



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

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

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

**“EFECTO DE UNA PUZOLANA DE DESPERDICIO AGRICOLA Y EL TIEMPO
DE CURADO EN LA CORROSIÓN DEL FERROCEMENTO”**

Tesis que para obtener el grado de:

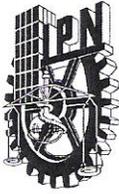
Maestro en Ciencias

Presenta:

Ur Iván Hernández Toledo

Director de Tesis:

Dr. Pedro Montes García



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 mayo del 2010 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 una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento”**

Hernández

Apellido paterno

Toledo

materno

Ur Iván

nombre(s)

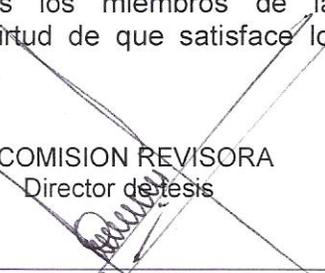
Con registro:

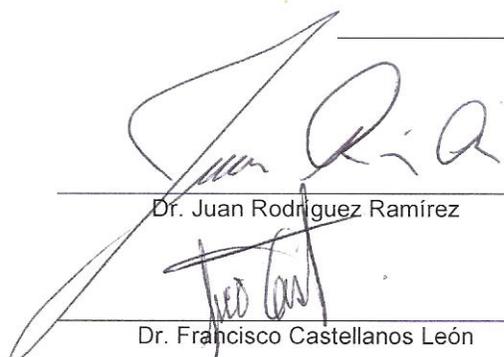
A	0	8	0	3	6	1
---	---	---	---	---	---	---

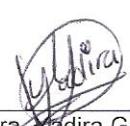
aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

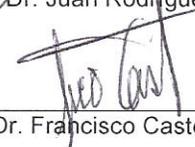
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA
Director de tesis


Dr. Pedro Montes García

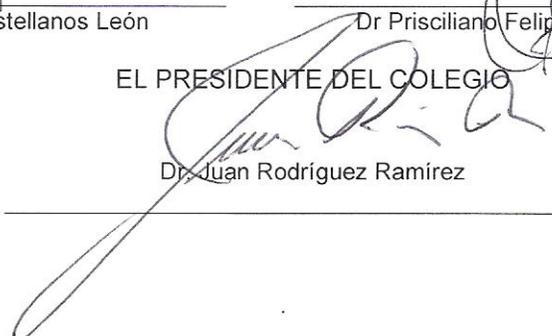

Dr. Juan Rodríguez Ramírez


Dra. Madira Gochi Ponce


Dr. Francisco Castellanos León

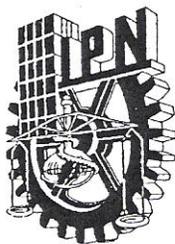

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


Dr. Juan Rodríguez Ramírez



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



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **20** del mes **mayo** del año **2010**, el (la) que suscribe **Hernández Toledo Ur Iván** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A080361**, 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 del Dr. Pedro Montes García y cede los derechos del trabajo titulado: “**Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión 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 urivanmxx@gmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Hernández Toledo Ur Iván



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

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña (CBC) y el tiempo de curado en las propiedades del mortero y la corrosión del ferrocemento. El experimento se conformó en dos fases. En la fase 1 se obtuvo la densidad, composición química y el Índice de Actividad Resistente (IAR) de CBC con diferentes tratamientos de cribado y molido para evaluar su uso como puzolana. En la fase 2 se elaboraron mezclas de mortero con proporción cemento:arena 1:3 y relación agua/cementantes de 0.63 con reemplazos de cemento por 0, 10 y 20% de CBC para colar especímenes cilíndricos de mortero y placas de ferrocemento, los cuales tuvieron tiempos de curado por inmersión de 0, 7 y 28 días. Con el objeto de comparación se elaboraron probetas con 20% de ceniza volante a las cuales se aplicó únicamente un curado de 28 días. Se realizaron pruebas en estado fresco de fluidez, peso volumétrico, contenido de aire y temperatura de las mezclas de mortero. Se determinó la resistencia a la compresión de cilindros de mortero a 3, 7, 14, 28 y 90 días de edad, y de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) diariamente hasta una edad de 90 días. Además, se obtuvieron los coeficientes de difusión de cloruros. Las placas de ferrocemento se sometieron a un ambiente agresivo simulado que consistió en ciclos diarios de humedecimiento y secado en una solución salina al 3%. Las pruebas de corrosión se realizaron durante 170 días, y consistieron en un estudio de inspección visual, lecturas diarias de potenciales de corrosión y pruebas semanales de resistencia a la polarización lineal (RPL). Con base en los resultados se puede concluir que el uso de CBC reduce la trabajabilidad de las mezclas. La adición de 10% de CBC y un curado de 0 y 7 días disminuye la resistencia a la compresión del mortero en todas las edades estudiadas, mientras que con 28 días de curado la resistencia a 28 y 90 días de edad es similar a la del control. La adición de 20% de CBC disminuye la resistencia a la compresión en todos los tiempos de curado y edades de prueba. El uso de CBC en mortero disminuye las VPUs especialmente con tiempos de curado bajos. La adición de CBC en mortero disminuye en 50% los coeficientes de difusión de cloruros independientemente del tiempo de curado. La CBC no parece incrementar significativamente los potenciales y velocidad de corrosión; sin embargo, se requiere continuar con el monitoreo a largo plazo para concluir de manera definitiva, ya que los niveles de corrosión actuales son bajos.

ABSTRACT

In the present study the effect of the addition of sugar-cane bagasse ash (SCBA) as a pozzolan and the time of curing on the properties of mortar and corrosion of ferrocement were evaluated. The experiment was carried out in two phases. In phase 1, the density, chemical composition and Strength Activity Index (SAI) of sugar-cane bagasse ash (SCBA) with different grinding and sieving levels were estimated. In phase 2, 1:3 cement-sand mortar mixtures with a water/cementitious materials ratio of 0.63 were prepared. In some mixtures 0, 10 and 20% of cement was replaced by SCBA. Cylindrical specimens of mortar and ferrocement slabs, which were cured by immersion at 0, 7 and 28 days, were cast. For comparison purposes a mixture containing 20% fly ash cured only 28 days was prepared. Tests in fresh state such as slump flow, volumetric weight, air content and temperature were performed. Compressive strength of mortar cylinders at 3, 7, 14, 28 and 90 days, and ultrasonic pulse velocity readings (UPV) during 90 days were carried out; moreover, the chloride diffusion coefficients were also obtained. Ferrocement slabs were subjected to an aggressive environment consisting of simulated daily cycles of wetting and drying in a 3% saline solution. The corrosion tests were conducted for 170 days, and consisted of a visual inspection, daily readings of corrosion potentials and weekly tests of linear polarization resistance (LPR). Based on the results it can be concluded that the use of SCBA reduces the workability of the mixtures. The addition of 10% of SCBA and curing of 0 to 7 days reduces the compressive strength of mortars at all ages studied, while for 28 days of curing the strengths at 28 and 90 days of age are similar to the control. The use of 20% of SCBA decreases the compressive strength at all curing times and ages of test. The addition of SCBA decreases UPVs especially with low curing times. The addition of SCBA decreases in 50% the chloride diffusion coefficients regardless of curing time. The SCBA does not appear to significantly increase the potential and corrosion rate; however, is required to continue the long-term monitoring to obtain a final conclusion, due to the present corrosion levels are low.

DEDICATORIA

A Dios

Por ser quien es...

A mis padres:

Celerino Hernández López y Noga Toledo Chávez

Que procuran siempre guiarme

A mí amada esposa:

Carolina Lara Pérez

A mí hijo:

Sebastián Hernández Lara

Que es mi aliciente para seguir adelante

A mis queridos hermanos:

Juliocésar Hernández Toledo y Daniel Hernández Toledo

A toda mi familia ...

Y a la memoria de mis primos:

Josué Caleb Hernández Pérez y Osmark Hernández Pérez

AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional y CIIDIR-Unidad Oaxaca** por haberme brindado las facilidades para la elaboración del presente trabajo.

Al **Instituto Politécnico Nacional** por el apoyo económico recibido mediante los proyectos de investigación “Estabilización química y mecánica del adobe compactado”, claves SIP-2008029, 20090144 y 20100266 y “Aspectos de durabilidad y seguridad estructural para el mejoramiento de micropresas de ferrocemento”, clave SIP 20090592. Y por la beca tesis otorgada a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado. Así mismo a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA) del mismo instituto, por la beca otorgada de agosto de 2008 a diciembre de 2009, a través del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI).

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por los recursos económicos otorgados mediante el proyecto “Corrosión del acero en concreto ordinario y de alto desempeño conteniendo puzolanas obtenidas de desperdicios agrícola”, clave SEP-CONACYT CIENCIA BASICA P47937-Y, la beca nacional nivel Maestría y por la beca de ayudante de investigador otorgada a través del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

A mí director de tesis y consejero estudiantil: el Dr. Pedro Montes García por el gran apoyo y confianza brindados, por compartir su tiempo y conocimientos durante la realización de éste trabajo.

Al comité revisor y jurado de examen integrado por: Dr. Juan Rodríguez Ramírez, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Pedro Montes García, Dra. Yadira Gochi Ponce, Dr. Francisco Castellanos León y Dra. Luicita Lagunez Rivera, así como profesores de seminarios de investigación: Dra. Luicita Lagunez Rivera, Dra. Lilia Méndez, M.C. Víctor Jiménez Quero, y Dr. Magdaleno Caballero por sus enseñanzas, consejos y recomendaciones para el mejoramiento de este trabajo.

Al M. en C. Rafael, Juanito, Yahir, M. en C. Víctor, M. en C. Berna, M. en C. Fernando, Ing. Raúl, M. en C. Samuel, M. en C. Tertuliano, Ana, M. en C. Laura y a Rodrigo por la ayuda otorgada.

A mis compañeros, Yahir, Juanito, Rafael, Fernando, Samuel, Víctor, Alejandro, Gerardo, Frank, Rey, Oscar, Sarahí, Ángeles, Ana, Laura, Soledad por su amistad brindada.

Al personal, administrativo y de servicios generales del CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	2
1.4. Antecedentes	4
1.5. Objetivos	9
1.6. Hipótesis	10
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	11
2.1. Definición, componentes e hidratación del cemento portland.....	11
2.2. Adiciones Minerales.....	14
2.2.1. Clasificación.....	14
2.2.1.1. Cementantes.....	14
2.2.1.2. Puzolanas.....	14
2.2.1.3. Cementantes-Puzolánicas.....	15
2.2.1.4. Nominalmente Inertes.....	16
2.2.2. Reacción puzolánica.....	16
2.2.2.1. Productos de la reacción.....	17
2.2.2.2. Índice de Actividad Puzolánica.....	18
2.2.3. Ceniza Volante.....	18
2.2.4. Humo de Sílice.....	19
2.2.5. Otras puzolanas de desechos agrícolas.....	20
2.2.6. Beneficios y precauciones en el uso de puzolanas.....	21
2.3. Generalidades sobre el mortero de cemento portland.....	22
2.3.1. Trabajabilidad.....	22
2.3.2. Segregación.....	23
2.3.3. Sangrado.....	23
2.3.4. Curado.....	24
2.3.5. Resistencia.....	24
2.3.5.1. Estimación de la resistencia (VPU)	25
2.4. Componentes y propiedades del Ferrocemento.....	26
2.4.2. Componentes.....	26
2.4.2.1. Mortero.....	26
2.4.2.1.1. Cemento.....	26
2.4.2.1.2. Agregados.....	26
2.4.2.1.3. Agua para mezclado.....	27
2.4.2.1.4. Aditivos.....	27
2.4.2.2. Refuerzo de acero.....	27

2.4.2.2.1. Mallas de alambre.....	28
2.4.2.2.2. Alambrones y barras.....	29
2.4.3. Propiedades.....	29
2.5. Durabilidad de estructuras de concreto y mortero reforzado.....	30
2.5.1. Influencia del sistema de poros.....	31
2.5.2. Mecanismos de transporte de fluidos.....	31
2.5.3. Difusión.....	31
2.5.4. Mecanismos de deterioro.....	32
2.5.4.1. Carbonatación.....	32
2.5.4.2. Ataque de sulfatos.....	33
2.5.4.3. Eflorescencia.....	33
2.5.4.4. Daño por agua de mar.....	34
2.5.4.5. Destrucción por reacción álcali-sílice.....	34
2.5.4.6. Corrosión de acero de refuerzo.....	34
2.6. El fenómeno de la corrosión.....	35
2.6.1. Mecanismo.....	35
2.6.2. Tipos de corrosión.....	36
2.6.2.1. Por picaduras.....	37
2.6.2.2. Uniforme.....	37
2.6.2.3. Galvánica.....	37
2.7. La corrosión en concreto y ferrocemento.....	37
2.7.1. Corrosión causada por iones cloruro.....	38
2.7.2. Niveles de cloruro iniciadores de la corrosión.....	39
2.7.3. Métodos de prueba para estimar la difusión de cloruros.....	40
2.7.3.1. En estado estacionario.....	40
2.7.3.2. En estado no estacionario (NT Build 443).....	41
2.8. Métodos de evaluación de la corrosión.....	42
2.8.1. Inspección Visual.....	42
2.8.2. Media celda (potenciales de corrosión).....	42
2.8.3. Resistencia a la polarización lineal.....	43
2.9. Marco teórico.....	45
2.9.1. Resistencia a la compresión.....	45
2.9.2. Índice de actividad resistente.....	45
2.9.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	46
2.9.4. Mecanismos de transporte (difusión de cloruros).....	46
2.9.5. Potenciales de corrosión.....	47
2.9.6. Densidad de corrosión.....	48
2.9.6.1. Método de resistencia a la polarización lineal.....	49
2.9.6.2. Velocidad de corrosión.....	50

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	51
3.1. Diseño del experimento	54
3.1.1. Fase 1.- Obtención, tratamiento y selección de ceniza que se utilizó en la fase 2.....	54
3.1.1.1. Obtención de cenizas de concha de coco, hoja de pino y bagazo de caña y evaluación de su potencial puzolánico	54
3.1.1.2. Evaluación del potencial puzolánico de ceniza de bagazo de caña con diferentes tratamientos	54
3.1.2. Fase 2.- Evaluación del efecto de la CBC y el tiempo de curado en las propiedades del mortero y corrosión del ferrocemento	55
3.2. Materiales.....	59
3.2.1. Materiales de la fase 1 del experimento	59
3.2.2. Materiales de la fase 2 del experimento	60
3.3. Métodos	62
3.3.1. Métodos utilizados en la fase 1.....	62
3.3.1.1. Obtención de ceniza de concha de coco (CCC) y hoja de pino (CHP).....	62
3.3.1.2. Obtención de ceniza de bagazo de caña (CBC)	63
3.3.1.3. Cribado de la CBC.....	64
3.3.1.4. Molido de la CBB	65
3.3.1.5. Prueba de análisis químico	66
3.3.1.6. Pruebas de densidad	66
3.3.1.7. Pruebas de IAR de la CCC, CHP, CBC y CV	66
3.3.2. Métodos utilizados en la fase 2	68
3.3.2.1. Preparación de especímenes y exposición al ambiente simulado para el estudio de la corrosión	68
3.3.2.2.1. Preparación de especímenes para la prueba de corrosión.....	68
3.3.2.2.2. Acondicionamiento del ambiente simulado para acelerar la corrosión	69
3.3.2.2. Diseño de mezclas.....	70
3.3.2.3. Pruebas en estado fresco a las mezclas de mortero.....	71
3.3.2.4. Prueba de resistencia a la compresión	71
3.3.2.5. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico	72
3.3.2.6. Prueba de difusión de cloruros	73
3.3.2.7. Inspección visual.....	74
3.3.2.8. Prueba de potenciales de corrosión	74
3.3.2.9. Prueba de resistencia a la polarización lineal (RPL).....	75

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	78
4.1. Resultados de la fase 1	78
4.1.1. Resultados de composición química	78
4.1.2. Resultados de IAR	80
4.2. Resultados de la fase 2	83
4.2.1. Propiedades del mortero en estado fresco	83
4.2.2. Resultados del mortero en estado endurecido	85
4.2.2.1. Resistencia a la compresión	85
4.2.2.2. Comparación de VPUs	95
4.2.2.3. Perfiles y coeficientes de penetración de cloruros.....	100
4.2.3. Resultados de corrosión en ferrocemento	107
4.2.3.1. Inspección visual	107
4.2.3.2. Potenciales de corrosión	109
4.2.3.3. Velocidad de corrosión	112
4.2.4. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU	116
4.2.5. Análisis estadístico de resultados	119
4.2.5.1. Resistencia a la compresión	119
4.2.5.2. Velocidad de pulso ultrasónico	120
4.2.5.3. Coeficientes de difusión de cloruros	122
CONCLUSIONES	123
RECOMENDACIONES	124
REFERENCIAS	125
ANEXOS	132
I. Dosificación de mezclas de mortero	132
II. Análisis estadístico completo de los resultados	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades fisicoquímicas e IAR de CCCs.....	6
Tabla 1.2. Dependencia del IAR con las propiedades físicas de la CCC.....	7
Tabla 1.3. Propiedades fisicoquímicas e IAR de CBC.....	8
Tabla 2.1. Principales compuestos del cemento portland.....	11
Tabla 2.2. Principales productos de la hidratación del cemento portland.....	13
Tabla 2.3. Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado.....	40
Tabla 2.4. Interpretación de potenciales de corrosión (unidades en milivolts).....	43
Tabla 2.5. Nivel de corrosión con base a medidas de densidad de corrosión.....	44
Tabla 3.1. Diseño experimental de la fase 2.....	57
Tabla 3.2. Características y número total de especímenes elaborados para la fase 2.....	58
Tabla 3.3. Propiedades físicas de las arenas.....	60
Tabla 3.4. Principales óxidos del cemento CPO 40.....	60
Tabla 3.5. Nomenclatura de las CBCs según el tratamiento aplicado.....	65
Tabla 3.6. Diseño de mezclas preliminar para obtener el IAR de CCC y CHP (relación agua/cementantes constante).....	67
Tabla 3.7. Diseño de mezclas para IAR de de CCC, CHP, CBCs y CV (relación arena/cemento constante).....	67
Tabla 3.8. Proporcionamiento de materiales de mezclas de mortero (por m ³).....	70
Tabla 4.1. Resultados de composición química y densidad de CCC, CHP, CBC y CV.....	78
Tabla 4.2. Propiedades en estado fresco de mezclas de mortero.....	84
Tabla 4.3. Comparativo de IARs de CBC con otras investigaciones.....	88
Tabla 4.4. Características físico-químicas de CBCs de relevancia para el IAR.....	91
Tabla 4.5. IARs de las mezclas con CBC.....	95
Tabla 4.6. Resultados del ANOVA de resistencia a la compresión.....	120
Tabla 4.7. Resultados del ANOVA de VPU.....	121
Tabla 4.8. Resultados del ANOVA de Coeficientes de difusión de cloruros.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1.- Periodos de evolución de calor de hidratación en el cemento portland.....	13
Fig.2.2. Micrografía de ceniza volante.....	19
Fig. 2.3. Fases y componentes presentes en el mortero.....	22
Fig. 2.4. Mallas típicas y refuerzos usados en ferrocemento.....	29
Fig. 2.5. Sección típica de ferrocemento.....	30
Fig. 2.6. Reacciones de corrosión en acero.....	36
Fig. 2.7. Corrosión en refuerzo de concreto y ferrocemento.....	38
Fig. 2.8. Rectas de Tafel.....	48
Fig. 2.9. Curvas de Tafel.....	48
Fig. 3.1. Diagrama de flujo del experimento.....	53
Fig. 3.2. Diseño del experimento (factorial 3 ²).....	58
Fig. 3.3. Horno y ventilador utilizados.....	62
Fig. 3.4. Combustión inicial de hoja de pino.....	62
Fig. 3.5. Filtro para sedimentar cenizas.....	63
Fig. 3.6. Ceniza de fondo de hoja de pino.....	63
Fig. 3.7. Ingenio azucarero Constancia en Tezonapa, Ver.....	64
Fig. 3.8. Sitio de recolección de la CBC en Tezonapa, Ver.....	64
Fig. 3.9. Molienda de la CBC.....	65
Fig. 3.10. Cubos después de ser desmoldados y marcados.....	68
Fig. 3.11. Ensayo a compresión para determinar IARs.....	68
Fig. 3.12. a) Pintura epóxica en conexión de malla galvanizada, b) Refuerzo de malla galvanizada.....	69
Fig. 3.13. Acondicionamiento de ambiente agresivo simulado.....	70
Fig. 3.14. Pruebas en estado fresco: a) temperatura, b) fluidez, c) peso volumétrico y d) contenido de aire.....	71
Fig. 3.15. Ensayo de resistencia a la compresión.....	72
Fig. 3.16. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico.....	72
Fig. 3.17. Especímenes para la prueba de difusión de cloruros.....	74
Fig. 3.18. Placas de ferrocemento antes de someterse al ambiente agresivo simulado.....	74
Fig. 3.19. Prueba de potenciales de corrosión.....	75
Fig. 3.20. Prueba de RPL en placas de ferrocemento.....	76
Fig. 4.1. IARs a 7, 14 y 28 días de edad de las CBCs.....	80
Fig. 4.2. IARs a 7, 14 y 28 días de edad de la CCC, CHP, CBC200 y CV.....	82
Fig. 4.3. Resistencia a la compresión a 3 días de edad.....	87
Fig. 4.4. Resistencia a la compresión a 7 días de edad.....	87
Fig. 4.5. Resistencia a la compresión a 14 días de edad.....	87
Fig. 4.6. Resistencia a la compresión a 28 días de edad.....	87

