado en porcentaje mediante la siguiente expresión (ec. 9):

$$IAR = \frac{A}{B} \times 100 \quad (ec. 9)$$

Donde:

IAR = Índice de Actividad Resistente (%)

A = Promedio de la resistencia a compresión en mezclas con adiciones puzolánicas (kg/cm² ó MPa)

B = Promedio de la resistencia a compresión en mezclas control (kg/cm² ó MPa)

2.2.5 Análisis de estructuras cristalinas

2.2.5.1 Difracción de rayos X y la ley de Bragg

Mediante la difracción de rayos X (DRX) se puede conocer la estructura cristalina y composición mineralógica de un material. Es muy común que el análisis por DRX se realice con muestras pulverizadas, puesto que de esta manera se logra que los cristales de los cuales está conformada la muestra tengan orientaciones al azar. Al tener orientación al azar se puede cumplir con las condiciones de difracción de la ley de Bragg (William y Javad 2006, William 2009).

La ley de Bragg muestra la relación entre las posiciones angulares de los haces de luz difractados en función de la longitud de onda de la radiación de rayos X incidentes y del espacio interplanar D_{hkl} , de los planos cristalinos, (Figura 11) (William y Javad 2006). Esta ley se expresa de la siguiente manera (ec. 10):

$$n\lambda = 2D_{hkl} \quad (ec. 10)$$

Donde:

n = es el orden de reflexión (1,2,3...) siempre que Sen θ no exceda la unidad

λ = Longitud de onda del espectro de emisión de rayos X (Ångström)

D_{hkl} = es el espacio interplanar o distancia entre los planos del cristal.

hkl = son índices de Miller

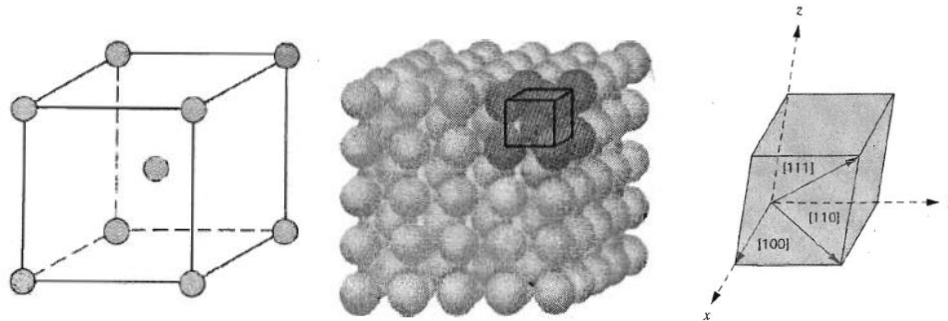


Figura 11: Espacios interplanares de una celda unitaria

Fuente: William 2009

El espacio interplanar se obtiene al dividir el valor de la constante de red (a) con los índices de Miller (ec.11).

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (ec. 11)$$

Los índices de Miller, obtenidos de los difractogramas (Figura 12), son un conjunto de tres dígitos que designan los planos cristalográficos, determinados a partir de los recíprocos de las intersecciones fraccionadas de los ejes (ec. 12). Son útiles para obtener la longitud de onda (λ) del espectro, y así poder obtener el valor de constante de red (a) en nanómetros, el cual es necesario para identificar el tipo de material en estudio.

$$\lambda = \frac{2a \cdot \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (ec. 12)$$

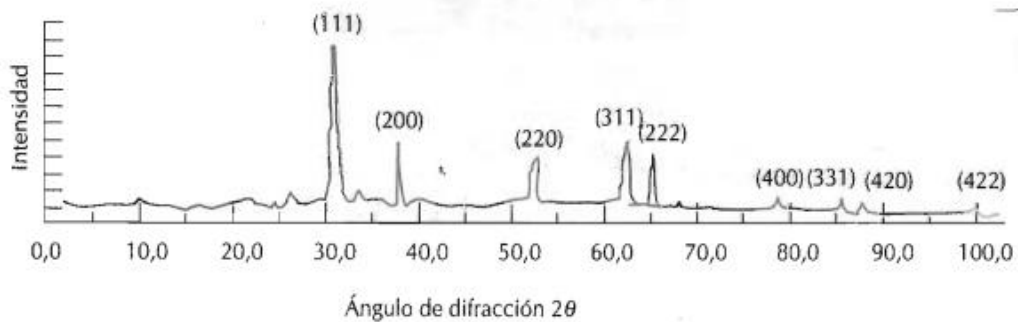


Figura 12: Difractograma, los números en paréntesis muestran los índices de Miller (h, k, l)

Fuente: William Callister, 2009

2.2.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En la ciencia e ingeniería de materiales, el microscopio electrónico de barrido se ha convertido en una técnica muy importante de investigación. La MEB se utiliza para estudiar las características microscópicas, fracturas y la formación de nuevos compuestos por la

manipulación de los materiales. Este método dirige un haz de electrones hacia un punto de la superficie de la muestra por analizar, recoge y muestra señales electrónicas (William y Javad 2006) permitiendo hacer un análisis cualitativo y semicuantitativo de la composición elemental de áreas superficiales de la muestra puesto que permite aumentos de 10x a 50000x junto con un espectrómetro de rayos X (William 2009).

2.2.6 Mecanismos de transporte (Difusión de cloruros)

Tanto en morteros como en concretos se tiene el transporte de gases o líquidos a través de los poros y grietas presentes en la pasta cementante, esto ocurre debido al fenómeno de la difusión. La difusión es el flujo o movimiento de las sustancias gaseosas o líquidas a través de un material, estas sustancias se mueven de forma predecible tratando de eliminar diferencias de concentración para producir una composición homogénea (Donald 1998).

2.2.6.1 Primera Ley de Fick

Microscópicamente la difusión es un proceso que depende del tiempo, es decir, la cantidad de un cierto elemento transportado dentro de otro es una función del tiempo, o velocidad de transferencia de masa, a lo que se le denomina *Flujo de difusión* (J) que se define como el número de átomos que pasa a través de un plano sólido por unidad de tiempo (William 2009). La primera ley de Fick determina el flujo neto de átomos para el estado estacionario, es decir no hay cambio del sistema con el tiempo (William y Javad 2006), esta ley se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera (ec. 13):

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (\text{ec. 13})$$

Donde:

J = es el flujo de difusión, (átomos/m²-s)

D = Es el coeficiente de difusión (m²/s)

dc/dx = es el gradiente de concentración (átomos/m³- cm)

El signo negativo de la expresión anterior indica que la dirección de difusión es contraria al gradiente de concentración, es decir, que va desde rangos elevados de concentración hasta rangos bajos de concentración (William 2009). En cuanto al gradiente de concentración, este muestra como la composición del material varía conforme la distancia cambia, lo que indica que *dc* es la diferencia en concentración a lo largo de una distancia *dx* (Donald 2008).

2.2.6.2 Segunda ley de Fick

En la ingeniería de los materiales es muy común que en la mayoría de los casos se tenga difusión pero en estado no estacionario, en el cual la concentración del soluto varía con

respecto al tiempo de un punto a otro del material. Para estos casos se utiliza la segunda ley de Fick aplicada a la difusión (William y Javad 2006), la cual describe el estado dinámico de la difusión de los átomos y permite calcular la concentración de iones difundidos cerca de la superficie del material en función del tiempo y distancia, mientras que el coeficiente de difusión (D) permanezca constante (Donald 1998). Lo anterior se adecua para entender el fenómeno de difusión de iones cloruro en concretos y morteros.

La segunda ley de Fick para un estado no estacionario o de transición se define matemáticamente como (ec. 14):

$$\frac{\delta c}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(D \frac{\delta c}{\delta t} \right) \quad (ec. 14)$$

Donde:

D = es el coeficiente de difusión (cm²/s)

t = es el tiempo de difusión

c = es la concentración de cloruros en los poros.

x = es la distancia en la cual se mide la concentración

En la práctica es muy común considerar un sólido semiindefinido con una concentración superficial constante y se plantean las siguientes condiciones: Para la condición de frontera $c = c_0$ cuando $0 \leq x \leq \infty$, y $t = 0$, se tiene la siguiente expresión (ec. 15):

$$c(x, t) = c_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (ec. 15)$$

Donde:

erf = función error

t = tiempo de exposición.

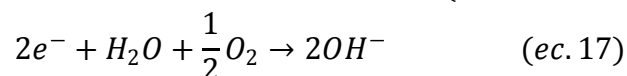
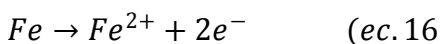
D = Es el coeficiente de difusión (cm²/s)

x = es la distancia en la cual se mide la concentración

c(x,t) = es la concentración de cloruros medida en un intervalo de profundidad x en un determinado tiempo de exposición t

2.2.7 El fenómeno de la corrosión

El fenómeno de la corrosión (Figura 13) inicia con dos reacciones: anódica y catódica. La reacción anódica (ec. 16) permite la disolución de los electrones de hierro (Fe²⁺) en los poros de agua creando iones de hierro con carga positiva, los cuales se transportan a través del conductor eléctrico hasta la zona catódica, se combinan con agua y oxígeno y forman iones hidroxilo (2OH⁻), lo que se conoce como reacción catódica (ec. 17).



Los iones hidroxilo se combinan con los iones de hierro de la zona anódica para formar hidróxido ferroso (ec. 18), el cual se combina con moléculas de agua y oxígeno para formar hidróxido férrico (ec. 19) y después óxido férrico hidratado (ec. 20).

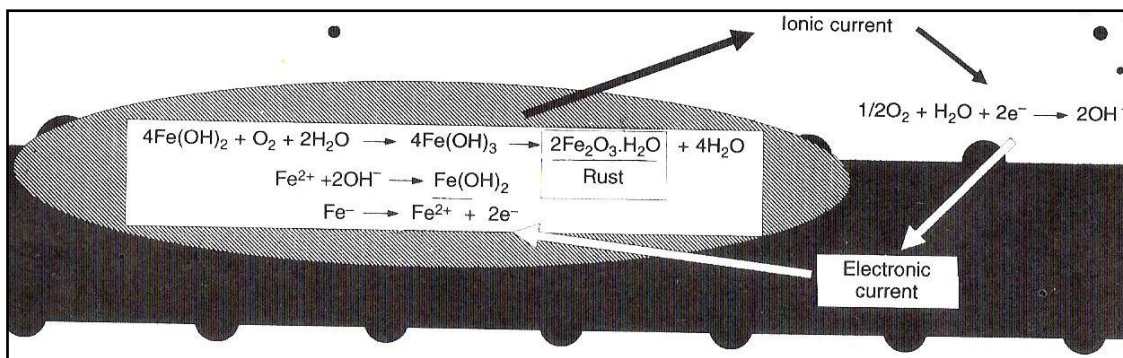
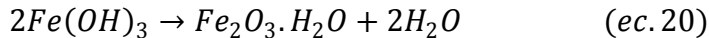
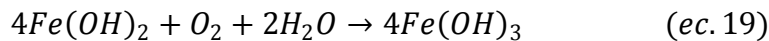


Figura 13: Formación de productos de corrosión en el acero

Fuente: Broomfiel 1997

2.2.8 Potencial de corrosión

El potencial de corrosión (E_{corr}) se obtiene interpretando la diferencia de potencial entre el metal en estudio (electrodo de trabajo) y una referencia (electrodo de referencia), donde el flujo de corriente es proporcional a la resistencia del alambre conductor (R). Para este caso la ley de Ohm resulta aplicable, puesto que relaciona la corriente (I) con el voltaje aplicado (V) (William y Javad 2006). Esta ley se puede expresar de la siguiente manera (ec. 21):

$$V = RI \quad (ec. 21)$$

Donde:

V = Voltaje o diferencia de potencial V (volts)

I = es la corriente eléctrica A (amperes)

R = es la resistencia al flujo de corriente Ω (ohms)

2.2.9 Densidad de corrosión

La densidad de corrosión (I_{corr}) es útil para estimar la velocidad de corrosión a la cual un metal se disuelve sometido a soluciones corrosivas. La densidad de corrosión en sistemas como el concreto puede estimarse a partir de la prueba de resistencia a la polarización lineal (RPL). La estimación de la densidad se realiza con base a la ecuación establecida por Stern-Geary en 1957 (ec. 22):

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (ec. 22)$$

Donde:

R_p = resistencia a la polarización o cambio de potencial

B = relación entre pendientes de Tafel (ec. 23), las cuales permiten pasar de la proporcionalidad a la igualdad

$$B = \frac{b_a \cdot b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (ec. 23)$$

b_a y b_c = son constantes de Tafel (anódico y catódica)

Las pendientes de Tafel (Figura 14) permiten establecer la relación existente entre la corriente aplicada al material y el potencial del electrodo (metal en estudio).

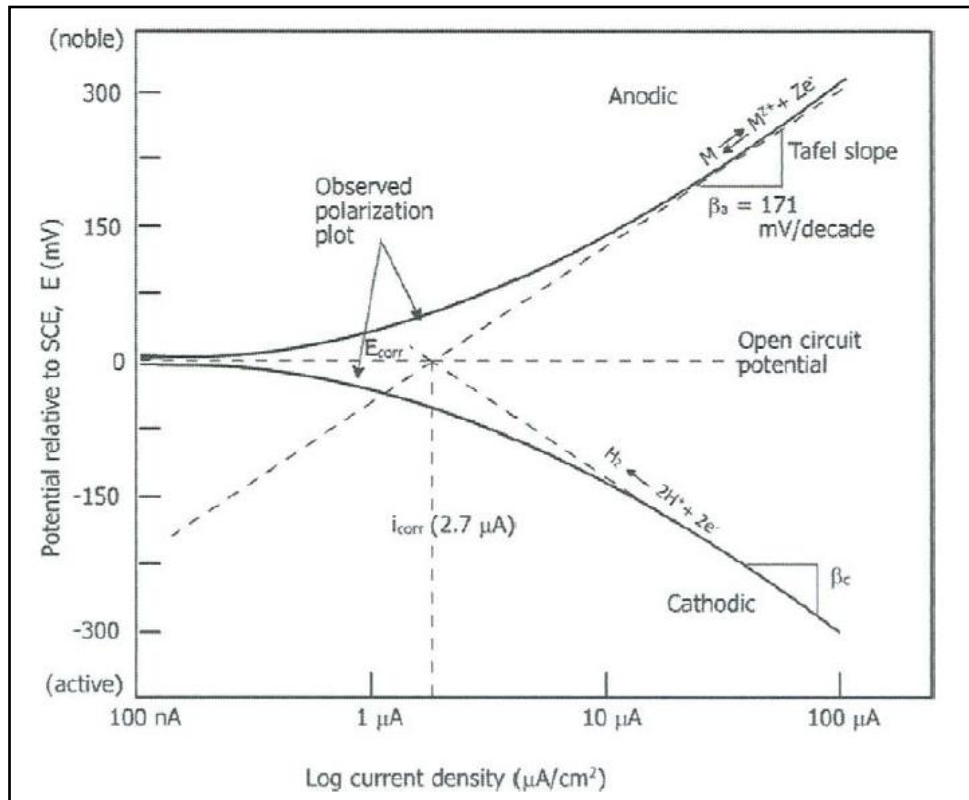


Figura 14: Pendientes de Tafel

Fuente: Ahmad 2006.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

La investigación se dividió en cuatro fases (Figura 15). En la fase 1 se realizaron el diseño experimental, la elección y caracterización de materiales mediante análisis químico, y técnicas de difracción láser, DRX, MEB y adsorción física de gases por el método BET.

En la fase 2 se elaboraron mezclas de mortero sustituyendo el cemento por 0, 10 y 20% de CBC y por 20% de CV. En estado fresco se determinaron la fluidez, el peso volumétrico, el contenido de aire y la temperatura. Posteriormente se elaboraron probetas cilíndricas de mortero, de las cuales se obtuvieron las resistencias a la compresión a edades de 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días. También se caracterizaron microestructuralmente los morteros a 1, 7, 28 y 90 días de edad por medio de DRX y MEB.

En la fase 3 se dio continuidad a una investigación previa (Hernández 2010) que forma parte de un proyecto a largo plazo. En esa investigación se evaluaron el efecto de la CBC y el tiempo de curado en las propiedades mecánicas de morteros y de durabilidad del ferrocemento. Para esto se prepararon probetas cilíndricas de mortero y placas de ferrocemento. En la presente investigación se obtuvieron perfiles y coeficientes de penetración de cloruros libres. Posteriormente se estimaron los cloruros ligados para cada una de las mezclas utilizando como referencia los coeficientes de cloruros totales obtenidos previamente por Hernández (2010). También se continuó el monitoreo del deterioro por corrosión de las probetas de ferrocemento durante 735 días, mediante inspección visual y pruebas de potencial de corrosión y resistencia a la polarización lineal.

Por último, en la fase 4 se analizaron y discutieron los resultados de las fases 1 a 3, posteriormente se realizaron las conclusiones y se redactaron dos artículos técnicos que fueron presentados en congresos especializados sobre el tema. También se escribió un artículo científico que se someterá a una revista con arbitraje estricto (JCR).

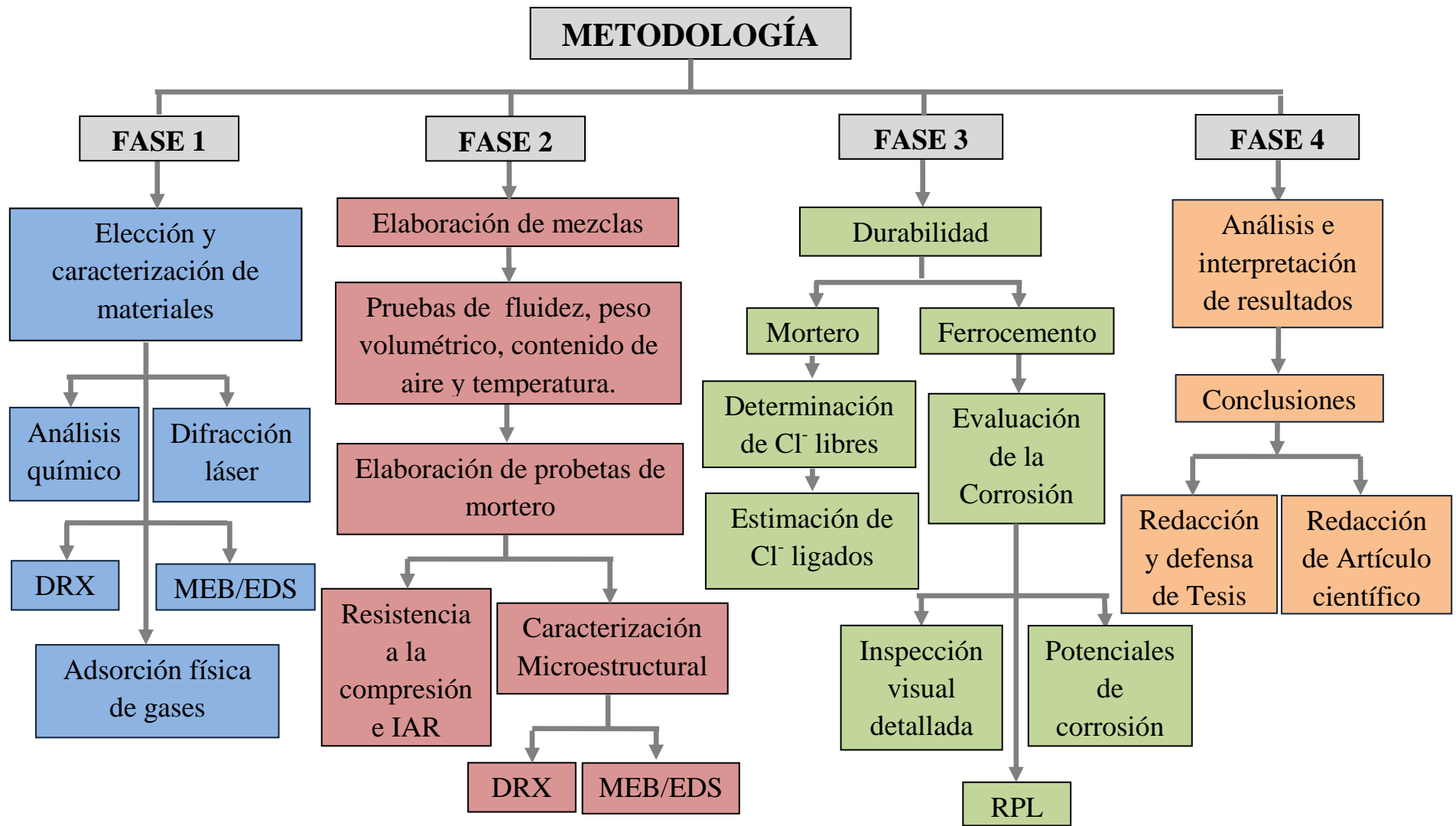


Figura 15: Metodología de la investigación

3.1 Diseño experimental

El diseño experimental de las fases 2 y 3 se muestra en la tabla 8, en la cual se observan todos los factores, niveles y variables.

Tabla 8: Diseño experimental de las fases 2 y 3

	FACTORES	NIVELES	Variables respuesta
F A S E 2 **	CBC, %	0	Resistencia a la compresión*
		10	
		20	
	Edad, días	1	Fases minerales de morteros
		7	
		28	
		90	Microestructura de morteros
F A S E 3 ***	CBC, %	0	Coefficiente de difusión de Cl⁻ libres
		10	
		20	
	Tiempo de curado, días	0	Inspección visual
		7	
		28	
			Potencial de corrosión
			Densidad de corrosión
<p><i>* También se consideraron 56 y 450 días de edad.</i></p> <p><i>** Se consideró un mortero con 20% de ceniza volante a 28 días de edad para fines de comparación.</i></p> <p><i>*** Se considero un mortero con 20% de ceniza volante a 28 días de curado para fines de comparación.</i></p>			

3.1.1 Diseño experimental para la fase 2

Factores

- *Ceniza de bagazo de caña (CBC):* Se eligió utilizar CBC puesto que podría incrementar la resistencia a la compresión y mejorar la microestructura del mortero, ya que se crean nuevos productos cementantes a partir de las reacciones puzolánicas entre el SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O de la CBC con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento.
- *Edad:* Se consideró el incremento de la edad de los morteros puesto que se podrían tener mejoras de las propiedades mecánicas y microestructurales. Además al

adicionar nuevos materiales tales como la CBC podrían tenerse variaciones en dichas propiedades en comparación con un mortero sin adiciones puzolánicas.

Niveles

- *Porcentaje de adición de CBC:* Se seleccionaron 0, 10 y 20% de CBC, siendo 0% para el mortero control, es decir sin adiciones puzolánicas, Se incorporó 10 y 20% CBC con base en lo reportado en la literatura en donde se menciona que el reemplazo de hasta 20% de cemento por CBC no afecta significativamente la resistencia a compresión (Ganesan et. al 2007, Hernández 2010, Morales et al. 2009, Noor-ul 2011, Maldonado et al. 2012). Además se consideró una mezcla de referencia con 20% de adición de CV para fines comparativos.
- *Edad:* Se seleccionaron edades de 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días para resistencia a la compresión, 1, 7, 28 y 90 para caracterización microestructural. 1 día para evaluar los morteros a edad temprana, 7 días puesto que es muy común en proyectos de campo, 28 días con base a la normatividad ASTM y 56, 90 y 450 días para evaluar los efectos de la adición de la CBC a edades tardías.

Variables respuesta

- *Resistencia a la compresión:* La obtención de la resistencia a la compresión permite evaluar la calidad del mortero con base a su resistencia ante la aplicación de una carga por área determinada. La calidad es importante e influenciada por aspectos como la porosidad del mortero.
- *Fases minerales de morteros:* El análisis de las fases minerales permite evaluar de manera cualitativa y semi-cuantitativa la formación y evolución de los compuestos formados en el mortero a través del tiempo, así como identificar nuevas fases creadas debido a la adición de otros materiales tales como la CBC. El conocimiento de estas fases permite explicar los cambios en algunas propiedades del mortero, tales como la resistencia a la compresión.
- *Microestructura de morteros:* La evaluación de la microestructura permite conocer de manera cualitativa y a nivel microscópico la formación y evolución de compuestos que modifican la matriz cementante de los morteros, especialmente por la adición de nuevos materiales tales como la CBC y por el incremento en la edad del mortero.

3.1.2 Diseño experimental para la fase 3

Factores

- *Ceniza de bagazo de caña (CBC)*: Se utilizó CBC puesto que podría densificar la matriz cementante del mortero y por tanto disminuir el ingreso de agentes agresivos como los iones cloruro e incrementar la durabilidad del ferrocemento. Lo anterior puede atribuirse a la creación de nuevos productos cementantes a partir de las reacciones puzolánicas.
- *Tiempo de curado*: Se consideró el tiempo de curado puesto que es uno de los factores más importantes en el proceso de hidratación de los materiales cementantes, por lo que es importante evaluar su influencia y la interacción con los distintos porcentajes de adición de CBC.

Niveles

- *Porcentaje de adición de CBC*: se seleccionaron los mismos niveles de la fase 2.
- *Tiempo de curado*: Se seleccionaron tiempos de curado de 0, 7 y 28 para determinar los coeficientes de cloruros y corrosión del ferrocemento. 0 días para evaluar la ausencia de curado 7 días puesto que es muy común en proyectos de campo, 28 días con base a la normatividad ASTM.

Variables respuesta

- *Coefficientes de difusión de cloruros*: El análisis de los coeficientes de difusión de cloruros permiten determinar la cantidad de cloruros que penetran en el mortero a través de la red de poros, de esta manera puede inferirse la durabilidad de las estructuras.
- *Inspección visual*: La realización de la inspección visual provee de evidencia física acerca del deterioro de un material expuesto a condiciones adversas. Para fines de esta investigación permite evaluar el deterioro físico en el ferrocemento causado por la corrosión.
- *Probabilidad de corrosión*: El monitoreo de los potenciales de corrosión permite determinar que tan propenso es un metal a corroerse en un tiempo y condiciones determinados. Para el caso de materiales cementantes puede obtenerse por medio de la prueba de potenciales de corrosión.

- *Densidad de corrosión*: La estimación de la densidad de corrosión permite estimar la velocidad de corrosión a la cual se disuelve un metal en un ambiente corrosivo. En sistemas como concretos reforzados puede obtenerse por medio de la prueba de resistencia a la polarización lineal (RPL).

El diseño experimental de la fase 2 contempla 3 mezclas. En cada una se consideran 6 edades para evaluar la *resistencia a la compresión* y 3 mezclas con 4 edades cada una para estudiar las variables de *fases minerales* y *microestructura de morteros*, con lo anterior se tuvieron 18 y 12 tratamientos respectivamente. Para las cuatro variables de la fase 3 se elaboraron 3 mezclas con 3 tiempos de curado cada una, teniendo 9 tratamientos. Para ambas fases se consideró una mezcla adicional con adición de 20% de CV, para la fase 2 se consideró 28 días de edad y para la fase 3 fueron 28 días de curado. En total se tuvieron 41 tratamientos.

En la fase 2; para la medición de la variable *resistencia a la compresión* se elaboraron 3 réplicas y para las variables *fases minerales* y *microestructura de morteros* se elaboraron 2 réplicas por tratamiento. Para la fase 3 se elaboraron 3 réplicas para cada tratamiento. En la tabla 9 se muestran los tipos de probetas, números de réplicas, total de probetas y tiempos de prueba considerados para cada una de las variables de la experimentación.

Tabla 9: Características y total de probetas para las fases 2 y 3

	Variable respuesta	Tipo de probeta	Réplicas	Total de probetas	Tiempo de prueba
F A S E 2	Resistencia a la compresión	Cilindros de mortero (D = 7.5 cm y h = 15 cm)	3	72	A edades de 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días
	Fases minerales de morteros		2	2	A edades de 1, 7, 28 y 90
	Microestructura de morteros				
F A S E 3	Coefficiente de difusión de Cl⁻ libres	Cilindros de mortero (D = 10 cm y h = 20 cm)	3	30	A 63 días (28 de maduración + 35 por exposición a Cl ⁻)
	Inspección visual	Placas de ferrocemento de 25 x 20 cm y 3 cm de espesor	3	30	Semanalmente por 735 días*
	Potencial de corrosión				Diariamente por 735 días*
	Densidad de corrosión				Semanalmente por 735 días*

*Continuidad del monitoreo a partir del día 265

3.2 Métodos utilizados en la fase 1

3.2.1 Elección de Materiales

3.2.1.1 Materiales para la fase 2

Cemento: Para la elaboración de todas las mezclas de mortero se utilizó cemento Pórtland compuesto (CPC) 30R marca Apasco, el cual cumple con los requisitos de calidad estipulados por la norma mexicana del cemento NMX-C-414-ONNCCE. Se eligió este cemento debido a la comercialidad que tiene en la región y puesto que en comparación con otros tipos de cemento no contiene adiciones de puzolanas naturales de origen desconocido. Además el CPC contiene escorias de alto horno que son materiales puzolánicos-cementantes. Se espera que la influencia de la escoria de alto horno sea mínima en los resultados experimentales, puesto que se empleará una puzolana de origen natural.

Ceniza de bagazo de caña (CBC): La ceniza de bagazo de caña empleada en la elaboración de mezclas de mortero es un subproducto de desecho agrícola proveniente del ingenio azucarero “Constancia”, el cual pertenece al grupo Beta San Miguel, ubicado en Tezonapa, Veracruz, México. Esta ceniza es generada por la calcinación del bagazo de caña a temperaturas de entre 550 a 700⁰C y es recuperada por aspersión de agua durante la producción de azúcar de caña. Comúnmente es empleada como relleno de terraplén en un predio propiedad de este ingenio de donde fue recolectada para los fines de la presente investigación. En estudios previos (Hernández 2010) se le aplicaron postratamientos cribado y molido y se estimaron los índices de actividad resistente (IAR). Finalmente, en este trabajo y con base en las investigaciones de Hernández (2010) se eligió emplear aquella ceniza cribada por la malla ASTM No 200 (75µm), puesto que obtuvo los mayores IAR’s y menores requerimientos de energía para su activación puzolánica. La densidad de la CBC empleada fue de 2.19g/cm³ con un diámetro promedio de tamaño de partículas de 47µm.

Ceniza volante (CV): Se utilizó ceniza volante clase F marca Admix Tech, la cual tiene bajo contenido de calcio y una densidad de 2.27g/cm³ con un diámetro promedio de tamaño de partículas de 38µm.

Arena: Se empleó arena de río graduada puesto que es la opción más común y menos costosa para aplicaciones prácticas. Tuvo una densidad de 2.70g/cm³ y un módulo de finura de 2.45, cumpliendo con lo establecido por la norma ASTM C 33-03.

Agua: Se utilizó agua bidestilada para elaborar todas las mezclas de mortero con la finalidad evitar la presencia de sustancias ajenas, tales como los iones cloruro.

Aditivo: Debido a que la adición de CBC hizo menos trabajable el mortero, se utilizó un aditivo hiperfluidificante de la marca PLASTOL 4000 EUACO, cuya formulación es a base de policarboxilatos y no contiene iones cloruros cumpliendo con la norma ASTM-494, la cual lo clasifica como reductor de agua de alto rango Tipo F.

3.2.1.2 Materiales para la fase 3

Se emplearon cemento, CBC, CV, arena, agua y aditivo con las mismas características de los utilizados en la fase 2.

Reactivos para determinar coeficientes de difusión de Cl⁻: Se utilizaron los reactivos descritos por las normas NT BUILD 443 (penetración acelerada de Cl⁻), ASTM D-512 (para extraer Cl⁻ libres) y NT BUILD 208 (titulación por el método Volhard)

Acero de refuerzo: Se utilizaron dos capas de malla de acero galvanizado hexagonal con diámetro de 1 mm y abertura de 1/2" como refuerzo para las probetas de ferrocemento.

Cloruro de sodio: Comúnmente conocido como sal industrial, fue utilizada para elaborar la solución del ambiente agresivo simulado al que fueron expuestas las placas de ferrocemento.