Fig. 4.7. Resistencia a la compresión a 90 días de edad.....	88
Fig. 4.8. Resistencia a la compresión de especímenes 0%CBC	94
Fig. 4.9. Resistencia a la compresión de especímenes 10%CBC.....	94
Fig. 4.10. Resistencia a la compresión de especímenes 20%CBC.....	94
Fig. 4.11. VPU a 3 días de edad.....	97
Fig. 4.12. VPU a 7 días de edad.....	97
Fig. 4.13. VPU a 14 días de edad.....	97
Fig. 4.14. VPU a 28 días de edad.....	97
Fig. 4.15. VPU a 90 días de edad.....	98
Fig. 4.16. VPU en especímenes 0%CBC (mezcla control).....	99
Fig. 4.17. VPU en especímenes 10%CBC.....	99
Fig. 4.18. VPU en especímenes 20%CBC.....	100
Fig. 4.19. Perfiles de penetración de cloruros de especímenes de mortero (% de Cl ⁻ totales respecto al peso del mortero).....	101
Fig. 4.20. Perfiles de penetración de cloruros promedio de especímenes de mortero de mezclas 0%CBC, 10%CBC y 20%CBC con a) 0, b) 7 y c) 28 días de curado ...	104
Fig. 4.21. Coeficientes de difusión de cloruros a 63 días de edad	106
Fig. 4.22. Placas de ferrocemento representativas de mezclas 0%CBC, 10%CBC, 20%CBC con 0, 7 y 28 días de curado después de ser expuestas al ambiente agresivo simulado	108
Fig.4.23. Potencial de corrosión en especímenes 0%CBC	111
Fig.4.24. Potencial de corrosión en especímenes 10%CBC	112
Fig.4.25. Potencial de corrosión en especímenes 20%CBC	112
Fig.4.26. Densidad de corrosión en especímenes 0%CBC	113
Fig.4.27. Densidad de corrosión en especímenes 10%CBC	114
Fig.4.28. Densidad de corrosión en especímenes 20%CBC	114
Fig.4.29. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU de especímenes con edades de 3 a 28 días y tiempos de curado de 0, 7 y 28 días.....	117
Fig.4.30. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU de especímenes con edades de 3 a 28 días, curado variable y secos al momento del ensayo.....	118
Fig.4.31. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU de especímenes con edades de 3 a 28 días, curado variable y saturados al momento del ensayo...	118

NOMENCLATURA

0%CBC	Mezcla control sin ceniza de bagazo de caña
0c	Ausencia de curado por inmersión
½”	Un medio de pulgada
10%CBC	Mezcla de mortero con 10% de ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 200
20%CBC	Mezcla de mortero con 20% de ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 200
28c	Curado por inmersión durante 28 días
7c	Curado por inmersión durante 7 días
ANOVA	Análisis de Varianzas
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio
Ca(Zn(OH) ₃) ₂	Hidrozincato de calcio
CBC	Ceniza de bagazo de caña
CBC100	Ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 100
CBC100m	Ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 100 y molida
CBC200	Ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 200
CBC200m	Ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 200 y molida
CBC8	Ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 8
CBC8m	Ceniza de bagazo de caña cribada por el tamiz no. 8 y molida
CCC	Ceniza de fondo de concha de coco
Cl ⁻	Ion cloruro
CPC 30	Cemento Portland Compuesto clase resistente 30 Megapascales
CPO 40	Cemento Portland Ordinario clase resistente 40 Megapascales
CV	Ceniza volante
CV(20%)	Mezcla de mortero con 20% de ceniza volante
CHP	Ceniza de fondo de hoja de pino
D, De	Coefficiente de difusión de cloruros
F’c	Resistencia a la compresión a 28 días

HOBO	Instrumentos electrónicos con memoria interna que miden y registran temperatura y humedad relativa
LOI	Pérdidas por ignición o pérdidas por calcinación
MEB	Microscopio Electrónico de Barrido
MPa	Megapascales (10.197 kilogramos/centímetro cuadrado)
mV	Milivolts
Na ⁺	Ion sodio
NaCl	Cloruro de sodio
OH ⁻	Ion hidróxido
p	Significancia estadística
PUNDIT	Equipo Portátil de Ensaye Ultrasónico No Destructivo de Indicación Digital
PxC	Pérdidas por calcinación
R ²	Coefficiente de determinación
rev/min	Revoluciones sobre minuto
RPL	Resistencia a la polarización lineal
S-H-C	Silicato Hidratado de Calcio
TMP	Tamaño máximo de partícula
VPU	Velocidad de pulso ultrasónico
μA/cm ²	Microamperes sobre centímetro cuadrado

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Existe en el mundo una generalizada demanda social por cubrir los requerimientos de servicios básicos, para lo cual se busca construir infraestructura con materiales económicos que puedan cumplir con los requerimientos de seguridad y durabilidad. Debido a los grandes impactos ambientales que genera la industria del concreto (García, 2002) y que su costo no está al alcance de muchas personas y más aún en las zonas rurales de países subdesarrollados como México, se hace más apremiante la necesidad de contar con un material que reduzca la demanda de recursos naturales, la contaminación y consumo de energía en su fabricación y el costo final del producto, pero que además siga manteniendo buenas características de resistencia y durabilidad. El ferrocemento ha sido un buen prospecto para este propósito.

El ferrocemento se concibió por primera vez en 1848 por Joseph Louis Lambot, horticulturista francés quien construyó una balsa con este material (Morgan y Morgan 1998). El ferrocemento es un compuesto delgado hecho con una matriz de cemento y arena reforzado con mallas de acero poco espaciadas, aunque actualmente las mallas pueden ser de otros materiales (Robles-Austriaco, 2001). Es a partir de 1960 que empezaron a experimentar y utilizar el ferrocemento en países como Canadá, Estados Unidos, Italia, Australia, Rusia, Reino Unido, China, India, Cuba, Malasia, Tailandia, México entre otros (Caballero, 2001). Puesto que las técnicas de construcción pueden ser aprendidas con bastante rapidez y no se requiere del uso de maquinaria, el ferrocemento es especialmente adecuado para aplicaciones rurales en países en desarrollo. Consecuentemente se ha hecho considerable investigación en viviendas de bajo costo y aplicaciones rurales haciendo uso de los materiales y mano de obra disponibles (Paramasivam 2001). Otras aplicaciones son: cubiertas, auditorios, barcos, silos, viviendas, edificios públicos, puentes, monumentos, piscinas, canales de riego, compuertas, tanques y cortinas de micropresas para captar agua de lluvia (Caballero, 2001).

Actualmente se reconocen y aprecian las propiedades del ferrocemento como resistencia, impermeabilidad al agua, ligereza, resistencia al fuego, estabilidad en el medio ambiente y ventajas de moldeabilidad y bajo costo, las cuales no han podido ser igualadas por ningún otro material delgado de la construcción (Naaman, 2006). Desafortunadamente, existe evidencia de que *estructuras de ferrocemento muestran un deterioro en tiempos menores a los esperados causado por corrosión del acero de refuerzo* (Jiménez, 2007). Este problema puede agravarse en estructuras de ferrocemento que están cercanas a las zonas costeras debido a la corrosión acelerada que propician los iones cloruro (Paul y Pama, 1991, Wainshtok, 1998, Olvera, 2002).

1.2. Planteamiento del problema

Es esencial que toda estructura continúe ejecutando sus funciones destinadas, manteniendo su resistencia y utilidad requeridas, durante el tiempo de servicio especificado o esperado. Para ello, los materiales deberán ser capaces de soportar el proceso de deterioro, causado por el ambiente al que estarán expuestos (Neville, 1995). Puesto que no es posible modificar el ambiente al que estarán expuestas las estructuras, lo pertinente es mejorar el comportamiento del ferrocemento haciendo una adecuada selección de materiales que permita reducir las acciones internas del deterioro e incrementar la resistencia a los agentes agresivos externos (Montes, 2004).

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los principales fenómenos que afectan la durabilidad de las estructuras. La corrosión puede ser causada por cloruros o por la carbonatación del concreto. Actualmente los iones cloruro (Cl⁻) son reconocidos como uno de los principales causantes de una corrosión prematura del refuerzo. La corrosión en las estructuras de concreto y ferrocemento causará una pérdida de servicialidad o una temprana falla estructural (Vickridge y Ranjbar, 1998).

Normalmente la pasta de cemento provee un ambiente altamente alcalino que protege al acero embebido, de la corrosión. Adicionalmente, el acero de refuerzo es protegido por la barrera física que es el recubrimiento de concreto. Sin embargo, en el ferrocemento esta

barrera física es menos eficaz por el reducido recubrimiento, lo cual permite un ingreso más fácil de los iones corrosivos al acero de refuerzo (Vickridge y Ranjbar, 1998). Incrementar el espesor del recubrimiento en el ferrocemento no es una solución viable, ya que perdería su cualidad de ligereza y propiedades mecánicas, así como el ahorro en el consumo de materiales, por lo tanto, el problema abordado se limitará a *reducir la permeabilidad del mortero*.

1.3. Justificación

Se justifica realizar estudios que evalúen de manera cuantitativa el efecto del uso de una puzolana calcinada de desperdicio agrícola en la corrosión del ferrocemento, porque de esta manera se aportarían conocimientos que contribuyan a mejorar la durabilidad de este material. Al mejorar la durabilidad del ferrocemento haciendo uso de una puzolana de desperdicio se pretende apoyar en los siguientes aspectos:

1. Fomentar la disminución del uso del concreto, porque su producción ocasiona gran daño al medio ambiente. Prueba de ello, la industria del concreto utiliza 8 billones de toneladas de agregados cada año (Metha, 1999), convirtiéndose en la industria que consume la mayor cantidad de recursos naturales.
2. Disminuir la producción de cemento por tener que construir en periodos de tiempo mayores y por ser reemplazado parcialmente por puzolanas. En el 2002 fue de 1500 millones de toneladas (García, 2002), con la consecuente emisión a la atmósfera de una cantidad similar de dióxido de carbono (CO₂), que representa el 7% del total liberado por todas las industrias.
3. Facilitar la construcción de infraestructura en países y zonas donde los recursos económicos son escasos, lo cual es fundamental para el desarrollo de la economía y mejora la calidad de vida de las personas. Se calcula que al menos 1,500 millones de personas sobreviven con un ingreso de US \$2 diarios o menos (Banco Mundial, 2004).
4. Incrementar la seguridad de las construcciones para evitar pérdidas humanas y económicas.

5. Disminuir la contaminación ocasionada por desechos agrícolas.

1.4. Antecedentes

La permeabilidad en el mortero depende de dos factores principales: *la interconectividad de los poros en la pasta de cemento y el agrietamiento del mismo*. En la pasta de cemento, la porosidad e interconectividad son controlados en mayor parte por la relación agua/cemento, el grado de hidratación y el grado de compactación. La densidad y localización de la grietas está determinada por el nivel de esfuerzos o deformaciones que experimenta el mortero, aplicados externa e internamente (Bhargava y Banthia, 2008). El agrietamiento se presenta cuando se rebasa la capacidad última del mortero para absorber las deformaciones impuestas (Tie-Jun, 2006). Las tensiones y deformaciones internas ocurren en el mortero como resultado del proceso de hidratación, contracciones, gradientes térmicos, cambios bruscos en la temperatura ambiental y factores que causan inestabilidad volumétrica. Las tensiones y deformaciones externas son el resultado de las cargas de servicio y permanentes (peso propio) impuestas a la estructura (Bhargava y Banthia, 2008).

En la actualidad se ha elaborado ferrocemento con características de resistencia y durabilidad que satisfarían fácilmente las demandas de la mayoría de las estructuras comunes, reduciendo al mínimo los problemas antes mencionados que afectan su desempeño, pero son soluciones que no pueden implementarse salvo situaciones especiales, por requerir de tecnologías adicionales y por su elevado costo.

Se ha mejorado notablemente la matriz con el uso de aditivos químicos (súperplastificantes, reductores de agua, retardantes e impermeabilizantes, entre otros) y minerales (humo de sílice, escoria de alto horno, ceniza volante y arcilla) que modifican benéficamente la trabajabilidad, fluidez, tiempo de fraguado, resistencia y durabilidad (Nedwell, 1998, Vickridge, 1998, Robles, 2001, Naaman, 2006). Sin embargo, la mayoría de las tecnologías mostradas encarecen el producto final y requieren de personal técnico para su aplicación.

La elección de la técnica de construcción más apropiada depende de la naturaleza de la aplicación particular, el tipo de mezcla y colocación del mortero y de la habilidad de la mano de obra disponible (Paramasivam, 1998). *En esta investigación se busca aportar mejoras a la durabilidad del ferrocemento utilizando materiales de desperdicio, los cuales puedan ser integrados mediante métodos constructivos, también económicos y accesibles a zonas urbanas, suburbanas y rurales.*

Abordando el problema de la *permeabilidad de la matriz de cemento endurecido* debido a la cantidad de poros y su interconectividad, ha resultado muy eficiente el uso de reductores de agua y súperplastificantes para reducir la relación agua/cemento de las mezclas y generar matrices con baja permeabilidad (Neville, 1995, Kosmatka, 2004). Pero como ya se mencionó, estos aditivos químicos no son económicos.

Se sabe que el uso de aditivos minerales como las puzolanas mejoran las características de durabilidad, densificando la matriz de cemento, también mejoran las propiedades en estado fresco. Las puzolanas reaccionan con el hidróxido de calcio del cemento para formar silicatos hidratados de calcio, la formación tardía de este compuesto va rellenando parte de los poros disponibles. Además, el consumo del hidróxido de calcio presente en el cemento hidratado, evita el desarrollo la reacción álcali-agregado y álcali-carbonato, las cuales son altamente perjudiciales para el concreto reforzado (Neville, 1995, Vickridge, 1998, Kosmatka, 2004, Sata, 2006, Robles, 2006, Rukzon, 2006). *Un concreto con adiciones puzolánicas debe tener un curado adecuado, ya que se han observado efectos aún más desfavorables que en concreto sin adiciones, cuando este no se lleva a cabo correctamente.* Entre las puzolanas más usadas se encuentran el humo de sílice, ceniza volante, escoria granulada de alto horno, arcilla, metakaolín y en menor medida, cenizas de desechos agrícolas como cáscara de arroz, bagazo de caña (Martirena, 2006, Ganesan, 2007, Cordeiro, 2008) y concha de coco (Chindapasirt, 2007).

Al igual que los aditivos químicos, los aditivos minerales comerciales presentan el problema de incremento de costos. Las puzolanas de origen agrícola pueden ser mucho

más económicas, si se cuenta con una fuente de desechos en la zona y actividades que requieran estos desechos para ser usados como combustible.

En México la concha de coco es utilizada ampliamente como combustible por su bajo costo en hornos ladrilleros, alfareros y en fábricas para la extracción de aceite de coco, éstos a su vez producen ceniza de concha de coco (CCC) que posteriormente es desechada. Desde hace casi dos décadas se reportan investigaciones realizadas en países asiáticos tropicales en donde se sugiere que la CCC podría ser una puzolana. Estas investigaciones fueron iniciadas por Tay en 1990. En el cuadro 1.1 se muestra un resumen de las propiedades fisicoquímicas e Índice de Actividad Resistente (IAR) de ceniza de concha de coco molida, tomadas de algunas investigaciones.

Tabla 1.1. Propiedades fisicoquímicas e IAR de CCCs.

Propiedades	Awal 1997	Sata 2006	Jaturapitakkul 2007	Chindaprasirt 2007	Rukzon 2008
Cenizas de:	A	B	B	A,B	B
Temperatura de quemado (°C)	600	-----	800-1000	-----	800-1000
Densidad (g/cm ³)	2.22	2.33	2.43	2.43	2.25
Ret. en malla No. 325	-----	1.5	1.0	1.0	1-3
Partícula d ₅₀ (µm)	-----	10.1	7.4	8.0	7.0
Fineza (cm ² /g)	5,190	12,435	-----	-----	11,800
<u>Composición química</u>					
SiO ₂	43.6	65.30	57.7	57.8	63.6
Al ₂ O ₃	11.4	2.56	4.5	4.6	1.6
Fe ₂ O ₃	4.7	1.98	3.3	3.3	1.4
CaO	8.4	6.03	6.5	6.6	7.6
K ₂ O	3.5	5.72	8.2	8.3	6.9
MgO	4.8	3.08	4.2	4.2	3.9
Na ₂ O	0.39	0.36	0.5	0.5	0.1
SO ₃	2.8	0.47	0.2	0.3	0.2
LOI	18.00	10.05	10.50	10.10	9.60
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	59.7	69.84	65.5	65.7	66.6
IAR a 28 días, 20% de sustitución	115 % (mortero)	105% (mortero con fibras)	99% (concreto)	92% (concreto)	102% (mortero)

A: Quema de frutos de coco vacíos en fábricas productoras de aceite de palma.

B: Quema de frutos de coco vacíos en plantas generadoras de energía eléctrica.

Los antecedentes revisados indican que cuando la CCC presenta altas cantidades de óxidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃), tendrá un Índice de Actividad Resistente (IAR) alto, sin embargo, la fineza de la ceniza también es un factor determinante. En el cuadro 1.2 se muestra un

ejemplo de la dependencia del IAR a 28 días de la CCC con la fineza de la misma utilizada por Jaturapitakkul (Jaturapitakkul, 2007).

Tabla 1.2. Dependencia del IAR con las propiedades físicas de la CCC.

Propiedades	Sin moler	Molido medio	Molido alto
Densidad (g/cm ³)	1.89	2.36	2.43
Partícula d ₅₀ (µm)	183.0	15.9	7.4
Retenido en malla No. 325	94.4	19.5	1.0
IAR a 28 días, 20% de sustitución en concreto	66%	84%	99%

Como se mencionó antes, las puzolanas pueden reducir la permeabilidad de la matriz, en este sentido Chindaprasirt reportó que una sustitución de cemento en el concreto por un 20% de CCC molida, no afectó la resistencia a la compresión a los 28 días y se redujo la permeabilidad (Chindaprasirt, 2007).

Otro desecho utilizado en cantidades mayores como combustible, es el bagazo de caña. La industria azucarera utiliza grandes cantidades de bagazo de caña como combustible para proveer de energía eléctrica y calorífica a sus fábricas, como resultado de esta operación se obtienen también cantidades importantes de ceniza de bagazo de caña (CBC). México es uno de los países líderes en el cultivo de caña de azúcar, ocupando el 5^{to} lugar a nivel mundial. En el periodo 2008-2009 se produjeron 42 millones de toneladas de caña de azúcar, de los cuales se obtuvieron 12 millones de toneladas de bagazo de caña (UNC, 2009).

Diversas investigaciones reportan las propiedades puzolánicas de la ceniza de bagazo de caña (CBC) y los beneficios que esta aporta a concretos y morteros elaborados con cemento Portland. En general, las propiedades puzolánicas de la CBC dependen de la temperatura y tiempo de quemado, y tratamientos posteriores como el molido y cribado (Villar-Cociña, 2003, Frías, 2005, Martirena, 2006 Cordeiro, 2008). En la Tabla 1.3 se muestra un resumen de las propiedades fisicoquímicas e IAR de CBC molida reportadas en algunas investigaciones.

Tabla 1.3. Propiedades fisicoquímicas e IAR de CBC.

Propiedades	Ganesan 2007	Águila 2008	Cordeiro 2009	
Cenizas de:	A	B	A	
Temperatura de quemado (°C)	650	-----	700-900	
Densidad (g/cm ³)	1.85	1.45	2.53	
Retenido en malla No. 325	1.0	22.76	0.0	
Partícula d ₅₀ (µm)	5.4	-----	2.6	
Fineza (cm ² /g)	9,430	2,693	8,930	
<u>Composición química (%)</u>				
SiO ₂	64.15	36.52	78.34	
Al ₂ O ₃	9.05	-----	8.55	
Fe ₂ O ₃	5.52	1.53	3.61	
CaO	8.14	2.69	2.15	
K ₂ O	1.35	22.04	3.46	
MgO	2.85	4.16	1.65	
Na ₂ O	0.92	0.27	0.12	
SO ₃	-----	3.35	-----	
LOI	4.90	26.40	0.42	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	78.72	38.05	90.50	
Evaluado en:	Mortero	Concreto	Mortero	Concreto
IAR a 7 días, 20% de sustitución	99.6 %	118.4%	41.2%	-----
IAR a 28 días, 20% de sustitución	98.4 %	111.1%	39.5%	95.0%

A: Combustión de bagazo de caña en ingenios azucareros.

B: Combustión de bagazo de caña sin control.

Los antecedentes indican que al igual que la CCC, cuando la CBC presenta altas cantidades de óxidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) y una alta fineza, el IAR es también alto. En lo referente a la durabilidad, se reportó que un remplazo del 20% de CBC, incrementó la resistencia a compresión y disminuyó la absorción y difusión de especímenes de concreto a 28 y 90 días de edad (Ganesan, 2007).

La CBC muestra un alto potencial puzolánico a pesar de que su obtención se lleve a cabo de manera artesanal (Martirena, 2006). En resumen, la CBC es una de las mejores puzolanas derivadas de productos agrícolas, la cual solo es superada por la ceniza de cáscara de arroz.

La concha de coco y el bagazo de caña son utilizados ampliamente como combustible en muchos países en desarrollo, entre ellos México, y la ceniza de desecho de éstos, contribuye a mejorar la durabilidad del concreto y ferrocemento. Sobre la ceniza de hoja de pino no se han encontrado referencias, sin embargo, en la búsqueda de nuevas puzolanas, ésta fue también evaluada.

Con base en la revisión de antecedentes se concluye que es necesario realizar más investigación sobre el efecto de la adición de puzolanas de desechos agrícolas y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento.

1.5. Objetivos

General

Evaluar la influencia de la adición de una puzolana de desperdicio agrícola (CBC) y el tiempo de curado en las propiedades de morteros y la corrosión del ferrocemento.

Particulares

1. Obtener ceniza de concha de coco, hoja de pino y bagazo de caña, estimar su potencial puzolánico y elegir con cual se trabajará.
2. Determinar la influencia de la ceniza de bagazo de caña y el tiempo de curado en la resistencia a compresión y velocidad de pulso ultrasónico en morteros.
3. Determinar el efecto de la ceniza de bagazo de caña y el tiempo de curado en los coeficientes de penetración a los cloruros en morteros.
4. Evaluar la influencia de la ceniza de bagazo de caña y el tiempo de curado en la corrosión de especímenes de ferrocemento.

1.6. Hipótesis

1. El uso de 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña como material suplementario al cemento, no disminuye la resistencia a compresión en morteros cuando son curados en un intervalo de 7 a 28 días.
2. Una sustitución de cemento por 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña, no incrementa los coeficientes de penetración de cloruros en morteros cuando son curados en un intervalo de 7 a 28 días.
3. El uso de 10 y 20% de ceniza de bagazo de caña como material suplementario al cemento, no incrementa la velocidad de corrosión en el ferrocemento cuando es curado en un intervalo de 7 a 28 días.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Definición, componentes e hidratación del cemento portland

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua pero además son resistentes a ella. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca. Cuando la pasta se añade a los agregados actúa como adhesivo y une a todas las partículas de agregado para formar así el mortero o concreto (Kosmatka et al., 2004).

El cemento portland está formado básicamente por clinker y de un material empleado como regulador de fraguado que generalmente es yeso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). El clinker se produce con la molienda conjunta de una mezcla de caliza y arcilla y su posterior cocción a una temperatura aproximada de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ (Taylor, 2001). Durante la calcinación en la fabricación del clinker de cemento portland, el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90 % del peso del cemento. También se encuentran presentes yeso y otros materiales (Neville, 1995). En la Tabla 2.1 se muestran compuestos del cemento portland.

Tabla 2.1. Principales compuestos del cemento portland

Nombre del compuesto	Mineral	Formula química	Abreviatura	% en masa
Silicato tricálcico	Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	42-66
Silicato dicálcico	Belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	9-30
Aluminato tricálcico	Celita	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6-14
Ferroaluminato tetracálcico	Ferrita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	1-12
Sulfato de calcio hidratado (Yeso)	Anhidrita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cs	≈ 5

A continuación se presentan las propiedades de los cinco compuestos principales del cemento portland (Kosmatka et al., 2004):

Silicato tricálcico: Se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana.

Silicato dicálcico: Se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran medida al incremento de la resistencia a edades mayores de una semana.

Aluminato tricálcico: Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. Contribuye un poco al desarrollo de la resistencia temprana.

Ferroaluminato tetracálcico: Reduce la temperatura de formación del clinker. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de efectos de color se deben a éste compuesto y a sus hidratos.

Sulfato de calcio hidratado (yeso): Se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del C_3A .

En presencia del agua, estos cinco compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta de cemento endurecido en el concreto. Los silicatos de calcio, C_3S y C_2S , se hidratan para formar los compuestos de **hidróxido de calcio** y **silicato de calcio hidratado** (gel de tobermorita). La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al gel de tobermorita. El C_3A reacciona con el agua y con el hidróxido de calcio para formar el **aluminato tetracálcico hidratado**. El C_4AF reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar **ferroaluminato de calcio hidratado**. El C_3A , el yeso y el agua se pueden combinar para formar el **trisulfoaluminato de calcio hidratado**. En la Tabla 2.2 se presentan los principales productos de hidratación del cemento portland (Neville, 1995, Kosmatka et al., 2004).

Es importante destacar que la hidratación del cemento no procede a una tasa fija. Tal como puede observarse en la Figura 2.1, se distinguen 5 etapas en este proceso:

1) Preinducción: Es una hidratación inicial rápida que ocurre cuando las partículas de cemento son expuestas al agua, liberando una gran cantidad de calor.

- 2) **Inducción (durmiente):** Hay una reducida hidratación y no se sabe bien la razón.
- 3) **Aceleración:** Se incrementa la tasa de hidratación. Comienza el fraguado.
- 4) **Desaceleración:** Disminuye la tasa de hidratación a medida que el material hidratado cubre las partículas.
- 5) **Difusión limitada:** La hidratación y conglomeración ocurren lentamente, ya que las reacciones están limitadas a las tasas de difusión de las especies dentro de la densa red de poros.

Tabla 2.2. Principales productos de la hidratación del cemento portland

Compuestos que lo forman	Nombre del compuesto formado	Mineral	Formula química	% en masa
C ₃ S+Agua, C ₂ S+Agua	Silicato de calcio hidratado (S-C-H)	Gel Tobermorita	3CaO.2SiO ₂ .8H ₂ O	50-60
C ₃ S+Agua, C ₂ S+Agua	Hidróxido de calcio (CH)	Portlandita	Ca(OH) ₂	15-25
C ₃ A+Yeso +Agua	Trisulfoaluminato de calcio hidratado	Etringita	6CaO.Al ₂ O ₃ .3SO ₃ .32H ₂ O	--
C ₃ A+Etringita +Agua	Monosulfoaluminato de calcio hidratado		3(4CaO.Al ₂ O ₃ .SO ₃ .12H ₂ O)	--
C ₃ A+portlandita +Agua	Aluminato tetracalcico hidratado		4CaO.Al ₂ O ₃ .13H ₂ O	--
C ₄ AF+Agua +portlandita	Ferroaluminato de calcio hidratado		6CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃ .12H ₂ O	--

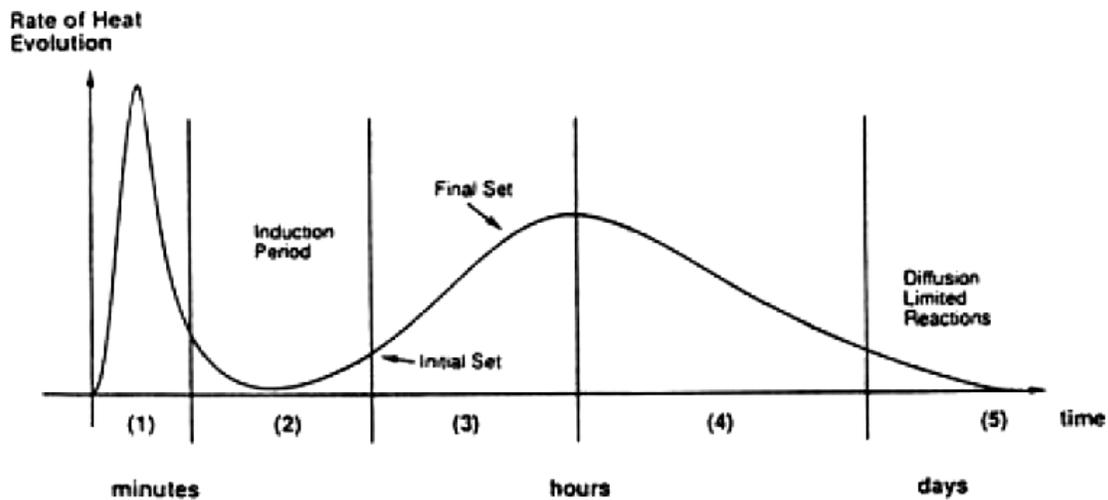


Fig. 2.1.- Periodos de evolución de calor de hidratación en el cemento portland.

2.2. Adiciones Minerales

Estos son materiales pulverizados que se agregan al concreto antes del mezclado o durante éste para mejorar o transformar algunas de las propiedades del concreto de cemento portland en estado plástico o endurecido. Estos aditivos son generalmente materiales naturales o subproductos.

Los *materiales naturales* son aquellos que han sido procesados con el único propósito de producir un aditivo mineral. El procesamiento generalmente involucra el triturado, molido y cribado; en algunos casos también puede incluir una activación térmica. Con excepción de las tierras diatomáceas, todas las adiciones minerales naturales se derivan de rocas y minerales volcánicos. Los *materiales de subproductos* son aquellos que no son productos primarios de la industria que los produce. Las principales adiciones minerales de subproductos son las cenizas de la combustión de carbón y algunos residuos de cosechas, la sílice volatilizada de ciertas operaciones metalúrgicas y la escoria granulada tanto de industrias de metales ferrosos como no ferrosos.

2.2.1. Clasificación

Con base en sus propiedades químicas o físicas las adiciones minerales son clasificadas en cementantes, puzolanas, cementantes-puzolánicas y nominalmente inertes.

2.2.1.1. Cementantes

Los materiales cementantes son sustancias que por sí solas tienen propiedades hidráulicas cementantes (fragan y endurecen en presencia del agua). Los materiales cementantes incluyen a la escoria granulada de alto horno molida, al cemento natural, a la cal hidráulica hidratada y a las combinaciones de estos y de otros materiales.

2.2.1.2. Puzolanas

Una puzolana es un material silíceo o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia del agua,

reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Durante mucho tiempo el uso de puzolanas ha sido principalmente limitado a Italia, donde se encuentran considerables reservas de puzolanas naturales y también en Grecia (Tierra Santorin). En otros países el interés en estos materiales es de fecha relativamente reciente y ha surgido de la necesidad de la reutilización de algunos materiales de desecho como las cenizas volantes y humo de sílice. Los resultados de una variedad de estudios han confirmado que los cementos puzolánicos pueden producir concretos que muestran una alta resistencia a edades tardías y una gran resistencia al ataque de agentes agresivos.

La clasificación más comúnmente aceptada para las puzolanas concierne a su origen y por lo tanto una primera subdivisión es entre materiales naturales y artificiales. Los materiales naturales no necesitan de ningún otro tratamiento aparte de la molienda; las puzolanas artificiales resultan de productos químicos y/o modificaciones de los materiales que originalmente tenían pocas o no tenían propiedades puzolánicas.

Como puzolanas naturales se emplean un gran número de materiales naturales: las tierras diatomáceas, los horstemos opalinos, las arcillas, las pizarras, las tobas-volcánicas, y la piedra pómez. La mayoría de las puzolanas naturales se deben moler antes de ser usadas y muchas se tienen que calcinar a temperaturas de 650°C a 980°C, para activar sus componentes arcillosos. La ceniza volante, el humo de sílice y la ceniza de cascarilla de arroz y bagazo de caña son puzolanas artificiales. Estos materiales se clasifican según la norma ASTM C 618 como puzolanas Clase N.

2.2.1.3. Cementantes-Puzolánicas

Algunas escorias granuladas de alto horno molidas y también algunas cenizas volantes, exhiben propiedades tanto puzolánicas como cementantes. Las cenizas volantes ASTM C 618 Clase C con un contenido de óxido de calcio de aproximadamente 15 a 30% en peso, son las predominantes dentro de esta clasificación. Al exponerse al agua, muchas de estas cenizas se hidratan y endurecen en menos de 45 minutos.

2.2.1.4. Nominalmente Inertes

Los materiales nominalmente inertes tienen pocas o nulas propiedades cementantes. Algunos de estos materiales son el cuarzo en bruto finamente dividido, las dolomitas, muchas calizas, el mármol, el granito, y otros materiales. Los materiales inertes frecuentemente se emplean como adición al cemento y como una sustitución parcial de la arena en el concreto para mejorar la trabajabilidad pobre causada frecuentemente por la falta de finos en la arena (Neville, 1995, Metha y Monteiro, 1998, Kosmatka et al., 2004).

2.2.2. *Reacción puzolánica*

A pesar de la complejidad de la evolución de las fases puzolánicas activas en todo el proceso de hidratación, el progreso de la reacción puzolánica es comúnmente evaluada en términos de la disminución de la cal libre en el sistema o el aumento de la alúmina y sílice soluble en ácido.

El término “actividad puzolánica” incluye dos parámetros, a saber, la cantidad máxima de cal que una puzolana puede combinar y la velocidad con que tal combinación se produce. Ambos factores dependen de la naturaleza de las puzolanas y, más concretamente, de la calidad y cantidad de las fases activas. La heterogeneidad de las familias de puzolanas, así como la complejidad de los fenómenos que ocurren durante la hidratación, no permiten que pueda definirse un modelo de “actividad puzolánica” y sólo permiten la identificación de tendencias generales.

Hay un acuerdo general en que la cantidad total de cal ligada depende esencialmente de lo siguiente (Lea y Desch, 2004):

1. La naturaleza de las fases activas;
2. su contenido en la puzolana;
3. su contenido SiO_2 ;
4. la relación cal/puzolana en la mezcla
5. duración del curado;

Mientras que la velocidad de combinación también depende de:

6. el área superficial específica de la puzolana;
7. relación agua/sólidos de la mezcla;
8. temperatura.

2.2.2.1. Productos de la reacción

La reacción de la mezcla puzolana-cal produce los mismos compuestos que se han encontrado en la hidratación del cemento Portland. También diferentes tipos de puzolana producen los mismos aluminatos y silicatos hidratados. Las diferencias son menores y, en general, afectan la cantidad y no la naturaleza de las fases hidratadas.

Las puzolanas naturales, dispersas en una solución de cal saturada o casi saturada reaccionan con la cal y forman silicato hidratado de calcio (C-S-H) y aluminatos de calcio hidratados hexagonales (C_4AH_{13}). Al extender la duración de la reacción entre las puzolanas y soluciones de cal, además del C-S-H y el C_4AH_{13} , son reconocibles otros compuestos: carboaluminatos, gehlenita e hidrogranate. El hidrogranate aparece después de 70-150 días combinado con la cal y representa del 40 a 60% de la masa inicial de la puzolana. Cuando se produce yeso en las pastas de cal-puzolana, también se forma etringita, que causa desmoronamiento de las pastas.

La relación C/S del C-S-H es variable y parece depender del tipo de puzolana, el tiempo y la temperatura de curado, la relación cal/puzolana, así como del método analítico utilizado. La reacción entre humo de sílice y $Ca(OH)_2$ disponible produce un C-S-H mucho más cristalino que el C-S-H producido por el cemento portland. Los productos de la reacción de caolín quemado con cal son principalmente C-S-H, hidrato de gehlenita (C_2ASH_8) y pequeñas cantidades de aluminato de calcio hidratado, C_4AH_{13} (Lea y Desch, 2004).

2.2.2.2. Índice de Actividad Puzolánica

Para evaluar la actividad puzolánica de un material se pueden aplicar métodos químicos, físicos y mecánicos. Los más conocidos y aplicados en ingeniería son estos últimos. Con los métodos mecánicos se evalúa la contribución de la reacción puzolánica en el desarrollo de la resistencia a compresión de morteros y concretos que las contienen. Al valor que representa el desempeño de la puzolana en términos de desarrollo de resistencia por efecto de la reacción puzolánica se le llama Índice de Actividad Resistente (IAR).

A nivel general se establecen una serie de parámetros para evaluar el IAR de un material: relación agua/cemento, relación agregado/cementante, tiempo de curado, temperatura de curado, proporción de puzolana y tipo de cemento, entre otros. Para poder interpretar los datos mecánicos obtenidos se sugiere que al menos estos parámetros deben fijarse (Páya et al., 2002).

A nivel de normas, la ASTM C311-04 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete” fija todos los factores mencionados anteriormente con excepción de la relación agua/cemento, que es uno de los más importantes por estar vinculado directamente con el desarrollo de la resistencia a la compresión. A pesar de que ésta norma propone una relación agua/cemento fija, ésta se modifica por considerar el efecto demandante o reductor de agua de la puzolana en cuestión y así mantener una fluidez determinada en la mezcla.

2.2.3. Ceniza Volante

Las cenizas volantes son producto de la combustión de carbón mineral de plantas generadoras de vapor. Las partículas gruesas, llamadas cenizas de fondo o escoria, se precipitan en la cámara de combustión y las finas, llamadas cenizas volantes, permanecen suspendidas en el gas. Antes de emitir los gases a la atmósfera las cenizas son recuperadas por un precipitador electrostático.

Las cenizas volantes son usadas en una variedad de aplicaciones de ingeniería, tales como: concreto a base de cemento portland, estabilización de suelos y bases de caminos, rellenos sanitarios, lechadas, rellenos estructurales y asfaltos. Las cenizas se componen de partículas generalmente esféricas, en un rango de tamaños entre 10 y 100 micrones, pero se encuentran también algunas partículas huecas llamadas cenosferas y otras con esferas en su interior llamadas plerosferas tal como se muestra en la Figura 2.2 (ACI Committee 232, 1996). Estas pequeñas esferas mejoran la fluidez y trabajabilidad del concreto fresco. Cenizas más gruesas podrían ser menos reactivas y podrían contener un alto contenido de carbón. Las cenizas pueden ser procesadas para mejorar su fineza y reactividad.

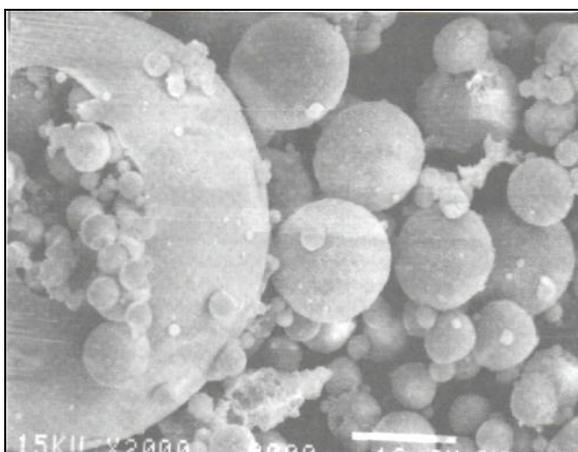


Fig.2.2. Micrografía de ceniza volante (Fuente: ACI Committee 232).

Las cenizas volantes consisten principalmente de óxidos de silicio, aluminio, fierro y calcio. También pueden contener óxidos de magnesio, potasio, sodio titanio y azufre en cantidades menores. Cuando son usadas como aditivo mineral en concreto, se clasifican con base en su composición química de acuerdo a la ASTM C de la siguiente manera: **Cenizas clase C:** con alto contenido de calcio (generalmente más del 20%) y **Cenizas clase F:** con bajo contenido de calcio (menos del 10%) (Malhotra y Ramezianpour, 1994, Neville, 1995, Kosmatka et al., 2004, Day, 2006).

2.2.4. Humo de Sílice

El humo de sílice, también llamado de micro sílice, humo de sílice condensado o sílice activa es un subproducto que se usa como una puzolana. Este subproducto es el resultado

de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de silicio sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000 °C. Cuando se enfría el humo se condensa y se colecta en grandes bolsas de tela. El humo de sílice es procesado para remover las impurezas y para controlar el tamaño de partículas.

El humo sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1µm y con diámetro promedio de cerca de 0.1 µm, aproximadamente 100 veces menor que el promedio de las partículas de cemento. El color en polvo es generalmente gris (Kosmatka et al., 2004).

La inclusión de humo de sílice en concreto causa cambios significativos en la estructura de la matriz, a través de la acción física y la reacción puzolánica, que produce densificación, refinamiento del sistema de poros, ganancia de resistencia mecánica y resistencia a ciertos ambientes hostiles. El concreto con humo de sílice es susceptible a curados pobres y los efectos negativos son más pronunciados que en concretos ordinarios (Newman y Choo, 2003).

2.2.5. Otras puzolanas de desechos agrícolas

Las cenizas de la quema de cáscara de arroz o de algunos residuos agrícolas presentan altos contenidos de SiO₂, y si la quema se realiza bajo un control adecuado con condiciones de temperatura de 350-600 °C, el material molido es muy puzolánico. El material formado consiste en gran parte de sílice amorfa que mantiene la estructura celular del material original y posee una superficie específica muy alta. Su posible utilización en conjunto con la cal o cemento ha recibido atención por razones de economía y por su alta resistencia al ataque de ácidos. La ceniza de cáscara de arroz tiene características muy similares a las del humo de sílice pero puede tener incluso mayor capacidad puzolánica.

Se espera que la naturaleza y disponibilidad de productos específicos de residuos industriales varíe con los cambios en la tecnología derivados del agotamiento de las fuentes de energía y materias primas así como del creciente reconocimiento de la necesidad de reducir la contaminación y los daños ambientales. Con base en lo anterior, es factible que todo tipo de residuos producidos con potencial puzolánico, que tienen limitado interés en la actualidad, podrían convertirse en los principales componentes del concreto en un futuro (Taylor, 1997).

2.2.6. Beneficios y precauciones en el uso de puzolanas

Los beneficios del uso de puzolanas en concreto y mortero varían dependiendo del tipo puzolana, la proporción usada y otros ingredientes en la mezcla, procedimiento de mezclado, condiciones de campo y colocación. Algunos de los beneficios son: resistencia última más alta, mejor trabajabilidad, disminución del sangrado, reducción del calor de hidratación, reducción la permeabilidad, mejoramiento de la resistencia al ataque por sulfatos, disminución del ataque por reacción álcali-sílica, disminución de costos, disminución de la contracción e incremento de la durabilidad. A continuación se explica la causa de algunas de estas mejoras.