3.2.2 Caracterización de materiales

Se caracterizaron física y químicamente el CPC y las CBC y CV para evaluar algunas de sus propiedades tales como: óxidos mayores, forma y distribución de tamaños de partículas, área superficial, fases minerales y morfología. Para esto se realizaron pruebas de análisis químico, difracción láser, adsorción física de nitrógeno, DRX y MEB/EDS.

3.2.2.1 Análisis químico

Los análisis químicos del CPC y de las CBC y CV fueron realizados en el Servicio Geológico Nacional Mexicano. El objetivo fue cuantificar los principales óxidos, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, ya que de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM 618 – 05 la suma de estos tres óxidos debe ser superior a 70% para que un material sea considerado con potencial puzolánico. Los métodos de prueba empleados fueron calcinación a 1000°C/gravimetría, digestión ácida en parrilla (H₂SO₄)/Volumetría, Fusión con mezcla de carbonatos/HCl/Gravimetría y digestión con tres ácidos (HF, HCl, y HNO₃)/I.C.P.Óptico.

3.2.2.2 Difracción láser

La técnica de difracción láser se empleó para determinar la distribución de tamaños de partículas distribuidas por volumen del CPC y de las CBC y CV. La prueba se realizó por vía húmeda empleando un analizador de partículas tri-láser marca MICROTRAC modelo S3500 (Figura 16), el cual mide ángulos de dispersión entre 0 y 172 grados. Las condiciones de trabajo fueron: rango de medición de 0.243 – 1408 micrones, considerando que las partículas son de forma irregular e índices de refracción de 1.7, 1.54 y 1.84 para el CPC y las CBC y CV respectivamente.



Figura 16: Analizador de distribución de tamaños de partículas Microtrac S3500

Para obtener la distribución de tamaños de partículas de cada materia, se tomó una muestra representativa de aproximadamente 1 gramo, misma que se depositó en el interior del analizador láser para que se mezclara y fluyera por medio del alcohol isopropílico. Los resultados se mostraban por medio del software Microtrac Flex versión 10.6.1 y posteriormente se trabajaron en la hoja de cálculo Microsoft Excel®.

3.2.2.3 Área superficial por el método BET

Las áreas superficiales de las CBC y CV fueron determinadas por medio de fisisorción o adsorción física de gases, el análisis se realizó basándose en el método BET (Brunauer-Emmet-Teller) y utilizando un equipo de la marca Quantachrome Instruments modelo Nova 2000e (Figura 17). El procedimiento consistió en colocar las muestras homogenizadas (menos de 0.5gr) en una celda para su desgasificación (remoción de humedad en los poros). Posteriormente las muestras se sometieron a vacío en un baño de nitrógeno a temperatura de 150°C; bajo estas condiciones se introdujeron volúmenes conocidos de nitrógeno en un intervalo de presión relativa de 0.050 a 0.30 tomando 11 puntos dentro de este rango. De esta manera al condensarse el nitrógeno sobre la superficie de la muestra se formó una monocapa que al analizarse por el método BET determina el área superficial del material. En este caso la determinación de dicha área se obtuvo mediante el software NovaWin versión 2.1®.



Figura 17: Equipo para fisiosición de gases de la marca Quantachrome Instruments

3.2.2.4 *Análisis de fases minerales por DRX*

Las fases minerales del CPC y de las CBC y CV fueron analizadas por medio de DRX. El procedimiento consistió en tomar una muestra representativa de aproximadamente 1 gramo de cada material y se colocaron en un portamuestras de acrílico para ser analizadas en un difractómetro marca Bruker AXS D8 advance (Figura 18) con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda_{\text{RX}} = 1.5418 \text{ \AA}$). Las condiciones de trabajo fueron a intervalos 2θ de 10 – 70 grados y tamaño de paso de 0.5 segundos e incrementos de 0.05 grados. De cada muestra se obtuvo un difractograma por medio del cual se identificaron cualitativamente las fases minerales mediante el software EVA versión 11.0.0.3®.



Figura 18: Difractómetro de rayos X Bruker AXS D8 advance

3.2.2.5 *Análisis de forma y tamaño de partículas por MEB*

Los tres materiales (CPC, CBC y CV) fueron observados a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido con la finalidad de su conocer forma, sus características superficiales y tamaños de partículas. Para la observación fue necesario que las muestras fueran conductoras, esto se logró recubriéndolas con deposiciones de oro-paladio utilizando una recubridora marca Denton Vacuum modelo Desk IV (Figura 19A). A continuación las

muestras se introdujeron en la cámara de observación de un microscopio electrónico de barrido de alto vacío marca JOEL modelo JSM – 6490LV (Figura 19B). Las condiciones de trabajo fueron de 20Kv como voltaje de aceleración y tamaño de abertura del emisor de electrones de 60 μ m. De cada muestra se obtuvieron micrografías y se midieron algunas partículas. También se realizaron microanálisis elemental por dispersión de rayos X de algunas partículas por medio del analizador EDS marca Oxford Instrument modelo 7573 con que el microscopio está equipado.



Figura 19: Recubridora y Microscopio electrónico de barrido

A) Recubridora de muestras Denton Vacum y B) Microscopio electrónico de barrido JOEL equipado con analizador EDS Oxford Instrument

3.3 Métodos utilizados en la fase 2

3.3.1 Diseño de mezclas

Se realizaron cuatro diseños de mezclas de mortero cuyas relaciones agua/materiales cementante (a/mc) y materiales cementantes/arena (mc/ar) fueron constantes, donde el cemento fue reemplazado parcialmente por 0, 10 y 20% de CBC y 20% de CV (mezclas CBC0, CBC10, CBC20 y CV20 respectivamente) (Tabla 10). La mezcla CV20 se consideró como un mortero referencia cuya finalidad fue la de comparar la actividad puzolánica entre un material conocido (CV) y un material poco evaluado (CBC). Para conservar constantes las relaciones a/mc y mc/ar, en las mezclas con adición de CBC fue necesario emplear aditivo, de esta manera se preservó la fluidez de morteros 110 \pm 5% establecido en la norma ASTM C 1437 puesto que se perdía trabajabilidad. Lo anterior se puede atribuir a la demanda de agua, forma y tamaño de partículas de la ceniza. En la tabla 10 se muestran los proporcionamientos de mezclas empleados.

Tabla 10: Proporcionamientos de morteros por m³

Mezcla	Cemento (kg)	CBC (kg)	CV (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Aditivo (ml/kg)*	a/mc**	mc/ar***
CBC0	465.0	0	0	293.0	1393.5	0	0.63	1:3
CBC10	416.1	46.2	0	291.3	1386.9	2.0	0.63	1:3
CBC20	366.4	91.6	0	288.5	1374.0	6.5	0.63	1:3
CV20	368.1	0	92	289.9	1380.3	0	0.63	1:3

* Aditivo empleado para alcanzar la fluidez de morteros de 110 ±5% (ASTM C 1437)
 ** Relación agua / materiales cementantes
 *** Relación materiales cementantes / arena

3.3.2 Elaboración de probetas de mortero

Durante la elaboración de mezclas de mortero se realizaron pruebas en estado fresco, tales como: fluidez, temperatura, peso volumétrico y contenido de aire (Figura 20), todas cumpliendo con lo especificado en la normatividad ASTM.

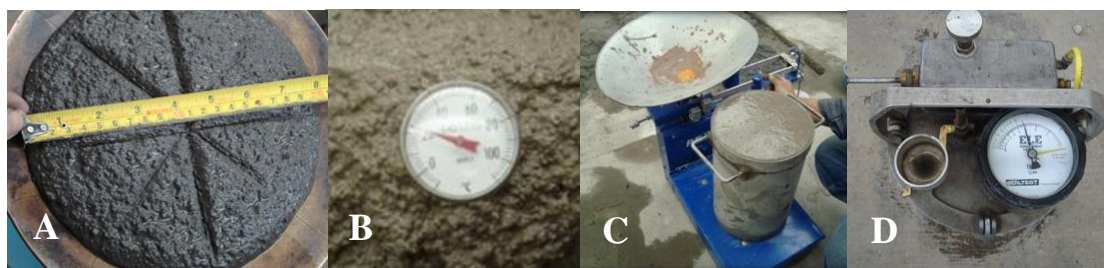


Figura 20: Pruebas en estado fresco

A) Fluidez B) Temperatura, C) Peso volumétrico y D) Contenido de aire

Para evaluar los efectos de la adición de la CBC se elaboraron probetas de acuerdo al diseño experimental de la Tabla 8. Para pruebas de resistencia a la compresión y caracterización microestructural se elaboraron cilindros de mortero de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura (Figura 21A). Para la obtención de coeficientes de difusión de cloruros libres se elaboraron cilindros de mortero de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, de las cuales se extrajeron muestras en polvo.

Finalmente se elaboraron placas de ferrocemento (Figura 21B) cuyas dimensiones fueron 25cm x 20cm y espesor de 3 cm, éstas se emplearon para estudiar el fenómeno de la corrosión mediante pruebas de inspección visual, potenciales de corrosión y RPL. El refuerzo colocado en las placas consistió de dos mallas de acero galvanizado de 1mm de diámetro y abertura de ½”, cuya sección rectangular fue de 21 x 16cm colocadas en el centro de la probeta. Para colocar el refuerzo se posicionaron de manera paralela nueve tensores de cuerda de nylon de 0.5mm de diámetro centrados en los tres ejes. Antes del acabado final, se retiraron las cuerdas y se vibraron las placas para cerrar los orificios dejados por las cuerdas. Además para poder realizar las pruebas de potenciales y RPL se

conectó al refuerzo de acero un cable calibre No. 14 AWG, en esta conexión se aplicaron tres capas de epóxico para prevenir corrosión galvánica.

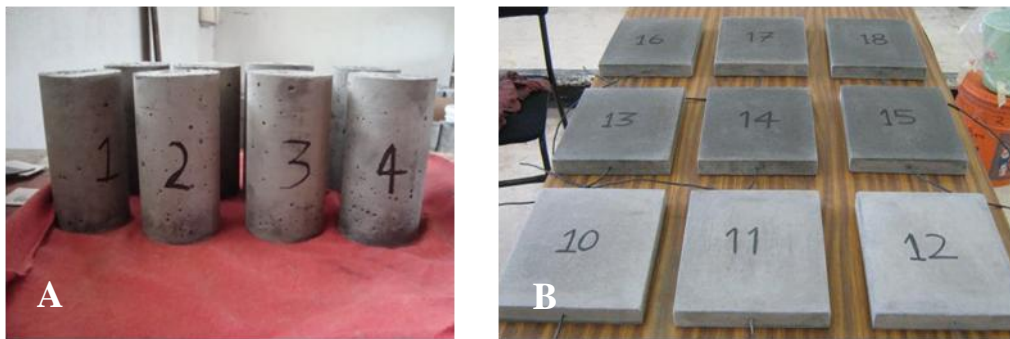


Figura 21: Probetas para experimentación
A) Cilindros de mortero y B) Placas de ferrocemento.

3.3.3 Pruebas de resistencia a compresión

Se obtuvo la resistencia a compresión en cilindros de mortero de acuerdo a la norma ASTM C 39/C 39M – 04^a. Para los ensayos se utilizó una prensa hidráulica marca ELVEC E 659-5 equipada con válvula regulable de aplicación de carga y capacidad de 120 toneladas. Para el cabeceo de las probetas se utilizaron bases metálicas y cojinetes de neopreno de ½” como se aprecia en la Figura 22. Los cilindros fueron ensayados a distintas edades siguiendo lo especificado en el diseño experimental de la sección 3.1.



Figura 22: Ensayo de resistencia a compresión de cilindros

3.3.4 Caracterización microestructural de morteros

Para la caracterización microestructural de los morteros se realizaron pruebas de DRX y MEB/EDS. La finalidad fue identificar y analizar la formación de compuestos y fases minerales creadas por la adición de CBC a distintas edades. Las muestras consistieron

en polvos y fragmentos de pasta cementante, para DRX y MEB respectivamente, obtenidas a partir de rodajas de mortero de medio centímetro de espesor cortadas a partir de cilindros de 7.5cm de diámetro por 10cm de altura (Figura 23). Las rodajas fueron sumergidas en acetona grado ACS como medio para detener el proceso de hidratación hasta el día de obtención de muestras y ensayo.

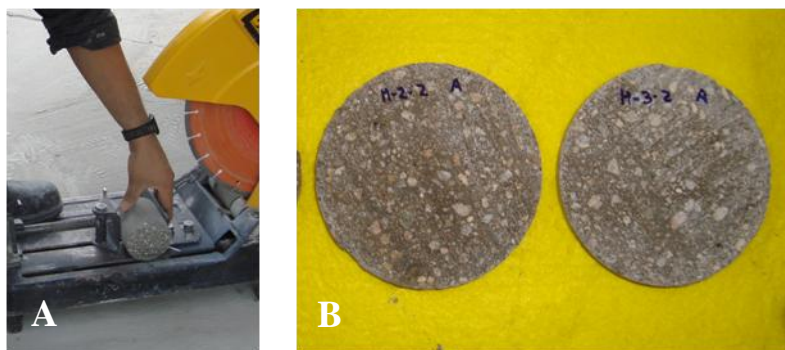


Figura 23: Muestreo para pruebas de DRX y MEB
A) Corte de cilindros de mortero y B) Rodajas de morteros

3.3.4.1 Difracción de Rayos X (DRX)

Para el análisis por DRX se obtuvieron muestras en polvo, el procedimiento de obtención consistió en fracturar las rodajas de mortero en un mortero metálico y retirar las partículas de agregado mayores (arena). En seguida las muestras se colocaron en un mortero de porcelana donde se pulverizaron empleando suficiente acetona para facilitar el proceso hasta obtener material cribado por la malla No.100 ASTM, eliminando de esta manera partículas de arena. El procedimiento se ilustra en la Figura 24.

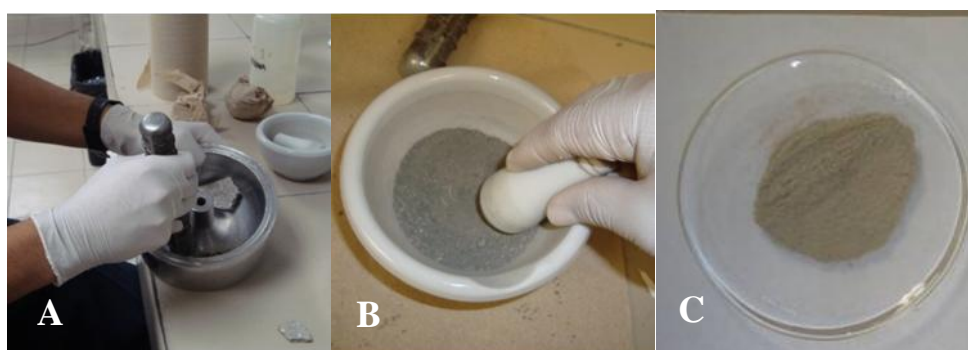


Figura 24: Preparación de muestras para DRX
A) Fractura de rodaja de mortero, B) Pulverización en mortero de porcelana y C) Muestra pulverizada y cribada por la malla No100 ASTM para DRX.

Los análisis de difracción de rayos X se realizaron colocando las muestras en polvo en un portamuestras de acrílico y se ensayaron en un difractómetro marca Bruker AXS D8 advance con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda_{\text{RX}} = 1.5418 \text{ \AA}$) (Figura. 25). Las pruebas se realizaron a

intervalos 2θ de 10 – 70 grados y tamaño de paso de 0.5 segundos e incrementos de 0.05 grados. Posteriormente se obtuvieron difractogramas, los cuales fueron analizados por medio el software EVA versión 11.0.0.3® para identificar las fases minerales presentes en cada uno de los morteros.



Figura 25: Muestras y ensayo de DRX

A) Muestras colocadas en el portamuestras de acrílico y B) Prueba de DRX.

3.3.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Para las observaciones en microscopía electrónica de barrido se obtuvieron fragmentos de pasta cementante. El procedimiento consistió en fracturar las rodajas de mortero y seleccionar pequeñas muestras de pasta (aproximadamente del tamaño de 1cm^3) (Figura 26) de la parte central de las rodajas. A continuación las muestras fueron colocadas un horno eléctrico a temperatura de $40\text{ }^\circ\text{C}$ por un periodo de 15 minutos para evaporar el excedente de acetona absorbida durante el almacenamiento de las rodajas. En seguida las muestras fueron recubiertas con aluminio dejando libre solo una de las caras, la cual se cubrió con deposición de oro-paladio para hacerla conductora, el recubrimiento se realizó utilizando una recubridora marca Denton Vacuum modelo Desk IV. Posteriormente se colocó cinta de carbón en la parte inferior de las muestras para poder fijarlas en el portamuestras. A continuación las muestras fueron colocadas en la cámara de observación de un microscopio electrónico de barrido de alto vacío marca JOEL modelo JSM – 6490LV equipado con un analizador de rayos X (EDS) marca Oxford Instrument modelo 7573. Las condiciones de trabajo fueron de 20Kv como voltaje de aceleración y tamaño de abertura de $60\mu\text{m}$.

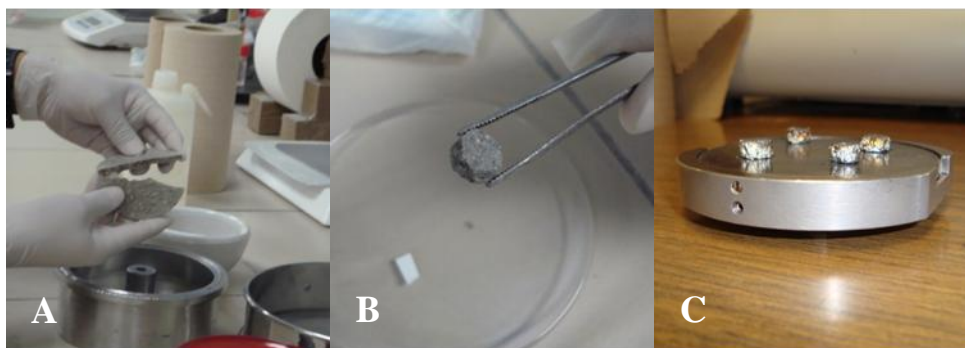


Figura 26: Preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido
A) Fractura de rodaja de mortero, B) Muestra de mortero seca y C) Muestras recubiertas con aluminio y en la superficie con deposición de oro-paladio.

3.4 Método empleados en la fase 3

3.4.1 Determinación de coeficientes de penetración de cloruros

Con base en los estudios e hipótesis de [Hernández \(2010\)](#), en los cuales se evaluó el contenido de cloruros totales en mezclas de mortero con adiciones de 0, 10 y 20% de CBC y de 20% de CV y tiempos de curado de 0, 7 y 28 días. En este trabajo se procedió a determinar los perfiles y coeficientes de penetración de cloruros libres en las mismas mezclas de mortero. Posteriormente se efectuó un análisis del contenido de cloruros ligados.

Para determinar los coeficientes de penetración de cloruros se elaboraron cilindros de mortero de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Los cilindros recibieron curados a 0, 7 y 28 días y se dejaron madurar 28 días de acuerdo con la norma NT BUILD 443. Posteriormente los cilindros fueron cortados por la mitad (Figura 27A). Una de las mitades se protegieron para evitar su contaminación y poder determinar la concentración inicial de cloruros, a las otras mitades se les aplicó tres capas de epóxico dejando descubierta solamente una de las caras circulares y fueron sumergidas en una solución de hidróxido de calcio puro saturado hasta tener variaciones menores al 0.5% en peso respecto al día anterior. Una vez saturadas fueron sometidas a exposición por cloruros durante 35 días en una solución de cloruro de sodio puro cuya concentración fue de 14.16%.

Culminado el periodo de exposición se extrajeron polvos de 10 capas a cada 2 mm de profundidad de cada una de las mitades (Figura 27B), para esto se utilizó un taladro extractor de polvos marca Profile Brinder, modelo Metabo. Además se extrajo una capa de 2 mm de espesor de cada una de las mitades sin contaminar. De los polvos extraídos se determinaron los contenidos de cloruros libres (Figura 27C) siguiendo los procedimientos de las normas ASTM D 512 para la extracción de Cl^- y NT BUILD 208 para titulación. El procedimiento consiste en agregar excesos de nitrato de plata en una solución que contiene

cloruros, de esta manera los cloruros precipitan a cloruros de plata, el exceso de iones de plata es titulado con solución de tiocianato de amonio. Al término de las pruebas experimentales se obtuvieron los perfiles de concentración de cloruros los cuales se graficaron y se calcularon coeficientes de difusión de cloruros libres con ayuda del software Table Curve versión 5.01®.

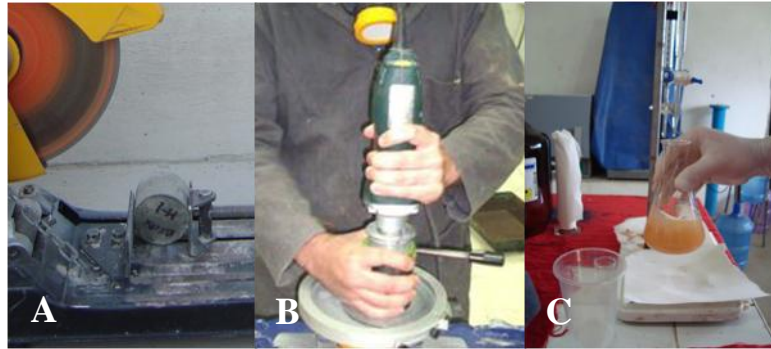


Figura 27: Determinación de contenido de cloruros
A) Corte de cilindros de mortero B) Extracción de polvos y C) Titulación

3.4.2 Determinación del deterioro por corrosión

El deterioro por corrosión fue evaluado sometiendo las placas de ferrocemento a un ambiente agresivo simulado (Figura 28). Dicho ambiente consistió en una solución salina cuya concentración fue del 3%. Esta solución se cambio periódicamente de acuerdo a la norma ASTM C 1543 con el fin de mantener la concentración de iones cloruros constante (Figura 28A). Para incrementar la agresividad del ambiente se simuló un efecto marea, teniendo ciclos de humedecimiento-secado de 12 horas cada uno (Figura 28B). Para esto se habilitó un sistema de bombeo en el cual las placas se sumergían durante todo el día en la solución mencionada y por las noches se vaciaba la solución. Además con la finalidad de evitar el efecto pabito se acondicionaron bases de plástico que permitían que las placas quedaran por encima de la solución que no se alcanzaba a drenar.

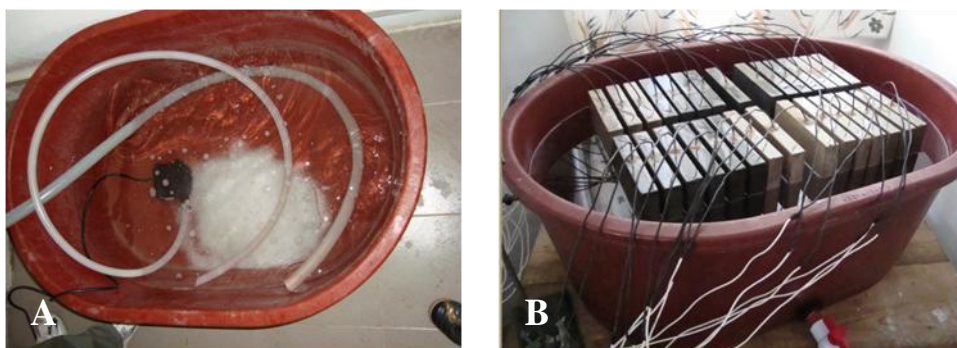


Figura 28: Acondicionamiento del ambiente agresivo simulado para evaluar el deterioro por corrosión en placas de ferrocemento

A) Cambio de solución salina y B) Ciclos de humedecimiento y secado

Una vez acondicionado el ambiente agresivo simulado, se realizó el monitoreo del deterioro por corrosión mediante pruebas de inspección visual, potenciales de corrosión y resistencia a la polarización lineal. En la tabla 11 se muestra el total de placas, tipos de pruebas, variables respuesta y frecuencia de realización de mediciones.

Tabla 11: Pruebas para detectar corrosión en especímenes de ferrocemento

<i>Especimen</i>	<i>Total</i>	<i>Tipo de Prueba</i>	<i>Variables respuesta</i>	<i>Frecuencia de mediciones</i>
Placas de ferrocemento	30	Inspección visual no destructiva	Daño físico visible externo	Semanalmente
		Potencial de corrosión	Probabilidad de corrosión	Diariamente
		Resistencia a la polarización lineal	Densidad de corrosión	Semanalmente

3.4.2.1 Inspección visual

La inspección visual (Figura 29) se realizó con el fin de detectar daños físicos evidentes en las placas de ferrocemento ocasionados por corrosión. Las inspecciones se realizaron semanalmente al termino de las pruebas de RPL y de manera detallada cuando existían cambios importantes, tanto físicos en las probetas, como variaciones en las lecturas electroquímicas. Para realizar la inspección visuales se extraían las probetas de ferrocemento del ambiente agresivo simulado, se secaban superficialmente y observaban de manera detallada con la finalidad de detectar daños que infieran deterioro por corrosión del acero del refuerzo, entre ellos manchas por corrosión, degradación de la pasta, agrietamiento, desconchamientos, eflorescencias, entre otros.



Figura 29: Inspección visual no destructiva detallada de placas de ferrocemento

3.4.2.2 Potenciales de corrosión

El potencial de corrosión (E_{corr}) determina la probabilidad de que un metal se corroa en un tiempo determinado bajo condiciones específicas. Las pruebas se realizaron diariamente a las 30 placas de ferrocemento mientras se encontraban en el ciclo de humedecimiento siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C 876-91. Para esto se empleó una media celda de plata-cloruro de plata y un voltímetro digital de alta impedancia marca M.C MILLER Co. Inc, modelo LC-4. En la figura 30A se observa la toma de potenciales de corrosión en placas de ferrocemento.

3.4.2.3 Resistencia a la polarización lineal (RPL)

La prueba de resistencia a la polarización lineal es útil para conocer la densidad (I_{corr}) y velocidad de corrosión de un metal (Figura 30B). Esta prueba se realizó a las 30 placas de ferrocemento semanalmente durante el ciclo de humedecimiento aprovechando la conductividad eléctrica de la solución salina en la que se encontraban inmersas. Las pruebas se llevaron a cabo con base en la norma ASTM G 59-91 utilizando un equipo potenciostato/Galvanostato/ZAR marca Gamry Serie G 300.

Durante las pruebas se conectaba el potenciostato a un cable de cobre que hacía contacto con el acero de refuerzo (electrodo de trabajo) de la placa de ferrocemento, también se conectaba una media celda de plata-cloruro de plata (electrodo de referencia) el cual hacía contacto con la solución salina, y finalmente se utilizaba un contraelectrodo externo de acero galvanizado. Cada prueba requirió un tiempo aproximado de 6 minutos y al término de ellas se procedió a determinar la densidad de corrosión de cada placa por medio del software Gamry Echem Analyst™ versión 5.1.3®.

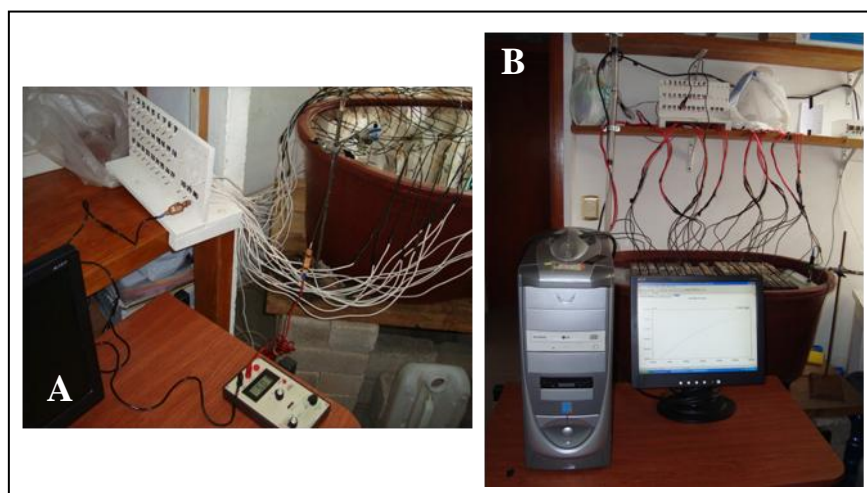


Figura 30: Realización de las pruebas electroquímicas en las placas de ferrocemento
A) Pruebas potenciales de corrosión y B) Pruebas de polarización lineal.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados de la fase 1

La caracterización físico-química del CPC y de las CBC y CV se realizó mediante análisis químico, difracción láser, adsorción física de nitrógeno, DRX y MEB/EDS. El objetivo fue conocer la composición química, tamaño y distribución de partículas, área superficial, fases minerales, forma y características superficiales de estos materiales, todos estos parámetros influyen en la evolución de la pasta cementante de los morteros así como en su durabilidad.

4.1.1 Análisis químico.

La composición química del CPC y de las CBC y CV se muestran en la tabla 12. Mediante el análisis químico se determinaron los óxidos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) presentes en cada material.

Para el caso de la CBC se tiene que la suma de los óxidos mayores fue del 76.02% (superando al 70% establecido en la norma ASTM C 618 para clasificarse como puzolana), teniendo 2.36% de CaO y 10.53% de pérdidas por calcinación. Estas pérdidas podrían atribuirse a que durante el proceso de quemado se tiene combustión incompleta del bagazo, probablemente por un pobre control de la temperatura de calcinado o suministro insuficiente de oxígeno. Si estas pérdidas se redujeran a menos del 6% la CBC podría clasificarse como puzolana clase F con base a la ASTM C 618, a reserva una evaluación en laboratorio (nota A de la tabla 1 de la ASTM C 618). Diversos autores (Martirena et al. 1998, Ganesan et al. 2007, Chusilp N. et al. 2009, Morales et al. 2009, Frías et al. 2011, Somma et al. 2012 y Cordeiro et al. 2012) han obtenido pérdidas por calcinación entre 0.4 y 20%, esto dependiendo del tipo de bagazo de caña, de los procesos y control del calcinado y postratamientos (cribado, molido, recalcinado).

En cuanto a la CV se obtuvo que la sumas de los óxidos mayores representa el 85.74%, teniendo 5.47% de CaO y 3.69 de pérdidas por calcinación. Con lo anterior se verifica que se trata de una puzolana clase F de acuerdo a la norma ASTM C 618

Tabla 12: Composición química del CPC y de las CV y CBC. PXC = pérdidas por ignición

	CPC	CBC	CV
Al ₂ O ₃	5.77	14.61	23.28
CaO	50.76	2.36	5.47
Fe ₂ O ₃	2.19	5.04	4.44
K ₂ O	0.92	3.29	0.95
MgO	1.36	1.43	1.37
Na ₂ O	0.91	1.57	0.62
P ₂ O ₅	0.12	0.85	0.30
PXC	6.97	10.53	3.69
SiO ₂	23.86	56.37	58.02
Σ de óxidos mayores	31.72	76.02	85.74

4.1.2 Difracción de rayos láser

Los resultados de los análisis por difracción láser muestran que los diámetros promedio del CPC, de la CBC y de la CV fueron 26.08, 55.37 y 37.71 μ m respectivamente, considerando una distribución por volumen (MV) la cual representa el centro de gravedad de la distribución. Así mismo, se tuvo que la desviación estándar (SD) para cada material fue de 19.39, 33.34 y 30.8 μ m respectivamente. Además, se tiene que el 90% de las partículas del CPC, CBC y CV son menores a 53.6, 105.2 y 92.2 μ m respectivamente; y que el 95.2, 77.8 y 86.0% de las partículas de CPC, CBC y CV pasan la malla No. 200 (75 micrones) ASTM.

En la figura 31 se pueden comparar las distribuciones de tamaños de partículas de los tres materiales. Al observar las distribuciones acumuladas (Figura 31A) se tiene que el CPC se encuentra en un rango de 1.156 y 209.0 μ m, la CBC entre 5.50 y 296.0 μ m y la CV entre 1.945 y 209.3 μ m. En la figura 31B se muestran las distribuciones relativas de tamaños de partículas en donde la CBC tiene un rango de distribución uniforme pero menor que el del CPC y de la CV. Al comparar estos dos últimos, el CPC tiene un mayor rango de distribución que la CV y formando dos distribuciones relativas (densidades) a 3.89 y 31.1 μ m, mientras que la CV muestra cinco distribuciones relativas, estando en 2.75, 5.5, 11, 18.5 y 52.336 μ m.

Con base en los resultados anteriores se puede mencionar que los beneficios en la microestructura de morteros adicionados con CBC podrían ocurrir a edades tardías en comparación con las mezclas que no contengan puzolanas. Lo anterior porque los tamaños de partículas afectan la densidad de la matriz cementante, a menores tamaños de partículas se puede tener mayor área superficial y por lo tanto se tendría una mayor reactividad puzolánica, haciendo más densa la matriz cementante del mortero.

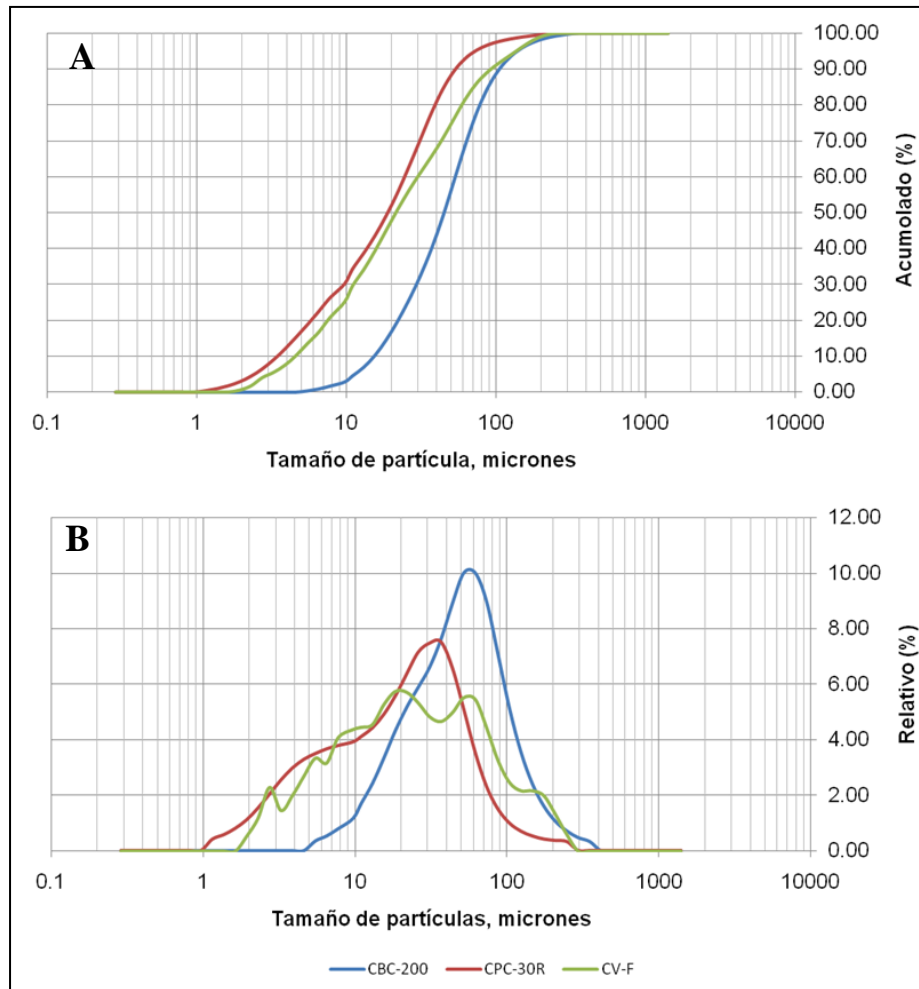


Figura 31: Distribución de tamaños de partículas de los tres materiales cementantes empleados A) Acumulado y B) Relativo.

Una de las implicaciones de los tamaños de partículas, como se explicó en la sección 2.1.3.1, es que cuando la distribución en el caso del cemento es demasiado fina puede reaccionar rápidamente causando que la evolución del calor de hidratación sea excesiva y se genere expansión en el mortero, en cambio si el tamaño de partículas es muy grande no se tendrá excesiva generación de calor de hidratación. También de acuerdo a la norma ASTM C 618, uno de los requerimientos físicos de las partículas de cemento o material alternativo, es que más del 65% de partículas pasen por la malla No 325 ASTM (45 μ m). En los resultados obtenidos de los análisis de distribución de tamaños de partículas se tiene que tanto el CPC como la CV cumplen con dicho porcentaje. Sin embargo la CBC no lo cumple. Al respecto podría mencionarse lo referente a la forma de las partículas, por ejemplo; mientras que para la CV las partículas tienden a ser redondeadas para la CBC pueden ser de forma prismática o aglomerada como lo han demostrado diversos autores al realizar observaciones microscópicas (Martirena et al. 1998, Cordeiro et al. 2009, Chulsilp N. et al. 2009, Frías et al. 2011, Maldonado et al. 2012), lo que podría influir en las

mediciones de los tamaños de partículas de tal manera que se incremente el tamaño promedio.

4.1.3 Área superficial por el método BET

Las áreas superficiales obtenidas por adsorción física de nitrógeno y análisis por el método BET fueron para la CBC y CV de 42.25 y 7.47 m²/g respectivamente. Estos valores son indicativos del área potencial de reacción puzolánica con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. Al comparar ambos resultados y considerando el análisis químico de sección 4.1.1, se puede mencionar que la CBC tiene una mayor área superficial debido a sus altos contenidos de carbón, ya que este podría ser poroso. Existen estudios (Valdez et al. 2004) en los cuales algunas puzolanas de origen natural llegan a tener áreas superficiales mayores a 25 m²/g y altas PXC (superiores a 7%). Así mismo mencionan que conforme incrementa el área superficial de la puzolana de origen natural los requerimientos de agua son mayores para obtener la misma fluidez que en pastas y morteros.

4.1.4 Composición mineralógica por difracción de rayos X

En la figura 32 se muestra el análisis de las fases minerales obtenidas por DRX para el CPC, se observan predominantemente fases de silicatos dicálcico y tricálcico, los cuales favorecen la formación de productos cementantes como el C-S-H y CH durante el proceso de hidratación. También se detectaron las fases de aluminato tricálcico y ferroaluminato de calcio, los cuales afectan la velocidad del fraguado y calor de hidratación. Así mismo se detectaron las fases correspondientes al carbonato de calcio y yeso.

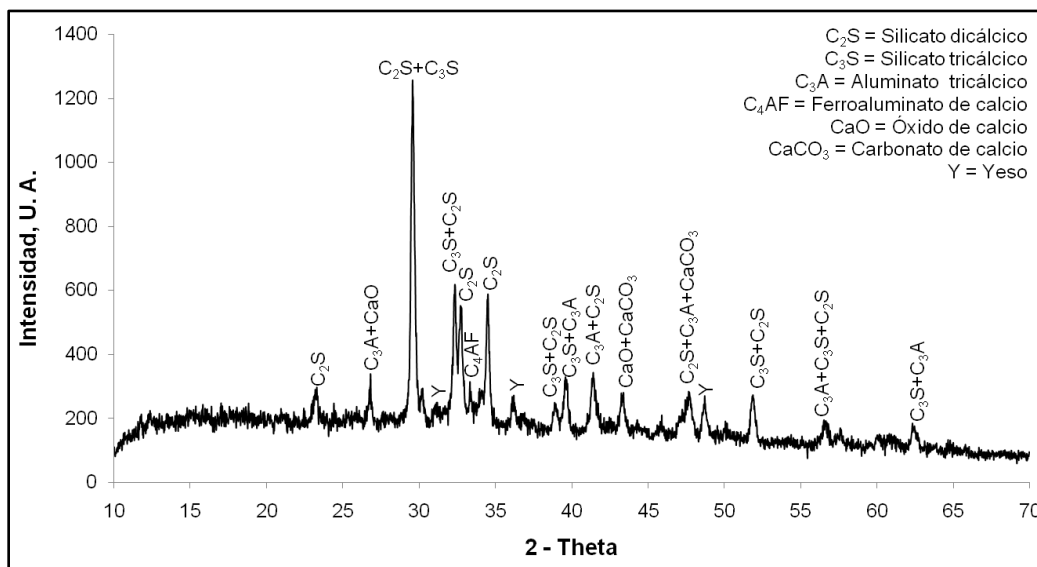


Figura 32: Difractograma del CPC

El difractograma para la CBC (Figura 33) muestra que se trata de un material con poca cristalinidad, lo cual puede observarse de manera relativa en la curva entre los ángulos 2θ de 10 a 35. Otros autores (Martirena et al. 2006, Ganessan et al. 2007, Morales et al. 2009, Cordeiro et al. 2009, Chulsip N. et al. 2009) también han reportado este tipo de curvas al evaluar la CBC por medio de DRX, los ángulos de aparición de esta curva de amorficidad difieren dependiendo del tipo de ceniza y condiciones de calcinado del bagazo. Estas curvas conformadas por varias señales de intensidades relativas sugieren la presencia de sílice y carbón en estado amorfo y cristalino (Morales et al. 2009, Cordeiro et al. 2012). Al analizar el patrón de difracción se detectaron las fases cristalinas de cuarzo y cristobalita como los componentes mayoritarios, algo similar a lo mostrado por otros autores (Martirena et al. 1998, Ganessan et al. 2007, Frías et al. 2011, Cordeiro et al. 2012). La diferencia entre estas dos fases compuestas por SiO_2 se encuentra en su morfología, la cual puede variar según los procesos térmicos y de presión que ha sufrido el sílice (Rahhal y Talero 2006). Además se detectaron dos picos correspondientes a la fase de carbón residual en los ángulos 2θ de 23.2 y 44.6, dicha fase podría atribuirse a las pérdidas por calcinación del bagazo (Cordeiro et al. 2012). Finalmente se detectaron las fases cristalinas de gibsita (Al_2O_3) y hematita (Fe_2O_3) las cuales, junto con el sílice amorfo, podrían favorecer las reacciones puzolánicas con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento Portland en los sistemas de morteros adicionados con CBC.

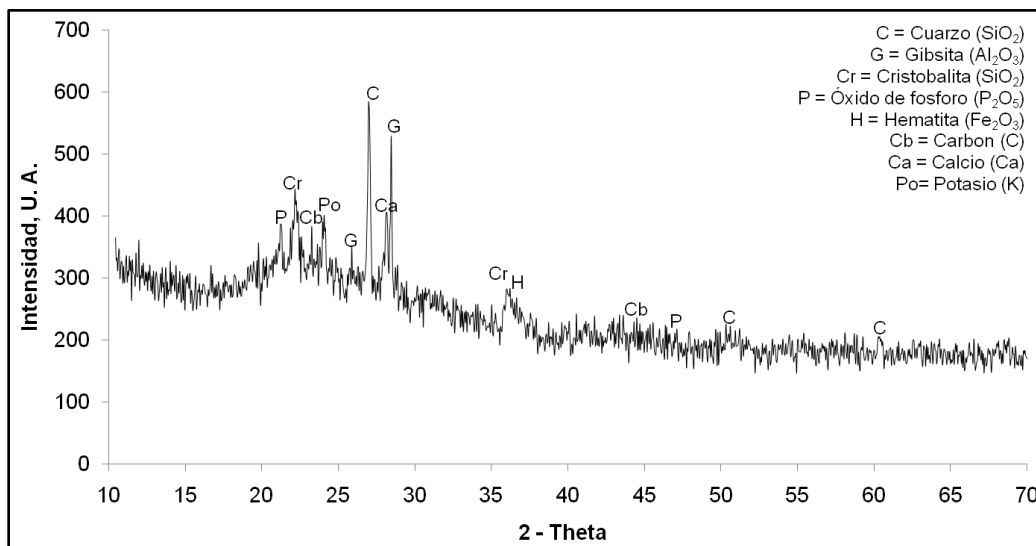


Figura 33: Difractograma de la CBC

El análisis por DRX (Figura 34) de la ceniza volante muestra que se encuentra conformada por las fases de cuarzo (SiO_2) y mulita ($\text{Al}_2\text{3Si}_7\text{O}_{4.85}$). Se observa que se trata de un material con fases amorfas de SiO_2 , puesto que se aprecia de manera relativa una curva entre los ángulos 2θ de 17 y 28. Malhotra y Ramezianpour 1994 mencionan que

para un ceniza volante con bajo contenido de calcio esta curva de amorficidad se encuentra entre los ángulos 2θ de 21 a 25.

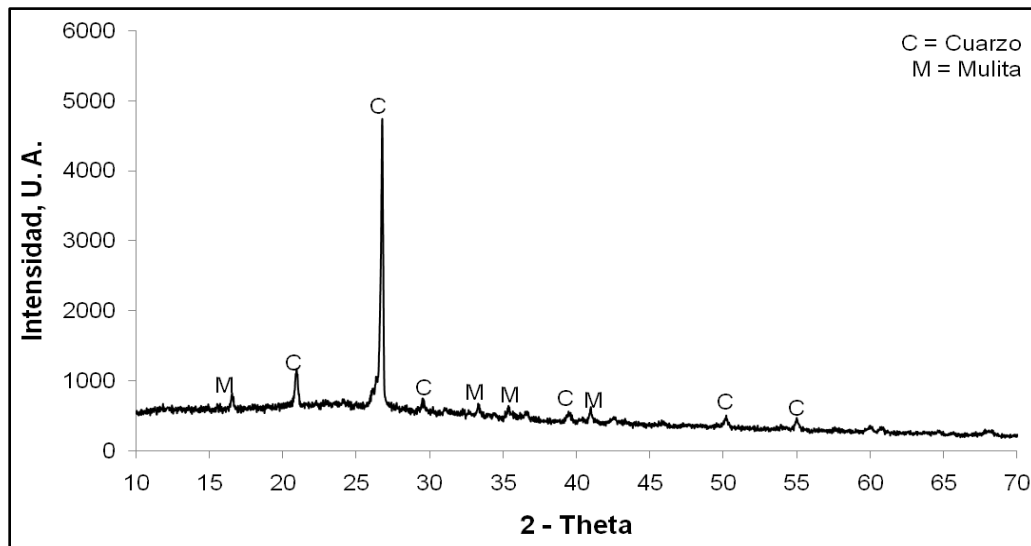


Figura 34: Diffractograma de la CV clase F

4.1.5 Morfología y composición elemental por MEB/EDS

4.1.4.1 Cemento Portland Compuesto

Las micrografías del cemento Pórtland compuesto obtenidas por microscopía de barrido revelan que se tienen partículas con diversas formaciones (Figuras 35 y 36) cuyos tamaños de partículas se encuentran en un rango de 3 a $47\mu\text{m}$ (Figura 35). Kosmatka 2004 menciona un rango de tamaños de partículas entre 45 y $100\mu\text{m}$ consecuencia de la pulverización del clinker. Como era de esperarse, los microanálisis EDS (Figura 36) muestran la presencia mayoritaria de Ca y O, componentes mayoritarios de los compuestos potenciales del cemento Pórtland, lo que se corrobora con los resultados del análisis químico (Tabla 12). Los resultados de los microanálisis elementales se muestran en la tabla 13.

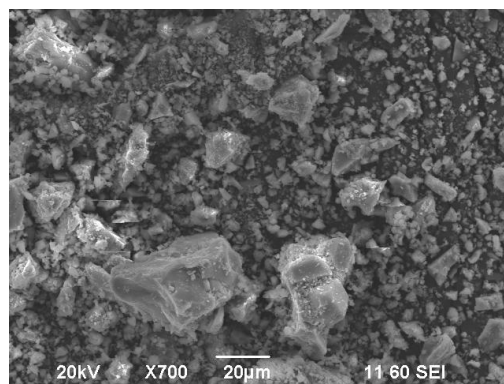


Figura 35: Micrografía del CPC, conformado por partículas de formaciones irregulares angulosas

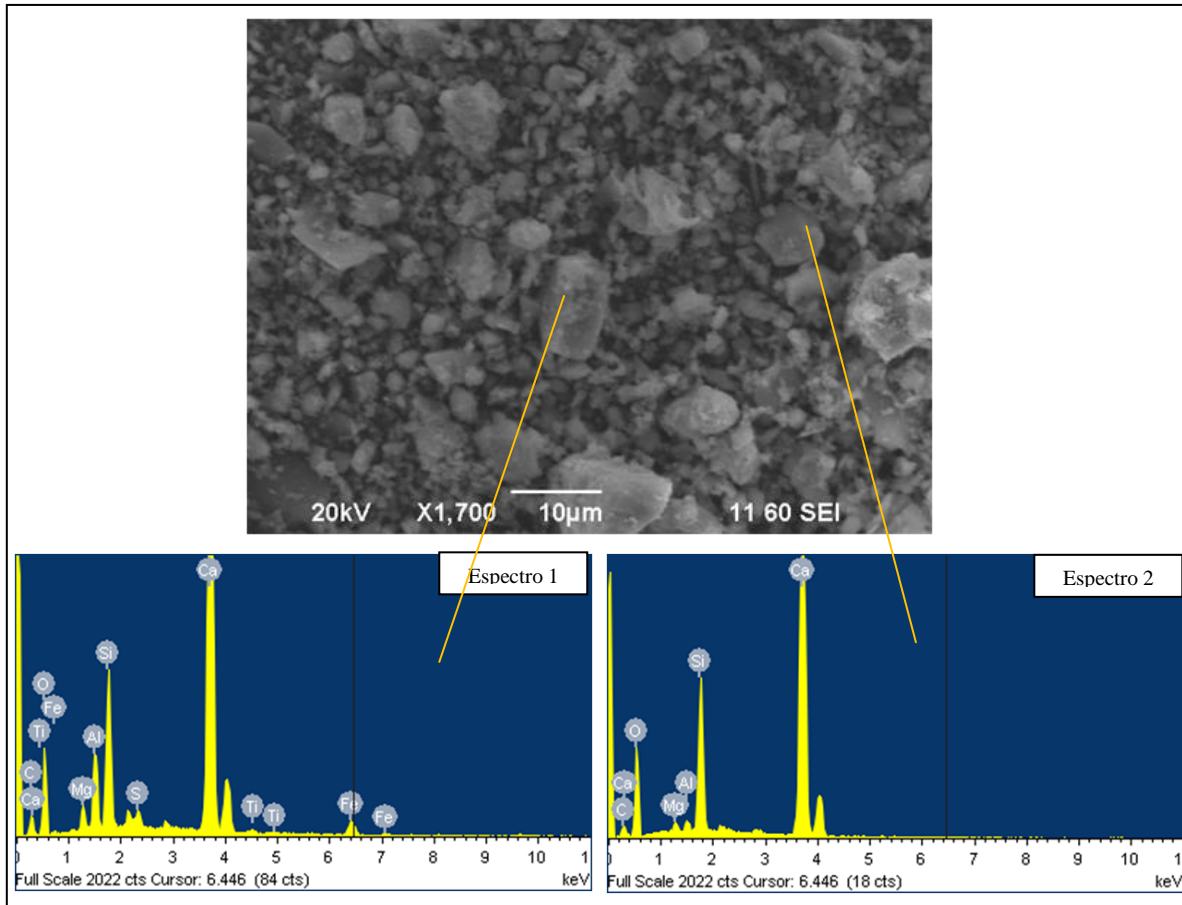


Figura 36: Análisis elemental por puntos de algunas partículas del CPC

Tabla 13: Análisis puntual por EDS del CPC. Porcentajes en peso

Cemento Portland Compuesto		
Microanálisis por EDS		
Elemento	Espectro 1	Espectro 2
Si	7.64 %	11.23 %
Al	3.74 %	0.74 %
Fe	2.84 %	0 %
Ti	0.41	0 %
Ca	33.93 %	41.15 %
C	5.62 %	4.31 %
Mg	1.39 %	0.73 %
O	43.68 %	41.84 %
S	0.75	0 %
Total	100 %	100 %

4.1.4.2 Ceniza de bagazo de caña

La morfología de la CBC (Figuras 37 y 38) observada por MEB muestra que se trata un material cuyos tamaños y formas de partículas son heterogéneos, teniendo tamaños entre 10 y 115µm, lo que concuerda con el rango de mediciones obtenido por la técnica de

difracción láser, la diferencia entre estos dos métodos radica en que en MEB la medición es selectiva y en el analizador se miden todas las partículas de la muestra.

Se pueden apreciar tres formas distintas de partículas en la CBC (Figuras 37 y 38): i) aglomerada, ii) prismática y iii) porosa, estos tipos de formas concuerdan con lo observado por diversos autores (Martirena et al. 1998, Cordeiro et al. 2008, Cordeiro et al. 2009, Chulsilp et al. 2009, Frías et al. 2011, Somma et al. 2012, Maldonado et al. 2012). En la figura 37A se pueden apreciar partículas con estructura aglomerada y algunas partículas con forma prismática presentando fallas concoidales, típico de materiales vítreos y con alta relación sílice-alúmina (Cordeiro et al. 2009, Frías et al. 2011, Maldonado et al. 2012). Además, en la figura 37B se aprecian algunas partículas de aspecto poroso con contenidos de sílice de más del 90%, estas estructuras son semejantes a las del bagazo de caña sin calcinar (Chulsilp et al. 2009, Somma et al. 2012).

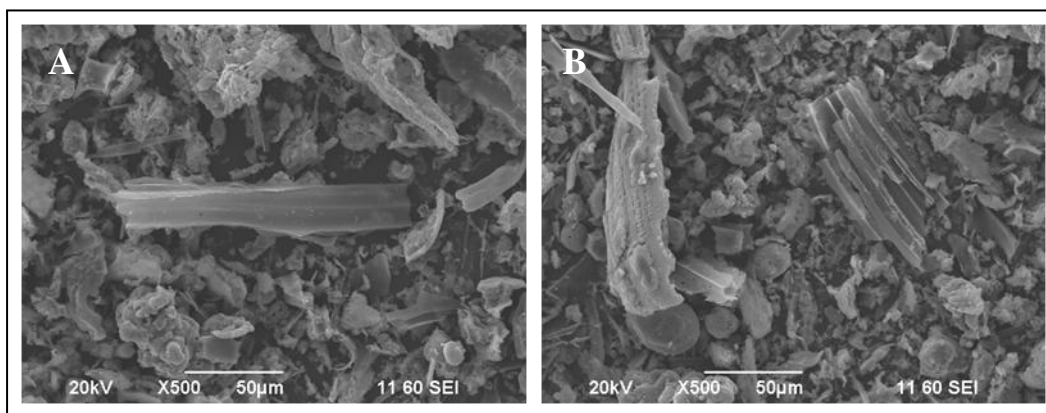


Figura 37: Micrografías de la ceniza de bagazo de caña

A) Partículas de estructura aglomerada y formas prismáticas y B) Partículas con estructura porosa.

El microanálisis elemental en área por EDS (Figura 38), muestra que la CBC contiene en su mayoría óxidos de sílice, aluminio y fierro, lo que concuerda con los análisis químicos realizados.

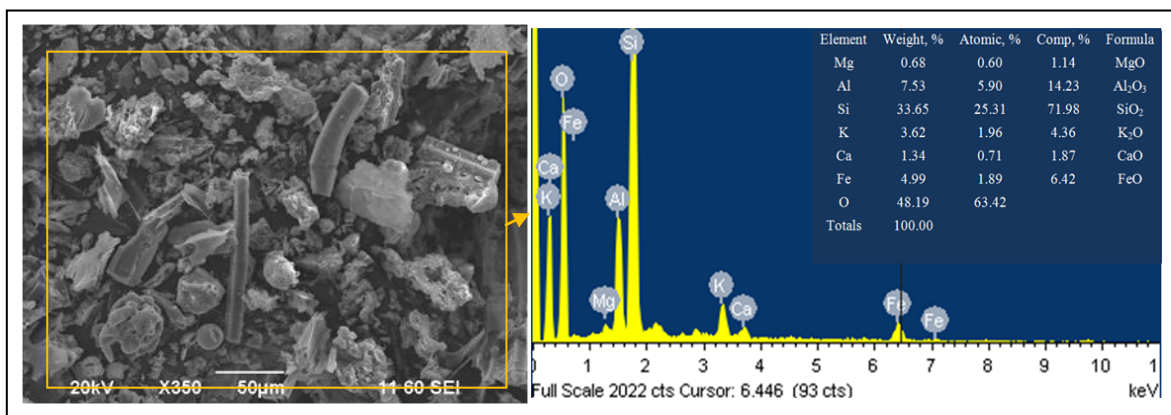


Figura 38: Análisis elemental por área de CBC

En la figura 39 se muestran los microanálisis elementales de cuatro puntos seleccionados, los elementos encontrados fueron Si, Al, Fe, K, Ca, C, Mg, Na, y O (Tabla 14). Al comparar los porcentajes de la tabla 14, se observa que los espectros 1 y 2 corresponde a partículas con alto índice de Si y O que al combinarse forman de SiO_2 en comparación con los espectros restantes. También se observó que los contenidos de carbón y álcalis (Na y K) están presentes en aquellas partículas de forma aglomerada (espectros 3 y 4 de la figura 39). El contenido de carbón, afecta algunas propiedades mecánicas como la resistencia a compresión (Chulsilp et al. 2009), así como el tiempo de fraguado.

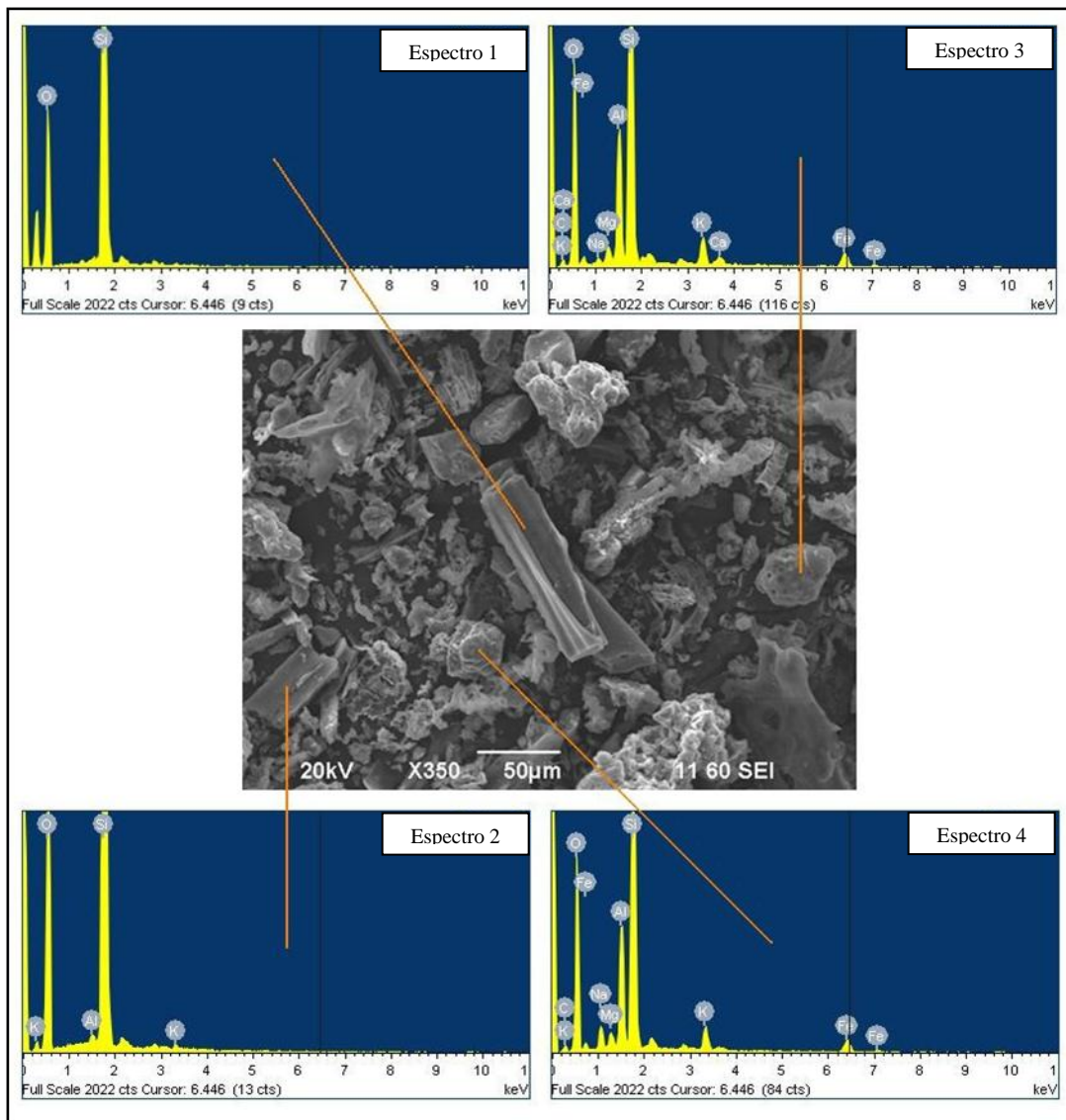


Figura 39: Análisis Elemental por puntos de la CBC

Tabla 14: Análisis puntual por EDS de la CBC. Porcentajes en peso

Ceniza de Bagazo de Caña				
Microanálisis por EDS				
Elemento	Espectro 1	Espectro 2	Espectro 3	Espectro 4
Si	46.74 %	46.21 %	24.22 %	26.53 %
Al	0 %	0.38 %	6.82 %	7.84 %
Fe	0 %	0 %	3.51 %	3.44 %
K	0 %	0.34 %	2.40 %	2.39 %
Ca	0 %	0 %	0.65 %	0 %
C	0 %	0 %	6.77 %	4.46 %
Mg	0 %	0 %	0.89 %	0.91 %
Na	0 %	0 %	0.51 %	2.43 %
O	53.26 %	53.06 %	54.22 %	52.10 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %

4.1.4.3 Ceniza Volante

En las micrografías de la CV (Figura 40) se identifican partículas esféricas, redondeadas e irregulares. La distribución de tamaños de partículas es del orden de 5 a 25 μm (Figura 40A). También se pudieron apreciar algunas plerosferas en cuyo interior se alojan partículas de CV de menor tamaño (Figura 40B) (Martínez 2007). La tabla 15 muestra la composición elemental por microanálisis EDS de tres partículas de CV que se muestran en la figura 41. Se observa que las partículas de los espectros 1 y 2 están formadas principalmente de silicio, aluminio y calcio (menor al 10%), por lo que estas partículas provienen de la quema de carbón bituminoso, lo anterior clasifica a esta CV como clase F de acuerdo a la norma ASTM C 618. Sin embargo, existen algunas partículas (tal es el caso de la partícula del espectro 3) en las cuales el contenido de calcio es mayor al 10%. Lo anterior podría proveer a la CV de propiedades cementantes.