Resistencia: La formación de cementantes adicionales permite continuar ganando resistencia con el tiempo.

Permeabilidad: La disminución en el contenido de agua combinada con la producción de materiales cementantes adicionales reduce la interconectividad de los poros del concreto, de esta manera disminuyendo la permeabilidad.

Durabilidad: La disminución de cal libre y en consecuencia el incremento de compuestos cementantes, combinada con la reducción de permeabilidad, mejora la resistencia a varios tipos de deterioro incluyendo la corrosión.

Precauciones en el uso de puzolanas

Cuando se vaya a usar puzolanas como aditivo para el concreto y mortero se deberá tomar en cuenta lo siguiente: las cenizas podrían impedir la formación de burbujas de aire introducido con propósitos de durabilidad, esto sería más evidente cuando se usaran cenizas

con alto contenido de carbón; el uso de cenizas proporciona una baja resistencia a edades tempranas, por lo que se debe esperar más tiempo para retirar la cimbra; en climas fríos se debe tener cuidado, ya que las cenizas reducen el calor de hidratación. Sin embargo, si se consideran estos problemas pueden solucionarse si se lleva a cabo un diseño de mezclas y prácticas constructivas adecuadas.

2.3. Generalidades sobre el mortero de cemento portland

El mortero es una mezcla de cemento agua y agregado fino y eventualmente algún aditivo. El agregado fino es comúnmente arena natural o piedra triturada que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y es predominantemente retenido sobre el tamiz de 75 μ m (No.200) (Comité ACI 116). En la Figura 2.3 se muestran las fases y componentes del mortero.

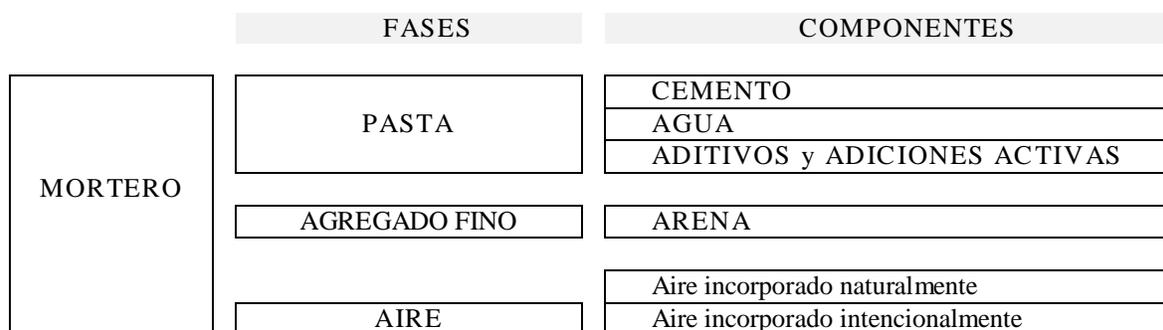


Fig. 2.3. Fases y componentes presentes en el mortero.

A continuación se describen algunas de las principales propiedades y cuidados necesarios reconocidos en el concreto, los cuales también son asociadas en la mayoría de los casos al mortero (concreto sin agregado grueso).

2.3.1. Trabajabilidad

Comúnmente esta es definida como la facilidad de colocar, consolidar y acabar el concreto y mortero recién mezclado. Pero la trabajabilidad se debería definir como una propiedad física solo en función a las circunstancias de un tipo particular de construcción. El término “consistencia” es empleado para referirse a la firmeza o la facilidad con la cual fluirá. La

“estabilidad”, se refiere a la cohesión de la mezcla, esto es su resistencia a la segregación (Neville, 1995).

El factor principal que afecta la trabajabilidad es el contenido de agua de la mezcla. Pero el tamaño máximo de agregado, su granulometría, forma y textura así como la temperatura de la mezcla también son factores. Una medida de la trabajabilidad en mortero puede ser estimada con la prueba de fluidez o extensibilidad y la prueba de revenimiento para el concreto (Neville, 1995).

2.3.2. Segregación

Se puede definir la segregación como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de modo que su distribución ya no es uniforme. La ausencia de segregación apreciable es esencial, ya que la compactación completa de una mezcla segregada es imposible. En el caso del mortero y concreto, las diferencias de tamaño de las partículas y peso específico de los constituyentes de la mezcla son las causas primarias de la segregación, pero su efecto puede controlarse con la elección de una granulometría adecuada y con el cuidado en el manejo de la mezcla. Una viscosidad mayor de la pasta de cemento fresco actúa en contra del movimiento descendente de las partículas de agregado más pesadas, por consiguiente, las mezclas con relaciones agua/cemento bajas son menos propensas a la segregación. Con un método correcto de manejar, transportar y colocar, se puede reducir bastante la probabilidad de segregación; se encuentran bastantes reglas prácticas en la guía ACI 304R-85.

2.3.3. Sangrado

También conocida como “ganancia de agua”, es una forma de segregación en la cual algo del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del mortero acabado de colar. El agua que asciende por sangrado deja atrás bolsas de aire o lentes, y como todos los huecos están orientados en la misma dirección, puede aumentar la permeabilidad del concreto en un plano horizontal. La tendencia al sangrado depende en forma importante de las propiedades del cemento. Es importante señalar, que es posible disminuir el sangrado adicionando puzolanas y otros materiales finos. Específicamente se ha encontrado que la adición de

ceniza volante o humo de sílice al mortero disminuye significativamente el sangrado (Neville, 1995).

2.3.4. Curado

El concreto y mortero (más precisamente, el cemento) requiere de humedad para hidratarse y endurecer. El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y temperaturas satisfactorias en el concreto y mortero durante un periodo definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas. El curado tiene una gran influencia sobre las propiedades del concreto endurecido como son la durabilidad, resistencia, hermeticidad, resistencia a la abrasión, estabilidad volumétrica y resistencia a la congelación y deshielo y a los cloruros. La pérdida de agua también va a provocar que el concreto se contraiga, creando así esfuerzos de tensión en el concreto (contracción plástica) que pueden tener como resultado agrietamientos superficiales (Kosmatka et al., 2004).

2.3.5. Resistencia

Una de las propiedades más valiosas del mortero y concreto es su resistencia, aunque en muchos casos prácticos, otras características tales como la durabilidad o la permeabilidad pueden ser más importantes. No obstante, la resistencia a la compresión es establecida con fines de cumplimiento sobre todo en el aspecto estructural y suele dar una imagen general de la calidad del concreto por estar directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratada. A continuación se verán algunas de las relaciones empíricas acerca de la resistencia del concreto (Neville, 1995).

Relación agua/cemento: Se dice que cuando un concreto está completamente compactado su resistencia es inversamente proporcional a la relación agua/cemento.

Relación de gel/espacio: La resistencia a cualquier relación agua/cemento depende del grado de hidratación del cemento, y de sus propiedades físicas y químicas; de la temperatura a la que ocurre la hidratación, del contenido de aire del concreto, y también, del cambio en la relación agua/cemento efectiva y de la formación de grietas por causa del

sangrado. Por lo tanto, es más correcto relacionar la resistencia con la concentración de productos sólidos de la hidratación del cemento dentro del espacio disponible para estos productos, o dicho de otra forma la relación entre la resistencia y la relación gel/espacio. (Neville, 1995).

Porosidad

La porosidad definida como el volumen total de poros mayores que los poros de gel, expresada como un porcentaje del volumen global de la pasta de cemento hidratado, es un factor primario que tiene influencia en la resistencia de la pasta de cemento. Además de su volumen, la forma y el tamaño de los poros también son factores.

Interfase del agregado y pasta de cemento

La zona de interfase tiene una mayor porosidad que la demás pasta de cemento hidratado. Sin embargo, con el uso de puzolanas la resistencia de la zona de transición puede aumentar con el tiempo como consecuencia de la reacción puzolánica. (Neville, 1995).

2.3.5.1. Estimación de la resistencia (VPU)

Existen varias pruebas no destructivas para la estimación indirecta de la resistencia a compresión del concreto y mortero, entre las que destacan el martillo de rebote Smith (esclerómetro) y la velocidad de pulso ultrasónico. Aunque las pruebas no destructivas son menos confiables para la estimación de la resistencia a la compresión, son útiles para verificar la calidad en un mismo elemento o estructura en el tiempo, además tienen grandes ventajas como, economía, rapidez y versatilidad (Neville, 1995).

El método de velocidad de pulso ultrasónico puede ser usado en el concreto, mortero y pastas de cemento para determinar: su homogeneidad; la presencia de vacíos, grietas y otras imperfecciones; cambios que ocurren a través del tiempo (por ejemplo la hidratación del cemento); su calidad en relación a los requerimientos de normas, y curvas de calibración para estimar la resistencia a compresión. La velocidad de pulso ultrasónico es afectada por factores, tales como la humedad del concreto, la temperatura, la armadura de refuerzo y las microgrietas (CNS Electronics).

2.4. Componentes y propiedades del Ferrocemento

El comité ACI 549 define al ferrocemento como un tipo de muro reforzado comúnmente construido de mortero hidráulico reforzado con capas de mallas continuas de alambre relativamente delgado muy próximas entre sí. La malla puede ser de materiales metálicos o de otro tipo.

2.4.2. Componentes

A continuación se describen los materiales componentes más comunes del mortero y acero de refuerzo empleados en el ferrocemento.

2.4.2.1. Mortero

El mortero utilizado normalmente en el ferrocemento es una mezcla de cemento hidráulico, arena, agua y eventualmente se pueden incluir aditivos que mejoran sus propiedades. Las relaciones cemento:arena en peso más comunes son de 1:1.5 a 1:3, es decir, aproximadamente de 800 a 500 kg de cemento por metro cubico de mortero. Generalmente se utilizan relaciones agua/cemento en peso que van de 0.4 a 0.6 (Paul y Pama, 1991, Wainshtok, 1998, Olvera, 2002).

2.4.2.1.1. Cemento

Generalmente son utilizados cementos portland ordinarios, resistentes a sulfatos, con escoria de alto horno y puzolánicos. Sin embargo, también se hace uso de adiciones minerales durante el mezclado para mejorar las características de durabilidad y/o disminuir costos.

2.4.2.1.2. Agregados

La arena utilizada para el ferrocemento generalmente tiene un tamaño máximo de aproximadamente 5 mm. Este material se encuentra disperso en toda la masa del mortero y ocupa de 60 a 70 % de su volumen. El agregado utilizado en la producción de mortero de

alta calidad para el ferrocemento debe ser resistente, impermeable, y capaz de producir una adecuada trabajabilidad para lograr una buena penetración en las mallas de refuerzo, con un mínimo de relación agua/cemento. Las arenas utilizadas pueden ser naturales o artificiales producto de la trituración de piedra. Aspectos importantes a tener en cuenta son la granulometría, el modulo de finura y la formas de los granos. Las arenas con altos contenidos de de sustancias nocivas como arcillas y materia orgánica, o con partículas de forma laminada son consideradas inadecuadas.

2.4.2.1.3. Agua para mezclado

La calidad del agua para mezclar el mortero es de vital importancia para el ferrocemento endurecido resultante. Las impurezas del agua pueden interferir en el fraguado del cemento y afectar adversamente la resistencia o provocar manchado en la superficie, y asimismo provocar la corrosión del refuerzo. El agua puede contener impurezas tales como barro, lama, ácidos, sales solubles, materiales vegetales en descomposición y muchas otras sustancias orgánicas.

2.4.2.1.4. Aditivos

Generalmente se usan aditivos químicos para alterar o mejorar una o más de sus propiedades. La mayor parte de los aditivos se usan para mejorar la trabajabilidad, para reducir la demanda de agua y para prolongar el fraguado del mortero.

2.4.2.2. Refuerzo de acero

El refuerzo empleado en el ferrocemento puede ser dividido en dos clases: armadura difusa constituida por telas de mallas de alambre de pequeño diámetro y poco espaciadas entre sí y armadura discreta constituida de alambrones o barras de acero de pequeño diámetro y eventualmente de tubos de acero. En la Figura 2.5 se muestran algunas de las mallas y refuerzos típicos usados en ferrocemento. La función del refuerzo en el ferrocemento es, en primera instancia conformar la estructura y soportar el mortero sin fraguar (en el caso de no usar cimbra) y posteriormente absorber los esfuerzos de tracción que el mortero solo no sería capaz de soportar, y favorecer el surgimiento de una configuración de fisuras poco espaciadas. Se recomienda que el volumen del acero de refuerzo en estructuras de

ferrocemento no resistentes al agua sea mayor al 1.8% respecto la volumen total y el área superficial del mismo sea al menos $0.8 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ y en estructuras resistentes al agua 3.5% y $1.6 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ respectivamente (Naaman, 2000).

2.4.2.2.1. *Mallas de alambre*

En ferrocemento las telas de mallas pueden estar formadas con alambres tejidos, trenzados o soldados (Figura 2.4). Como principales características deben ser manuales y flexibles para adaptarse a las más diversas formas. Entre las más comunes se encuentran las siguientes:

Malla de alambre hexagonal: Conocida también como malla de gallinero, es la más utilizada y está disponible en la mayor parte de los países. Se fabrica con alambre estirado en frío, que generalmente se entreteje en patrones hexagonales y posteriormente es galvanizado. En el ferrocemento por lo general se utilizan con diámetros de 0.5 a 1 mm, y aberturas de malla de $\frac{1}{4}$ a 1 pulgada.

Malla de alambre soldado: Esta formada por alambres rectilíneos de acero (comúnmente calibre 18 y 19) dispuestos de manera que forman mallas cuadradas o rectangulares soldadas entre sí en los puntos de contacto. Por ser más rígida presenta ventajas de montaje en superficies planas y con cierto grado de curvatura.

Malla entretejida: Esta formada por simple entrelazado de los alambres galvanizados o no, que forman una malla cuadrada o rectangular. Es difícil su manipulación y colocación, pero cuando es estirada conforma rápidamente la curva deseada. Su comportamiento mecánico es similar o mejor que el de las mallas hexagonales y de alambre soldado.

Malla de metal desplegado: Se forma perforando una hoja delgada de metal para hacer aberturas en forma de diamante. Es bien sabido que su relación peso/resistencia no es tan buena como la de la malla entretejida, pero tiene una mejor relación costo/resistencia.

Malla Watson: Esta consiste en alambres rectos de alta resistencia y en un alambre ondulado transversal que mantiene en posición a estos alambres. Los alambres de alta resistencia están colocados en dos niveles paralelos uno al otro, y están separados de los primeros por alambre dulce transversal. El resultado es una maya muy resistente que no está sujeta a ruptura durante el manejo o por esfuerzos en el mortero endurecido.

2.4.2.2.2. Alambrones y barras

Son utilizados para hacer el armazón o esqueleto de la estructura sobre la cual se colocan las capas de malla. Tanto las varillas longitudinales como las transversales se distribuyen uniformemente y se amoldan a la forma deseada. Las varillas se separan lo más posible hasta una distancia de 30 cm para soportar las mallas, pero se reduce ésta separación cuando se requiere que trabajen como elemento principal de refuerzo. Las barras presentan diámetros generalmente comprendidos entre 0.42 a 0.95 cm. Puede usarse una combinación de varillas de diferentes medidas con las varillas de diámetro menor en la dirección transversal.

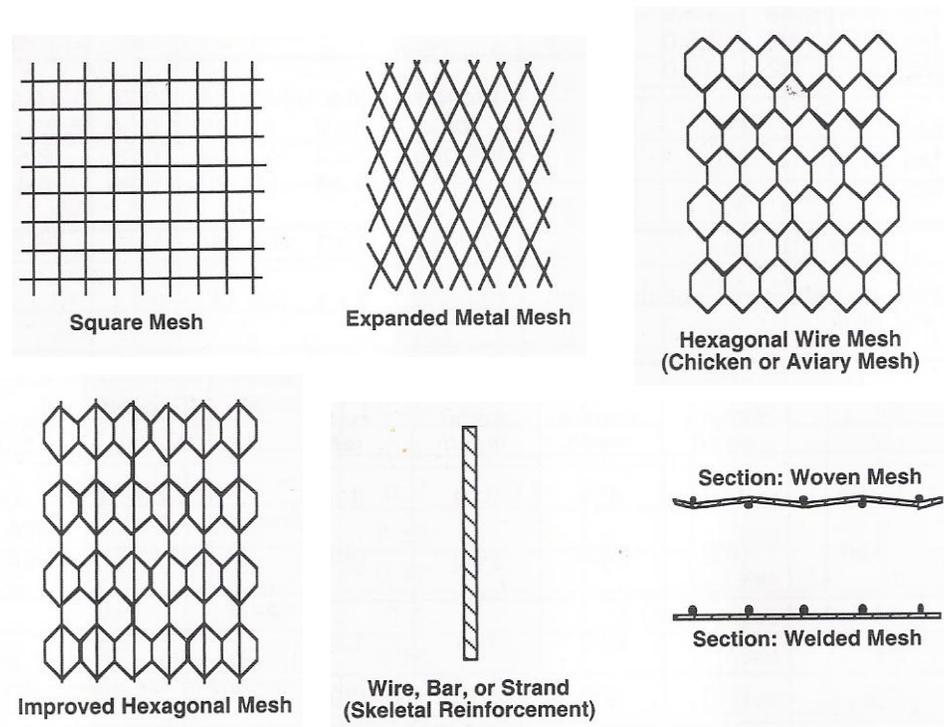


Fig. 2.4. Mallas típicas y refuerzos usados en ferrocemento.

2.4.3. Propiedades

Muchas de las propiedades del ferrocemento se derivan de contener una relativamente alta cantidad de refuerzo constituido por telas de mallas de alambre de pequeño diámetro y distribuida en toda la sección. Entre estas propiedades su gran elasticidad y resistencia al agrietamiento son de las más importantes, lo que permite considerarlo como un material

homogéneo y casi elástico para determinados regímenes de carga. En la Figura 2.5 se muestra una sección típica de ferrocemento.

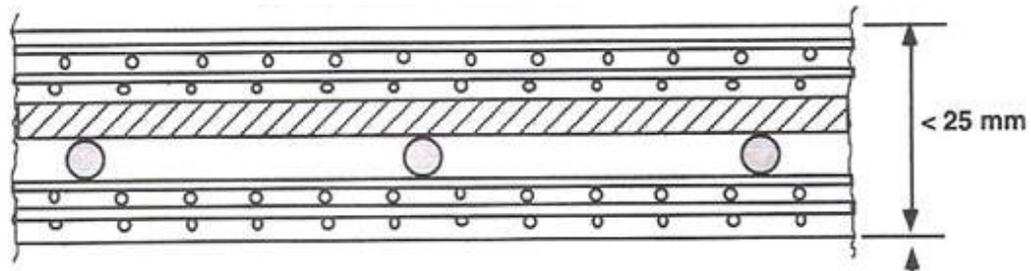


Fig. 2.5. Sección típica de ferrocemento.

Sin embargo, algunas de las características que le proporcionan ventajas mecánicas pueden afectar la durabilidad del ferrocemento por las siguientes cuestiones (ACI Comité 549, 1993):

1. El recubrimiento de mortero sobre la malla es muy delgado (1 a 2 mm), por lo que es relativamente fácil para los líquidos o agentes corrosivos penetrar hasta la armadura.
2. La superficie de la armadura es muy grande, así que el área de contacto para que se propicie la corrosión también es mayor.
3. Aunque muchas mallas de refuerzo utilizadas en ferrocemento son galvanizadas para disminuir la corrosión, el recubrimiento de zinc puede provocar algunos efectos adversos como la generación de burbujas de hidrogeno.

2.5. Durabilidad de estructuras de concreto y mortero reforzado

La durabilidad del concreto es definida por el comité ACI 201 como la capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Con excepción del daño mecánico, todas las influencias adversas sobre la durabilidad comprenden el transporte de fluidos a través del concreto y mortero (Neville, 1995). Hay tres fluidos principalmente importantes que pueden entrar en el concreto y

mortero: agua pura o que lleva iones agresivos, dióxido de carbono y oxígeno. Todo el transporte de fluidos depende de la pasta de cemento hidratado.

2.5.1. Influencia del sistema de poros

Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, éstos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad es también alta. En contraparte, si los poros son discontinuos, entonces la permeabilidad del concreto es baja, aun si su porosidad es alta.

Los poros importantes para la permeabilidad son aquellos con un diámetro de al menos 120 o 160 nanómetros, si es que son continuos. Existen teorías de que la zona de interfase contribuye grandemente a la permeabilidad del concreto. Esto debido a que es una zona más porosa y llega a ocupar desde un tercio hasta un medio del volumen total de la pasta de cemento endurecido en el concreto.

2.5.2. Mecanismos de transporte de fluidos

Generalmente se asocia a la facilidad de movimiento de los fluidos a través del concreto, únicamente con la permeabilidad, pero deben distinguirse tres mecanismos. La “permeabilidad” se refiere al flujo sujeto a un diferencial de presión. “Difusión” es el proceso en el cual el fluido se mueve por un diferencial de concentración. Para el concreto y mortero la propiedad más importante es la difusividad. La “absorción” es el resultado del movimiento capilar en los poros del concreto que están abiertos al medio ambiente.

2.5.3. Difusión

En lo que corresponde a la difusión de gases, el dióxido de carbono y el oxígeno son de interés principal: el primero conduce a la carbonatación de la pasta de cemento hidratado, y el último hace que sea posible el progreso de la corrosión del acero embebido. El curado reduce el coeficiente de difusión. Además de la difusión de gases, los iones de carácter agresivo, notablemente cloruros y sulfatos, se mueven por difusión (difusión iónica) en el agua contenida en los poros. La difusión también se ve disminuida con relaciones

agua/cemento bajas, pero a menor escala que en la permeabilidad. Debido a que los iones cloruro son los principales causantes del deterioro de estructuras reforzadas por acción de la corrosión, el conocimiento del coeficiente de difusión de cloruros en concreto y mortero es un buen indicativo de la durabilidad potencial que una estructura puede tener en un ambiente determinado.

2.5.4. Mecanismos de deterioro

A continuación se presentan algunos de los principales mecanismos físicos-químicos de deterioro en concreto y mortero reforzado.

2.5.4.1. Carbonatación

Con respecto a la durabilidad, la importancia de la carbonatación descansa en el hecho de que reduce el pH del agua en los poros en la pasta de cemento portland endurecido desde valores situados entre 12.6 y 13.5 hasta un valor de casi 9. Así, cuando el frente de bajo pH alcanza la cercanía de la superficie del acero de refuerzo, la película de óxido protectora es removida y puede tener lugar la corrosión, siempre que estén presentes el oxígeno y la humedad necesarios para las reacciones de corrosión.

La carbonatación ocurre progresivamente desde el exterior del concreto expuesto al CO_2 , pero lo hace a una rapidez decreciente pues el CO_2 se ha de difundir a través del sistema de poros, que incluye la zona superficial carbonatada del concreto. Tal difusión es un proceso lento si los poros de la pasta de cemento hidratado están llenos de agua, porque la difusión del CO_2 es cuatro veces más lenta que en el aire. El factor fundamental que controla la carbonatación es la difusividad de la pasta de cemento endurecido. A pesar de todo, la carbonatación puede tener algunas consecuencias positivas. Puesto que el CaCO_3 ocupa un volumen más grande que el Ca(OH)_2 al cual reemplaza, la porosidad del concreto con carbonato se reduce. También, el agua liberada por el Ca(OH)_2 en la carbonatación puede ayudar a la hidratación del cemento sin hidratar hasta ese momento.

2.5.4.2. Ataque de sulfatos

Las sales sódicas pueden reaccionar con la pasta de cemento hidratado cuando se encuentran en solución. Son comunes los sulfatos de sodio, potasio, magnesio y calcio, los cuales se presentan en el suelo o en el agua freática. El sulfato de amonio ataca la pasta de cemento hidratado al producir yeso.

Las consecuencias del ataque de sulfatos incluyen no sólo expansión y agrietamiento destructivos, sino también una pérdida de resistencia del concreto debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento hidratado y de adhesión entre esta y las partículas de agregado. El concreto atacado por sulfatos tiene una apariencia blanquecina. El daño comienza usualmente en las orillas y equinas del elemento, y enseguida por agrietamiento y desconchamiento progresivos, los cuales reducen el concreto a un estado frágil y hasta blando.

Como medidas de prevención para disminuir el ataque por sulfatos se puede reducir al mínimo el contenido de C_3A del cemento, es decir, utilizar cemento resistente a sulfatos, o reducir la cantidad de $Ca(OH)_2$ de la pasta de cemento hidratado mediante el uso de cementos mezclados que contengan escoria de alto horno o puzolana. Sin embargo, es todavía más importante la prevención del ingreso de sulfatos dentro del concreto: haciendo el concreto tan denso como se pueda y con una permeabilidad tan baja como sea posible.

2.5.4.3. Eflorescencia

La disolución de los compuestos de cal, en algunas circunstancias puede conducir a la formación de depósitos de sal sobre la superficie del concreto, conocida como eflorescencia. Este fenómeno se ve presente cuando el agua se filtra a través del concreto mal compactado o a través de grietas o a lo largo de juntas mal hechas, y cuando puede suceder evaporación en la superficie del concreto. El carbonato de calcio formado por la reacción de $Ca(OH)_2$ con CO_2 es dejado atrás en forma de depósito blanco y se encuentran también depósitos de sulfato de calcio. Generalmente la eflorescencia causa, solo problemas, relacionados con la apariencia del concreto.

2.5.4.4. Daño por agua de mar

El concreto que está expuesto al agua de mar puede estar sujeto a acciones que incluyen el ataque químico, corrosión del acero de refuerzo inducida por el cloruro, ataque de congelación y deshielo, exposición a la sal, y abrasión por arena en suspensión y por hielo.

Cuando el concreto es mojado repetidamente por el agua de mar en la zona de mareas y en la zona de salpicado, con periodos alternados de secado durante los cuales se evapora agua pura, algo de las sales disueltas en el agua de mar se dejan como residuos en la forma de cristales, principalmente sulfatos, los que se rehidratan y secan en condiciones de mojado subsecuente, y con esto ejercen una fuerza expansiva en la pasta de cemento endurecido circundante. La mejor forma de prever los efectos del agua de mar en un concreto, es elaborándolo con una baja permeabilidad y proporcionarle un buen curado.

2.5.4.5. Destrucción por reacción álcali-sílice

Esta reacción puede ser destructiva y se manifiesta por el agrietamiento. El ancho de las grietas puede variar desde 0.1 mm hasta 10 mm en caso extremo y tienen una profundidad que generalmente no pasa los 25 mm, raramente alcanzan los 50 mm. El factor más preocupante es que este agrietamiento puede facilitar el ingreso de agentes dañinos.

La expansión causada por la reacción álcali/sílice es tanto mayor cuanto mayor es el contenido de sílice reactiva, pero sólo hasta cierto contenido de sílice; a contenidos más altos, la expansión es menor. Adiciones puzolánicas como el cristal resistente al calor triturado o la ceniza volante, se han hallado realmente efectivas para reducir la penetración de las partículas más gruesas de agregado. Para éste fin, la ceniza volante deberá contener no más de 2 o 3 por ciento de álcalis por masa. El humo de sílice y la escoria granulada o molida de alto horno, también son efectivos para reducir los efectos expansivos (Neville, 1995).

2.5.4.6. Corrosión de acero de refuerzo

El concreto protege al acero de refuerzo embebido de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El ambiente de pH alto en el concreto y mortero (normalmente mayor a 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de

óxido no corrosivo, llamada capa pasivante. Sin embargo, la presencia de iones corrosivos principalmente cloruros pueden destruir o penetrar en la capa pasivante con lo que se da inicio a la corrosión del acero.

La resistencia del concreto y mortero a los cloruros es buena, pero se puede mejorar con una relación agua/cemento baja (menor a 0.40), por lo menos siete días de curado y el uso de adiciones minerales, tales como cenizas volantes, para reducir la permeabilidad. El aumento del recubrimiento encima del acero también reduce la penetración de cloruros (Kosmatka et al., 2004).

2.6. El fenómeno de la corrosión

La corrosión se define como: "la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal, y su medio ambiente que produce un deterioro del material y sus propiedades" (ASTM G 15-04).

2.6.1. Mecanismo

El tipo de corrosión depende del medio en el que se desarrolla, en un ambiente seco predomina la corrosión química y en un ambiente acuoso se presenta la corrosión electroquímica (Broomfield. 1997), formándose en este último una pila galvánica.

En una pila galvánica se identifican los siguientes elementos: una zona anódica: donde ocurre la reacción de oxidación o disolución del metal; una zona catódica: donde ocurre la reacción de reducción; un conductor eléctrico: donde fluyen los electrones del ánodo al cátodo; y un conductor iónico: como medio de transporte de los iones. A continuación se enlistan las reacciones que se presentan en una celda galvánica y se muestran gráficamente en la Figura 2.6.

- El hierro al liberar dos electrones se convierte en un ión con carga positiva, ésta es una reacción de oxidación y la porción del metal donde ocurre esta reacción es el ánodo.
- Los electrones liberados por el hierro viajan a través del conductor eléctrico hasta el cátodo para combinarse con iones hidrogeno y formar gas hidrógeno.
- El gas hidrógeno se combina con el oxígeno para formar agua.
- El agua, el oxígeno y los electrones provenientes del ánodo se combinan y forman iones hidróxilo u oxidrilo.
- Los iones hidróxilo viajan a través del conductor iónico hasta las inmediaciones del ánodo, se combinan con los iones de hierro y forman el hidróxido ferroso blanco.
- El hidróxido ferroso se combina con el agua y con moléculas de oxígeno para formar finalmente el hidróxido férrico o herrumbre de color rojizo, que tiene un volumen 8 veces mayor al volumen inicial de la molécula de hierro.

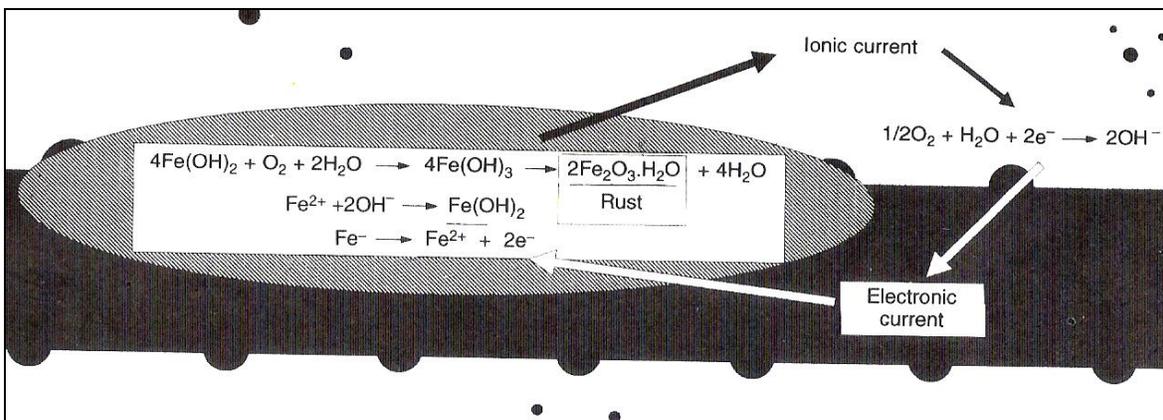


Fig.2.6. Reacciones de corrosión en acero (Fuente: Broomfield, 1997).

2.6.2. Tipos de corrosión

Es conveniente clasificar los tipos de corrosión por la forma en que estas se manifiestan. Algunas de las formas de corrosión son únicas pero todas están más o menos interrelacionadas entre sí. Fontana identifica ocho tipos de corrosión principales: uniforme, o ataque generalizado; galvánica, o corrosión entre dos metales; en espacios confinados; por picaduras; intergranular; lixiviación selectiva; erosión corrosión; y corrosión bajo tensión (Fontana, 1996). A continuación se explican las más comunes en concreto reforzado.

2.6.2.1. Por picaduras

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva, típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al interior del concreto, formándose una celda de corrosión donde existe una área pasiva intacta actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero. Varios factores actúan en conjunto para mantener o profundizar las picaduras existentes, más que para extender la corrosión o generar nuevas picaduras. Las picaduras son autocatalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento (Fontana, 1986).

2.6.2.2. Uniforme

La corrosión uniforme es el resultado de una pérdida de la película pasiva, resultante de la carbonatación del concreto y/o la presencia excesiva de iones cloruro (Fontana, 1986). También puede ocurrir por efecto de la lixiviación del hidróxido de calcio producida por la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente acidas.

2.6.2.3. Galvánica

Este tipo de corrosión se puede dar cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico. En el caso del acero en concreto, esta situación se dará cada vez que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actuará como cátodo (Fontana, 1986).

2.7. *La corrosión en concreto y ferrocemento*

En el medio ambiente existen diversos factores que pueden causar corrosión en el acero o promover las condiciones para que ésta se inicie. La causa más común de la corrosión del acero de refuerzo es la presencia de cloruros.

La corrosión que se presenta en el acero de refuerzo en concreto y ferrocemento es electroquímica y consta de los mismos elementos que en una pila galvánica, con las siguientes consideraciones: la zona anódica: es una parte del acero de refuerzo, la zona catódica: es otra parte del acero de refuerzo, el conductor eléctrico: es el acero de refuerzo y el conductor iónico: es la solución existente en los poros del concreto. En la Figura 2.7 se representa esquemáticamente la corrosión del acero de refuerzo en concreto y ferrocemento.

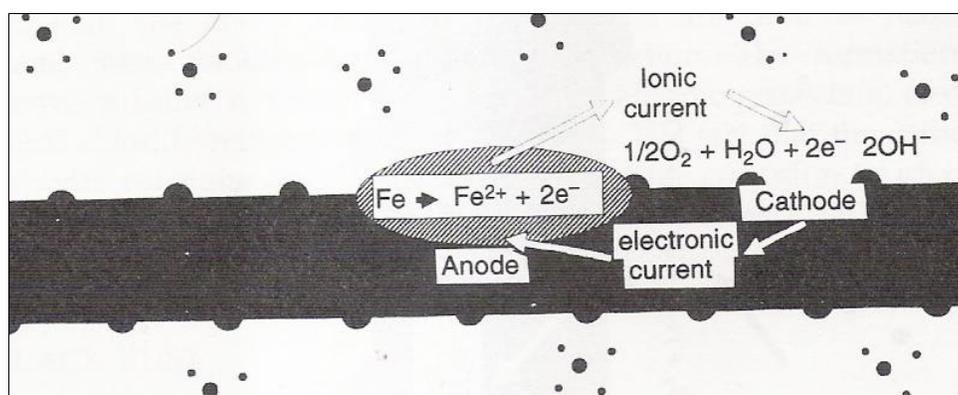


Fig.2.7. Corrosión en refuerzo de concreto y ferrocemento (Fuente: Broomfield, 1997).

2.7.1. Corrosión causada por iones cloruro

La presencia de cloruros en el concreto puede deberse a la contaminación durante su elaboración, por uso de agregados contaminados o aditivos a base de cloruros (acelerantes de fraguado o reductores de agua), también por ingreso de cloruros desde el exterior a través de los poros del concreto. A la cantidad de cloruros presentes en la superficie del acero capaces de iniciar la corrosión del acero de refuerzo se le conoce como *umbral de cloruros*. La teoría de formación de compuesto explica el mecanismo de ataque de los cloruros en el acero de la manera siguiente:

Esta plantea que los cloruros libres forman un compuesto soluble con los iones de hierro ($2Fe^{++} + 6Cl^{-} \rightarrow 2FeCl_3 + 4e^{-}$), alejándolos del ánodo, en busca de un pH alto y oxígeno

disuelto, en estas condiciones los compuestos se disocian precipitando el hidróxido de hierro liberando los iones cloruros ($\text{FeCl}_3 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 3\text{Cl}^-$) (Fontana, 1986).

En esta reacción los cloruros no se agotan, el proceso continúa formando óxidos o hidróxidos por la combinación del hierro con el oxígeno. Por lo tanto en vez de que la reacción se propague a lo largo del acero se desarrollan picaduras profundas en el acero (Genescá, 1996).

Una vez presentes en el concreto, los iones cloruros se encuentran en los siguientes estados: químicamente enlazados, físicamente absorbidos o disueltos en agua. Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos y enlazados se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos, por lo que es recomendable evaluar el total de cloruros presentes en el concreto o mortero (DelValle et al., 2001).

2.7.2. Niveles de cloruro iniciadores de la corrosión

El umbral de cloruros depende de numerosos factores, y no se puede determinar un valor fijo general para todos los tipos de concreto. Entre estos factores están: el proporcionamiento de la mezcla de concreto, humedad contenida en el concreto, temperatura, contenido de C_3A en el cemento, materiales de mezclado, los cuales pueden afectar en diferentes maneras, la habilidad de unión con el cemento y por lo tanto, la cantidad de cloruros libres capaces de depasivar el acero, y finalmente el pH de la solución de poro (Alonso et al., 2000).

Otra razón para la falta de precisión en el umbral de cloruros puede estar relacionada a la definición de umbral. Algunos autores consideran que ocurre la depasivación del acero cuando ocurre un cambio en los potenciales de corrosión; otros autores con la aparición de manchas de óxido en la superficie del acero; otros más con un cierto nivel de corriente de corrosión y finalmente otros con el incremento en la corriente galvánica (Alonso et al, 2000).

A pesar de ello, se han desarrollado varias investigaciones para conocer el nivel de cloruros iniciadores de la corrosión. En la Tabla 2.3 se muestran algunos resultados de niveles límite establecidos por algunos reglamentos y diversos autores (Castro, 2001).

Tabla 2.3. Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado.

Autor o reglamento	Año	Contenido límite de cloruros	
		(Kg/m ³ de concreto)	(% por peso de cemento)
Hausmann	1967	0.22.8	
Clear	1976	0.81	0.2
Everett y Treadway	1980		0.41
Berke. Gau	1982	0.60.9	
Comité EuroInternacional du Beton (Europa)	1982		0.351
FHWA (Estados Unidos)	1985		0.3
BS81101985 (Reino Unido)	1985		0.20.4*
RILEM (Francia)	1987		0.4
EH88 (España)**	1988		0.4
Pr EN206 (España)**	-		0.4
ACI31889 (Estados Unidos)	1989		0.150.31**
Roy, Liam y Northwood	1993		0.4
Mustafa y Yusof	1994	0.376	-
Castro y Maldonado	1994	1.02.0	-

*El límite varía en función del tipo de cemento.

**El límite varía en función de la agresividad ambiental.

2.7.3. Métodos de prueba para estimar la difusión de cloruros

Las pruebas de difusión son adecuadas para la evaluación de la difusión del ion cloruro dentro del concreto y mortero, porque este simulan el proceso de difusión natural. Con base en la naturaleza de su medida el método de prueba de difusión puede ser dividido en pruebas en estado estacionario y no estacionario.

2.7.3.1. En estado estacionario

Para el método de prueba en estado estacionario, un espécimen pequeño es colocado entre dos celdas. Una celda es llenada con una solución de cloruro, mientras que la otra celda es llenada

con una solución saturada de Ca(OH)_2 libre de cloruros, (celda de colección de cloruros). Durante la prueba la concentración de iones cloruro en la celda de colección es monitoreada, y la relación entre la concentración de cloruros y el tiempo es establecida cuando el estado estacionario es alcanzado, el coeficiente de difusión “D” puede ser calculado por la primera ley de difusión de Fick (Martínez, 2009)

2.7.3.2. En estado no estacionario (NT Build 443)

Para el método de prueba en estado no estacionario (también llamado de acumulación o pruebas de inmersión), una superficie de un espécimen usualmente está en contacto con una solución de cloruros, las demás superficies permanecen controladas mediante impermeabilización para asegurar una difusión unidimensional. Después de un cierto periodo de tiempo, se determina el contenido de *iones cloruro totales* del concreto a diferentes profundidades desde la superficie de exposición, y el perfil de iones cloruros del espécimen de concreto es establecido. El coeficiente de difusión “D” es calculado con base en el perfil de iones cloruro, por medio de la solución propuesta por Crank a la segunda ley de difusión de Fick.

En programas de evaluación de pruebas en la Universidad de Toronto se encontró que los resultados del NT Build 443 no son afectados por los iones conductivos (sales) en la solución del poro del concreto. Investigadores en el tema han revisado la mayoría de los procedimientos existentes para la estimación de la resistencia contra la penetración de iones cloruros dentro del concreto endurecido y consideran que la prueba de difusión en estado no estacionario estandarizada por NT Build 443 es un método de prueba fiable (Martínez, 2009).

2.8. Métodos de evaluación de la corrosión

Debido a que la corrosión en el concreto reforzado es de tipo electroquímico es posible estudiarla con métodos afines como: media celda (potenciales de corrosión), resistencia a la polarización lineal (RPL), impedancia electroquímica o ruido electroquímico además de una inspección visual. La selección de las técnicas en un estudio específico depende del tipo de corrosión y de consideraciones económicas. Sin embargo, debido a la complejidad del fenómeno en estudio es necesario llevar a cabo al menos dos de las pruebas anteriores.

2.8.1. Inspección Visual

La ventaja principal de este método radica en que es accesible y sirve para evaluar estructuras en cualquier condición, es confiable y no se requiere de una inversión económica alta.

La inspección visual puede desarrollarse en dos etapas, la etapa no destructiva consiste en realizar la observación externa de la estructura para evaluar la condición del concreto, identificar manchas, erosiones, productos de corrosión o agrietamiento del concreto en dirección del acero de refuerzo. Cuando en la superficie del concreto no existe evidencia suficiente para ratificar un estado del acero, una segunda etapa puede llevarse a cabo. Esta segunda etapa corresponde a una prueba destructiva que consiste en descubrir y exponer el acero de refuerzo, para registrar características como delaminación o productos de corrosión en la interfase acero-concreto. Con el registro de la inspección visual se obtiene información muy importante para el entendimiento del problema además de la evidencia física del daño en el acero o en el concreto.

2.8.2. Media celda (Potenciales de corrosión)

Este método estima la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo en concreto interpretando su potencial de corrosión. Existen diferentes electrodos de referencia que pueden emplearse para determinar la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo:

plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), mercurio /cloruro de mercurio (Hg/HgCl, Calomel) y cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄)

La media celda se compone de una fracción de metal en una solución de sus propios iones (como cobre/sulfato de cobre, plata/cloruro de plata) que si se conecta a otros metales, en una solución de sus propios iones (tal como hierro en hldróxido férrico Fe(OH)₃) se puede determinar la diferencia de potencial entre las dos medias celdas, haciendo lo anterior se ha construido una batería, la cual genera un voltaje debido a la diferente posición de los metales en la serie electroquímica. Esta es una celda galvánica en que la corrosión y el flujo actual entre los diferentes metales, es conocido como acción galvánica (Broomfield, 1997).