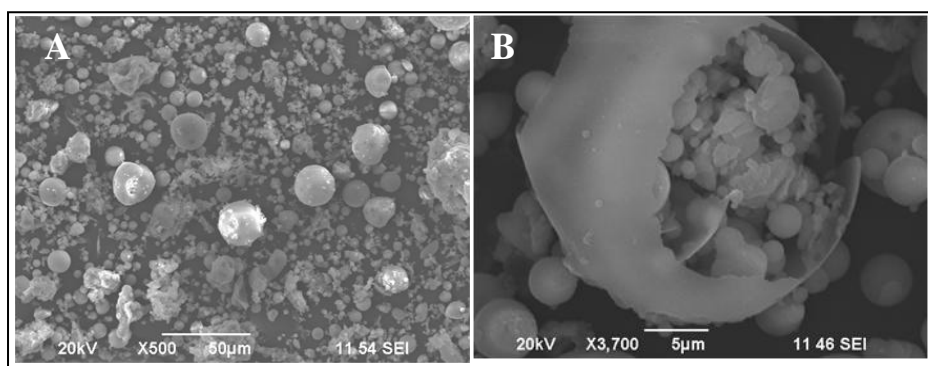


Figura 40: Micrografías de la ceniza volante
a) Medición de tamaños de partículas y b) Plerosfera

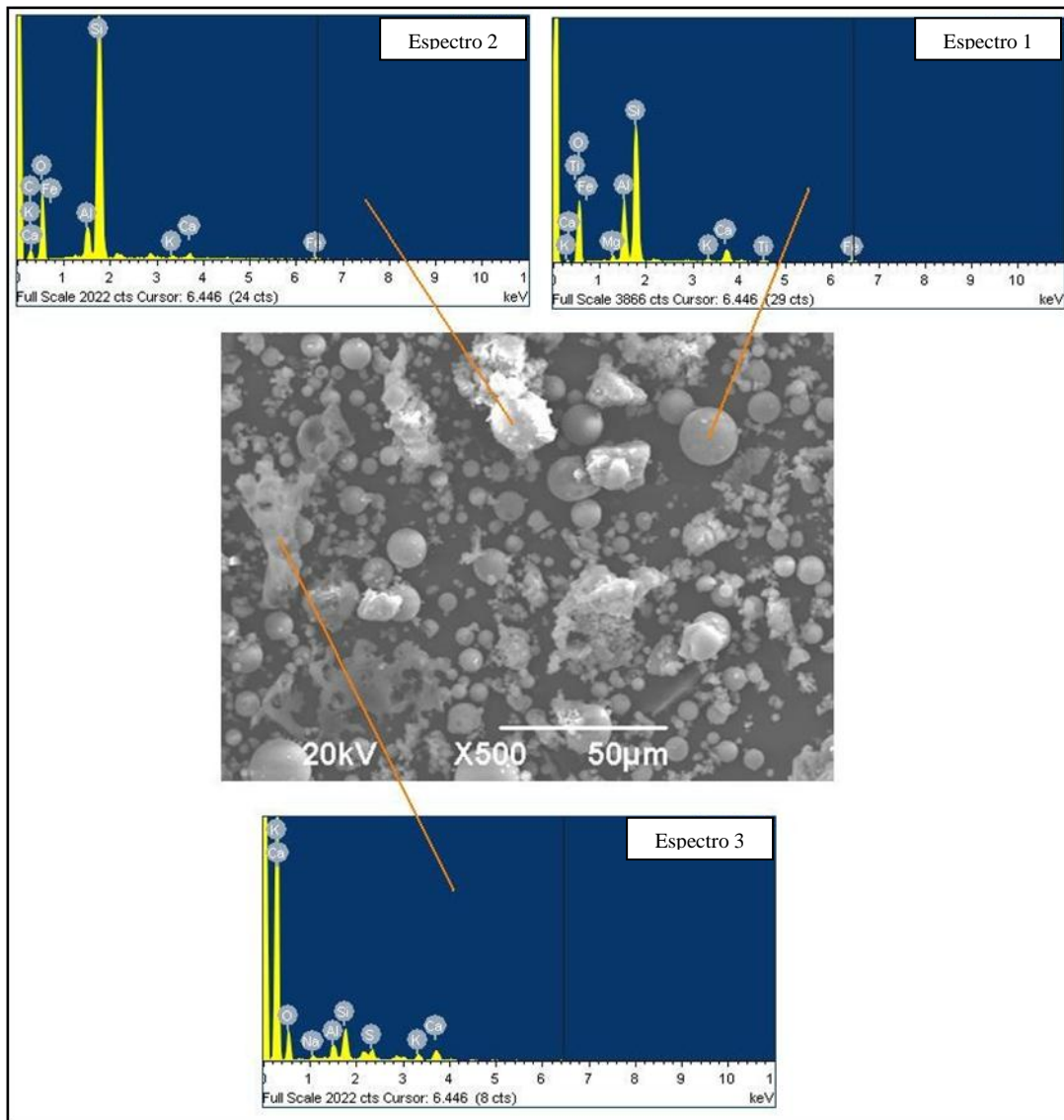


Figura 41: Análisis elemental por puntos de la CV

Tabla 15: Análisis puntual por EDS de la CV. Porcentajes en peso

Ceniza Volante			
Microanálisis por EDS			
Elemento	Espectro 1	Espectro 2	Espectro 3
Si	30.94 %	25.95 %	19.65 %
Al	11.77 %	2.40 %	8.45 %
Fe	1.53 %	0.85 %	0 %
K	0.67 %	0.32 %	5.59 %
Ca	4.34 %	0.65 %	10.24 %
C	0 %	10.25 %	0 %
Mg	0.10 %	0 %	0 %
O	49.11 %	59.58 %	45.95 %
Total	100 %	100 %	100 %

4.1.4.4 Discusión de resultados del CPC y de las CBC y CV por MEB

Durante las observaciones del CPC y de las CBC y CV por microscopía electrónica de barrido, se pudo obtener la distribución de tamaños de partículas, los cuales se compararon con las mediciones por difracción de rayos láser, teniendo resultados correlativos. También se observaron detalles como: algunas partículas de cemento aglomeradas (Figuras 35 y 36), la diversidad de formas de partículas de la CBC, algunas de ellas porosas (Figura 37), la existencia de plerosferas de CV y una pequeña fracción de partículas de tamaño superior a $100\mu\text{m}$ (Figura 40). En cuanto a los análisis EDS realizados, corroboran que el CPC contiene mayormente calcio y que las CBC y CV sílice, alúmina y fierro, siendo elementos de mayor importancia, respectivamente. En el caso del CPC, mediante los análisis EDS se determinó que la mayor parte de partículas se conforma por silicatos de calcio ya que los análisis demuestran la presencia mayoritaria de calcio, silicio y oxígeno, lo que concuerda con el difractograma de la figura 32. Sin embargo, mediante los análisis EDS se tiene información de que la CBC se conforma por algunas partículas compuestas por más del 95% de SiO_2 , que de acuerdo al difractograma de la figura 33 se puede decir que parte de este compuesto se encuentra en estado amorfo.

4.2 Resultados de la fase 2

4.2.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión en cilindros de mortero se obtuvo a 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días de edad para todas las mezclas. Los resultados (Figura 42) indican que conforme incrementa la edad, la resistencia a la compresión incrementa en todas las mezclas puesto que existe suficiente humedad para propiciar las reacciones de hidratación del cemento y las reacciones puzolánicas de la CBC y CV. Los incrementos en la resistencia a compresión son indicativos de mejoras en la calidad de la matriz cementante.

En cuanto al efecto de adicionar CBC, se observó que a 1 y 7 días de edad las resistencias a compresión del mortero control (CBC0) fueron mayores que las de los morteros con 10% de CBC (CBC10) y con 20% de CBC (CBC20). A partir de los 28 días las resistencias a compresión de los morteros CBC0 fueron menores que las de los morteros CBC10 y CBC20.

También se observó que conforme se incrementa el contenido de 10 a 20% de CBC, la resistencia a compresión disminuye entre 7 y 12% en edades de 1 a 90 días, efecto similar mostrado por otros investigadores en mezclas de morteros y concretos (Sing et al. 2000, Ganesan et al. 2007, Cordeiro et al. 2010, Hernández 2010, Maldonado et al. 2012) donde porcentajes mayores a 10% de adición de bagazo de caña disminuyen la resistencia a compresión. Sin embargo a 450 días se observó que la resistencia a compresión del mortero

CBC20 incrementó 9.7% con respecto a la resistencia a 90 días, no obstante, el mortero CBC10 permaneció sin incremento considerable a esas mismas edades. Lo anterior podría atribuirse a que después de 90 días existe mayor contenido de CBC sin reaccionar en la mezcla con 20% de adición.

Para el caso de los morteros CV20, se observó que la resistencia a compresión fue mayor que la de los morteros CBC0 y CBC20 a partir de los 56 días de edad y mayor a la del mortero CBC10 a 450 días. Lo anterior sugiere que los beneficios de la actividad puzolánica de la CBC utilizada ocurren a menores edades con respecto a la actividad de la CV, puesto que en la última edad de ensayo la resistencia del mortero CV20 supera a las de los demás.

Al comparar las resistencias a la compresión de las mezclas CBC20 y CV20 se puede apreciar que la CBC requiere un periodo más corto (aproximadamente 28 días para incrementar la resistencia a la compresión en comparación a con la CV. Lo anterior podría atribuirse al área superficial de las partículas de CBC puesto que se tiene mayor área de reacción y al efecto filler que producen las partículas inorganicas y/o cristalinas al diluir el cemento Pórtland (Bonavetti y Rahhal 2006, Rahhal y Talero 2006). Algunos investigadores (Toutanji 2004, Ashraf et al. 2009) reportan que la CV requiere de periodos largos del orden de 90 días o más para incrementar la resistencia.

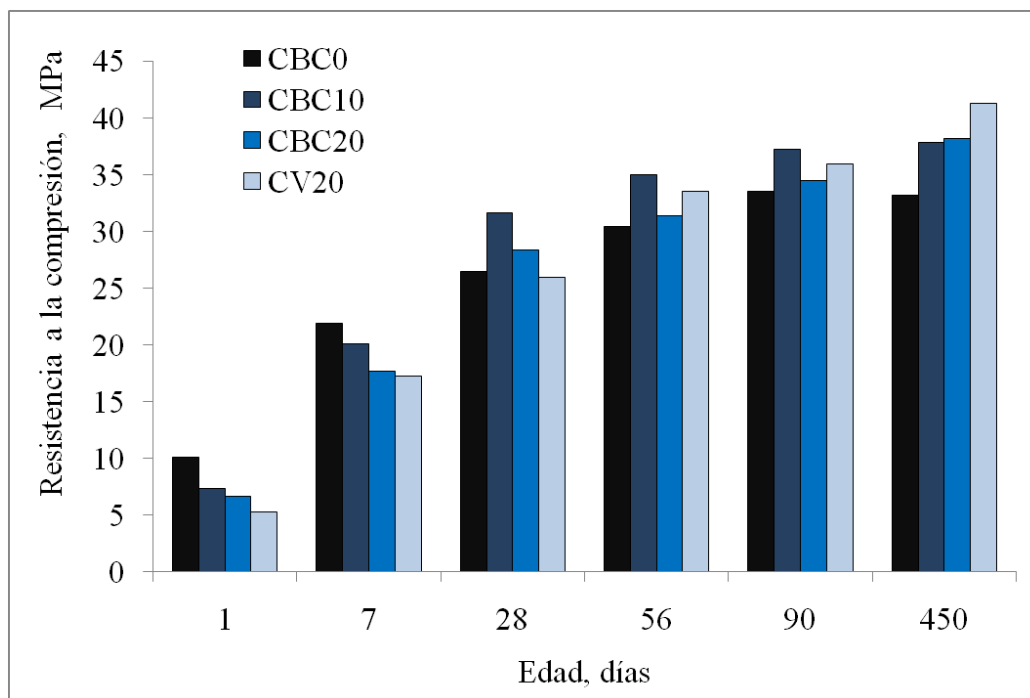


Figura 42: Resistencia a compresión de mortero a 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días de edad

4.2.2 Índice de actividad resistente

La norma ASTM C 311 menciona que el IAR se puede obtener a partir de cubos de 5cm. Sin embargo en esta investigación se estimaron los IAR's (Tabla 16) a partir de ensayos a compresión de cilindros de 7.5cm de diámetro por 15cm de altura en los cuales se empleo como agregado, arena de río. Se observa que los mayores IAR's los obtuvo la mezcla CBC10 a edades de 1, 7, 28, 56 y 90 días, pero a 450 días las mezclas CBC20 y CV20 obtuvieron mayores IAR's.

Tabla 16: Índices de actividad resistente de las tres mezclas con adiciones puzolánicas a 1, 7, 28, 56, 90 y 450 días de edad. Resultados en porcentaje

Índices de actividad resistente						
Mezcla	1 día	7 días	28 días	56 días	90 días	450 días
CBC10	72	92	120	115	111	114
CBC20	66	81	107	103	103	115
CV20	52	79	98	110	107	124

4.2.3 Caracterización microestructural de morteros

La caracterización microestructural de morteros se realizó por medio de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido con microanálisis elemental por dispersión de energía de rayos X (MEB / EDS) a 1, 7, 28 y 90 días de edad. De manera general se puede mencionar que a mayor edad se tienen incrementos en las intensidades de las fases cristalinas de silicato hidratado de calcio (C-S-H) e hidróxido de calcio (CH), como principales productos de hidratación identificados por DRX, estos incrementos se pudieron observar por medio de MEB. Lo anterior podría dar explicación a los incrementos en las resistencias a compresión observadas en la sección 4.2.1.

4.2.3.1 Análisis de fases cristalinas por DRX en morteros

El objetivo del análisis por DRX fue identificar la formación y evolución de las fases minerales en el proceso de hidratación, a diferentes edades y por la adición de CBC y CV.

4.2.3.1.1 Mortero CBC0

En los resultados de DRX de los morteros sin adiciones se observaron las fases minerales de C-S-H y CH, como los principales productos cementantes formados por la hidratación del cemento (Figura 43). Ambas fases se formaron a partir de los silicatos dicálcico (alita) y silicatos tricálcicos (belita) presentes en el cemento (Escalante 2002, Giraldo y Tobón 2006). Ambos compuestos proveen a los sistemas cementantes resistencia

mecánica, adherencia y un pH adecuado (entre 12-13) que protege contra la corrosión a los concretos y morteros armados.

A un 1 día de edad, además de las fases de C-S-H ($4\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) en los ángulos 2θ de 20.9, 28.3 y 29.1 (convolucionado con otras señales) y CH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en los ángulos 2θ de 18 y 30, también se detectó la fase cristalina de silicato de calcio (CaSiO_3) en el ángulo 2θ de 27.5, la presencia de esta fase podría atribuirse a partículas de cemento (alita o belita) sin hidratar. Además se identificó la presencia de etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 25\text{H}_2\text{O}$) temprana. Las fases de cuarzo (SiO_2) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_3$) se imputan a partículas del agregado (arena) silicoaluminoso pulverizadas durante el proceso de obtención de muestras. A 7 días se observó que la fase del silicato de calcio disminuyó en intensidad debido a su consumo para formar compuestos cementantes, Asimismo se tuvieron incrementos en las intensidades de la fases cristalinas del C-S-H en el pico correspondientes al ángulo 2θ de 29.1 y del CH en los picos de los ángulos 2θ de 18 y 30.1.

A 28 días de edad las fases de C-S-H de los ángulos 2θ de 20.9 y 29.1 y CH permanecieron sin cambios considerables. Sin embargo se detectó otra fase de C-S-H cuya estequiometría es distinta ($\text{CaSiO}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$) a la fase de C-S-H encontrado a edades tempranas. Esta nueva fase de C-S-H se detectó en los ángulos 2θ de 24.8 y 29.5 convolucionada con la intensidad de la primer fase de C-S-H del ángulo 2θ de 29.1. La existencia de dos o más fases de C-S-H con estequiometrías distintas ha sido reportada por diversas investigaciones (Diamond 2004, Richardson 2008, Arizzi y Cultrone 2012) en donde mencionan que el C-S-H tiene estructuras cristalinas poco ordenadas sin embargo son las fases responsables de la resistencia mecánica del sistema cementante.

Finalmente a 90 días de edad se observaron considerables incrementos en ambas fases de C-S-H y en la fase de CH. A esta misma edad también detectó una fase cristalina de silicoaluminato de calcio hidratado (C-A-S-H) con estequiometría definida como $\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10.6}\cdot \text{H}_2\text{O}$ en el ángulo 2θ de 11.8. Esta fase contribuye muy poco a la resistencia del sistema cementante pero podría mejorar la durabilidad.

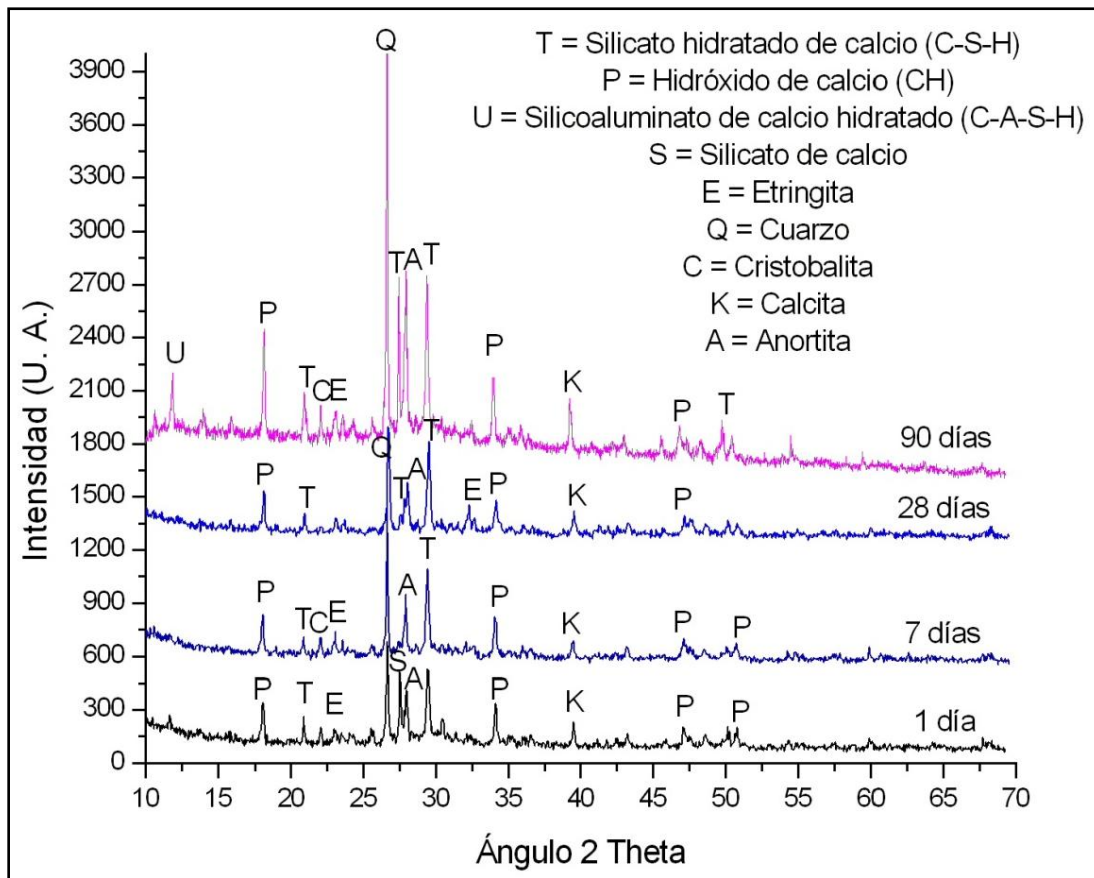


Figura 43: Difractogramas del mortero CBC0 a edades de 1, 7, 28 y 90 días

4.2.3.2.1 Mortero CBC10

Los difractogramas del mortero CBC10 (Figura 44) muestran que uno de los efectos benéficos del uso de puzolanas como sustitutos del cemento, es la creación de nuevos productos cementantes como el C-S-H a partir de las reacciones entre el sílice de la puzolana con el CH producto en la hidratación de cemento. La creación de C-S-H adicional como resultado del consumo del CH explica el mejoramiento de las propiedades mecánicas a edades tardías de los concretos y morteros adicionados con puzolanas (Escalante 2002, Ganesan et al. 2007, Ghriji 2007, Chindaprasirt P. et al 2007, Chulsilp 2009, Noor-ul 2011, Cordeiro et al. 2012). Este efecto se observó claramente en los difractogramas de la Figura 44 correspondientes a los morteros adicionados con 10% de CBC y edades de 1, 7, 28 y 90 días. Además del consumo de CH y creación de C-S-H y C-A-S-H también se observaron (Figura 44) variaciones en las intensidades de la fase de la cristobalita (SiO_2) en el ángulo 2θ de 21.9, estas variaciones pueden atribuirse a que la fase de la cristobalita se encuentre con estructura desordenada o en estado metaestable, lo que podría tener como resultado actividad puzolánica (Valdez et al. 2004, Valdez et al. 2008, EBS 2009).

A 1 y 7 días de edad se observaron que las fases de C-S-H y CH prácticamente tienen las mismas intensidades que las del mortero CBC0 en las mismas edades, esto apunta a la falta de actividad puzolánica. Así mismo a 1 día también se detectó la fase del silicato de calcio debido a la ausencia de curado, la cual al igual que en el mortero CBC0 desaparece a mayor edad. A 28 días se observaron disminuciones en las intensidades de la fase del CH con respecto a 1 y 7 días. Lo anterior y junto con el incremento en las intensidades de las fases del C-S-H sugieren actividad puzolánica de la CBC densificando la matriz cementante. Por último; a 90 días se identificó un considerable incremento en los picos de C-S-H en los ángulos 2θ de 24.8 y 2θ de 28.3 en la fase C-S-H-2. También se detectó la fase cristalina de C-A-S-H en los ángulos 2θ de 11.8 y 30.4 asociada con las reacciones puzolánicas entre el sílice y la alúmina de la CBC y el CH producto de la hidratación del cemento.

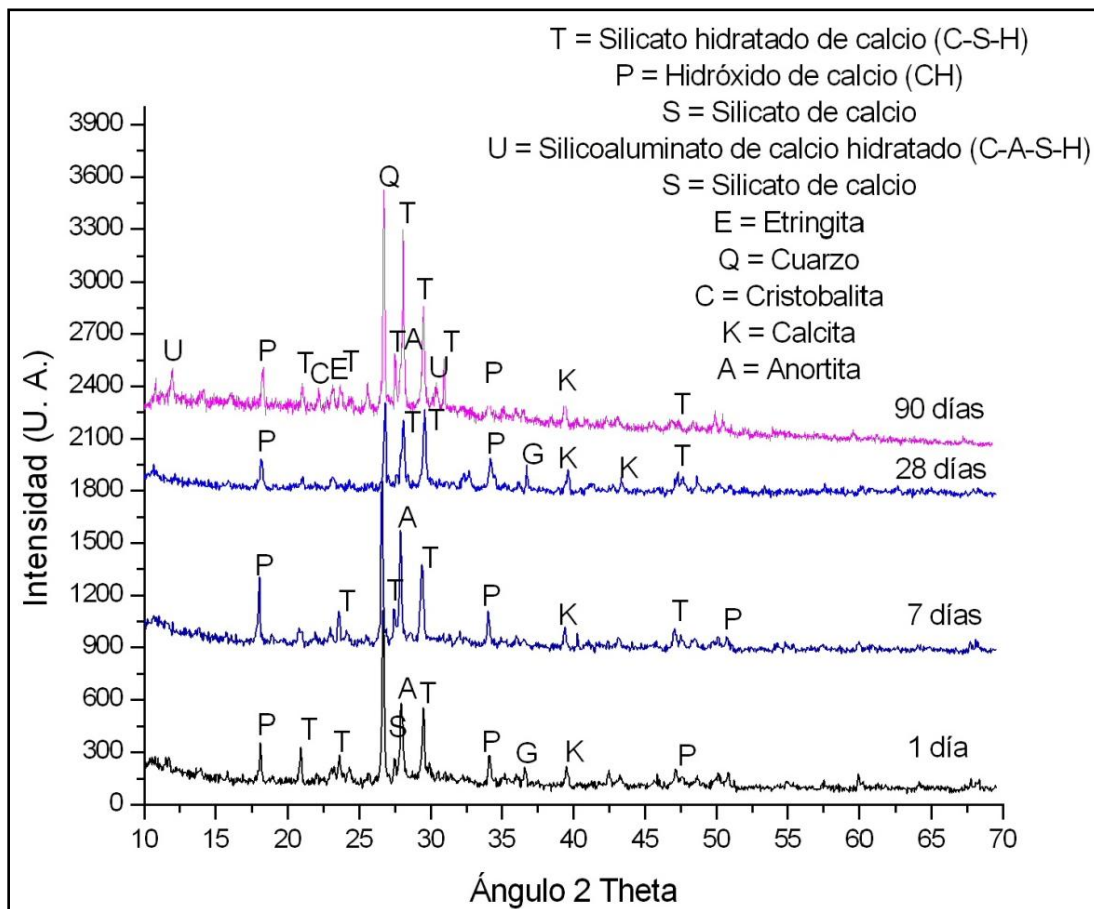


Figura 44: Difractogramas del mortero CBC10 a edades de 1, 7, 28 y 90 días

4.2.3.1.3 Mortero CBC20

Con respecto a los difractogramas del mortero CBC20 (Figura 45); primeramente se observó que conforme se incrementa la edad, las intensidades de la fase de CH

incrementan, especialmente entre 0 y 7 días, pero a mayores edades disminuyen. De manera similar que en la mezcla CBC10, la intensidad del C-S-H aumenta conforme incrementa la edad. A 28 días se identificó la fase del C-A-S-H en el ángulo 2θ de 30.4 y se tuvo incremento en la intensidad del C-S-H en el ángulo 2θ de 28.3. A diferencia del mortero CBC10 con 28 días de edad (Figura 44), en el mortero CBC20 también se detectó la fase cristalina de C-A-S-H en los ángulos 2θ de 30.4 a esta edad, lo anterior podría atribuirse a un mayor contenido de alúmina a consecuencia de la mayor adición de CBC. Finalmente a 90 días se observan considerables incrementos en los picos de las fases de C-S-H de los ángulos 2θ de 20.9 y 29.5, de C-A-S-H en los ángulos de 11.8 y 30.4 y de la cristobalita en el ángulo 2θ de 21.9. Al comparar las intensidades de estas dos últimas fases con respecto a las intensidades mostradas en el difractograma del mortero CBC10 a 90 días de edad (Figura 44) se observó mayor intensidad.

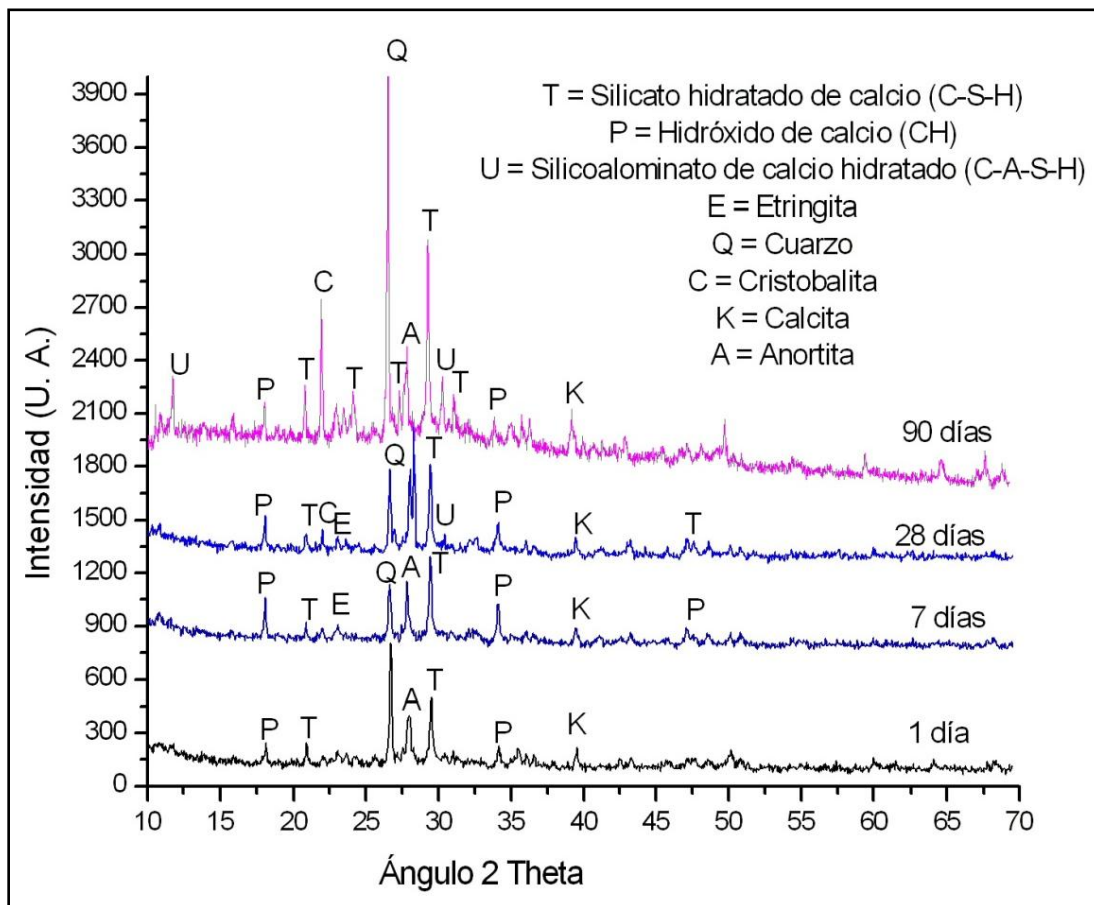


Figura 45: Difractogramas del mortero CBC20 a edades de 1, 7, 28 y 90 días

4.2.3.1.4 Mortero CV20

Los difractogramas del mortero CV20 (Figura 46) mostraron que a 1 día de edad se tienen contenidos de la fase de silicato de calcio proveniente del cemento, tal como se

identificó en el mortero CBC0 (Figura 43). En general los picos de C-S-H y CH tienen poca intensidad si se comparan con edades posteriores pero son similares los identificados en las mezclas CBC0, CBC10 y CBC20 (Figuras 43-45). Este comportamiento similar se debe a que a 1 día aún no ocurren reacciones puzolánicas. A 7 días se detectaron los mayores incrementos en los picos de la fase de CH, efecto similar en las otras tres mezclas. Las intensidades de los picos del C-S-H también tuvieron incrementos aunque en menor proporción que los tres morteros evaluados anteriormente, efecto que también se manifestó a 28 días. Esto podría ser causa de que el mortero CV20 tenga las menores resistencias a la compresión a edades de 0, 7 y 28 días (Figura 42). Sin embargo a 90 días el incremento de la intensidad de C-S-H, producto de la actividad puzolánica, fue considerable por lo que el mortero CV20 tuvo los mayores incrementos en la resistencia a compresión en comparación con los demás morteros, esto puede atribuirse a la forma de partículas y área superficial de la CV, lo que también contribuyó a conservar la trabajabilidad de los morteros. Además a 90 días también se identificó la fase de C-A-S-H, la cual también contribuye a la mejora de la matriz de mortero y finalmente se observó incremento en la intensidad de la fase de la cristobalita, lo que sugiere actividad puzolánica.