La ASTM propone en la norma C 876-91 “Standard test method for half-cell potentials uncoated reinforcing steel in concrete”, los valores que se muestran en la Tabla 2.4 para estimar la probabilidad de corrosión con los electrodos de referencia más comunes.

Tabla 2.4. Interpretación de potenciales de corrosión (unidades en milivolts).

<i>Cobre/sulfato de cobre</i>	<i>Plata/cloruro de plata/ 4M KCl</i>	<i>Estándar Electrodo de hidrógeno</i>	<i>Calomel Hg</i>	<i>Condición de corrosión.</i>
> -200	> -106	> +116	> -126	Bajo (10% riesgo de corrosión).
-200 a -350	-106 a -256	+116 a -34	-126 a -276	Intermedio riesgo de corrosión.
<-350	<-256	<-34	<-276	Alto (>90% riesgo de corrosión).
<-500	<-406	<-184	<-426	Corrosión severa.

2.8.3. Resistencia a la polarización lineal

Esta técnica requiere que se polarice el metal en estudio con la aplicación de una pequeña corriente eléctrica y sea monitoreado el efecto en el potencial de corrosión o viceversa. Cuando es aplicada una corriente y es monitoreado el potencial de corrosión se dice que la prueba es “galvanostatica” y cuando se aplica un potencial y es monitoreado el cambio en

la corriente la prueba es “potenciostática”. La pendiente creada por la gráfica de estas dos variables es la resistencia a la polarización (R_p), con la cual se calcula la Intensidad de corrosión (I_{corr}) (véase la página 50). Para poder convertir el valor intensidad de corrosión (en μA) en densidad de corrosión ($\mu A/cm^2$) es crucial definir el área del metal en estudio (Bromfield, 1997).

A pesar de ciertas limitaciones, la técnica de RPL ha sido probada para evaluar el proceso de corrosión con exactitud razonable (Genescá, 2002).

En la Tabla 2.5 se muestra un criterio para evaluar la condición del acero de refuerzo en base a medidas de densidad de corrosión utilizando anillo de guarda (Broomfield, 1997).

Tabla 2.5. Nivel de corrosión en base a medidas de densidad de corrosión.

Condición	Densidad de corrosión ($\mu A/cm^2$)
Pasiva	< 0.1
Corrosión baja o moderada	0.1 a 0.5
Corrosión moderada a alta	0.5 a 1.0
Alta velocidad de corrosión	> 1.0

2.9 Marco teórico

Para poder estimar adecuadamente la influencia de las variables independientes en las variables dependientes es necesario conocer las leyes y ecuaciones fundamentales que rigen los fenómenos que se presentan en las mismas. En este capítulo se presenta un resumen de estas leyes y ecuaciones.

2.9.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión es el esfuerzo último alcanzado en un material instantes antes de fallar cuando se le aplica una carga que trata de estrecharlo. El estudio de esfuerzos y deformaciones en materiales se basa en la *Ley de Hooke*, la cual establece que el alargamiento unitario ϵ de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada F . La resistencia a compresión (esfuerzo ingenieril) queda definida mediante la ecuación siguiente (Askeland, 1998):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde σ es el esfuerzo ingenieril (resistencia a compresión), F es la fuerza aplicada y A_0 es el área de la sección transversal antes de aplicar la fuerza.

2.9.2. Índice de actividad resistente

El IAR es la relación de la resistencia a compresión promedio a una misma edad del mortero con puzolana y el mortero control expresada en porcentaje (ASTM C311-04); puede calcularse con la expresión siguiente:

$$IAR = \frac{R_{MP}}{R_{MC}} \times 100 \dots\dots\dots (3.2)$$

Donde:

IAR= Índice de Actividad Resistente (%).

R_{MP} = Resistencia a la compresión del mortero cemento-puzolana: arena (Mpa-Kg/cm²).

R_{MC} = Resistencia a la compresión del mortero cemento: arena (Mpa-Kg/cm²).

2.9.3. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

La técnica de VPU tiene como base teórica la ecuación de onda. La ecuación de onda describe fenómenos ondulatorios: propagación del sonido, propagación de ondas electromagnéticas, vibración de cuerdas, barras y membranas, vibraciones producidas por terremotos, oscilaciones de péndulos y muelles, etc. La ecuación general de onda en una sola dimensión se muestra a continuación:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3)$$

Donde $\partial^2 u / \partial t^2$ es el desplazamiento con respecto al tiempo, $\partial^2 u / \partial x^2$ es el desplazamiento con respecto a un espacio y v es la velocidad.

La VPU que viaja en un material sólido depende de la densidad y de las propiedades elásticas de dicho material (Neville, 2000). En el presente trabajo se utilizará un equipo que indicará el tiempo de tránsito del pulso ultrasónico a través de un espécimen de longitud conocida. La velocidad de VPU se obtendrá utilizando la ecuación siguiente:

$$V = \frac{S}{t} \dots\dots\dots (4)$$

Donde S es la longitud de trayectoria y t es el tiempo de tránsito.

2.9.4. Mecanismos de transporte (difusión de cloruros)

En concreto y mortero el transporte de líquidos y gases se lleva a cabo en los poros, microgrietas y vacíos. El transporte de líquidos ocurre debido a difusión, absorción capilar y

filtración. En la mayoría de las estructuras el fenómeno de transporte predominante es difusión, es decir, la fuerza que origina el movimiento de agentes es un gradiente de concentración.

Con base en ciertas hipótesis es posible modelar el fenómeno de difusión en el concreto y mortero con la 2ª Ley de Fick (Maekawa, 1999):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Donde C es la concentración de cloruros en la solución de los poros, t es el tiempo de difusión, x es la distancia a la cual se mide la concentración C y D es el coeficiente de difusión del espécimen.

2.9.5. Potenciales de corrosión

Se llama potencial de corrosión al voltaje medible que se genera cuando el metal en estudio es conectado a una media celda (otro metal en una solución de sus propios iones). El voltaje es generado por la circulación de electrones, mismos que son desprendidos por el metal más electronegativo y recibidos por el menos electronegativo. Esta es una celda galvánica en que la corrosión y el flujo actual entre los diferentes metales, es conocido como acción galvánica (Broomfield, 1997).

Para medir los potenciales de corrosión se utilizan medias celdas de referencia cuyo potencial de equilibrio en la reacción óxido-reducción es constante, por lo que las variaciones de potencial en el sistema completo son función del potencial de equilibrio en la reacción óxido-reducción que se lleva a cabo en el metal evaluado. En general, conforme se incrementa el potencial de la reacción óxido-reducción que se lleva a cabo en el metal en estudio se incrementará la probabilidad de corrosión. De esta manera los potenciales de corrosión del sistema completo indicarán la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo (Gu y Beaudoin, 1990, Carino, 1999).

2.9.6. Densidad de corrosión

La densidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) es la medida más cercana que se puede obtener para calcular la velocidad ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{día}$) a la cual se disuelve la sección del acero sin dañar excesivamente el elemento, para tal efecto se utiliza el método de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL). El método de RPL está basado en la Ley de Tafel y ecuaciones de Butler –Volmer y Stern-Geary.

Ley de Tafel

Esta ley permite el establecimiento de la relación existente entre la corriente y el potencial del electrodo (el metal en estudio). Deduce de manera teórica, para la reacción de reducción del catión, la ecuación de polarización de un electrodo reversiblemente polarizable. Esta ley se expresa por las reacciones siguientes:

Para la reacción anódica
($i > 0$),

$$\eta_a = a + b \log i \dots\dots\dots (2.6)$$

($b > 0$)

Para la reacción catódica
($i < 0$),

$$\eta_c = a' - b' \log |i| \dots\dots\dots (2.7)$$

($b' > 0$)

En coordenadas semi-logarítmicas, estas relaciones se representan por las rectas de la Figura 2.8. Con las mismas coordenadas semi-logarítmicas, la curva de polarización real está constituida de dos ramas, anódica y catódica, siendo una asíntota a la recta de Tafel correspondiente. En coordenadas ordinarias, las Curvas de Tafel anódicas y catódicas para un mismo sistema tiene la forma presentada en la Figura 2.9.

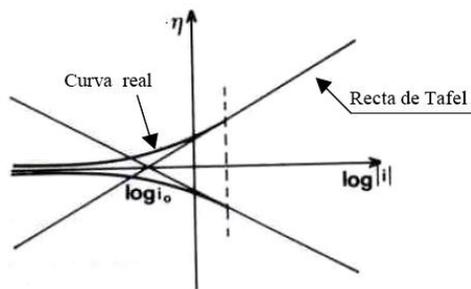


Fig. 2.8.- Rectas de Tafel

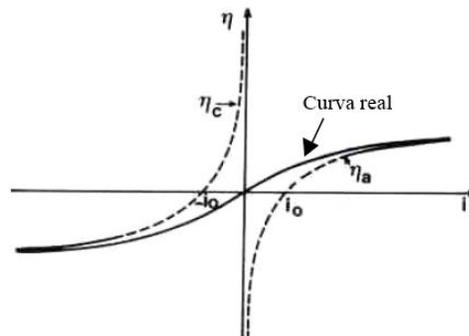


Fig. 2.9.- Curvas de Tafel

Esta ley de Tafel tiene un papel importante en electroquímica (a pesar de que sus hipótesis son del todo acertadas) y es en la búsqueda de su justificación teórica que se han podido encontrar las hipótesis correctas (Ec. de Butler–Volmer) para el mecanismo de una reacción electroquímica (Genescá, 2002).

Ecuación de Butler –Volmer

Esta teoría permite obtener la velocidad de un proceso electroquímico, es decir la relación $i=f(e)$ en el caso donde la transferencia de los electrones (etapa electroquímica) sea la única que controla la velocidad del proceso global. A tal régimen cinético se llama *régimen puro de transferencia electrónica* o *régimen de activación*. Considerando la reacción:



Considerando que el sobrepotencial: $\eta = e - e_t$.

La ecuación simplificada es de la siguiente forma:

$$I = A \cdot i_0 \cdot \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha \cdot n \cdot F}{R \cdot T} \cdot (E - E_{eq}) \right] - \exp \left[\frac{\alpha \cdot n \cdot F}{R \cdot T} \cdot (E - E_{eq}) \right] \right\} \dots\dots\dots (9)$$

Donde I es la corriente eléctrica (A), i_0 es el cambio en la densidad de corriente (A/m^2), E es el potencial del electrodo (V), E_{eq} es el potencial de equilibrio (V), A es el área superficial activa del electrodo (m^2), T es la temperatura absoluta (K), n es el número de electrones involucrados en la reacción del electrodo, F es la constante de Faraday (96,485 C/mol), R es la constante universal del los gases (8.314472 J/mol.K) y α es el factor de simetría adimensional (Stern y Geary, 1957).

2.9.6.1. Método de Resistencia a la Polarización Lineal

Este método electroquímico que se ha empleado para determinar la densidad de corrosión (i_{corr}) en sistemas tan diversos como el concreto fue propuesto y difundido por Stern y Geary en 1957 con la siguiente fórmula:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \dots\dots\dots (10) \text{ donde: } B = \frac{b_a \cdot b_c}{0.303(b_a + b_c)} \dots\dots\dots (11)$$

En donde

R_p es la resistencia a la polarización, b_a y b_c son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente (Stern y Geary, 1957)

En la ecuación 2.10 se establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión con la resistencia a la polarización. El método de resistencia a la polarización lineal está basado en la observación de la polarización lineal cerca del E_{Corr} ; es decir, la pendiente ($\Delta E/\Delta I$) de las curvas de polarización alrededor del E_{corr} . La constante B en la ecuación presenta una relación entre las pendientes de Tafel y sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad. Comúnmente se adoptan valores de B de 26 mV para acero en condición activa de corrosión y 52 mV en condición pasiva. El método de RPL usa una pequeña excitación del potencial ($\Delta E < 20$ mV) para polarizar el acero de refuerzo y se analiza su efecto en el potencial de media-celda. A pesar de ciertas limitaciones, la técnica de RPL ha sido probada para evaluar el proceso de corrosión con exactitud razonable (Genescá, 2002).

2.9.6.2. Velocidad de corrosión (pérdida de masa)

Ya que se conoce la densidad de corrosión ($\mu A/cm^2$), puede calcularse la pérdida de masa haciendo uso de la *Ley de Faraday de la electrólisis* (Fontana, 1986). El peso m del metal corroído será igual a:

$$m = \frac{Q \cdot M}{q \cdot n \cdot N_A} = \frac{Q \cdot M}{F \cdot n} \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

m : es la masa de la sustancia producida en el electrodo (g).

Q : es la carga eléctrica total que pasó por la solución (C).

q : es la carga del electrón = 1.602×10^{-19} C/e⁻.

n : es el número de valencia de la sustancia como ión en la solución (e⁻ por ión).

M: es el peso atómico de la sustancia (en gramos por mol).

N_A: es el número de Avogadro = 6.022×10^{23} iones por mol.

F: es la constante de Faraday, $F=q \cdot N_A = 96,485 \text{ C. mol}$

Considerando los fundamentos revisados, se planteó el diseño experimental y los procedimientos llevados a cabo en ésta investigación.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

El experimento está dividido en dos fases. En la fase 1 se obtuvieron cenizas de la quema de concha de coco, hoja de pino y bagazo de caña. Se determinaron sus densidades, composiciones químicas e Índices de Actividad Resistente (IAR) de las mismas. Con base en los resultados de IAR y la disponibilidad de las cenizas, se eligió trabajar con la ceniza de bagazo de caña (CBC). Se aplicaron tratamientos de cribado y molido a la CBC, se determinaron IARs y se eligió la CBC200 (CBC cribada en el tamiz no.200 con TMP de 150 μm) ya que presentó uno de los IARs más altos y requirió menos energía para su tratamiento que una CBC molida.

En la fase 2 del experimento se elaboraron mezclas de mortero, y se realizaron pruebas en estado fresco, tales como temperatura, extensibilidad, peso volumétrico y contenido de aire. Con éstas mezclas se colaron especímenes de mortero y ferrocemento para determinar la influencia de la CBC200 y el tiempo de curado en las propiedades del mortero y la corrosión del ferrocemento, mediante pruebas de resistencia a la compresión, Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), determinación de coeficientes de difusión de cloruros, Inspección visual, potenciales de corrosión (probabilidad de corrosión) y Resistencia a la Polarización Lineal (RPL, velocidad de corrosión). En la Figura 3.1 se muestra un diagrama flujo donde se resume el procedimiento del experimento.

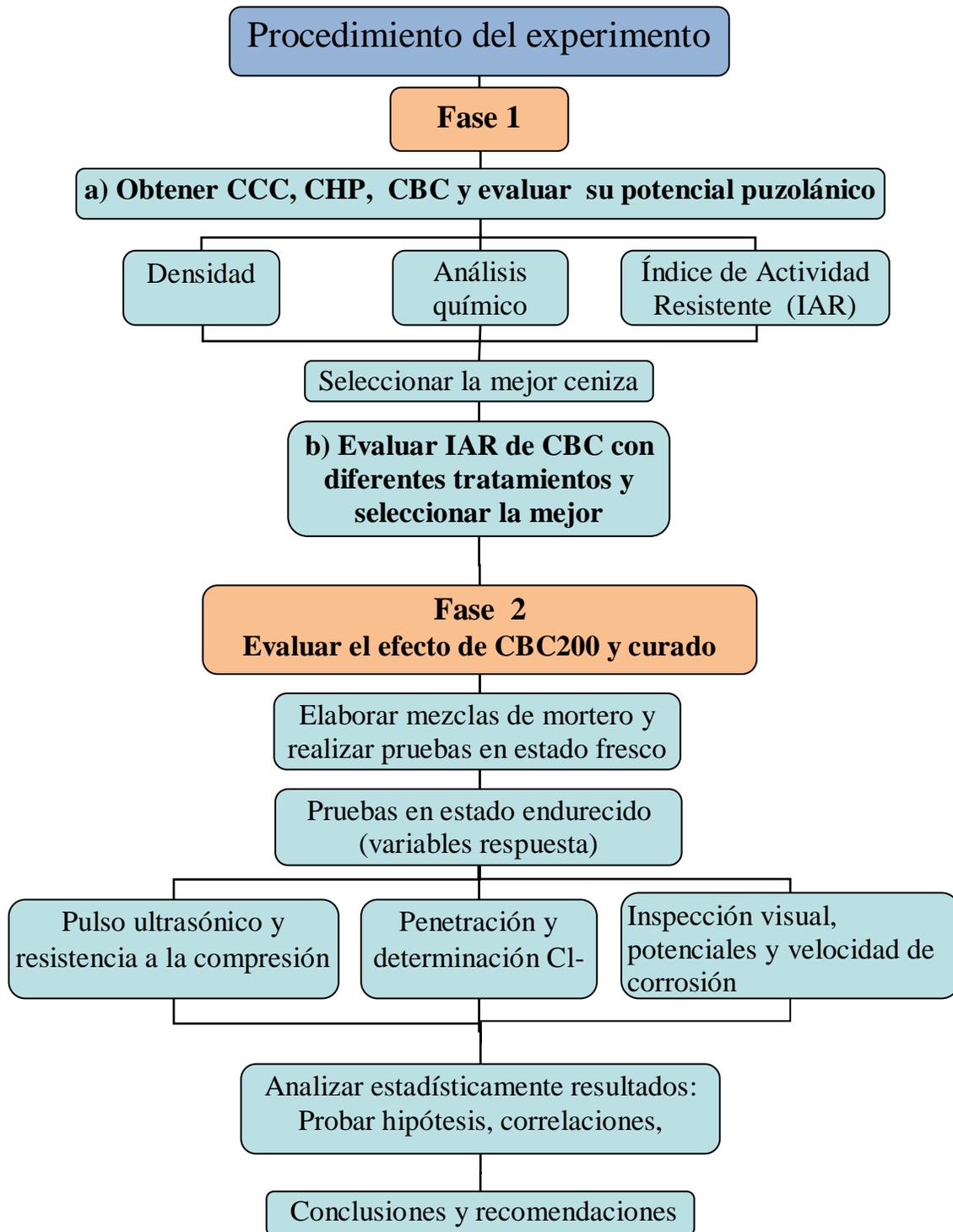


Fig. 3.1. Diagrama de flujo del experimento

3.1. Diseño del experimento

Es este apartado se justifica la selección de variables del experimento.

3.1.1. Fase 1.- Obtención, tratamiento y selección de ceniza que se utilizó en la fase 2

4.1.1.1. Obtención de cenizas de concha de coco, hoja de pino y bagazo de caña y evaluación de su potencial puzolánico

Se justifica la selección de factores únicamente de la prueba de IAR ya que en las pruebas de densidad y análisis químico no se manejarán niveles.

Selección de factores.- Los factores seleccionados fueron la ceniza de concha de coco, hoja de pino y bagazo de caña, debido a resultados encontrados en la literatura en los cuales se informa de su cualidad puzolánica y por su disponibilidad en México y Oaxaca.

Selección de niveles.- Se utilizó un mismo nivel para los tres factores, el cual fue de 20% de sustitución de ceniza por cemento portland ya que es lo que especifica la norma ASTM C311-04.

Selección de variables respuesta.- La variable respuesta es la resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días de edad, también especificada por la norma ASTM C311-04.

3.1.1.2. Evaluación del potencial puzolánico de ceniza de bagazo de caña con diferentes tratamientos

Selección de factores.- Los factores seleccionados fueron el tamaño máximo de partícula (TMP) y molienda posterior al cribado. El objetivo de cribar la CBC fue disminuir su TMP e incrementar el área superficial de la misma y a su vez eliminar partículas de carbón (las de mayor tamaño), de ésta manera se pretende mejorar su IAR. El objetivo del molido fue

únicamente incrementar el área superficial de la CBC disminuyendo su TMP (Villar-Cociña, 2003, Frías, 2005, Martirena, 2006, Cordeiro, 2008, Cordeiro, 2009).

Selección de niveles.- Para el factor TMP se utilizaron 3 niveles: 3,250 μm (tamiz no. 8), 150 μm (tamiz no. 100), y 75 μm (tamiz no. 200). Para el factor molienda posterior al cribado se utilizaron 2 niveles: molido y sin molido.

Selección de variables respuesta.- La variable respuesta es la resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días de edad, especificada por la norma ASTM C311-04.

3.1.2. Fase 2.- Evaluación del efecto de la CBC y el tiempo de curado en las propiedades del mortero y corrosión del ferrocemento

Selección de factores.- Para éste experimento se seleccionó como uno de los factores, la adición de ceniza de bagazo de caña con TMP de 75 μm (CBC200), debido a que se podría contribuir mejorando las propiedades del mortero y disminuyendo la corrosión del ferrocemento. El otro factor seleccionado fue el tiempo de curado (en una solución saturada de hidróxido de calcio) ya que es de interés estudiar el efecto en las variables respuesta originado por la interacción de este factor y el factor adición de CBC200. Esto debido a que se ha reportado que concretos con adiciones puzolánicas son más afectados que concretos normales cuando son inadecuadamente curados (Neville, 2000).

Selección de niveles.- Cuando se requiere una mezcla de concreto o mortero donde la resistencia a compresión es un requisito indispensable, las adiciones de puzolanas naturales pueden realizarse en niveles de hasta un 20%, en la mayoría de los casos sin afectar la resistencia a compresión (Sata, 2006, Ganesan, 2007). Por no afectar el desarrollo de la resistencia a compresión del mortero y por el tiempo disponible para realizar el experimento, se seleccionaron los niveles de 10 y 20% para el factor adición de CBC200, además se incluyó el nivel 0% para tener un control. La selección del rango para el factor de curado fue de 0-28 días por cumplir con la especificación de las normas para estudios de concreto que se realizan en laboratorio, las cuales indican un curado de 28 días (ASTM). Se

propuso además, un curado conservador de 7 días que es posible llevarlo a cabo en campo y un curado de 0 días (ausencia de curado).