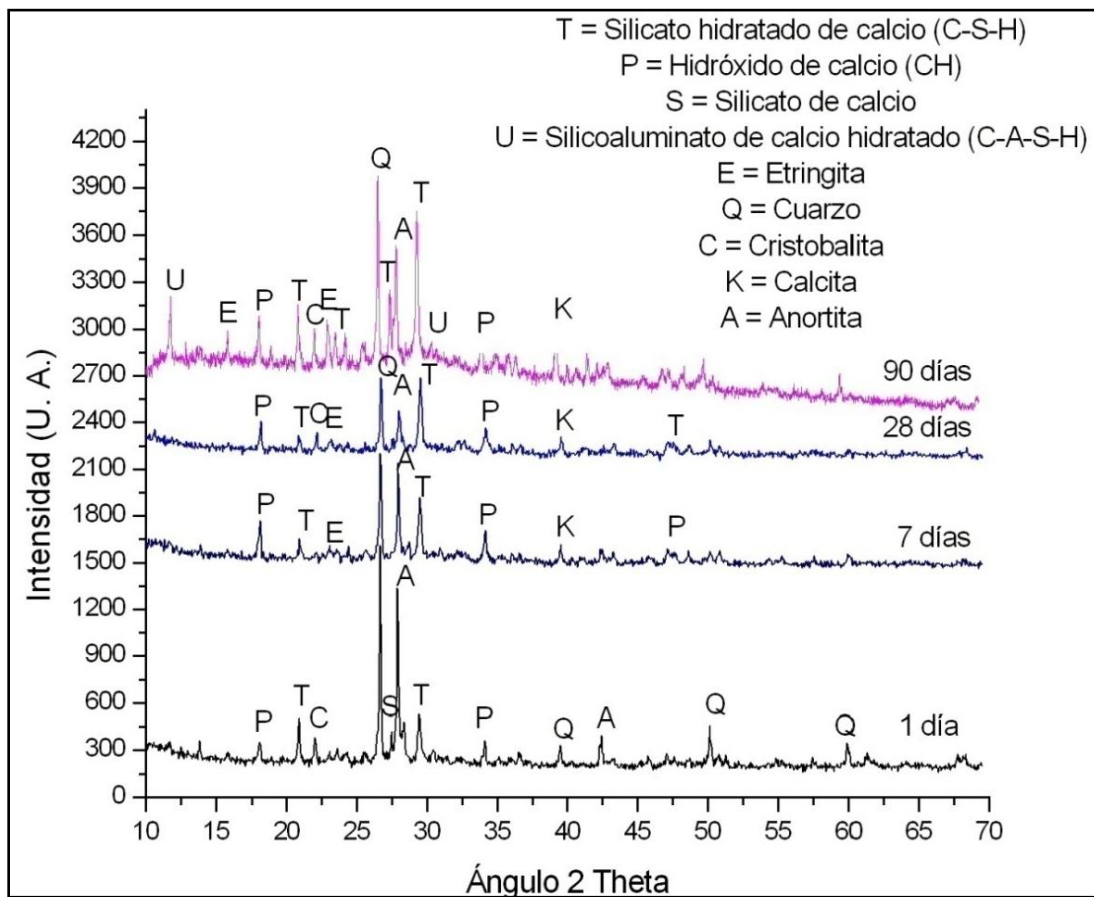


Figura 46: Difractogramas del mortero CV20 a edades de 1, 7, 28 y 90 días

Comparando los difractogramas de todas las mezclas, se observa que se cumple con lo establecido en la ecuación 1 (ver sección 2.1.2.5), donde se explica el mecanismo de reacción de las puzolanas, puesto que a edades tardías se tuvieron disminuciones de la fase de la portlandita e incrementos de las fases de C-S-H y C-A-S-H, sin embargo el consumo de la portlandita también podría disminuir el pH del sistema. Lo anterior sugiere que la CBC y CV están reaccionando con la portlandita y agua para formar compuestos de cementantes, por tanto se tienen efectos positivos en la matriz cementante como la disminución de la porosidad desarrollando un sistema más resistente ante agentes agresivos que afecten de manera negativa sus propiedades mecánicas y su durabilidad.

4.2.3.2 MEB / EDS en morteros

Las observaciones realizadas en los morteros por medio de MEB con microanálisis elemental EDS permitieron corroborar la presencia de las fases minerales detectadas por DRX. De manera general se puede decir que a mayor edad la matriz cementante se hace más densa puesto que se crean nuevos productos cementantes. La influencia de la adición de CBC o CV juega un papel importante en el mejoramiento de la matriz cementante, tal como se observa en las siguientes secciones.

4.2.3.2.1 Morteros CBC0

La evolución de los productos cementantes del mortero CBC0 a edades de 1, 7, 28 y 90 días se pueden apreciar en las figuras 47 a 49. A 1 día (Figura 47) se observó un mortero cuya matriz cementante es poco densa mostrando discontinuidades en la interfase agregado-pasta cementante, lo anterior se atribuye a la ausencia de curado externo. Las fases más abundantes observadas fueron el C-S-H y CH, ambas formadas a partir de la hidratación de la alita y belita del cemento (Diamond 2004, Giraldo y Tobón 2006). Además se observaron algunas partículas de CPC con una capa superficial redondeada de material hidratado las cuales se pueden asociar con la alita y belita (Figura 47). Esto es concordante con lo reportado en diversas investigaciones acerca de procesos de hidratación de pastas de cemento a edades tempranas (Kosmatka et al. 2004, Diamond 2004, Giraldo y Tobón 2006, Torres 2008). El microanálisis elemental de la figura 47 muestra la presencia de calcio, carbón y sílice como las fases más abundantes.

A 7 días (Figura 48) se apreciaron matrices cementantes conformadas principalmente por C-S-H y CH aunque con algunas fisuras. También fue posible detectar algunas partículas de belita cubiertas en su superficie con productos cementantes debido a que su proceso de hidratación resulta más lento en comparación con la alita (Neville 1998, Kosmatka et al. 2004). La identificación de partículas de belita fue con base a su halo de reacción característico, el cual es de la parte externa hacia el centro conforme se hidrata (Giraldo y Tobón 2006). También se detectaron algunas agujas de etringita aisladas.

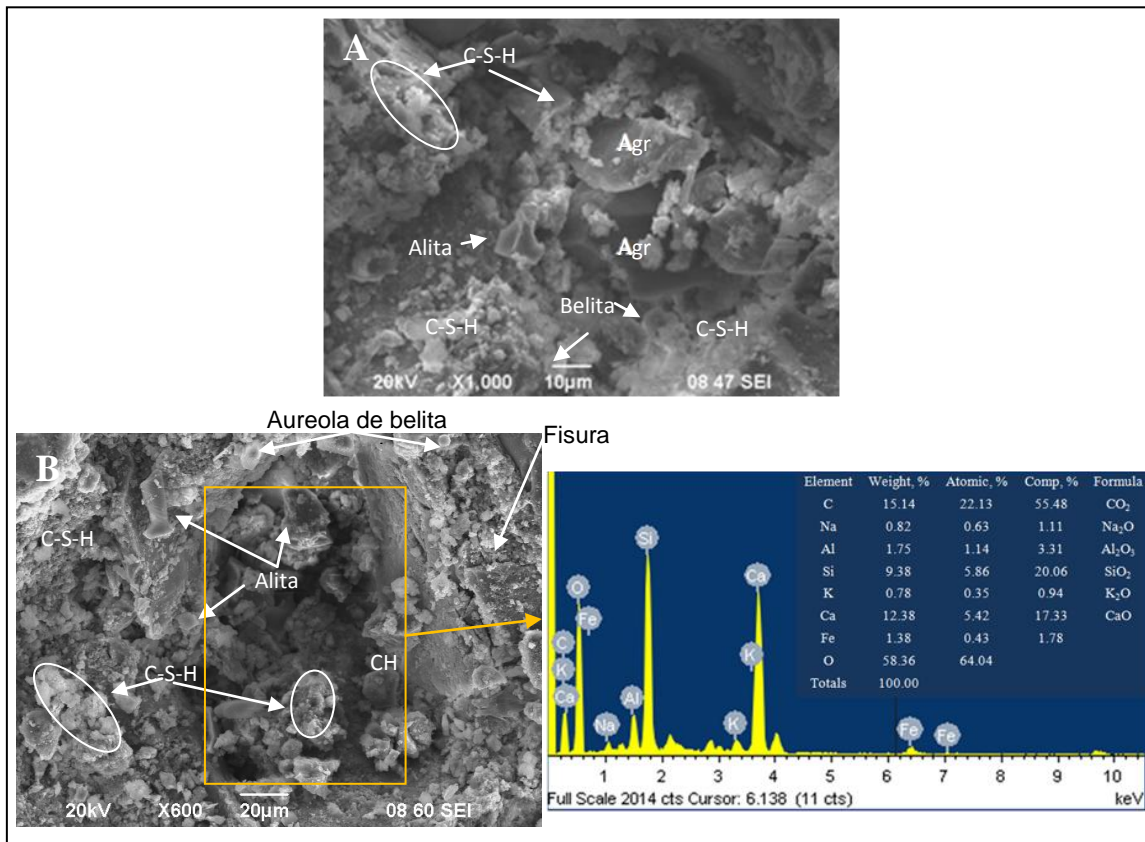


Figura 47: Micrografías del mortero CBC0 a 1 día de edad

A) Interfase agregado-pasta cementante y B) Matriz cementante en la cual se aprecian partículas de CPC.
Agr = Agregado

Como era de esperarse, a 28 y 90 días de edad (Figura 49) la matriz cementante fue más densa con respecto a edades de 1 y 7 días. En las figuras 49A y 49B pueden observarse acumulaciones de productos cementantes de C-S-H y CH cubriendo la interface agregado-pasta cementante. Estas acumulaciones de C-S-H también se identificaron en DRX por los incrementos en las intensidades de sus picos graficados en el difractograma de la Figura 43. Al tener estas acumulaciones se justifica el incremento en la resistencia a compresión conforme aumenta el tiempo (Figura 42). Sin embargo, a 28 días aún fue posible observar aureolas de belita, con productos de hidratación en su superficie debido a su lenta tasa de reacción (Giraldo y Tobón 2006).

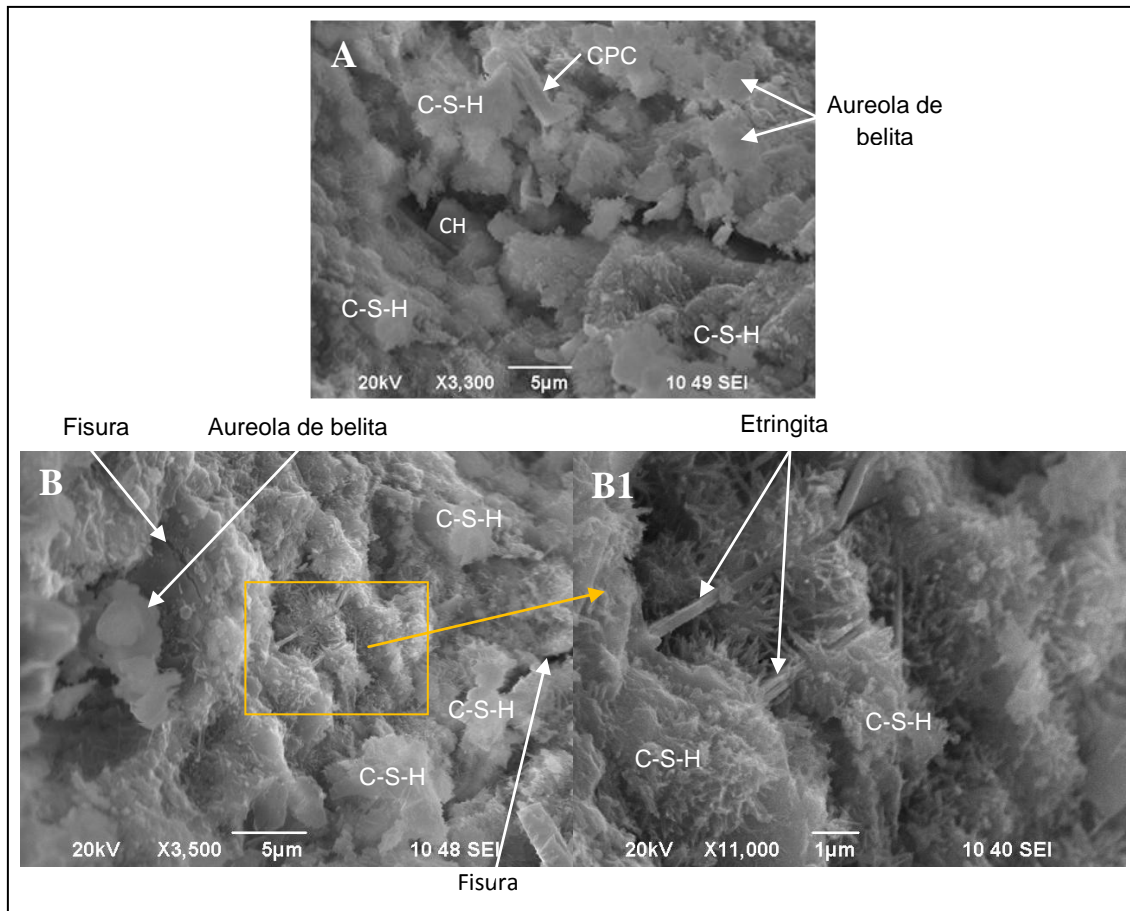


Figura 48: Micrografías de mortero CBC0 a 7 días de edad

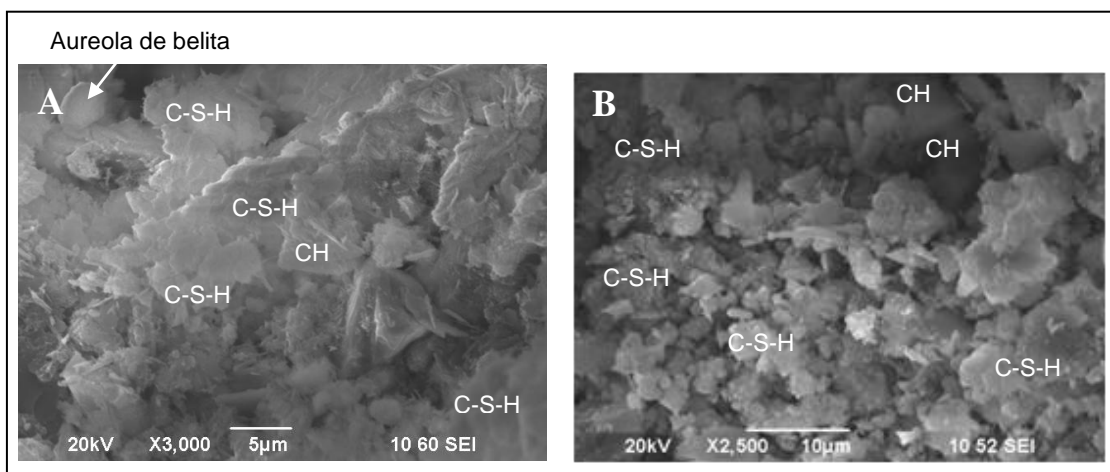


Figura 49: Micrografías de mortero CBC0 a A) 28 y B) 90 días de edad.

4.2.3.2.2 Mortero CBC10.

A 1 día de edad la matriz cementante fue poco densa, ya que se identificaron discontinuidades en la interfase agregado-pasta cementante (Figura 50A), al igual que en el mortero CBC0 con 1 día de edad (Figura 47A). También se observaron zonas porosas y algunas partículas de cemento y CBC prismáticas sin reaccionar, las cuales tienen productos cementantes en su superficie (Figura 50B). El microanálisis elemental realizado a una de las partículas prismáticas de CBC reveló que estas partículas están conformadas por silicio y aluminio, elementos disponibles para posteriores reacciones con el CH liberado durante la hidratación de CPC.

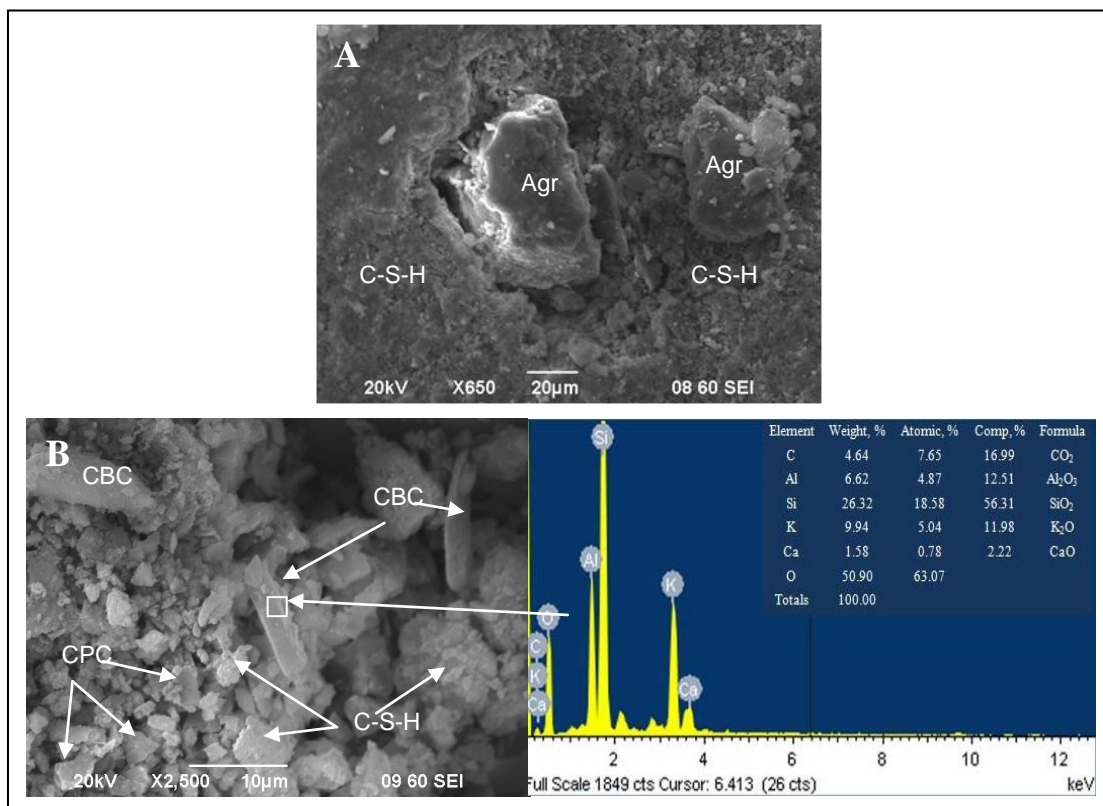


Figura 50: Micrografías de mortero CBC10 a 1 día de edad
 A) Interface agregado-pasta cementante y B) Partículas de CBC. Agr = Agregado

A 7 días se observaron partículas de cemento con productos cementantes en su superficie, tal es el caso de algunas aureolas de belita (Figuras 51A y 51B). También se observó que la matriz cementante muestra zonas densas de C-S-H e incremento de la fase de CH (Figura 51B). Las zonas densas de C-S-H y zonas de formación de CH corroboran lo detectado en los difractogramas del mortero CBC10 a 7 días (Figura 44) donde se muestran estos mismos incrementos. A 28 y 90 días (Figuras 52A y 52B) se observaron más zonas densas de C-S-H y C-S-H con C-A-S-H con respecto a 1 y 7 días (Figuras 50 y 51) y a 28 y 90 días del mortero CBC0 (Figuras 49A y 49B), esto se puede atribuir a las

reacciones puzolánicas de la CBC teniendo como resultado silicatos de calcio hidratados de diversas estequiometrias detectados en DRX (Figura 44). La fase de C-A-S-H es un producto de reacciones puzolánicas (Arizzi 2012), principalmente entre el sílice y alúmina de la CBC con CH y agua. Sin embargo, a 90 días (Figura 52B) se observaron algunas partículas aisladas de CBC sin reaccionar con aspecto prismático y rodeado por productos de C-S-H, las cuales muestran discontinuidades en la interface partícula de CBC-productos cementantes, estas partículas están conformadas de más de 90% de sílice y sus tamaños de partículas se encuentran en el máximo rango considerado en la medición de tamaños de partículas por difracción láser y lo observado en la caracterización microestructural de la CBC.

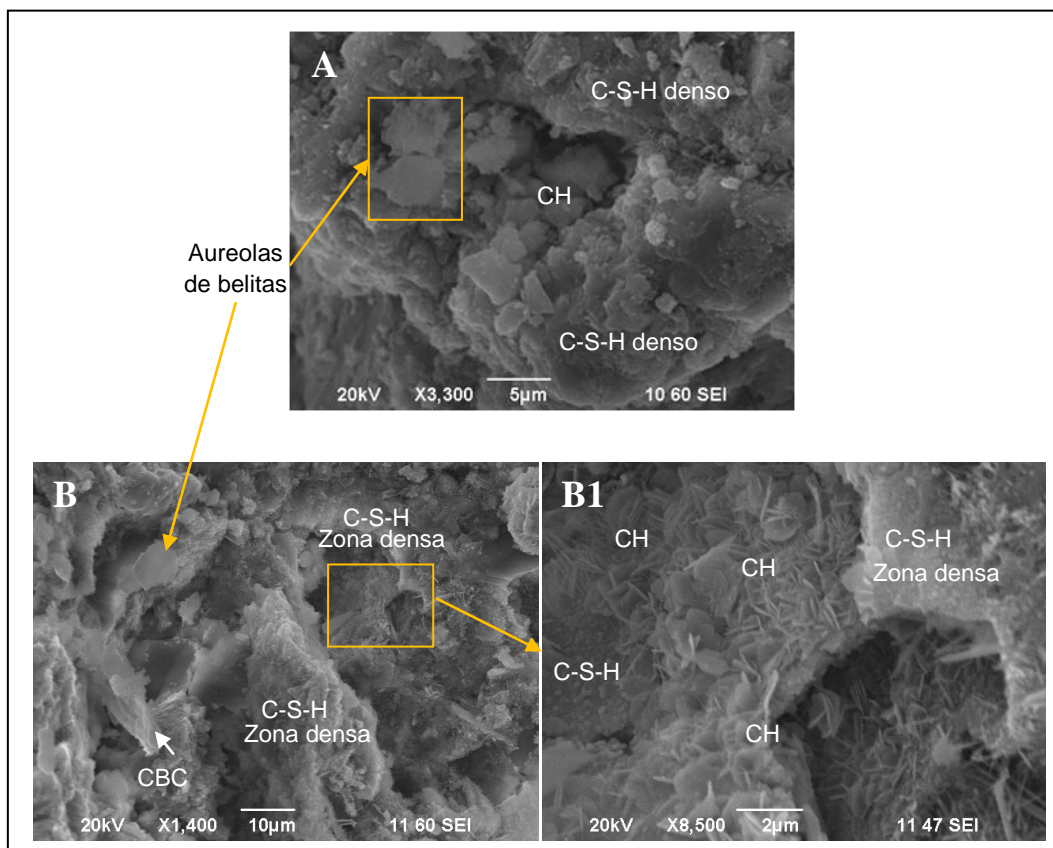


Figura 51: Micrografías de mortero CBC10 a 7 días de edad
A) Interface agregado-pasta cementante y B) Partículas de CBC

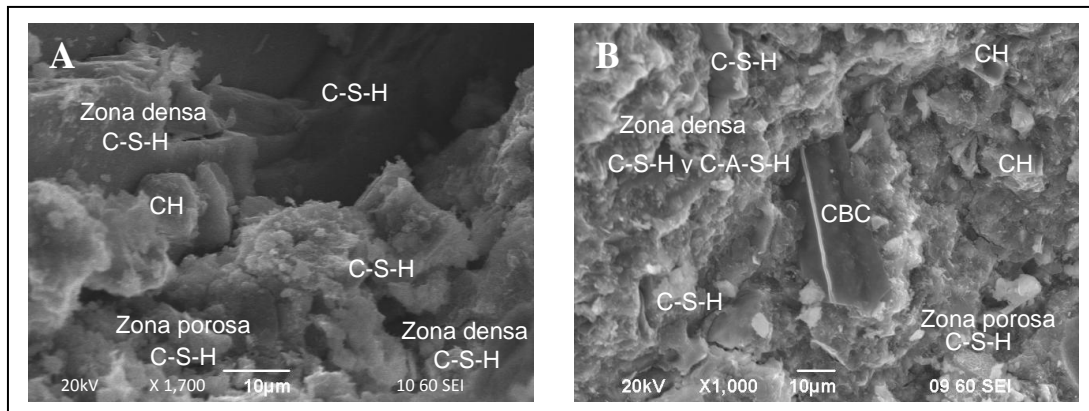


Figura 52: Micrografías de mortero CBC10 a edades de A) 28 y B) 90 días

Al comparar la evolución de los productos de C-S-H y C-A-S-H del mortero CBC0 (Figuras 47-49) con CBC10 (Figuras 50-52) y las diferencias de las intensidades de sus picos en los difractogramas respectivos (Figuras 43 y 44), ambos incrementando a mayor edad, se puede explicar el incremento de la resistencia a compresión en mezclas con adición de CBC, especialmente a 28, 56, 90 y 450 días.

4.2.3.2.3 Mortero CBC20

En las micrografías del mortero CBC20 con 1 día de edad se aprecian zonas de C-S-H de aspecto poroso y algunas fisuras (Figura 53A). También se observa que la interface agregado-pasta cementante es discontinua (Figura 53B), al igual que en los morteros CBC0 y CBC10 (Figuras 47A y 50A). Además se observaron algunas partículas de cemento sin hidratar o con productos cementantes en su superficie, algo muy similar a lo observado en las micrografías de las mezclas CBC0 y CBC10 (Figs. 47B y 50B) e identificado en DRX (Figuras 43 y 44). A 7 días (Figuras 54A y 54B) se observó densificación en la matriz cementante. También se apreciaron algunas zonas densas de C-S-H. A esta edad al igual que en el mortero CBC10, fue evidente el incremento y formación definida de las fases de C-S-H y CH (Figura 54B), además se observaron algunas agujas de etringita en la superficie de de ambos productos cementantes (Figura 54B).

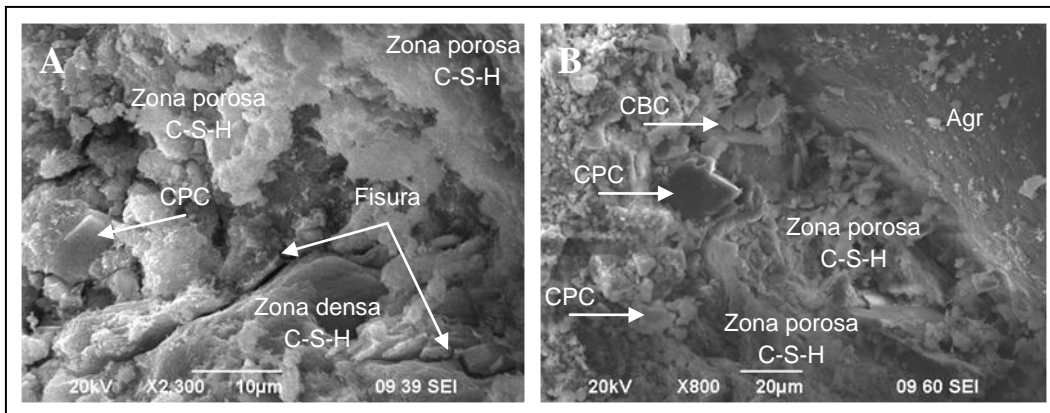


Figura 53: Micrografías de mortero CBC20 a 1 día de edad
 A) Zonas porosas de C-S-H y partículas de cemento sin hidratar y B) Interface agregado-pasta cementante, Agr = Agregado

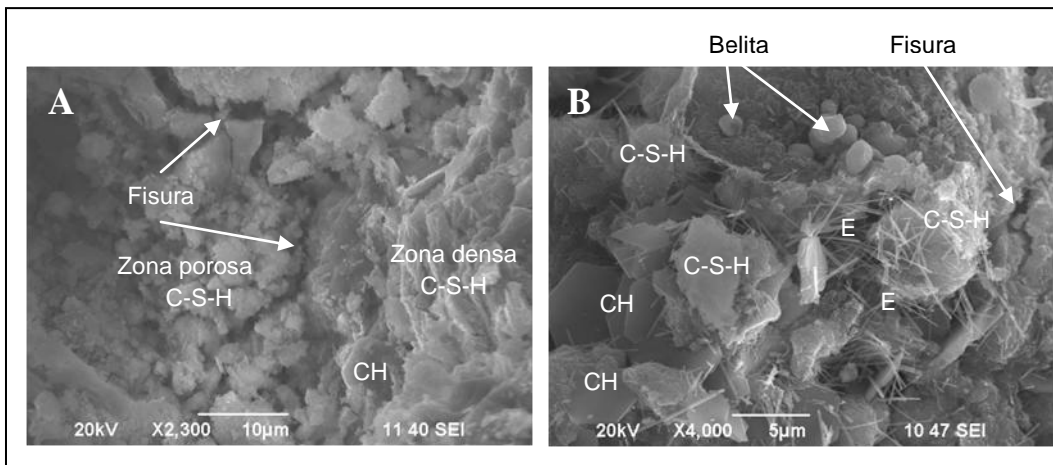


Figura 54: Micrografías de mortero CBC20 a 7 días de edad
 A) Zonas densas y porosas de la matriz cementante y B) Productos de C-S-H, CH y etringita

A 28 y 90 días de edad (Figuras 55 y 56) se observaron matrices cementantes con zonas densas y zonas porosas de C-S-H de manera similar a las del mortero CBC10. A 28 días (Figura 55B) el microanálisis elemental realizado en una partícula seleccionada, permitió inferir que se tienen formaciones de una fase mineral de C-A-S-H, lo anterior por los altos contenidos de sílice, alúmina y calcio. Además a esta misma edad es posible observar partículas de CBC de aspecto prismático cubiertas con productos cementantes, se infiere que son productos de las reacciones puzolánicas. La presencia de estas partículas de CBC sin reaccionar podría justificar que a mayor contenido de CBC (de 10 a 20%) sin reaccionar menor será la resistencia a compresión a edades de entre 1 y 90 días, tal como se aprecia en la figura 42. A 90 días (Figura 56) se observó mayor densificación de los productos cementantes, además se detectaron algunas partículas minerales conformadas por sílice y aluminio de acuerdo al microanálisis elemental realizado (Figura 56B), se trata de una fase de silicato hidratado de aluminio (A-S-H), producto de reacciones puzolánicas. También se observaron algunas agujas de etringita al igual que a siete días (Figura 54B).