Se elaboraron también mezclas con ceniza volante para poder comparar los resultados contra una puzolana que ha sido más estudiada. Se utilizó únicamente una sustitución de 20% y se aplicó solamente un curado de 28 días.

Selección de variables respuesta.- La velocidad de corrosión ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{día}$), obtenida a partir de la intensidad de corrosión (I_{corr} , $\mu\text{A/cm}^2$), es la medida más exacta obtenida mediante una técnica no destructiva (RPL) para estudiar el grado de deterioro del acero de refuerzo. Para reforzar las inferencias construidas con la velocidad de corrosión se midió también el potencial de corrosión (mV), el cual indica la probabilidad de corrosión, además, se realizó un estudio de inspección visual.

Debido a que se requiere una comprensión profunda de los efectos generados por los factores y sus interacciones, se deben medir variables que tenga una relación más directa con dicho fenómeno, éste es el caso del coeficiente de difusión de cloruros (m^2/s), el cual da un indicativo de la penetrabilidad del mortero. Estructuras con coeficientes de difusión bajos tiene una mayor durabilidad. La resistencia a compresión (MPa) es indicativo de la calidad del mortero y aunque no está directamente relacionada con la durabilidad y corrosión de las estructuras, se debe cuidar que ésta no sea afectada. Ya que la resistencia a compresión se obtiene mediante una técnica destructiva, fue necesario implementar otra técnica que no fuera destructiva y también proporcionara un índice de la calidad de los morteros, desde su colado hasta su destrucción. Por tal motivo se midió la velocidad de pulso ultrasónico (m/s). En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de los factores, niveles y variables respuesta seleccionados para la fase 2 del experimento.

Tabla 3.1. Diseño experimental de la fase 2

Factores	Niveles	Variables respuesta
CBC200 (reemplazo en peso)	0,10,20%	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión (MPa) • Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)
Curado (días)	0,7, 28	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de Difusión de cloruros (m^2/s) • Velocidad de corrosión ($\mu A/cm^2$)
Ceniza volante (CV) con 28 días de curado	20%	<ul style="list-style-type: none"> • Potenciales de corrosión (mV)

La velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión fue medida en cilindros de mortero de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de alto, en la prueba de penetración de cloruros se utilizaron cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto y en la prueba de potenciales y velocidad de corrosión (RPL) se utilizaron placas de ferrocemento de 20 x 25 x 3 cm. Se elaboraron 3 mezclas con 3 tiempos de curado cada una, con lo cual se tuvieron 9 tratamientos, mas una mezcla adicional con CV con un único tiempo de curado, siendo un total de 10 tratamientos.

Como constantes en el proporcionamiento de las mezclas de mortero, se tuvo una relación agua/cementantes en peso de 0.63, la cual fue necesaria para obtener una extensibilidad de $110 \pm 5\%$ en la mezcla control, se utilizó una proporción cementantes: arena en peso de 1:3, ya que se consideró que con dichos valores se satisfacen las demandas de trabajabilidad en estado fresco y resistencia en estado endurecido de la mayoría de las aplicaciones comunes del ferrocemento (Paul y Pama, 1991, Wainshtok, 1998).

Para la medición de la mayoría de las variables respuesta se elaboraron 3 réplicas para cada tratamiento. Únicamente para la determinación de la resistencia a la compresión a varias edades fueron necesarias una cantidad de réplicas mayor por tratarse de una prueba destructiva. Se elaboraron 3 réplicas para la determinación de la resistencia a compresión a edades de 3, 7, 14 y 90 días y 6 réplicas para la edad de 28 días. En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de los tipos y características de los especímenes, el número de réplicas, el total

de especímenes para los diez tratamientos, sus variables respuesta correspondientes, la frecuencia y tiempo de las mediciones realizadas.

Tabla 3.2. Características y número total de especímenes elaborados para la fase 2

Tipo de espécimen	Réplicas	Total especímenes	Variable respuesta y frecuencia de mediciones	Tiempo de prueba
Cilindros de mortero (D=7.5 cm, L=15 cm)	18	162	Resistencia a la compresión (una lectura) Velocidad de pulso ultrasónico (diariamente a 30 especímenes)	A 3,7,14,28 y 90 días De 1 a 90 días
Cilindros de mortero (D=10 cm, L=20 cm)	3	30	Índice de penetración de cloruros (una lectura)	A 63 días Maduración(28 días) más exposición a cloruros(35 días)
Placas de ferrocemento (25 x 20 x 3 cm)	3	30	Velocidad de corrosión (semanalmente) Potenciales de corrosión (diariamente)	170 días De 1 a 170 días.

Para la Fase 2 del experimento se utilizó un diseño *factorial* 3^2 , ya que se evaluaron 2 factores con 3 niveles cada uno (Fig.3.2).

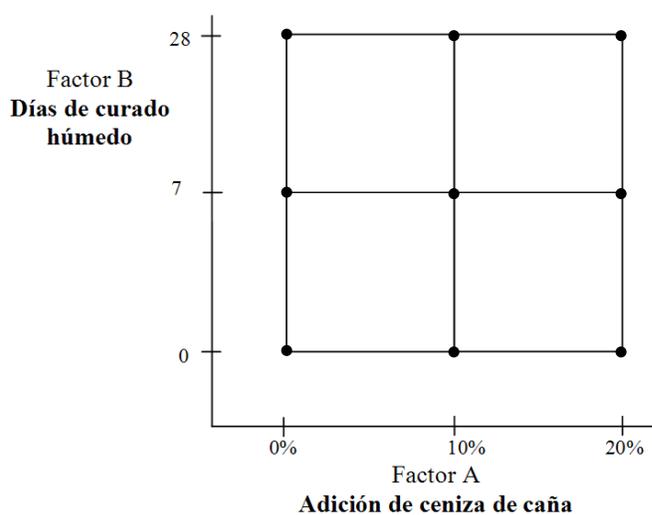


Fig. 3.2. Diseño del experimento (3^2)

Se propuso este diseño por las siguientes razones:

- El diseño factorial es el más adecuado cuando se desea estudiar no solo los efectos principales de los factores, sino también sus interacciones.
- Es más eficiente 1.5 veces que un factor a la vez.
- Permite la estimación de los efectos de un factor con varios niveles de los factores restantes, produciendo conclusiones que son válidas para un rango de condiciones experimentales
- También permite realizar un análisis estadístico de los datos cuando hay errores experimentales (Montgomery, 2006).

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales de Fase 1 del experimento

Cemento: Se utilizó Cemento Portland Ordinario CPO 40 LAFARGE, para todas las mezclas. Se seleccionó un cemento ordinario porque no contiene materiales suplementarios como puzolanas o escoria. En la Tabla 3.3 se muestran los principales óxidos presentes en éste cemento.

Ceniza Volante: Se utilizó una ceniza volante clase F (bajo contenido de calcio) de la marca Admix Tech. En la tabla 4.1 (página 78) se muestran los principales óxidos presentes en la misma.

Ceniza de coco, pino y caña: Se obtuvieron por calcinación cenizas de fondo de la quema de conchas de coco y hojas pino. La ceniza de bagazo de caña se recolectó del ingenio azucarero “Constancia” de Tezonapa, Veracruz. En la tabla 4.1 (página 78) se muestran los principales óxidos de las cuatro cenizas utilizadas en este estudio.

Arena: Se utilizó arena de río graduada que cumple con la norma ASTM C 778-02.

Arena sílica: Se utilizó arena sílica estándar graduada de Ottawa que cumple con la norma ASTM C 778-02. En la Tabla 3.4 se muestra la granulometría, densidad y absorción de las arenas utilizadas.

Agua: Se utilizó agua potable para elaborar los especímenes de mortero.

Tabla 3.3. Principales óxidos del cemento CPO 40

Elemento/ compuesto	%
Al ₂ O ₃	4.14
CaO	70.03
Fe	0.12
Fe ₂ O ₃	N.D
FeO	0.16
K ₂ O	0.71
MgO	0.83
MnO	0.04
Na ₂ O	1.88
P ₂ O ₅	0.04
PXC	5.06
SiO ₂	16.79
TiO ₂	0.21

Tabla 3.4. Propiedades físicas de las arenas

Granulometría		Arena de río	Arena graduada ASTM C778
Tamiz No.	% pasa	% pasa	% pasa
40	66.86	65-75	
50	25.00	20-30	
100	1.74	0-4	
Densidad	2.77	2.62	
Absorción	1.75%	0.21%	

3.2.2. Materiales de Fase 2 del experimento

Cemento: Se utilizó Cemento Portland Compuesto CPC 30 TOLTECA, para todas las mezclas. En la Tabla 3.5 se muestran los principales óxidos presentes en este cemento. Se optó por emplear un cemento con gran presencia a nivel regional y nacional; además, actualmente en México los cementos CPO se han descontinuado por lo que se consiguen con dificultad y únicamente sobre pedido.

Ceniza Volante: Se utilizó la misma ceniza volante clase F de la marca Admix Tech que en la fase 1.

Puzolana: Se utilizó como puzolana la Ceniza de Bagazo de Caña con TMP de 75 µm (CBC200).

Arena: Se utilizó arena de río con densidad de 2.65 y módulo de finura igual a 2.94, la cual cumple con las especificaciones de la norma ASTM C 33-03.

Agua: Se utilizó agua bidestilada para los especímenes que se elaboraron para la prueba de difusión de cloruros y agua potable para los demás especímenes.

Hiperfluidificante: Se utilizó el aditivo hiperfluidificante PLASTOL 4000 EUCO para mantener la relación agua/cementantes y la extensibilidad en las mezclas con CBC200. Este aditivo está elaborado a base de policarboxilatos y no contiene iones cloruros adicionados. Cumple con la norma ASTM-494 tipo F como reductor de agua de alto rango.

Acero de refuerzo: Se utilizó malla galvanizada hexagonal de ½” para elaborar los especímenes de ferrocemento.

Cloruro de Sodio: Se utilizó cloruro de sodio industrial para elaborar la solución del ambiente agresivo simulado al que fueron expuestos los especímenes de ferrocemento.

Reactivos y equipo para la prueba de Cl⁻: Se utilizaron los equipos y reactivos descritos en la norma NT BUILD 443 para la penetración acelerada y NT BUILD 208 para la determinación del contenido de cloruros.

Tabla 3.5. Principales óxidos del cemento CPC 30

Elemento/ compuesto	%
Al ₂ O ₃	4.46
CaO	62.75
Fe	1.63
Fe ₂ O ₃	2.24
FeO	0.08
K ₂ O	0.57
MgO	0.1.49
MnO	0.09
Na ₂ O	0.42
P ₂ O ₅	0.33
PXC	10.03
SiO ₂	15.96
TiO ₂	0.15

3.3. Métodos

3.3.1. Métodos utilizados en la fase 1

3.3.1.1. Obtención de ceniza de concha de coco (CCC) y hoja de pino (CHP)

La ceniza de coco se obtuvo a partir de conchas vacías de palma de coco (*Cocos nucifera*) recolectadas en la central de abasto de la ciudad de Oaxaca. La ceniza de pino se obtuvo de hojas de pino (*Pinus pseudostrabus*) recolectadas en los alrededores de Oaxaca. Las conchas de coco fueron secadas al horno durante 24 horas a 105° C para facilitar su posterior quemado, las hojas de pino se extendieron al sol durante dos horas.

Para incinerar las conchas coco y hojas de pino se utilizó un horno de concreto refractario reforzado exteriormente con acero, de diámetro y altura interior 40 cm y 45 cm respectivamente. Inicialmente se inyectaba gas butano por un orificio ubicado en la parte baja del horno. Con base a las pérdidas por calcinación obtenidas en incineraciones previas se decidió mejorar el proceso de combustión, para lo cual se colocó una malla de metal desplegado para elevar el material a quemar 10 cm por encima del fondo del horno y se inyectó aire con un ventilador en vez del gas butano (Figura 3.3). Con esta última adaptación se logró un suministro distribuido y constante de oxígeno en todo el material, lo que permitió una vigorosa combustión (Figura 3.4), reduciendo cinco veces el tiempo de quemado y alcanzando una temperatura de 600° C.



Fig.3.3. Horno y ventilador utilizados



Fig.3.4. Combustión inicial de hoja de pino

Después de la quema de coco se recolectó la ceniza de fondo, la cual quedó acumulada bajo la malla de metal desplegado. De igual manera se hizo para la ceniza de pino, aunque para esta se implementó un filtro para sedimentar parte de las cenizas volátiles; sin embargo, las cantidades atrapadas fueron mínimas, por lo que se trabajó con la ceniza de fondo (Figuras 3.5 y 3.6).



Fig.3.5.Filtro para sedimentar cenizas



Fig.3.6. Ceniza de fondo de hoja de pino.

Las cenizas se lavaron para eliminar el exceso de carbón, posteriormente se secaron al horno a 105° C. Por último se molieron primero en un molino de bolas a 100 rev/min durante una hora y después en un mortero de cerámica hasta lograr que el 100% pasara el tamiz no. 200(75µm). El color de las cenizas de concha de coco fue de un gris claro, mientras que el de la hoja del pino obtuvo un gris oscuro.

3.3.1.2. Obtención de ceniza de bagazo de caña (CBC)

La CBC utilizada es producida por el Ingenio Azucarero “Constancia” del Grupo Beta San Miguel, ubicado en la comunidad de Tezonapa, Veracruz. En la Figura 3.7 se muestra la entrada principal al ingenio. Cabe mencionar que esta CBC es un sub-producto que dicho ingenio azucarero (al igual que otros 8 ingenios de la región) no utiliza para ningún propósito.

El lote de CBC utilizado para este experimento fue recolectado de un terreno propiedad del ingenio, donde se utilizaba como relleno para formar un terraplén. En la Figura 3.8 se muestra el lugar de donde fue tomada la CBC para este trabajo.

Para disminuir la cantidad de CBC liberada al aire, el ingenio utiliza en la chimenea aspersores que lanzan agua a presión, posteriormente la combinación de CBC y agua es vertida en el río de la comunidad. La ceniza que es depositada en terrenos a cielo abierto es la que no alcanza a desecharse en agua y se acumula a los alrededores de la caldera.

Una vez que se tuvo la CBC en el área de construcción del CIIDIR-Oax, ésta fue extendida al sol para retirar parte de la humedad, posteriormente se cribó con el tamiz no.4 para retirar algunas gravas y vegetación presentes y se realizó un cuarteo para homogenizar la muestra. Para proceder con los tratamientos finales (cribado y molido) la CBC fue secada al horno durante 24 hrs a 105°C.



Fig.3.7. Ingenio azucarero Constanca en Tezonapa, Ver.



Fig.3.8. Sitio de recolección de la CBC en Tezonapa, Ver.

3.3.1.3. Cribado de la CBC

La CBC fue cribada con el objetivo de contar con una ceniza de mejor comportamiento puzolánico. Al cribar la CBC, se eliminan las partículas de mayor tamaño, mismas que tienen contenidos de carbón mayores, y se mejora la reactividad de la ceniza por tener un

área superficial mayor. La CBC fue cribada para obtener tres lotes con diferente fineza: CBC con tamaño máximo de partícula de 3,250 μm (tamiz no. 8), 150 μm (tamiz no. 100), y 75 μm (tamiz no. 200).

3.3.1.4. Molido de la CBC

Al igual que el cribado, el molido tuvo el objetivo de disminuir el tamaño de partícula. El molido se llevó a cabo en el taller de cerámica del ICAPET-Oaxaca, Unidad de Capacitación 085. Se utilizó un molino para arcillas de 17 L de capacidad (Figura 3.9). En cada molienda se introdujo una cantidad constante de 2.3 kg de CBC y 8 kg de bolas de porcelana. Todas las muestras fueron molidas por 1 hora a una velocidad de 62 rev/min. Se molieron muestras de CBC con los tres tamaños de partícula antes mencionados, por lo cual se duplicó el número de tratamientos. En la Tabla 3.5 se muestra la nomenclatura utilizada para las CBCs según el tratamiento aplicado.



Fig.3.9. Molienda de CBC.

Tabla 3.5. Nomenclatura de las CBCs según el tratamiento aplicado

<i>Nomenclatura</i>	<i>Tratamiento</i>
CBC8	CBC cribada en tamiz no. 8
CBC100	CBC cribada en tamiz no. 100
CBC200	CBC cribada en tamiz no. 200
CBC8m	CBC cribada en tamiz no. 8 y molida 1 hora
CBC100m	CBC cribada en tamiz no. 100 y molida 1 hora
CBC200m	CBC cribada en tamiz no. 200 y molida 1 hora

3.3.1.5. Prueba de densidad

La obtención de la densidad de la CCC, CHP, CBC y la CV se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C 188 – 95 (Reapproved 2003) “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement”. Para su realización se utilizó un frasco de Chatelier, nafta (gasolina blanca) y una báscula digital con precisión de centésimos de gramo.

3.3.1.6. Análisis químico

Se realizó un estudio de composición química de óxidos mayores a las CCC, CHP, CBC y la CV (así como a los cementos CPO 40 y CPC 30). Éste fue llevado a cabo en el Servicio Geológico Mexicano. El objetivo fue cuantificar los principales óxidos que intervienen en la reacción puzolánica (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) que estaban presentes en las cenizas para compararlos con lo establecido en la norma ASTM 618-05. Esta norma menciona que la sumatoria de dichos óxidos debe ser mayor a 70% para que las cenizas sean consideradas puzolanas.

3.3.1.7. Pruebas de IAR de la CCC, CHP, CBC y CV

Para obtener el Índice de Actividad Resistente (IAR) también llamado Índice de Actividad Puzolánica de estas cenizas, se elaboraron cubos de mortero de 5 cm de lado utilizando arena sílica estándar de Ottawa ASTM C 778-02. Originalmente se siguió el procedimiento de la norma ASTM C311-04, la cual establece para el diseño de mezclas que los especímenes control se elaboran con 2.75 partes de arena por una de cemento y una relación agua/cementantes de 0.485, la cual se modifica hasta alcanzar una fluidez de 110 \pm 5% y para las mezclas con puzolana se mantienen estas proporciones reemplazando un 20% de cemento por puzolana.

Al elaborar las mezclas con una relación agua/cementantes de 0.485 se observó que la fluidez alcanzada fue mucho menor que la especificada (35%) y que la pasta no cubría completamente las partículas de arena, por lo que se disminuyó la cantidad de arena hasta alcanzar la fluidez de 110 \pm 5% manteniendo en lo posible la relación agua/cementantes de 0.485. En la Tabla 3.6 se muestra el diseño de mezclas utilizado.

Tabla 3.6. Diseño de mezclas preliminar para obtener el IAR de CCC y CHP (relación agua/cementantes constante)

<i>Parámetro</i>	ASTM C311-04	<i>control</i>	<i>CHP</i>	<i>CCC</i>
Cemento	80%	100%	80%	80%
Puzolana	20%		20%	20%
Relación agua/cementantes	0.485	0.485	0.514	0.485
Relación arena/cementantes	2.75	1.90	1.60	1.97
Fluidez (%)	110±5	111	108	110

Posteriormente se elaboraron nuevas mezclas para la CCC, CHP, CBCs y CV, pero ahora manteniendo la relación arena/cementantes y fluidez de la mezcla. Al elaborar las mezclas con una relación agua/cementantes de 0.485 se observó que la fluidez alcanzada fue mucho menor (50%), por lo que se incrementó la cantidad de agua hasta alcanzar la fluidez de 110 ±5%. En la Tabla 3.7 se muestra el diseño de mezclas utilizado.

Tabla 3.7. Diseño de mezclas para IAR de de CCC, CHP, CBCs y CV (relación arena/cemento constante)

<i>Parámetro</i>	ASTM C311-04	Control	<i>CCC</i>	<i>CHP</i>	CBC cribada			CBC molida			C.V.
					#8	#100	#200	#8 M	#100 M	#200 M	
Cemento	80%	100%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Puzolana	20%	0%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Relación agua/cementantes	0.485	0.57	0.60	0.66	0.72	0.69	0.68	0.69	0.65	0.65	0.56
Relación arena/cementantes	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Fluidez (%)	110±5	115	105	105	110	110	115	105	115	105	115

Con cada mezcla se elaboraron cubos para ser ensayados a 7, 14 y 28 días con 3 réplicas para cada edad, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 109-05 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50-mm Cube Specimens)”. Los cubos fueron curados en una solución de hidróxido de calcio hasta el momento de su ensayo, mismo que se llevó a cabo con una prensa hidráulica ELVEC E

659-5. En la Figura 3.10 se muestran cubos después de ser desmoldados y marcados y en la Figura 3.11 el arreglo para el ensayo a compresión de un cubo de mortero.



Fig.3.10. Cubos después de ser desmoldados y marcados.