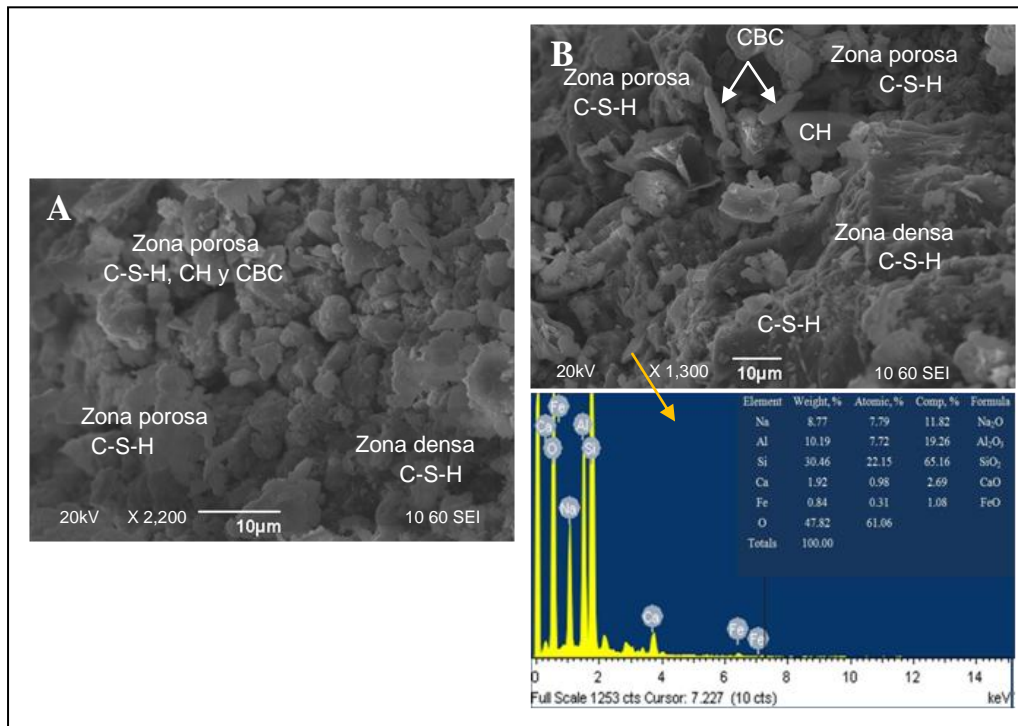


Figura 55: Micrografías de mortero CBC20 a 28 días de edad
A) Zonas densas y porosas de la matriz cementante y B) Productos de C-S-H, CH y etringita

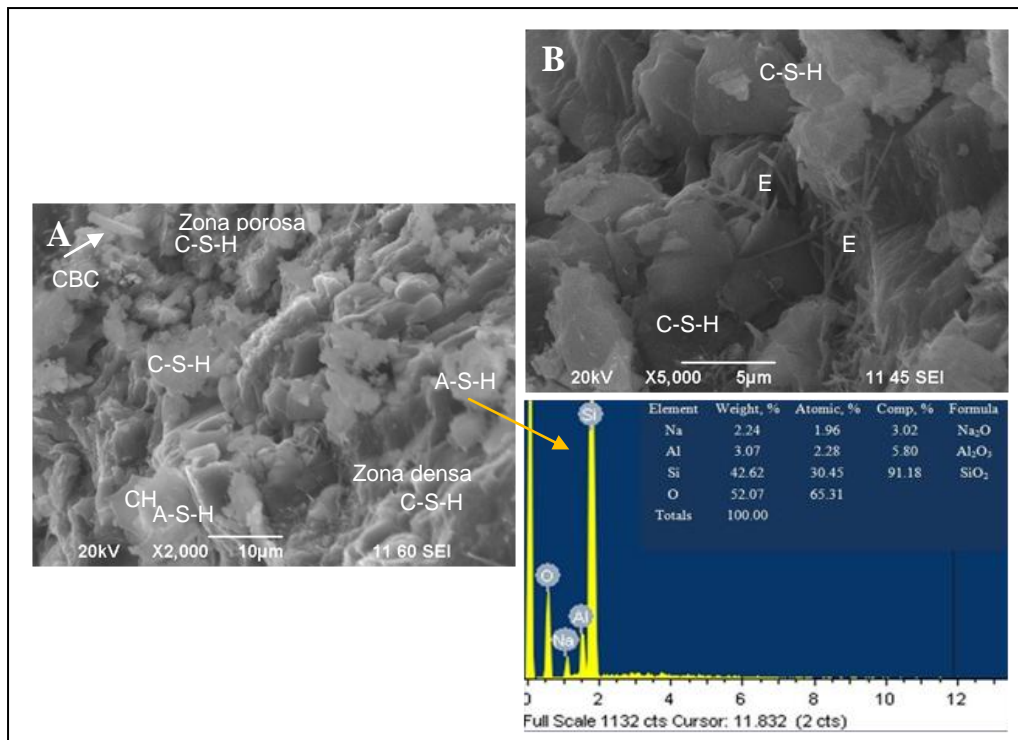


Figura 56: Micrografías de mortero CBC20 a 90 días de edad
A) Zonas densas y porosas de la matriz cementante y B) Etringitas

4.2.3.2.4 Mortero CV20

De manera similar que en los morteros CBC0, CBC10 y CBC20 a 1 día de edad, en el mortero CV20 (Figura 57) también se observaron; partículas de cemento y CV sin reaccionar, fisuras y poros, zonas porosas, agujas de estringita y discontinuidades en la interfase agregado-pasta cementante. Pero a 7 días la matriz cementante se densificó por el incremento del C-S-H y CH (Figura 58), formando aglomeramientos los cuales posteriormente a 28 y 90 días se observaron como zonas densas y compactas.

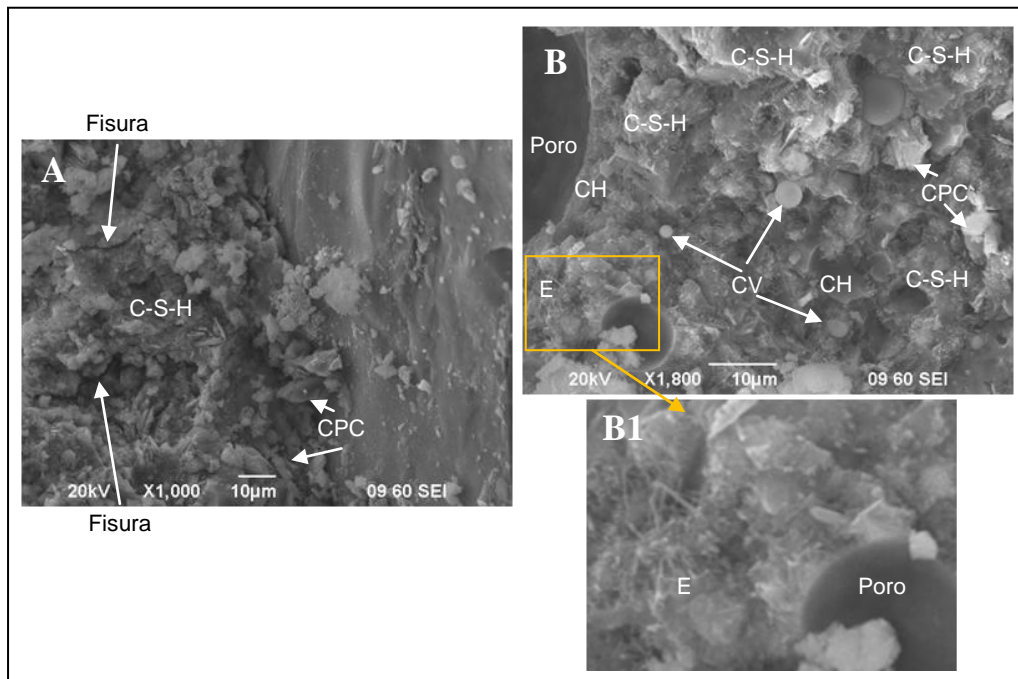


Figura 57: Micrografías de mortero CV20 a 1 día de edad

A) Interface agregado-pasta cementante y B) Partículas de CV sin reaccionar dentro de la pasta cementante

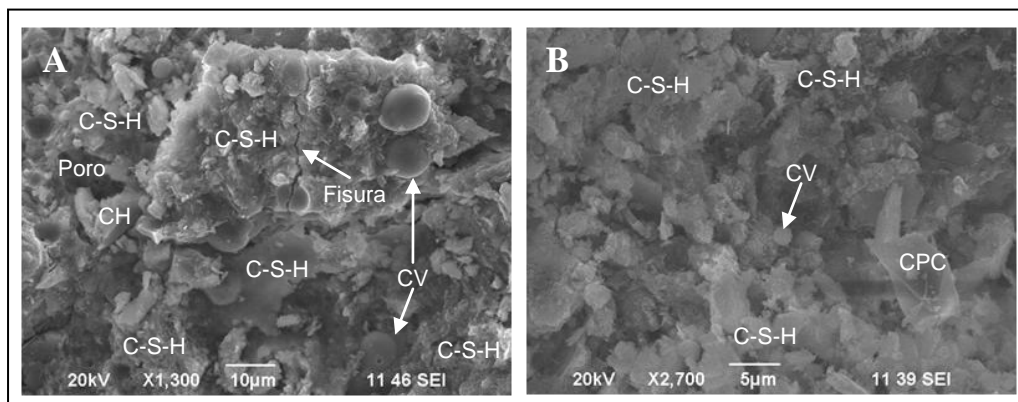


Figura 58: Micrografías de mortero CV20 a 7 días de edad

A) Algunas partículas de CV sin hidratar y B) Matriz cementante con algunas partículas de CV y CPC

A 28 días de edad (Figura 59) se identificaron partículas de CV cubiertas por productos cementantes, principalmente C-S-H de aspecto fibroso, la identificación de las partículas de CV fue fácil debido a su forma redondeada característica. Finalmente a 90 días (Figura 60) se observaron zonas compactas de C-S-H y C-A-S-H. Sin embargo aún fue posible identificar partículas aisladas de cemento teniendo productos cementantes en sus vértices, la presencia de estas partículas a esta edad se ha visto en diversas investigaciones (Sing et al. 2000). También se observaron partículas de CV sin reaccionar o con productos cementantes en su superficie.

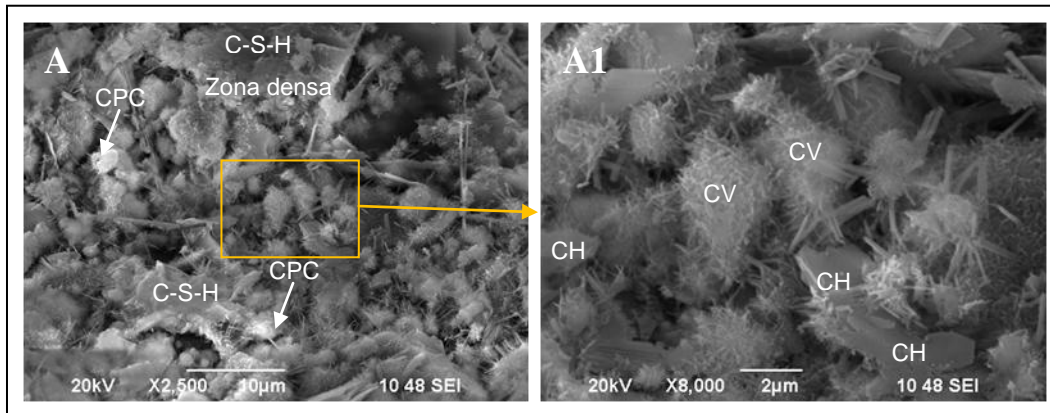


Figura 59: Micrografías de mortero CV20 a 28 días de edad

A) Matriz cementante con algunas partículas de CV y B) Matriz cementante con algunas partículas de CV y CPC

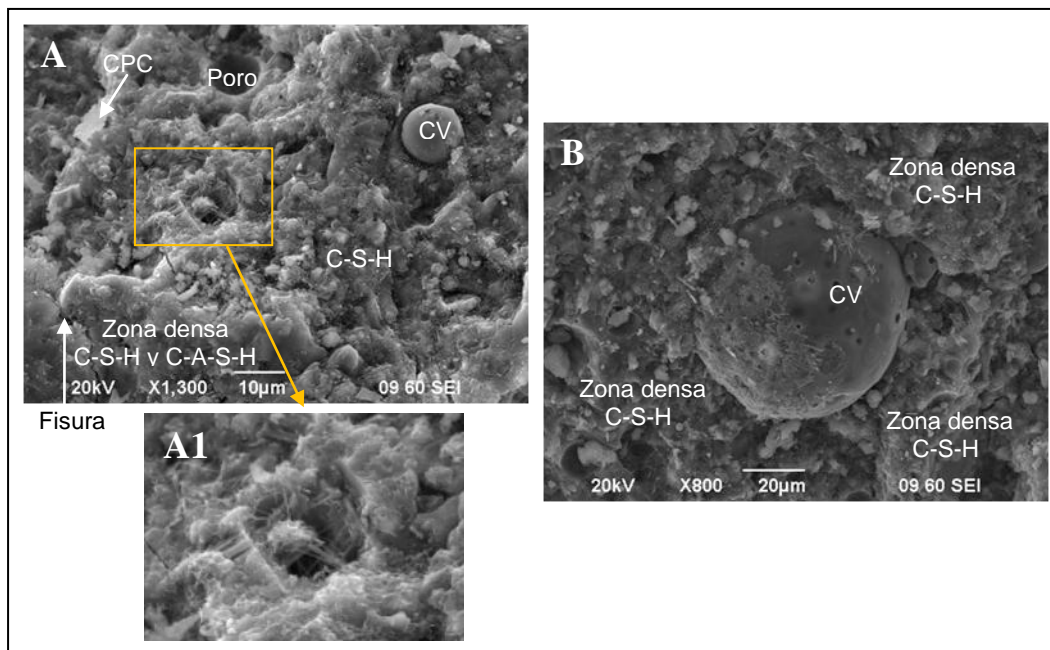


Figura 60: Micrografías de mortero CV20 a 90 días de edad

A) Matriz cementante con algunas partículas de CV y B) Partícula de CV con productos cementantes en su superficie

Durante las observaciones por MEB de los morteros CBC10, CBC20 y CV20 se observó que en este último el proceso de la reacción puzolánica fue más lento con respecto a los morteros CBC10 y CBC20, esto por la identificación de más partículas sin reaccionar o en proceso de reacción. Lo anterior indica que la CV requiere de mayores edades para reaccionar completamente tal como lo reportan otros investigadores (Ashraf et al. 2009). Este efecto también pudo observarse en las pruebas de resistencia a la compresión (Figura 42) y podría estar relacionado con el área superficial de las partículas de CBC y CV, en donde la CBC posea mayor área disponible para reaccionar.

4.3 Resultados de la fase 3

4.3.1 Coeficientes de difusión de cloruros libres

Estudios previos realizados por Hernández (2010), en los cuales se obtuvieron cloruros totales (Cl⁻-T) de las mismas mezclas evaluadas en la presente tesis sugieren que al aumentar el contenido de CBC se incrementa el contenido de cloruros en capas superficiales pero disminuyen en capas internas (anexos 1 y 2). También se sugirió que el efecto del curado entre 0 y 7 días disminuye conforme incrementa el contenido de CBC (anexo 3). Una posible explicación que maneja el autor en su hipótesis es el ligado de cloruros con la CBC, en la cual un tiempo de curado menor dejaría más CBC sin reaccionar y estaría disponible para combinarse con más cloruros.

El la figura 61 se muestran los perfiles de penetración de cloruros libres promedio (Cl⁻-L) de los cuatro morteros para los tres tiempos de curado. Al compararlos con los perfiles de penetración de cloruros totales promedio (Cl⁻-T) (anexo 2) se observa que las concentraciones de Cl⁻-L son menores que las concentraciones de Cl⁻-T para todos los casos. Lo anterior era de esperarse, y confirma la posibilidad de determinar el contenido de cloruros ligados (Cl⁻-Lg) por medio de la diferencia de Cl⁻-T menos Cl⁻-L (Lu et al. 2002).

Al promediar los perfiles de penetración de Cl⁻-L de las tres réplicas de cada tratamiento (Figura 62) se puede observar claramente el efecto de la adición de CBC en los morteros. Con 0 días de curado (Figura 62A) se observó que la mezcla CBC0 tuvo menor contenido de Cl⁻-L en capas superficiales en comparación con los morteros CBC10 y CBC20, lo cual se invirtió en capas internas. Las mezclas CBC10 y CBC20 mostraron valores de Cl⁻-L muy similares en las capas superficies pero en capas internas la mezcla CBC10 tuvo mayor contenido, efecto similar ocurrió en los perfiles de Cl⁻-T (anexo 2).

Después de 7 días de curado (Figura 62B), se observó que los perfiles de concentración de cloruros disminuyen en todas las mezclas al compararlos con los perfiles

a 0 días. También se observó que el mortero CBC0 tuvo el menor contenido de Cl⁻L en capas superficiales pero mayor en capas internas, de manera similar que en Cl⁻T (anexo 2). Sin embargo, al comparar los perfiles a 7 días de las mezclas CBC10 y CBC20; los contenidos Cl⁻L son menores en capas superficiales de la mezcla CBC10, pero significativamente similares en capas internas con respecto a la mezcla CBC20, este efecto no fue evidente al comparar los perfiles de concentración de Cl⁻T (anexo 2).

A 28 días de curado (Figura 62C) la mezcla CBC0 tuvo menor contenido de Cl⁻L con respecto a 0 y 7 días y de igual manera menor contenido en capas superficiales con respecto a las mezclas CBC10 y CBC20. El contenido de Cl⁻L de las mezclas CBC10 y CBC20 a 1mm de profundidad prácticamente permaneció igual en comparación a 7 días. Para el caso de la mezcla CBC10 se observa que entre las capas de 1 a 3 mm hay un decremento drástico en el contenido de Cl⁻L y a partir de entonces el decremento fue constante hasta ser la mezcla con menores concentraciones en capas internas. Sin embargo la mezcla CBC20 tuvo mayores concentraciones de Cl⁻L entre las capas de 1 a 9mm con respecto al perfil obtenido a 7 días, algo similar se observó en los perfiles de Cl⁻T (anexo 2).

Una posible explicación acerca del incremento de Cl⁻L en capas superficiales conforme se adiciona CBC podría estar relacionada con el contenido de carbón y el llamado efecto filler, lo cual podría producir una especie de taponamiento en la matriz cementante, ocasionando una mayor concentración de cloruros. Lo anterior puesto que al sustituir en masa al cemento Pórtland por CBC se introducen mayor cantidad de partículas, debió a la diferencia de densidades, por consecuencia se introduce mayor volumen de subproductos.

Respecto al efecto del curado en el contenido de cloruros de los morteros CBC0 se encontró que el incremento del tiempo de curado disminuye el contenido de Cl⁻L en todas las profundidades evaluadas. En el mortero CBC10 la disminución de la concentración de Cl⁻L fue menor. En el mortero CBC20 no se encontró disminución significativa en el contenido de Cl⁻L entre 0 y 7 días pero a 28 se observó que la concentración de cloruros incrementó, siendo mayor este efecto en las capas superficiales. Una posible explicación para este comportamiento está relacionada con el ligado de cloruros de la CBC, el cual podría ser menor conforme incrementa el tiempo de curado.

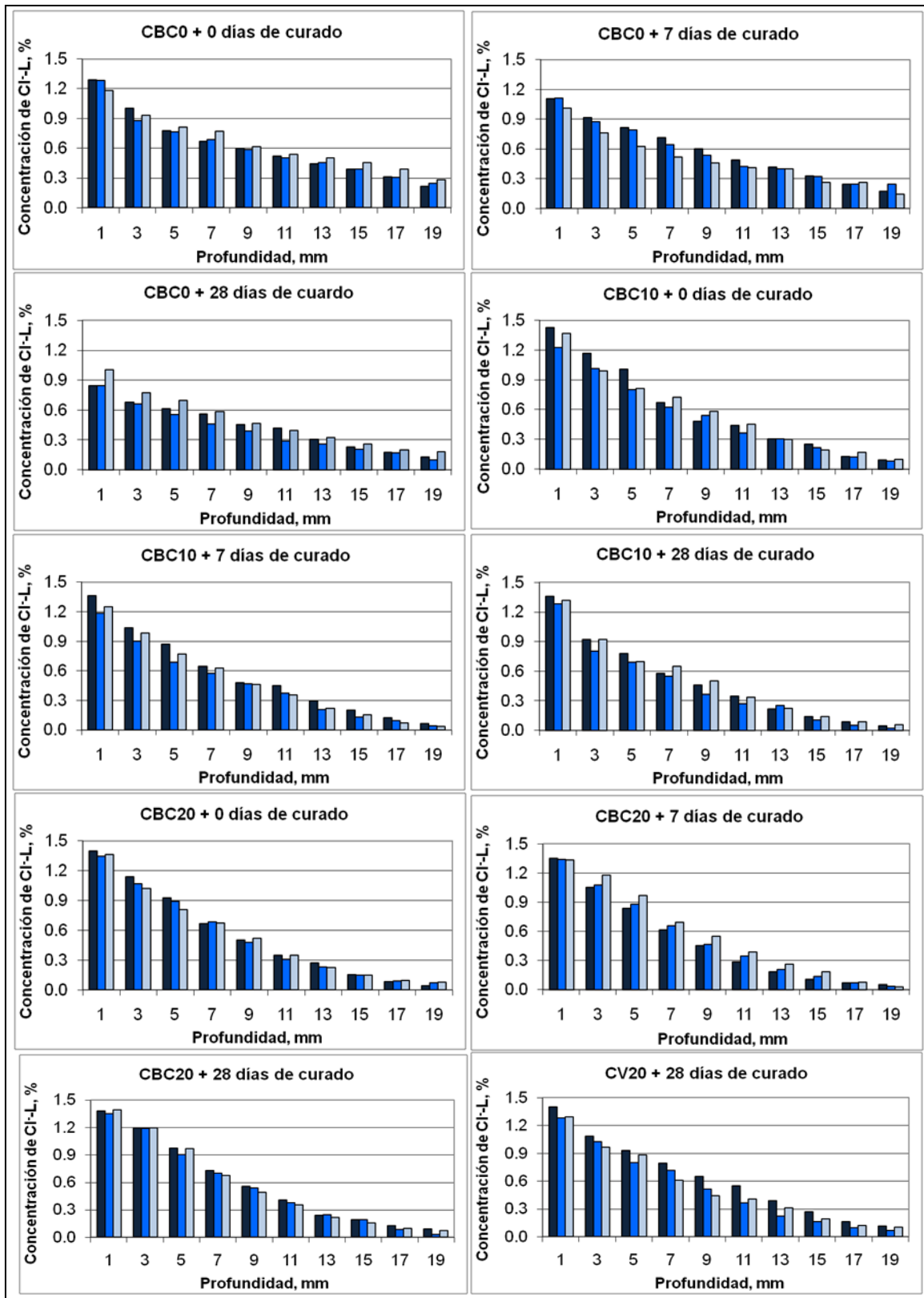


Figura 61: Perfiles de penetración de cloruros libres en probetas de mortero (3réplicas) CBC0, CBC10, CBC20 con 0, 7 y 28 días de curado y CV20 con 28 días de curado (% de cloruros libres en peso del mortero)

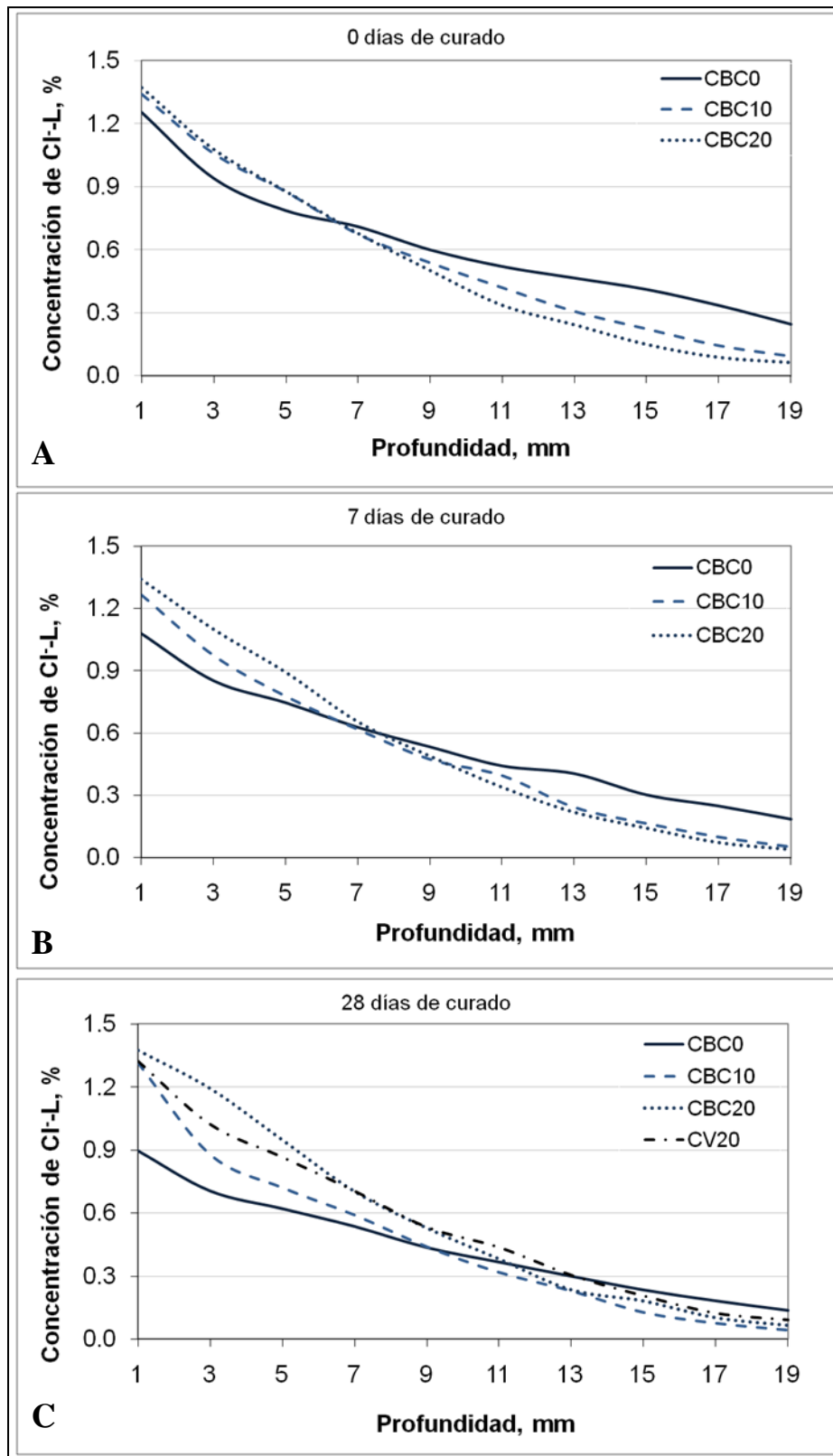


Figura 62: Perfiles de penetración de cloruros libres promedio en probetas de mortero A) con 0, B) con 7 y C) con 28 días de curado. (% de cloruros libres en peso del mortero)

Con base en los perfiles de concentración de Cl⁻-L de la figura 61 se obtuvieron los coeficientes de difusión de cloruros libres (CDC-L) para cada réplica, posteriormente se promediaron los valores de las tres réplicas de cada tratamiento y se obtuvieron los CDC-L mostrados en la figura 63.

Al evaluar el efecto del curado los mayores CDC-L se observaron a 0 días en las mezclas CBC0, CBC10 y CBC20. Para el caso de la mezcla CBC0 la disminución del CDC-L fue más evidente conforme incrementaba el tiempo de curado, se tuvieron disminuciones partiendo de 0 días del orden de 28.5 y 47.1% para 7 y 28 días respectivamente. Las mezclas con adición de CBC tuvieron menores disminuciones. La mezcla CBC10 tuvo disminuciones apenas del 13 y 17% para 7 y 28 días y para la mezcla CBC20 los decrementos fueron de 20.4 y 14.9%. Los porcentajes de decremento de CDC-L son semejantes a los coeficientes de difusión de cloruros totales (CDC-T) mostrados en el anexo 3.

Respecto a la influencia de la adición de CBC se observó que tanto el 10 y 20% disminuye los CDC-L entre 48 y 65% para todos los tiempos de curado en comparación con el mortero CBC0. Sin embargo existe poca disminución del CDC-L entre las mezclas con 10 y 20% de CBC. Además se observó que entre ambas mezclas no hay diferencia considerable de los CDC-L a 7 y 28 días de curado.

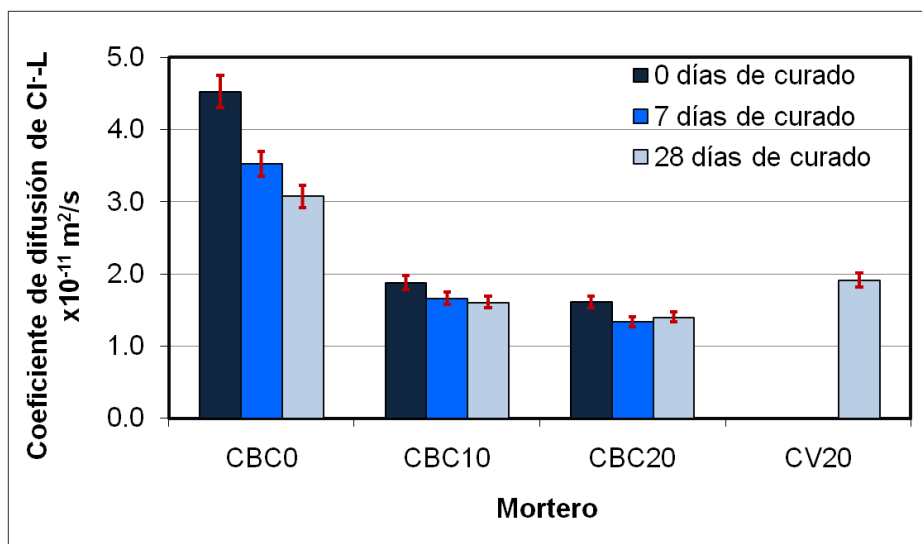


Figura 63: Coeficientes de difusión de cloruros libres en morteros a 63 días de edad

4.3.2 Estimación de cloruros ligados

Los resultados de los cloruros ligados muestran considerable variabilidad de la concentración de Cl^- conforme incrementa la profundidad en cada uno de los perfiles (Figura 64), es decir; no hay una tendencia general de decremento como en el caso de los Cl^- -T y Cl^- -L. También se observa que las concentraciones de Cl^- -Lg incrementan en capas superficiales hasta alcanzar un valor máximo, después de ello tienden a ser menores.

Al evaluar los perfiles de cloruros ligados promedio de los morteros a 0 días de curado (Figura 65A) se tiene que conforme incrementa el contenido de CBC, el ligado con las fases sólidas (cemento o ceniza) decrementa. Efecto semejante también ocurre a 7 y 28 días (Figuras 65B y 65C) pero en menor magnitud. Una posible explicación se encamina hacia la capacidad de ligado de cloruros del C-S-H. Zibara et al. 2008 mencionan que la capacidad de ligado de cloruros del C-S-H depende de la relación calcio/sílice que tenga, si dicha relación es alta entonces la capacidad de ligado del C-S-H se favorece. También mencionan que si hay ausencia de alúmina se favorece el ligado de los cloruros por el C-S-H y si hay una relación alta de calcio/alumina se favorece la formación de monocarboaluminato y sales de Friedel y poca concentración de cloruros.

Con base en lo anterior y en las fases minerales de C-S-H detectadas en DRX (Figuras 43-45), se puede decir que estas fases poseen altas relaciones calcio/sílice y por tanto podrían ligar cloruros. Por otra parte el cemento tiene menos alúmina que la CBC, al tener menor contenido de alúmina se favorece el ligado de los cloruros por parte del C-S-H.

A 28 días de curado se tuvieron más productos cementantes de C-S-H en las mezclas con adición de CBC debido a las reacciones puzolánicas (Figuras 43 a 44 en DRX) por tanto el ligado de cloruros por parte del C-S-H puede ser mayor que en la mezcla CBC0. Asimismo podría existir ligado de cloruros con la alúmina de la CBC. Por tanto se esperaría que a mayores tiempos de curado el ligado de cloruros sea mayor en mezclas con adición de CBC.

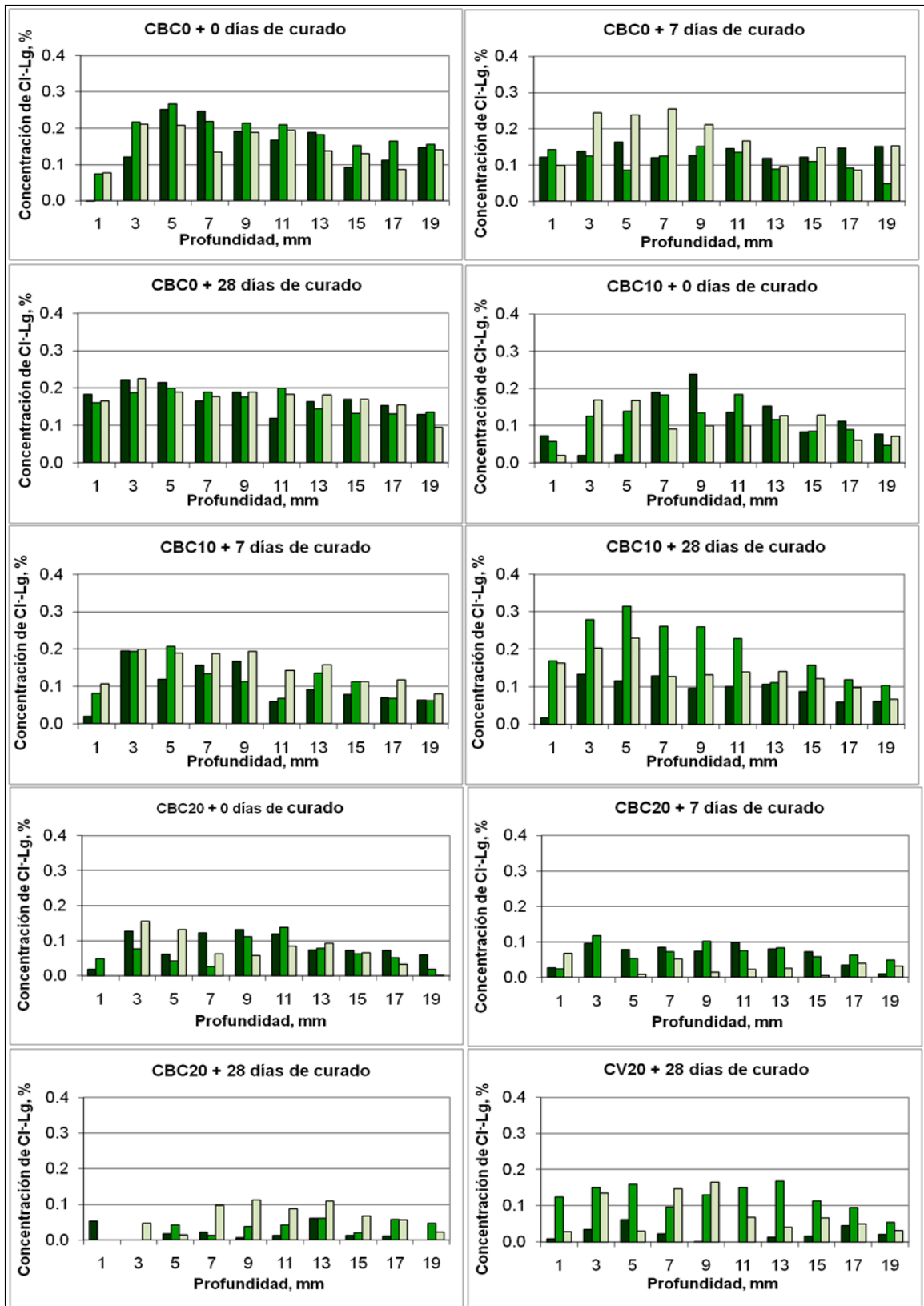


Figura 64: Perfiles de cloruros ligados (Cl-Lg) en probetas de mortero (3 réplicas) CBC0, CBC10, CBC20 con 0, 7 y 28 días de curado y CV20 con 28 días de curado

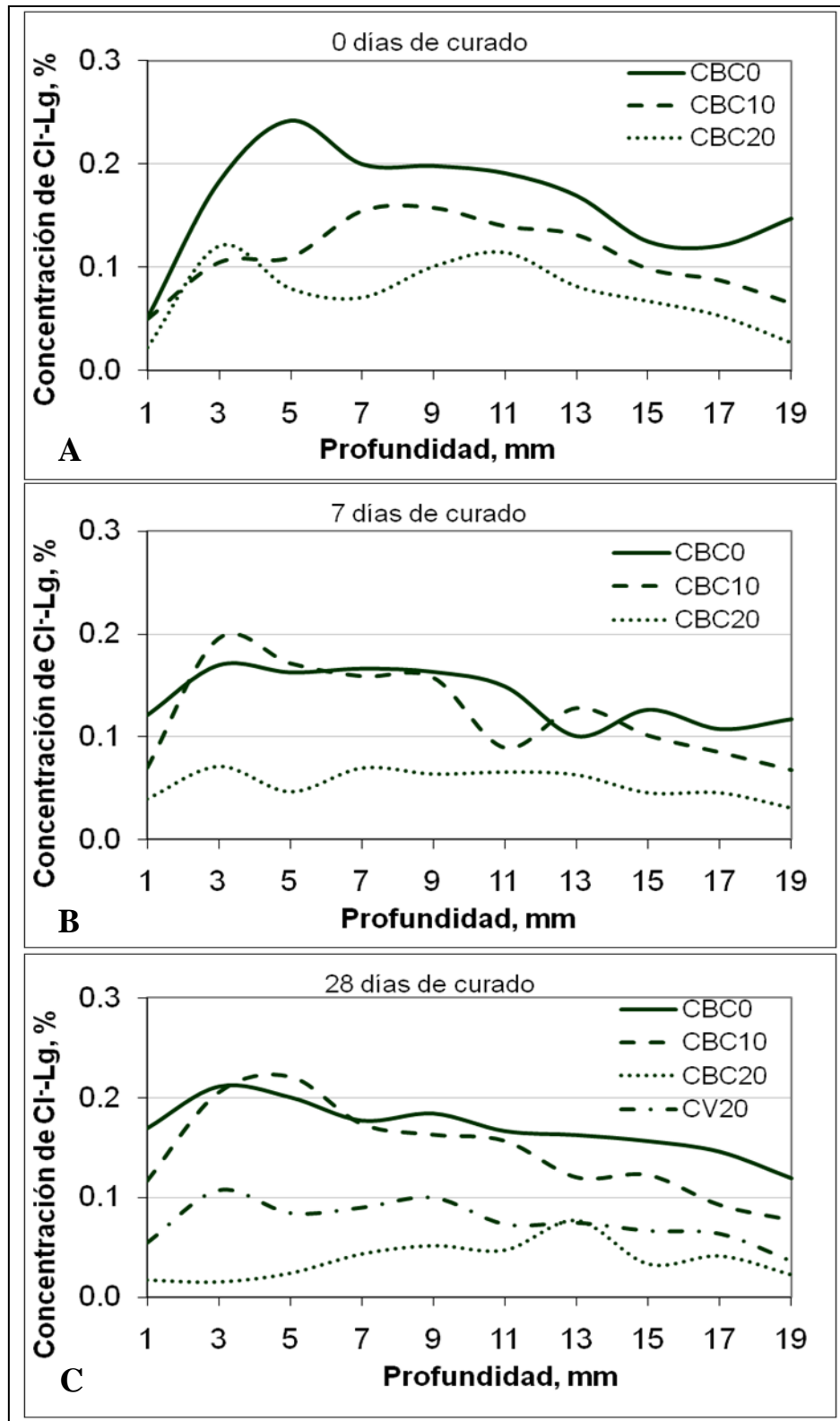


Figura 65: Perfiles de cloruros ligados promedio en probetas de mortero A) con 0, B) con 7 y C) con 28 días de curado

4.3.3 Evaluación de la corrosión en el ferrocemento

4.3.3.1 Inspección visual detallada no destructiva

En la figura 66 se puede observar que conforme incrementa el contenido de CBC, la coloración de la matriz cementante es más oscura debido a la naturaleza de la ceniza.

Durante la última inspección visual realizada a las placas de ferrocemento después de 1000 ciclos de exposición en el ambiente agresivo simulado (Figura 66), se identificaron algunas eflorescencias ocasionadas por la acumulación de sales (durante el ciclo de secado) provenientes del ambiente simulado o por impurezas en los agregados, degradación superficial de la pasta cementante por el efecto humedecimiento-secado y manchas por corrosión en áreas específicas con las cuales se podría inferir que existe corrosión del acero de refuerzo.

En las figuras 67 a 70 se muestran algunas manchas por corrosión dispersas, estas se identifican por su coloración rojiza. Sin embargo, dicha dispersión puede atribuirse a que los productos de corrosión acumulados aún no son suficientes como para generar agrietamiento, o bien existe suficiente recubrimiento para soportar los esfuerzos de tensión que se generen. Por tanto dichos productos solo son transportados por el agua durante el ciclo de secado a través de los poros de la matriz cementante generando estas manchas. Por lo anterior aún no es posible determinar los tipos de corrosión existentes, para ello es necesaria la autopsia de las probetas.

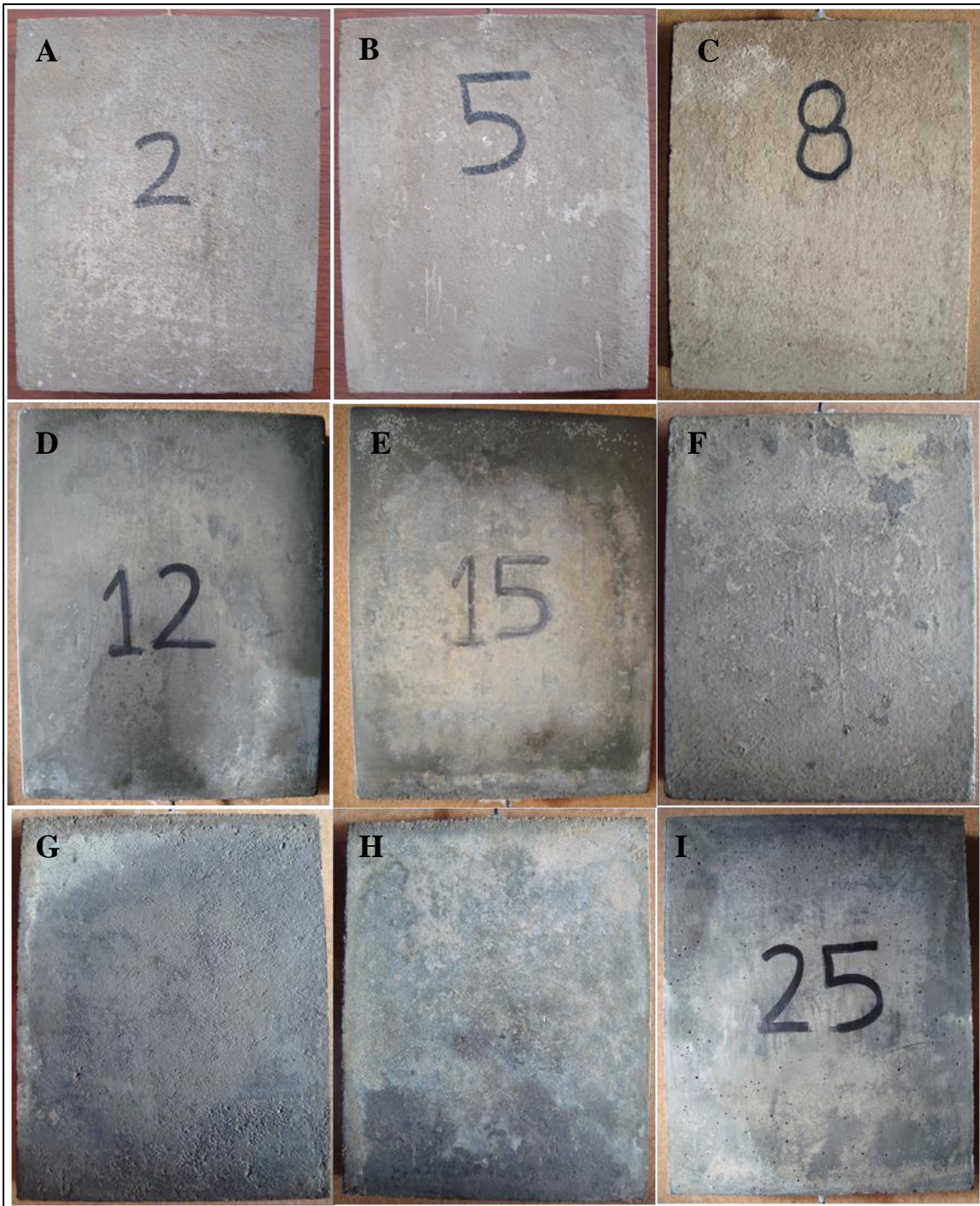


Figura 66: Imágenes de la inspección visual detallada de las placas de ferrocemento después de 1000 ciclos de humedecimiento y secado en un ambiente agresivo simulado
A) CBC0 + 0 días, B) CBC0 + 7 días, C) CBC0+ 28 días D) CBC10 + 0 días, E) CBC10 + 7 días, F) CBC10+ 28 días, G) CBC20 + 0 días, H) CBC0 + 7 días, I) CBC20+ 28 días, de curado.

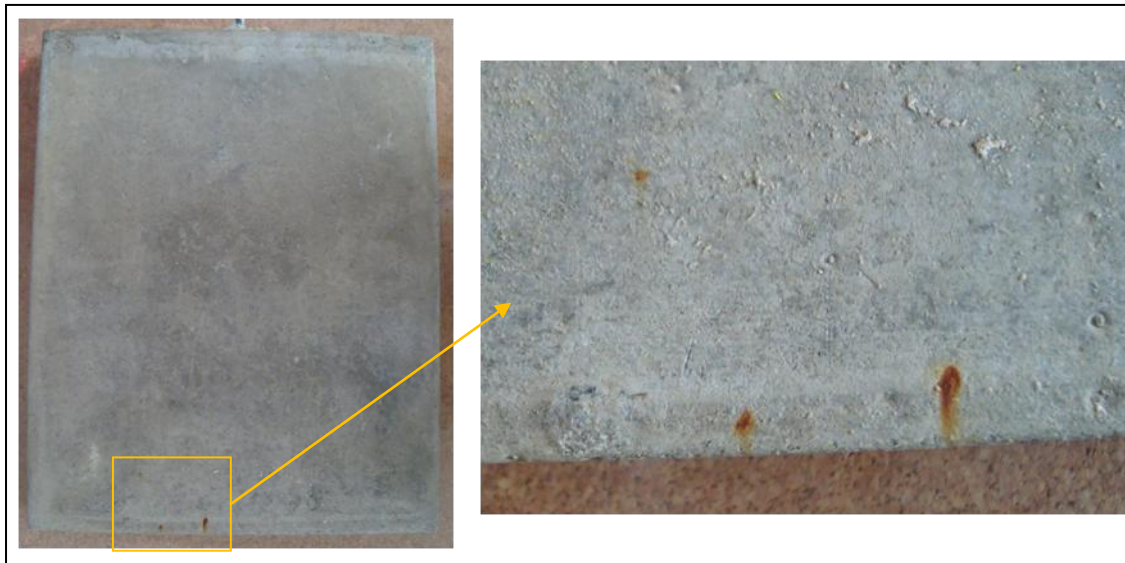


Figura 67: Manchas de óxido localizadas en una de las réplicas del mortero CBC0 con 28 días de curado

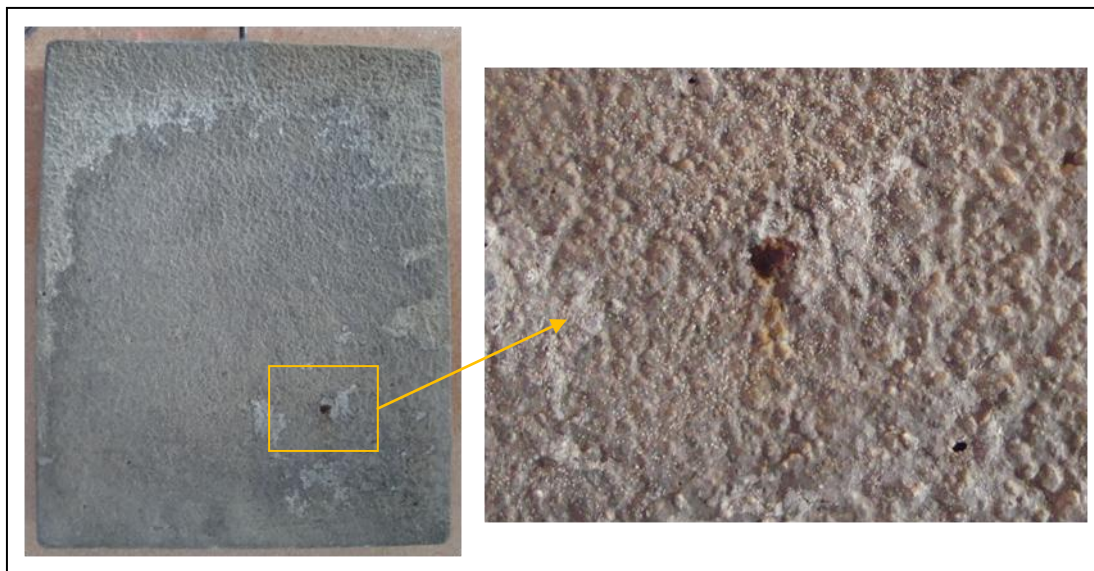


Figura 68: Mancha de óxido localizada en una de las réplicas del mortero CBC10 con 7 días de curado

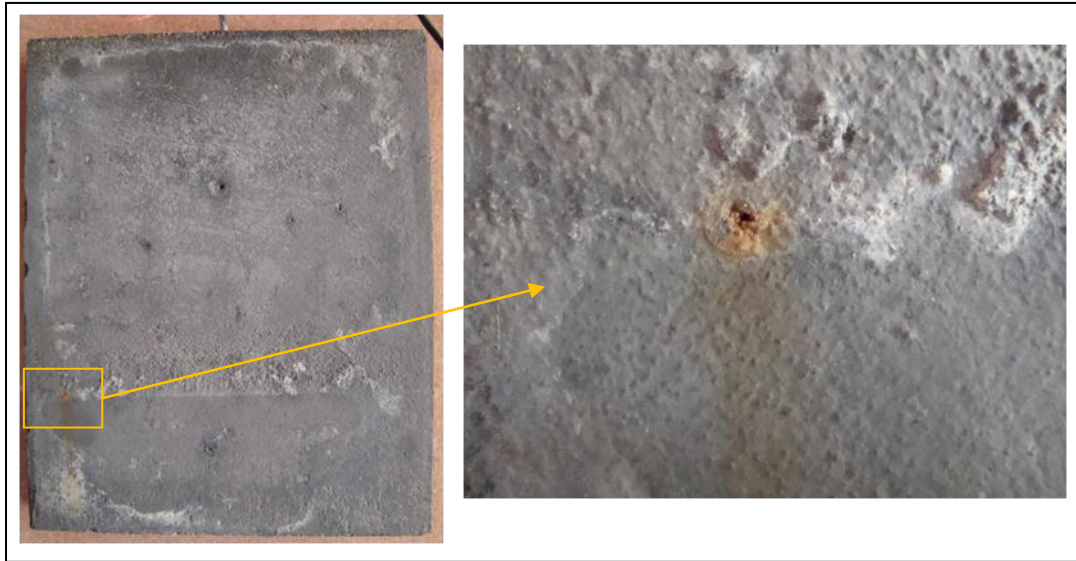


Figura 69: Mancha de óxido localizada en una de las réplicas del mortero CBC20 con 0 días de curado

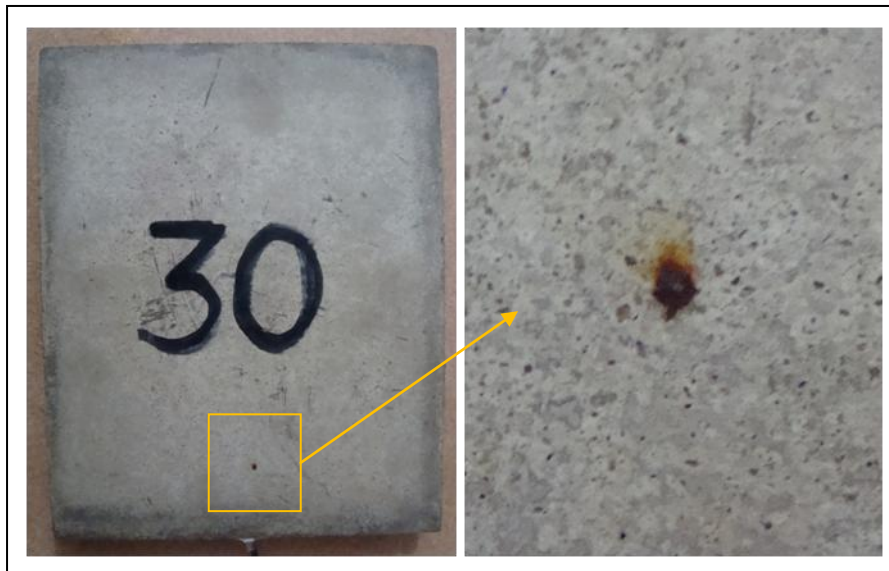


Figura 70: Mancha de óxido localizada en una de las réplicas del mortero CV20 con 28 días de curado

4.3.3.2 Potenciales de corrosión

En las figura 71 se muestran los resultados de pruebas de potenciales de corrosión en las placas de ferrocemento después de 1000 ciclos de humedecimiento y secado. Los valores son más electronegativos con respecto a los del acero al carbón debido al recubrimiento del zinc del acero de refuerzo.

Al analizar los potenciales de corrosión de las probetas sin adiciones puzolánicas (CBC0), se pueden observar tres regiones:

Primera región o periodo de pasivación (desde 0 a 100 días): Se observa variabilidad de los potenciales de corrosión del acero galvanizado en etapas tempranas, lo anterior al comparar los valores con los potenciales del acero al carbón de otras investigaciones (Gowripalan 1998, Aveldaño y Ortega 2011). **Segunda región o periodo de iniciación (hasta los 250 días):** En esta región se considera el tiempo en el cual los iones cloruro han penetrado el recubrimiento de mortero hasta alcanzar altas concentraciones en la interface con el acero de refuerzo, durante este periodo se observan lecturas de potenciales entre -400 a -550mV. **Tercera región o periodo de propagación:** en el cual se observan incrementos en los potenciales de corrosión, es decir, son más negativos, llegando en algunos casos a rebasar los -900mV durante el periodo evaluado.

Los resultados observados son consistentes con valores de la literatura en donde se ha evaluado la corrosión del acero galvanizado con zinc. En ella se reportan potenciales de corrosión entre -550 hasta -1200mV para considerar corrosión activa del sistema (Gowripalan 1998, Farina y Duffo 2007, Tittarelli y Moriconi 2011).

De manera similar que en los resultados de resistencia a la compresión, en las probetas CBC0 se observa un efecto benéfico del tiempo de curado en los potenciales de corrosión, puesto que los potenciales son menos negativos a mayor tiempo de curado. Lo anterior debido al mejoramiento de la matriz cementante del mortero causado por las reacciones de hidratación del cemento a mayor tiempo de curado creando nuevos productos cementantes, tal como se apreció en la sección de difracción de rayos X y como se observó en microscopía electrónica de barrido, esto infiere disminución del ingreso de iones cloruro a través de la pasta cementante.

En lo que respecta a las probetas con adiciones de CBC, los resultados aún no permiten concluir sobre el efecto e influencia de la adición de la puzolana en el fenómeno de la corrosión. Sin embargo, los valores para 0 y 7 días de curado son considerablemente más negativos que en las probetas sin adiciones puzolánicas. Una posible explicación es que existe un periodo de iniciación de la corrosión más prolongado o una menor actividad corrosiva debido a las mejoras en la microestructura de la matriz cementante, tal como se analizó en DRX y SEM. Al comparar las probetas CBC0 con las de CBC10 y CBC20 a 28 días de curado aún no se observan diferencias significativas; por lo que se sugiere continuar el monitoreo.

En cuanto a las probetas con adición de CV y 28 días de curado se observaron potenciales de corrosión menos negativos que los potenciales a 0 y 7 días de curado para las probetas CBC0 y CBC10, no mostrando diferencias significativas en comparación con las probetas CBC20. Sin embargo hasta el periodo evaluado, a los 1000 ciclos mostraron potenciales más negativos en comparación con las probetas CBC0, CBC0 y CBC20.

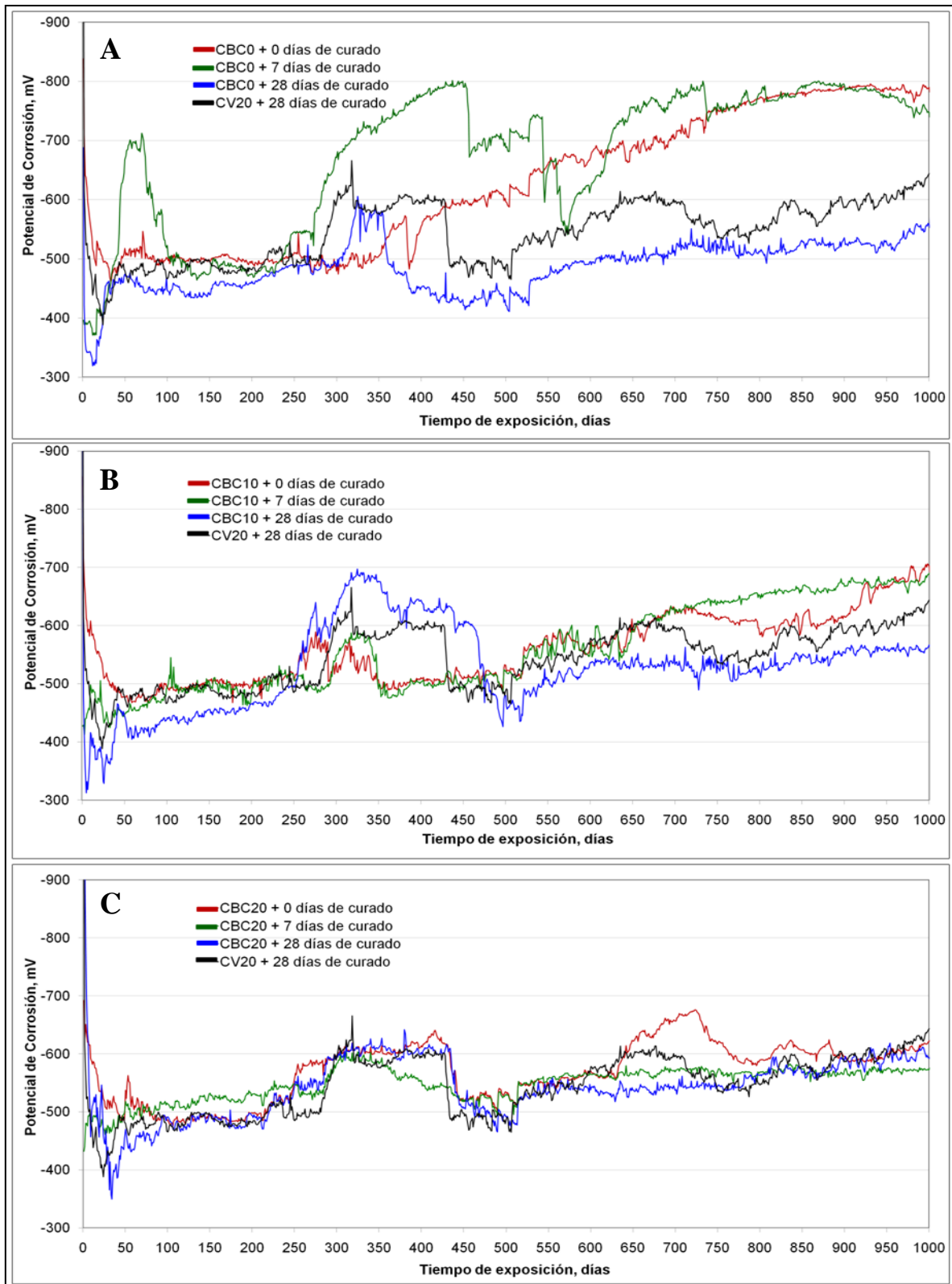


Figura 71: Potenciales de corrosión promedio de las placas de ferrocemento (tres réplicas) después de 1000 de exposición al ambiente agresivo simulado
 A) CBC0, B) CBC10, C) CBC20, con 0, 7 y 28 días de curado y CV20 + 28 días de curado.

4.3.3.3 Densidades de corrosión

Las densidades de corrosión (Figura 72) obtenidas a partir de las intensidades de corrosión por unidad de área muestran el incremento de la actividad corrosiva en el tiempo para todas las probetas de ferrocemento. En las gráficas se puede observar que a los 250 días (sugerido por los potenciales de corrosión) hay incremento considerable de la actividad corrosiva, los valores oscilan entre 1 y 2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo cual indica corrosión activa (Tittarelli y Moriconi 2011). Sin embargo, algunos autores (Farina y Duffó 2007) que han evaluado la densidad de corrosión del zinc y aceros galvanizados sugieren mayores densidades para tener corrosión activa.

El efecto del curado comienza a observarse después de los 600 días sin tener conclusiones hasta los 1000 ciclos de exposición. Por ahora solo en las probetas CBC0 se observa que conforme incrementa el curado los valores de densidad disminuyen, lo cual en las probetas con adiciones de CBC aún no es tan evidente. Por tanto; al igual que en los potenciales de corrosión se requiere extender el periodo de monitoreo para determinar los efectos del tiempo de curado.

En lo referente a la influencia de la adición de CBC en la densidad de corrosión, los resultados obtenidos en el periodo evaluado aún no permiten concluir sobre el efecto de la puzolana en el fenómeno de la corrosión. Lo anterior debido a que los valores de las densidades se encuentran en el mismo rango de valores (entre 0.5 y 2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) para todas las mezclas, por lo tanto se debe continuar el monitoreo

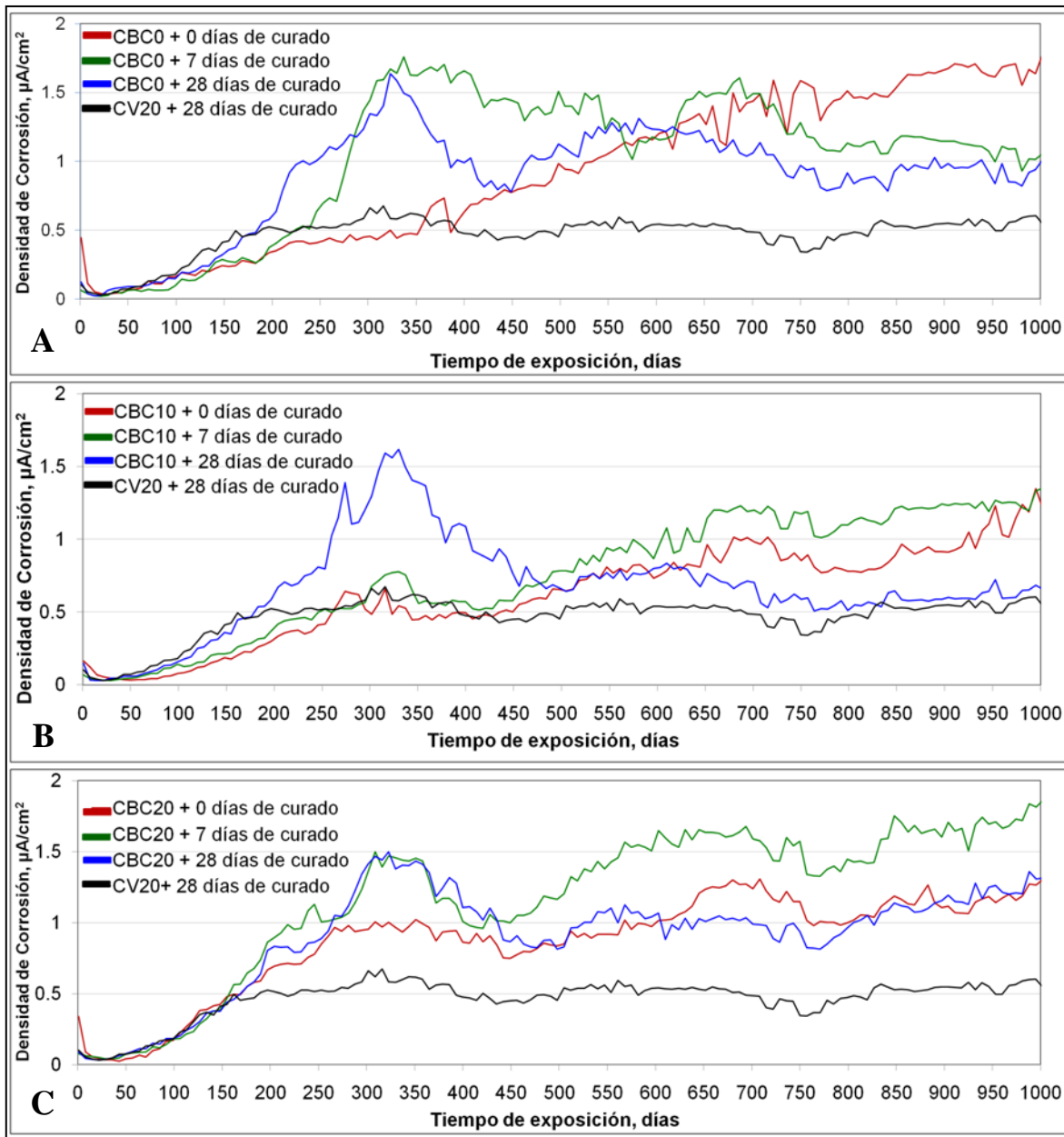


Figura 72: Densidades de corrosión promedio de las placas de ferrocemento (tres réplicas) después de 1000 de exposición al ambiente agresivo simulado
 A) CBC0, B) CBC10, C) CBC20, con 0, 7 y 28 días de curado y CV20 + 28 días de curado.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los resultados de las fases que conforman esta investigación se puede concluir lo siguiente:

1. La adición de 10 y 20% de CBC incrementa la resistencia a la compresión a edades de 28, 56, 90 y 450 días. Conforme se incrementa el contenido de CBC de 10 a 20% se reduce la resistencia a la compresión entre 7 y 12% a edades de 1, 7, 28, 56 y 90 días; sin embargo, esto no sucede 450 días.
2. La adición de 10 y 20% de CBC mejora la microestructura del mortero, puesto que se crean nuevos productos cementantes como el C-S-H y C-A-S-H los cuales densifican la matriz de dichos morteros.
3. El uso de 10 y 20% de CBC contribuye a disminuir los coeficientes de difusión de cloruros libres en el mortero en todos los tiempos de curado evaluados. Sin embargo, la CBC no contribuye al ligado de cloruros.
4. Los cambios positivos en la microestructura del mortero por la adición de CBC e incremento del tiempo de curado contribuyen a mejorar la durabilidad del ferrocemento.

RECOMENDACIONES

Las observaciones generadas en la parte experimental y de resultados de esta investigación permiten proponer lo siguiente:

1. Dar continuidad al monitoreo de potenciales y densidad de corrosión en las placas de ferrocemento para concluir en relación a su durabilidad acerca de los efectos de la adición de CBC y del tiempo de curado.
2. Realizar una inspección visual detallada al término del monitoreo de potenciales y densidad de corrosión para validar los resultados, identificar el tipo de corrosión y evaluar el daño ocurrido durante el periodo de exposición.
3. Obtener muestras de la interfase mortero-acero de refuerzo para un posterior estudio en DRX y MEB, el cual permita evaluar los productos formados durante el proceso de deterioro para futuras investigaciones sobre el tema.

REFERENCIAS

- ✓ ACI 116R-00 Cement and concrete terminology, ACI Manual of concrete practice 2001, Part 1.
- ✓ ACI 201.2R-92, Reapproved 1997, Guide to durable concrete, ACI Manual of concrete practice 2001, Part 1
- ✓ ACI 207.R – 96 Mass concrete, ACI Manual of concrete practice 2001, Part 1
- ✓ ACI 222R-96, Corrosion of metals in concrete, ACI Manual of concrete practice 2001, Part 1.
- ✓ ACI 232-96 Use of Fly Ash in Concrete” ACI Manual of concrete practice 2001, part 1
- ✓ ACI 549R-97, State of the part report on ferrocement, ACI Manual of concrete practice 2001, Part 5
- ✓ Ahmad Zaki, 2006, “Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control” Chapter 3 y 12: Concrete Corrosion, pp. 609-646.
- ✓ Ahmaruzzama M., 2010, “A review on the utilization of fly ash”, Progress in Energy and Combustion Science, vol. **36**, pp. 327-363.
- ✓ Angst Ueli., Elsener Bernhard., Larsen Claus K., Vennesland Øystein., 2009, “Critical chloride content in reinforced concrete – A review”, Cement and Concrete Research, vol. **39**, pp. 1122-1138.
- ✓ Arenas M. A., Casado C., Nobel-pujol V., De Damborenea J., 2006, “Influence of the coating on the corrosión of galvanized reinforcing steel”, Cement and Concrete Composites, pp. 267-275.
- ✓ Arizzi A., Cultrone G., 2012, ”Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study”, Construction and Building Materials, vol. **31**, pp. 135-143
- ✓ Ashraf M., Naeem Khan A., Ali Qasair., Goyal A., Anwar A. M., 2009, “Physico-chemical, morphological the combined pozzolanic activities of minerals additives”. Construction and building materials, vol. **23**, pp. 2207-2213.
- ✓ Aveldaño Raquel R.m Orteg Néstor F., 2011, “Characterization of concrete due to corrosión of reinforcements in different enviroments” Construction and Buiding Materials, vol. **25**, pp. 630-637
- ✓ Berke Neal S., Hicks Maria C., Malone James., Rieder Klaus A. 2005, “Concrete durability”, Revista Durability, Concrete international, the magazine of the American Concrete Institute-an international technical society, vol. **27**, No 8. pp 63-68.
- ✓ Bonavetti V. L., Rahhal V. F., 2006 “Interacción de adiciones minerales en pastas de cemento”, Revista de la construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, vol. 5, No. 2, diciembre, pp. 33-41.
- ✓ Broomfied John P., 1997, “Corrosión of steel in concrete”, primera edición, Gran Grataña, E & Fn Spon,
- ✓ “Cemento hidráulico”. 2003, Ficha técnica, ONNCCE. S. C.
- ✓ Castellote M., Andrade C., 2001, “Round-Robin test on chloride analysis in concrete - Part 1: Analysis of total chloride content”, Materials and Structures, November, vol. **34**, pp. 532-556.

- ✓ Castellote M., Andrade C., 2001, "Round-Robin test on chloride analysis in concrete Part 2: Analysis of water soluble chloride content", *Materials and Structures*, December, vol. **34**, pp. 589-598.
- ✓ Chen C., Harbert G., Bouzidi Y., Jullien A. 2010, "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *Journal of Cleaner Production*, vol. **18**, pp. 478-485.
- ✓ Chindapasirt P., Chotithanorn C., Cao H. T., Sirivivatnanon V. 2007, "Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete", *Construction and Building Materials*, vol. **21**, pp. 356-361.
- ✓ Chindapasirt P., Homwuttiwong S., Jaturapitakkul C., 2007, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash", *Construction and Building Materials*, vol. **21**, pp. 1492-1499.
- ✓ Chulsilp Nuntachai, Jaturapitakkul Chai, Kiattikomol Kraiwood., 2009, "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials*, vol. **23**, pp. 3352-3368.
- ✓ Chulsilp Nuntachai, Jaturapitakkul Chai, Kiattikomol Kraiwood., 2009, "Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars", *Construction and Building Materials*, vol. **23**, pp. 3523-3631.
- ✓ Cordeiro G. C., Toledo Filho R. D., Tavares L. M., Fairbairn E. M. R., 2008, "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars", *Cement and Concrete Composites*, vol. **30**, pp. 410-418.
- ✓ Cordeiro G. C., Toledo Filho R. D., Fairbairn E. M. R., 2009, "Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash", *Construction and Building Materials*, vol. **23**, pp. 3301-3303.
- ✓ Cordeiro G. C., Toledo Filho R. D., Fairbairn E. M. R., 2010, "Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries" *Ibracon, Structures and Materials Journal*, vol. **3**, pp. 50-67.
- ✓ Cordeiro G. C., Toledo Filho R. D., Fairbairn E. M. R., 2012, "Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes", *Construction and Building materials*, vol. **29**, pp. 641-646
- ✓ Crolet J. L., Defranoux J. M., 1973, "Calcul du temps d'incubation de la corrosion cavernuse des aciers inoxydables", *Corrosion Science*, vol **13**, pp. 575-585.
- ✓ Diamond S., 2004, "The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer", *Cement and Concrete Composites*, vol. **26**, pp. 919-933.
- ✓ Donald R. Askeland 1998, "Ciencia e ingeniería de los materiales" Tercera edición Internacional Thomson Editores.
- ✓ "El medio ambiente en México:" en resumen, 2009, SEMARNAT.
- ✓ Encyclopedia Britannica Selected (EBS), 2009 "Amethyst Galleries, Mineral Gallery", consultado el 22 de noviembre de 2012, www.galleries.com
- ✓ Escalante G. José Iván., 2002, "Materiales alternativos al Cemento Portland", *Avance y perspectiva*, vol 21, CINVESTAV-Saltillo.
- ✓ Escobar Loret De Mola., Wainshtok Rivas Hugo. 1998, "Residential Building Systems". *Ferrocement 6: Lambot Symposium, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement*, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
- ✓ Estrada M., Alonso E., Chávez L. E., Chávez H. L., Martínez W., Rubio J. C., Velasco F. Ávalos M., 2005, "Hidratación del cemento Portland, fase Etringita; Monosulfatos y

- Trisulfatos” Primer foro académico de la DES de ingenierías y arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo., 30 de noviembre al 2 de diciembre. Morelia, Michoacán, México.
- ✓ Farina S. B., Duffó G. S., 2007, “Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions”, *Electrochemical Data*, vol. **52**, pp. 5131-5339.
 - ✓ Fernandez A., Montes P. 1998, “A Monolithic ferrocement auditorium” *Ferrocement 6: Lambot Symposium, Preceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement*, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
 - ✓ FHWA, Federal Highway Administration, 2006, “Petrographic methods of examining hardened concrete: A petrographic manual” Julio, Publication number FHWA-HRT-04-150.
 - ✓ Flores Vivián Ismael., 2009, “Obtención de nanopartículas de SiO₂ y su efecto en las propiedades microestructurales, mecánicas y reológicas en materiales cementantes”, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
 - ✓ Fontana Mars G., 1986, “Corrosion Engineering”. Third edition, Mc Graw Hill
 - ✓ Frías Moisés., Villar Ernesto., Savastano Holmer. 2011, “Brazilian sugar cane bagasse from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture”, *Cement and Concrete Composites*, vol. **33**, pp. 490-496.
 - ✓ Ganesan K., Rajagopal K., Thangavel K., 2007, “Evaluation of bagasse ash supplementary cementitious material”, *Cement and Concrete Composites*, vol. **29**, pp. 515-524.
 - ✓ Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M. 2007, “Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cement”, *Cement and Concrete Composites*, vol. **29**, pp. 542-549.
 - ✓ Giraldo M. Manuel Alejandro, Tobón Jorge Ivan, 2006, “Mineralogical Evolution of Portland Cement During Hydration Process” *Dyna* (revista de la facultad de minas-Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellin), marzo, vol. **73**, número 148, pp 69-81.
 - ✓ Gowripalan N., Mohamed H. M., 1998, “Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp. 1119-1131.
 - ✓ Güneysi, E., Özturan, T., y Gesoglu, M., 2005, “A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions”, *Cement & Concrete Composites*, vol. **27**, pp. 449-461.
 - ✓ Hawkes Peter W., Spence John C. H., 2007, “ Science of Microscopy” vol. 1, Springer Science+Business Media, LLC.
 - ✓ Hernández Martínez Héctor, 2009, “Ceniza de bagazo de caña aumenta dureza del concreto”, *Revista Universo*, Universidad Veracruzana, publicación semanal, año 9, num. 361, junio, consultado el 01 de noviembre de 2012 www.uv.mx/universo/361/infgral-23.htm
 - ✓ Hernández Toledo Ur Iván., 2010, “Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento”, Tesis de Maestría, CIIDIR-IPN-Unidad Oaxaca, México.
 - ✓ Hernández-Toledo Ur Iván., Maldonado-García Marco Antonio., Montes-García Pedro., 2010, “Efecto de la ceniza de bagazo de caña en la resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico de morteros., VI Jornadas Politécnicas de Investigación

- en Conservación y Aprovechamiento de los Recursos Naturales, Instituto Politécnico Nacional CIIDIR-Oaxaca, Oaxaca, México, septiembre.
- ✓ Jakobse P. T., Maahn E., 2001, "Temperature and potential dependence of crevice corrosion of AISI 316 stainless steel", *Corrosion Science*, vol. **43**, pp. 1693-1709.
 - ✓ Jala Sudha., Dinesh Goyal., 2006, "Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production – A review", *Bioresource Technology*, vol. **97**, pp. 1136-1147.
 - ✓ Jillavenkatesa Ajit, Dapkunas Stanley J., Lum Lin-Sien H., 2001, "Particle size characterization" Recommended practice guide, Special publication 960-1 of National Institute of Standards and Technology (NIST)
 - ✓ Josa Alejandro., Aguado Antonio., Cardim Arnaldo., Byars Ewan., 2007, "Comparative analysis of the cycle impact assessment of available cement inventories in the EU", *Cement and Concrete Research*, vol. **37**, pp. 781-788.
 - ✓ Joseph Kappukatill Lizamma., 1989, "Mathematical modelling of the pit initiation process", Tesis de Maestría, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, E. U. A.
 - ✓ Kenai S., Brooks J. J. 1994, "Tensile, flexural and impact behaviour of ferrocement with chicken wire mesh reinforcement" *Ferrocement 5: Proceedings of the Fifth International Symposium on Ferrocement*, UMIST Manchester, 6-9 september.
 - ✓ Kosmatka Steven H., Kerkhoff Beatrix., Panarese William C., Taneso Jussara., 2004, "Diseño y control de mezclas de concreto", Portland Cement Association.
 - ✓ Lombardi B., Dapino M. A., Montardit P. R., Torres Sánchez R. M., 2001, "Aproximación al valor de superficie específica por un método manual y simple", Jornadas SAM-CONAMET-AAS.
 - ✓ Lorenzo García María Paz, 1993, "Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento Portland hidratado", Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid, España.
 - ✓ Lu Xinying., Li Cuiling., Zhang Haixia., 2002, "Relationship between the free and total chloride diffusivity in concrete", vol. 32, pp. 323-326
 - ✓ Maaddawy Tamer El., Soudki Khaled., 2007, "A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking", *Cement and Concrete Composites*, vol. **29**, pp. 168-175.
 - ✓ Maldonado-García M. A., Hernández-Toledo U. I., Montes-García P., Valdez P., 2012, "Efecto de la ceniza de bagazo de caña en la microestructura y permeabilidad de iones cloruros en mortero" VI International Conference on Physical Engineering, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México D.F. México, Junio.
 - ✓ Maldonado-García M. A., Hernández-Toledo U. I., Montes-García P., Valdez-Tamez P. L., 2012, "Influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña en la corrosión del ferrocemento" V Congreso Nacional ALCONPAT, Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa. Los Mochis Sinaloa, Noviembre.
 - ✓ Malhotra V. M., Ramezani-pour A. A., 1994, "Fly Ash in concrete", segunda edición, publicaciones CANMET.
 - ✓ Martínez Reyes Jacobo., 2007, "Caracterización de la reactividad puzolánica de materiales de origen natural, industrial y de desperdicio agrícola", Tesis de Maestría, CIIDIR-IPN-Unidad Oaxaca, México.
 - ✓ Martirena Fernando., Middenford Bernhard., Day Robert L., Gehrke Matthias., Roque Pablo., Martinez Lesday., Betancourt Sergio., 2006, "Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw", *Cement and Concrete Research*, vol. **36**, pp. 1056-1061.

- ✓ Martirena Hernández J. F., Middendorf B., Gehrke M., Budelmann H., 1998, "Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction", *Cement and Concrete Research*, vol. **28**, pp. 1525-1536.
- ✓ Mehta P. Kumar., Monteiro Paulo J. M., 2006, "Concrete, microstructure, properties and materials", Third edition, editorial Mc Graw Hill.
- ✓ Melgarejo Joan carles., Proenza Joaquín A., Galí Salvador., Llovet Xavier., 2010, "Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. **62**, num. 1, pp. 1-23.
- ✓ Mohammed T. U., Hamada H., 2003, "Relationship between free chloride and total contents in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1487-1490.
- ✓ Montes-García P., Jiménez-Quero V., Caballero Aquino T., Fernández-González A., 2011, "Corrosión en presas de ferrocemento", *Revista ALCONPAT*, Enero-abril, vol. 1, número 1, pp. 31-41.
- ✓ Morales E. V., Villar-Cociña E., Frías M., Santos S. F., Savastano Jr. H., 2009, "Effects of calcining conditions on the microestructure of sugar cane waste ashes (SCWA): influence in the pozzolanic activation", *Cement and Concrete Composites*, vol. **31**, pp. 22-28.
- ✓ Moragues Terrades Amparo., 2012, "Procesos de hidratación del cemento Portland y microestructura del hormigón" E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Consultado 22 de octubre de 2012. <http://prt2.uprm.edu/Microestructura.pdf>
- ✓ Naaman Antoine E. 2000, "Ferrocement and laminated cementitious composites", Primera edición, editorial Techno Press.
- ✓ Neville A. M., Brooks J. J., 2008, "Tecnología del concreto" Primera edición en español, Editorial Trillas.
- ✓ Nilson Arthur, 2009, "Diseño de estructuras de concreto". Duodécima edición, editorial Mc Graw Hill.
- ✓ NMX-C-414-ONNCCE-2004., Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C.
- ✓ Noor-ul Amin, 2011, "Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity", *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, technical note.
- ✓ Olvera L. Alonso. 1998, "Applications of prefabricated ferrocement housing in México" *Ferrocement 6: Lambot Symposium, Preceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement*, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
- ✓ Olvera L. Alonso., 2002, "El ferrocemento y sus aplicaciones", IPN, editorial Alfaomega.
- ✓ Pama R. P.. 1994, "Ferrocement – an overview", *Ferrocement 5: Proccedings of the Fifth International Symposium on Ferrocement*, UMIST Manchester, 6-9 september.
- ✓ Paul B. K., Pama R. P. 1991, "Ferrocemento" Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto a. c., Noriega editores.
- ✓ Paramasivam P. 1998, "Recent research and applications of ferrocemento in Singapore" *Ferrocement 6: Lambot Symposium, Preceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement*, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
- ✓ P. Popov Egor. 2000, "Mecánica de sólidos". Segunda edición Editorial Pearson Education, México.
- ✓ Plantz Philip E. 2008, "Particle size measurement of cement by laser diffraction using Microtrac S3500", application note SL-AN-26 Rev A. Microtrac Inc.

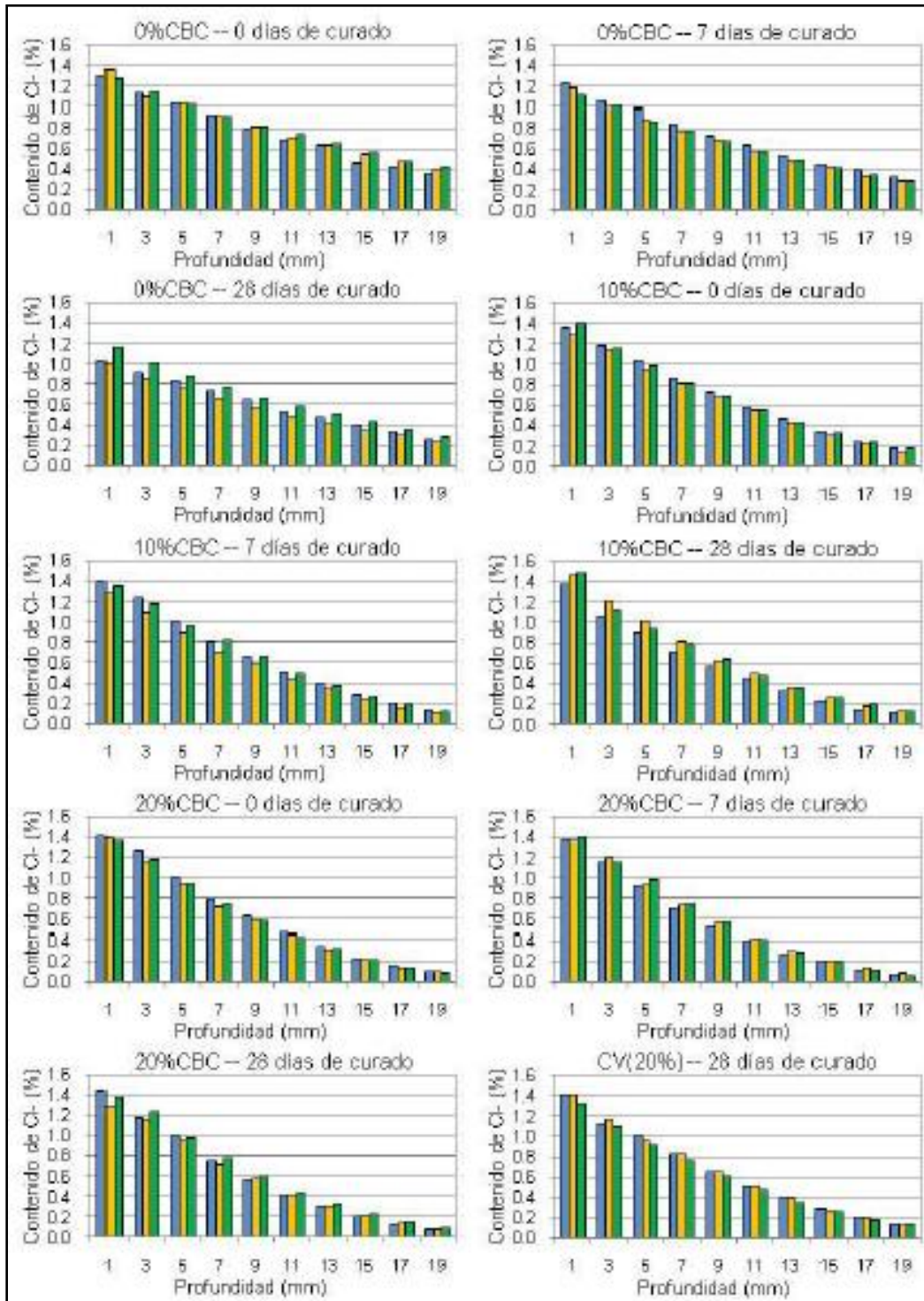
- ✓ Raichev Raicho., Verela Lucien., Valdez Benjamín. 2009, “Corrosión de metales y degradación de materiales: principios y prácticas de laboratorio” Universidad Autónoma de Baja California. CINVESTAV-Mérida / UABC-Mexicali.
- ✓ Rahhal V., Talero R., 2006, “Comportamiento de pastas de cemento Pórtland CEM I con adiciones silícicas a edades tempranas” Boletín Geológico y Minero, 117 (4), pp. 773-782.
- ✓ Ramachandra V. S., Beaudoin James J., 2001, “Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications”, William Andrew Publishing.
- ✓ Ramli mahyuddin., Tabassi Amin Akhavan., 2012, “ Mechanical behavior of polymer-modified ferrocement under different exposure conditions: An experimental study”, Composites, Part B, vol. 43, pp. 447-456.
- ✓ Richardson I. G., 2008, “The calcium silicate hydrates”, Cement and Concrete Research, vol. 38, pp. 137-158.
- ✓ RILEM TC 178-TCM: 2002, “Testing and modeling chloride penetration in concrete – Analysis of total chloride content in concrete”, Materials and Structures, November vol. 35, pp. 583-585.
- ✓ RILEM TC 178-TCM: 2002, “Testing and modeling chloride penetration in concrete – Analysis of water soluble chloride content in concrete”, Materials and Structures, November vol. 35, pp. 586-588.
- ✓ Rivas H. W., E. E. L. De Mola., O. De León González., E. S. Llanes. 1994, “System of residential building (SER)” Ferrocement 5: Proceedings of the Fifth International Symposium on Ferrocement, UMIST Manchester, 6-9 september.
- ✓ Rivas H. W., Moreno E. 1994, “Ferrocement Pools” Ferrocement 5: Proceedings of the Fifth International Symposium on Ferrocement, UMIST Manchester, 6-9 september.
- ✓ Scheider M., Romer M., Tsuchudin M., Bolio H., 2011, “Sustainable cement production-present and future”, Cement and Concrete Research, vol. 41, pp. 642-650.
- ✓ Sing N. B., Singh V. D., Rai Sarita., 2000, “Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 1485-1488.
- ✓ Somma Rattapon., Jaturapitakkul Chai., Rattapon Pokpong., Chalee Wichian., 2012 “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregated concrete”, Materials and Design, vol. 36, pp. 597-603.
- ✓ Stern, M., y Geary, A., 1957, “Electrochemical Polarization”, Journal of the Electrochemical Society, no. 104/1, pp. 56–63.
- ✓ Stark Jochen. 2011, “Recent advances in the fuel of cement hydration and microstructure analysis”, Cement and Concrete Research, vol. 41, pp. 666-678.
- ✓ Tan Z. Q., Hansson C. M. 2008, “Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embeded in concrete”, Corrosion Science, vol. 50, pp. 2512-2522.
- ✓ Sing N. B., Singh V. D., Rai Sarita., 2000 “Hydration of bagasse ash-blended portland cement”, Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 1485-1488
- ✓ Tittarelli F. Bellezze T. 2010, “Investigation of the major reduction reaction occurring during the passivation of galvanized steel rebars” Corrosion Science, vol 52, pags 978-983.
- ✓ Tittarelli F. Moriconi G. 2011, “Comparison between surface and bulk hydrophobic treatment against corrosion of galvanized reinforcing steel in concrete”, Cement and Concrete Research, vol 41, pp. 609-614.

- ✓ Torres Janneth., Mejía de Gutiérrez Ruby., Castelló Ricardo., Vizcaino Carmen., 2008, “Proceso de hidratación de pastas de OPC adicionadas con caolín tratado térmicamente” Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, marzo, número 043, pp. 77-85
- ✓ Toutanji H., Delatte N., Aggoun S., Duval R., Danson A., 2004, “Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete”, Cement and Concrete Research, vol. **34**, pp. 311-319.
- ✓ Trocónis de Rincon Oladis., Romero de Carruyo Aleida., Andrade Carmen., Helene Paulo., Díaz Isabel., 2000, “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armada”. Red DURAR tercera edición, agosto.
- ✓ UNC, Unión Nacional de Cañeros A. C. www.caneros.org.mx. Consultado el 13 de febrero de 2012
- ✓ UNIOVI, Universidad de Oveiro, “Lección 7: Hidratación del cemento” Apuntes de la asignatura Tecnología de cementos, vidrio y cerámicas, Laboratorio de cementos de la Escuela de Minas. Consultado el: 03 de octubre de 2012 <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>
- ✓ Valdez Pedro L., Durán Alejandro, Rivera Jorge M., Juárez César A., 2007, “Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante”, Revista Ciencia UANL, enero-marzo, año/vol. X, número 001, pp. 49-57.
- ✓ Valdez Tamez Pedro L., Das Roy Tushar K., Rivera Villareal Raymundo., 2004, “Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita”, Revista Ciencia UANL, Abril-junio, vol VII, pp. 190-195.
- ✓ Valdez Tamez P. L., Fajardo San Miguel G., Hermosillo Mendoza R., Flores Vivían I., 2008, “Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado” Revista Ciencia UANL, julio-septiembre, vol. XI, número 003, pp. 256-263.
- ✓ Vickridge I. G., Nakassan A. S., Turner H. 1998, “High durability ferrocement” Ferrocement 6: Lambot Symposium, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
- ✓ Vickridge I. G., Ranjbar M. M., 1998, “The combined effect of crack, load and aggressive environment on the corrosion rate of ferrocemtn reinforcement” Ferrocement 6: Lambot Symposium, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
- ✓ Vickridge I. G., Ranjbar M. M., 1998, “The effect of an aggressive environment on the flexural performance of ferrocement” Ferrocement 6: Lambot Symposium, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.
- ✓ Villa-Cociña E., Valencia-Morales E., Gonzáles- Rodríguez R., Hernández Ruiz J., 2003, “Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model”. Cement and Concrete Research, vol. 33, pp. 517-524.
- ✓ Wainshtok Hugo., 1998, “Ferrocemento diseño y construcción”, tercera edición, Guayaquil, Ecuador.
- ✓ Waldschlagel Owen., Schneider Nicholas., Bohlen Stephen A. 1998, “Ferrocement intact structures”, Ferrocement 6: Lambot Symposium, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrpccement, University of Michigan , Ann Arbor, USA, June 7-10.

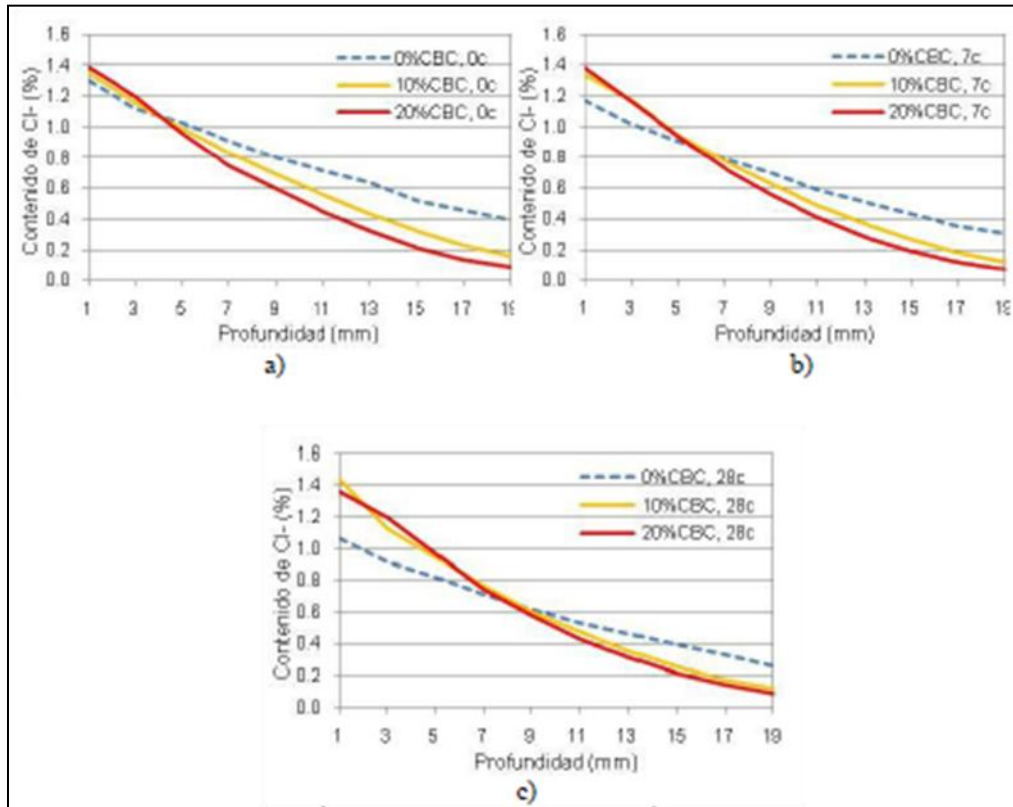
- ✓ WBC, World Business Council for Sustainable Development (WBC), 2011, “After water, concrete is the most consumed material on Earth... cement is the “glue” that holds it together”, Cement Industry Federation, www.cement.org.au
- ✓ William D. Callister Jr. 2009, “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales” Segunda edición. México. Editorial Limusa Wiley.
- ✓ William F. Smith, Javad Hashemi. 2006, “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales” Cuarta edición. México. Editorial Mc Graw Hill Interamericana.
- ✓ Zeman Frank. 2009, “Oxygen combustion in cement production”. Energy Procedia, vol. **1**, pp. 187-194.
- ✓ Zibara H., Hooton R. D., Thomas M. D. A., Stanish K., 2008, “Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-Mk mixtures”, Cement and Concrete Research, vol. **38**, pp. 422-426.

ANEXOS

1. Perfiles de penetración de cloruros totales en probetas de mortero 0%CBC = CBC0, 10%CBC = CBC10, 20%CBC = CBC20 y 20%CV = CV20. (% de Cl⁻ totales respecto al peso del mortero). **Fuente:** Hernández 2010.



2. Perfiles de penetración de cloruros totales promedio en probetas de mortero 0% CBC = CBC0, 10% CBC = CBC10, 20% CBC = CBC20 y 20% CV = CV20. a) con 0, b) con 7 y c) con 28 días de curado. (% de Cl⁻ totales respecto al peso del mortero). **Fuente:** Hernández 2010.



3. Coeficientes de difusión de cloruros totales a 63 días de edad. **Fuente:** Hernández 2010.