Fig.3.11. Ensayo a compresión para determinar IARs

3.3.2. Métodos utilizados en la fase 2

3.3.2.1. Preparación de especímenes y exposición al ambiente simulado para el estudio de la corrosión

3.3.2.1.1. Preparación de especímenes para la prueba de corrosión

Se elaboraron 30 placas de ferrocemento de 25 x 20 x 3 cm para el estudio de la corrosión. Estas placas fueron coladas en moldes fabricados con madera de pino pintados con esmalte acrílico. El refuerzo que se incluyó consistió en una sección rectangular de 21 x 16 cm con doble capa de malla de acero galvanizado de 1/2". Dicha malla se conectó con un cable de cobre calibre no. 14 para realizar la pruebas de potenciales de corrosión y RPL. Se aplicaron tres capas de pintura epóxica en la unión del cable con la malla para prevenir la corrosión galvánica (Figura 3.12a). La malla de refuerzo fue posicionada con ayuda de nueve tensores de cuerda de nylon de 0.5 mm de diámetro de manera paralela y centrada en los tres ejes (Figura 3.12b). Antes de aplicar el acabado final sobre la mezcla de mortero en las placas recién coladas, se retiraron las cuerdas de nylon y se vibró para cerrar los conductos dejados por éstas. No se colocó un contraelectrodo de acero inoxidable en el interior de las placas ya que no es factible colocarlo en especímenes tan delgados, por lo que se utilizó uno externo. Para elegir este arreglo se diseñó un experimento previo en el

que se evaluó la correlación de 56 lecturas de velocidad de corrosión (RPL) en 8 especímenes de concreto con contraelectrodo interno y 56 lecturas para los mismos especímenes utilizando un contraelectrodo externo, el coeficiente de determinación obtenido fue de 0.99 por lo que se concluyó que podría utilizarse el contraelectrodo externo.

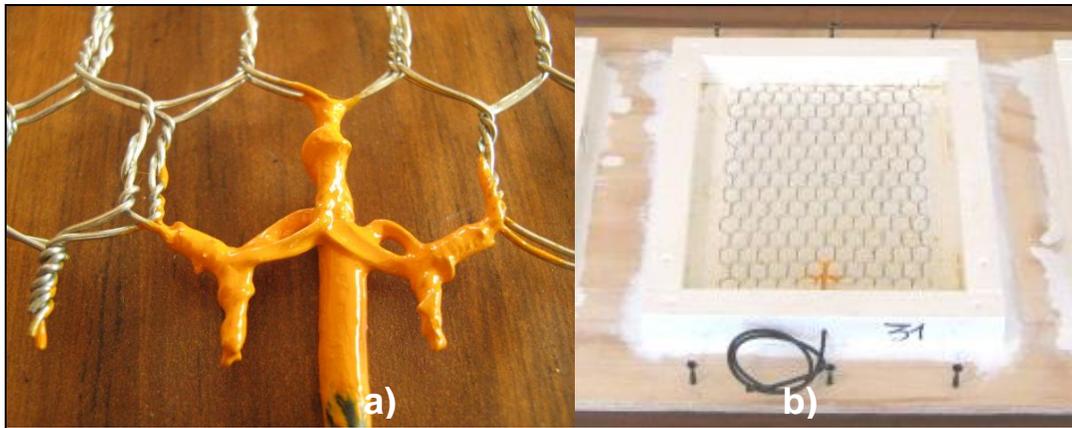


Fig.3.12. a) Pintura epóxica en conexión de malla galvanizada, b) Refuerzo de malla galvanizada.

3.3.2.1.2. Acondicionamiento del ambiente simulado para acelerar la corrosión

Para acelerar la corrosión, las placas de ferrocemento se sometieron a un ambiente agresivo simulado que consistió en ciclos diarios de mojado en una solución de cloruro de sodio al 3% y secado al ambiente (Figura 3.13). Para tal propósito se habilitó un sistema en el que las placas se encontraban sumergidas durante el día en una tina con la solución mencionada, en la noche se vaciaba la solución para que las placas comenzaran su ciclo de secado y en la mañana se bombeaba nuevamente a la tina donde se encontraban las placas. Las placas de ferrocemento se colocaron sobre bases de plástico que permitieron drenar completamente el agua y las mantuvo por encima de la solución que no alcanzaba a salir por la válvula de desagüe, esto con el objeto de evitar el efecto pabulo. Se colocaron dos HOBOS; uno para monitorear la temperatura de la solución de los especímenes de ferrocemento y el otro para la temperatura y humedad del recinto.



Fig.3.13. Acondicionamiento de ambiente agresivo simulado

3.3.2.2. Diseño de mezclas

Como se mencionó en el diseño del experimento cada mezcla de mortero se diseñó para mantener la relación agua/cementantes y extensibilidad constantes ($110 \pm 5\%$), por lo que se varió el contenido del aditivo súperplastificante. En la Tabla 3.8 se presenta el proporcionamiento de materiales empleado.

Tabla 3.8. Proporcionamiento de materiales de mezclas de mortero (por m^3).

<i>Mezcla</i>	<i>Cemento</i> (kg)	<i>CBC200</i> (kg)	<i>CV</i> (kg)	<i>Agua</i> (kg)	<i>Arena</i> (kg)	<i>Aditivo</i> (ml/kg)*	<i>a/c</i>
0% CBC	466.0	0	0	293.6	1397.9	0	0.63
10% CBC	416.8	46.3	0	291.8	1389.5	9.0	0.63
20% CBC	368.3	92.1	0	290.0	1381.2	17.0	0.63
CV (20%)	369.1	0	92.3	290.6	1384.0	0	0.63

*El aditivo se dosificó en ml/kg de cementantes (cemento + puzolana)

En el Anexo I puede consultarse la dosificación de materiales empleada para cada mezcla elaborada.

3.3.2.3. Pruebas en estado fresco a las mezclas de mortero

Se realizaron pruebas en estado fresco a cada mezcla elaborada con el objeto de verificar lo planeado en el diseño de mezclas y poder explicar en caso de ser necesario su comportamiento en estado endurecido. Se realizaron pruebas de temperatura de la mezcla, fluidez (extensibilidad), peso volumétrico y contenido de aire (Figura 3.14), todas ellas de acuerdo a las normas de la ASTM.



Fig.3.14. Pruebas en estado fresco: a) temperatura, b) fluidez, c) peso volumétrico y d) contenido de aire.

3.3.2.4. Prueba de resistencia a la compresión

Mediante esta prueba destructiva se obtuvo la resistencia a la compresión al momento de la falla de cilindros de mortero de 7.5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Ésta se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C191-04b-2004 (Método de Prueba para la Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico). La estimación de la resistencia a la compresión de los cilindros se hizo a edades de 3, 7, 14, 28 y 90 días de edad. Para el cabeceo de especímenes se utilizó el sistema de bases metálicas y cojinetes de neopreno de 1/2 pulgada. En la Figura 3.15 se muestra un cilindro antes de ser ensayado, y se observa que la base metálica superior apoyada sobre el cilindro cuenta con una placa circular, ésta fue diseñada de tal manera para facilitar el centrado del cilindro y lograr que el esfuerzo generado fuera lo más cercano al esfuerzo de compresión puro.



Fig.3.15. Ensayo de resistencia a la compresión.

3.3.2.5. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico

Esta prueba se realizó diariamente durante 90 días hasta la destrucción de los cilindros de la prueba anterior. Se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C 597-02 (Método de Prueba para la Velocidad de Pulso en Concreto) y se utilizó para su realización un equipo PUNDIT (Equipo Portátil de Ensaye Ultrasónico No Destructivo de Indicación Digital). En la Figura 3.16 se observa el PUNDIT y el arreglo utilizado para el ensayo de un cilindro el cual descansaba sobre una base de madera diseñada para facilitar las lecturas y posicionar los transductores en los centros de las caras del mismo.

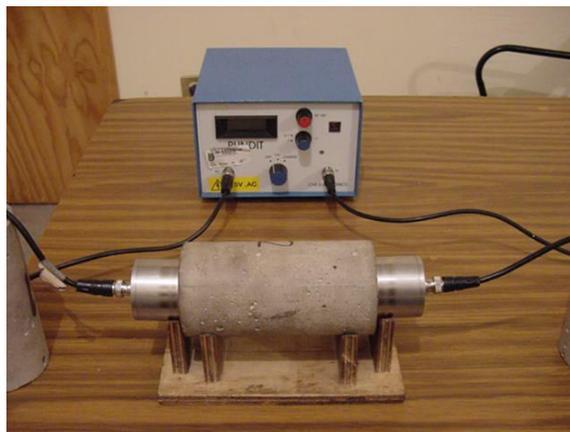


Fig.3.16. Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico

3.3.2.6. Prueba de difusión de cloruros

La prueba de difusión de cloruros se realizó en cilindros de mortero de 0.10 m de diámetro y 0.20 m de alto por cumplir con los estándares de reproducibilidad de acuerdo a las normas existentes. La prueba se llevó a cabo bajo el procedimiento establecido en la norma NT BUILD 443 (Concreto endurecido: Penetración acelerada de cloruros), y para la determinación de las concentraciones de cloruros la norma NT BUILD 208 (Concreto endurecido: Prueba de Titulación de Volhard para contenido de cloruros).

El procedimiento en forma general consistió en cortar los cilindros de mortero por la mitad (Figura 3.17, a) terminado su periodo de maduración de 28 días (en éste periodo los especímenes recibieron los distintos tiempos de curado correspondientes), inmediatamente después se embolsó una de las mitades para evitar su contaminación, a la otra mitad se aplicaron 3 capas de pintura epóxica dejando solo descubierta una de la caras circulares. La mitad del cilindro que se embolsó sirvió para calcular el contenido de cloruros en la mezcla de mortero sin someterse a la contaminación inducida (concentración de cloruros inicial). La otra mitad se sumergió en una solución de hidróxido de calcio puro saturada hasta que su peso no varió en más de 0.5% respecto al día anterior.

Una vez conseguida la condición de saturación de los especímenes, se sometieron al periodo de contaminación en una solución de cloruro de sodio puro con una concentración al 14.16% durante 35 días.

Cuando el periodo de contaminación terminó se extrajeron polvos de 10 capas de 2 mm de espesor cada una (con ayuda del equipo Profile Grinder, metabo, Figura 3.17, b) y una capa de 2 mm de espesor de las mitades embolsadas que no se sometieron a contaminación.

De los polvos extraídos se determinó el contenido de cloruros (Figura 3.17, c). Con estos contenidos de cloruros se graficó un perfil de penetración de cloruros y se calculó el coeficiente de difusión de cloruros con ayuda del software Table Curve 5.01®.



Fig.3.17. Prueba de difusión de cloruros: a) corte de cilindros, b) extracción de polvos y c) determinación de contenido de cloruros

3.3.2.7. Inspección Visual

Esta prueba tuvo como objetivo evidenciar físicamente el inicio y progreso de la corrosión de las placas de ferrocemento. Para esto se buscaron principalmente manchas de óxido, grietas y desconchamientos. En la Figura 3.18 se observa la apariencia de algunas de las placas de ferrocemento antes de ser sometidas al ambiente agresivo simulado.



Fig.3.18. Placas de ferrocemento antes de someterse al ambiente agresivo simulado.

3.3.2.8. Prueba de potenciales de corrosión

Esta prueba se llevó a cabo diariamente en las 30 placas de ferrocemento mientras se encontraban en el ciclo de mojado y se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 876-91 (Método de Prueba para Potenciales de Media-Celda del Acero de Refuerzo en Concreto),

para lo cual se utilizó de una media celda de plata-cloruro de plata y un voltímetro digital de alta impedancia marca Mc Miller (Figura 3.19).

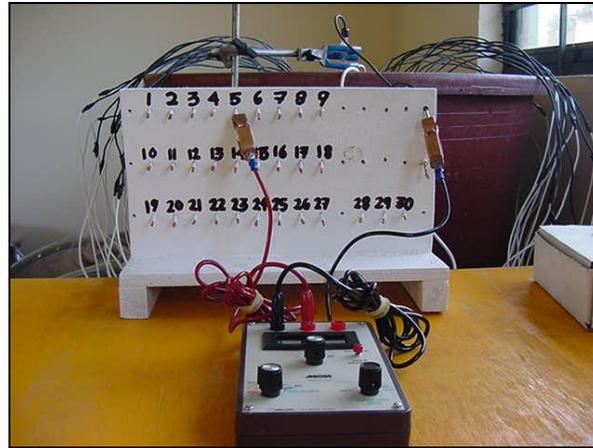


Fig.3.19. Prueba de potenciales de corrosión.

3.3.2.9. Prueba de resistencia a la polarización lineal (RPL)

A diferencia de las pruebas de potenciales de corrosión, las pruebas de RPL en las 30 placas de ferrocemento se llevaron a cabo semanalmente para minimizar la perturbación del sistema bajo estudio. Dichas pruebas se efectuaron mientras se encontraban las probetas en el ciclo de mojado, con el objeto de aprovechar la conductividad eléctrica de la solución salina.

Para realizar la prueba de RPL se conectaba el Potenciostato al cable que hace contacto internamente con la malla de refuerzo de la placa de ferrocemento (electrodo de trabajo), a una varilla de acero inoxidable (contraelectrodo) y a una media celda de plata-cloruro de plata (electrodo de referencia) que se colocaba en la solución salina en que se encuentran inmersos los especímenes, tal como se muestra en el esquema representativo de la Figura 3.20. Cada prueba de RPL requirió de un tiempo de 7 minutos, posteriormente se utilizó el software Gamry Echem Analyst™ para determinar la densidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) de cada espécimen.

En la Figura 3.21 se observan las placas durante una prueba de RPL. Se conectaron extensiones de cable calibre no.18 (color blanco) a cada espécimen, los cuales llegan hasta

un tablero elaborado para facilitar la toma de lecturas de esta prueba y la de potenciales de corrosión.

La prueba se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM G 59-91 (Práctica Estándar para Realizar Medidas de Resistencia a la Polarización Potenciodinámica) y se utilizó para su realización el Equipo Gamry Serie G 300 Potenciostato/Galvanostato /ZRA.

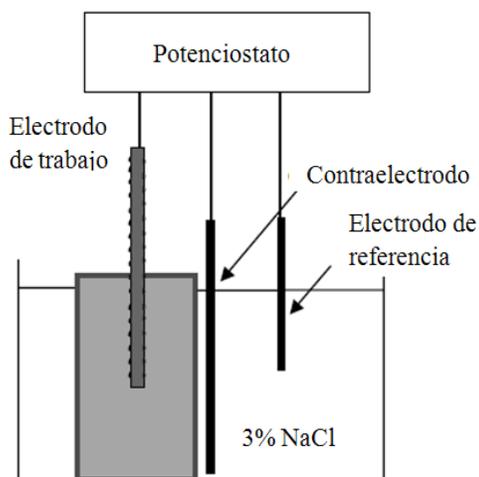


Fig. 3.20. Representación esquemática del arreglo para mediciones de RPL.

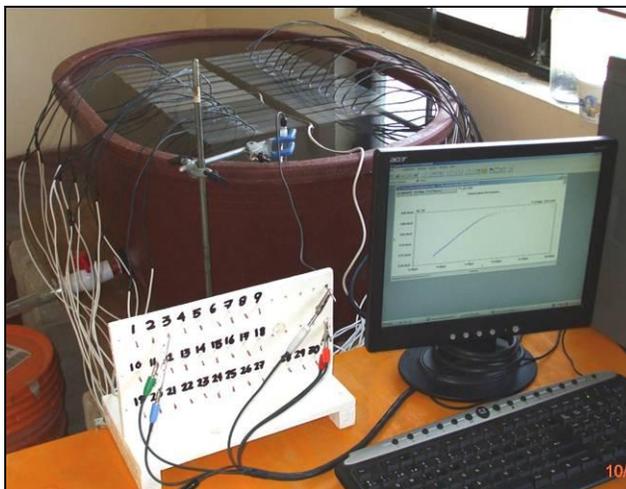


Fig.3.21. Prueba de RPL en placas de ferrocemento.

Ambas pruebas, potenciales y RPL se llevaron a cabo durante 170 días.

Para un estudio posterior de micrografías (MEB) se elaboraron cilindros adicionales para tomar muestras de todos los tratamientos a las edades de 3, 7, 14, 28 y 90 días. Estas muestras consisten en 44 rodajas de aproximadamente medio centímetro de espesor cortadas de cilindros de mortero de 7.5 cm de diámetro. Una vez cortadas se sumergieron en acetona para evitar que progresará la hidratación.

Adicionalmente se registraron la temperatura y humedad relativa del aire del espacio de almacenamiento y maduración de todos los especímenes elaborados en este estudio; se registró también la temperatura del micro ambiente agresivo simulado donde fueron colocados los especímenes de ferrocemento. La medición y registro fue hecho y se continúa haciendo con dos HOBOS (instrumentos electrónicos con memoria interna que miden y registran temperatura y humedad relativa) a intervalos de 10 min. Estos datos servirán para futuros trabajos, donde se correlacionarán los valores de humedad y temperatura con las variables de corrosión.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados de fase 1

4.1.1. Resultados de composición química

En la Tabla 4.1 se muestran los valores de densidad y contenido de los principales óxidos presentes en la CCC, CHP, CBC y CV, también se muestran los requisitos establecidos en la norma ASTM C618-05 para los tres tipos de puzolana que ésta considera. Clase N, puzolanas naturales crudas o calcinadas, Clase F, cenizas volantes generalmente producidas de la quema de carbones antracíticos o bituminosos con propiedades puzolánicas y Clase C; cenizas volantes generalmente producidas de la quema de carbones ligníticos o subbituminosos con propiedades puzolánicas y algunas cementantes.

Tabla 4.1. Resultados de composición química y densidad de CCC, CHP, CBC y CV.

Elemento/ Compuesto	ASTM C618-05			CCC %	CHP %	CBC %	CV %
	N	F	C				
Al₂O₃				1.93	8.97	9.92	23.28
CaO		<10	>10	7.07	10.59	2.59	5.47
Fe₂O₃				0.84	3.00	2.32	4.44
K₂O				22.97	1.48	2.10	0.95
MgO				6.06	5.54	1.44	1.37
Na₂O				2.97	1.39	1.23	0.62
P ₂ O ₅				6.36	1.63	0.90	0.30
PxC	10	6	6	32.05	12.77	24.15	3.69
SiO₂				17.69	50.70	51.66	58.02
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	70	70	50	20.46	62.67	63.90	85.74
Densidad				2.83	2.42	2.19	2.27

Se observa que la CCC presenta los contenidos de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ más bajos, obteniendo una suma de 20.46% de dichos óxidos, también muestra un elevado contenido de álcalis con un 22.97% de K₂O. Cabe mencionar que porcentajes muy altos de este álcali parecieran afectar la resistencia a la compresión, aunque no es posible asegurarlo ya que

este fenómeno no ha sido estudiado en detalle, por lo que la tendencia que se ha marcado es simplemente disminuir las cantidades presentes del mismo en las puzolanas. La CCC presenta altas pérdidas por calcinación, lo cual no es adecuado para concretos que requieren inclusión de aire ya que el carbón inhibe la formación de burbujas.

En general los resultados de composición química obtenidos de las CCC difieren con la mayoría de los antecedentes revisados (Awal, 1997, Sata, 2006, Jaturapitakkul, 2007, Chindaprasirt, 2007 y Rukzon, 2008), probablemente porque las cenizas recibieron algún tratamiento que no se menciona.

La suma de óxidos mayores para la CHP fue de 62.67% y obtuvo un 10.59% de CaO, con lo cual se podría clasificar como puzolana clase C (Tabla 4.1) si se disminuyeran las pérdidas por calcinación (12.77%) a menos de 6%, lo cual se podría alcanzar mejorando el proceso de quemado. En general los porcentajes de los principales óxidos de la CHP fueron adecuados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM C618-05.

La suma de óxidos de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ para la CBC fue de 63.90% y obtuvo un 2.59% de CaO, con lo cual podría clasificar como puzolana clase F (Tabla 4.1) si se disminuyeran las pérdidas por calcinación (24.15%) a menos de 6%, lo cual también se podría alcanzar mejorando el proceso de quemado. Con excepción de las pérdidas por calcinación los porcentajes de los principales óxidos de la CBC fueron adecuados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM C618-05.

La ceniza volante utilizada presenta en la suma de óxidos SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ un 85.74%, un 5.47% de CaO y 3.69% de pérdidas por calcinación, con lo cual se verifica que es una puzolana de clase F. La CBC presenta valores altos de pérdidas por calcinación debido a que en el proceso de quemado se presenta una combustión incompleta, probablemente por un suministro insuficiente de oxígeno. Por lo tanto, deberá ponerse atención a cómo afecta este elevado contenido de carbón en el desarrollo de la reacción puzolánica, ya que en la literatura se reportan trabajos con CBC con mayor tratamiento, donde las pérdidas por

calcinación generalmente son menores al 5 % (Martirena, 2006, Ganesan, 2007, Cordeiro, 2008).

Se observa que la CHP tiene una composición química un poco más favorable que la CBC ya que presenta menores pérdidas por calcinación y mayor contenido de CaO; sin embargo, deberá considerarse la viabilidad para su uso tomando en cuenta también los resultados de IAR y su disponibilidad.

4.1.2. Resultados de IAR

A continuación se presenta en la Figura 4.1 los resultados de IARs a 7, 14 y 28 días de la CBC8, CBC100, CBC200, CBC8m, CBC100m, CBC200m. La tendencia general que se observa, es que el IAR de la CBC se incrementa al reducirse el tamaño de partícula (no mayor de tamiz), ser molida y a mayor edad. Por ejemplo, se esperaría que la CBC con menores IARs fuese la que se cribó únicamente por la malla no.4 y no se molió, lo cual así sucedió, ya que sus IARs a 7, 14 y 28 días no superan el 55%; y se esperaría que la CBC con mayores IARs fuese la que se cribó en tamiz no. 200 y fue molida, lo cual también sucedió así, por lo que presentó valores de IAR entre el 90 y 95 % a 7 y 28 días.

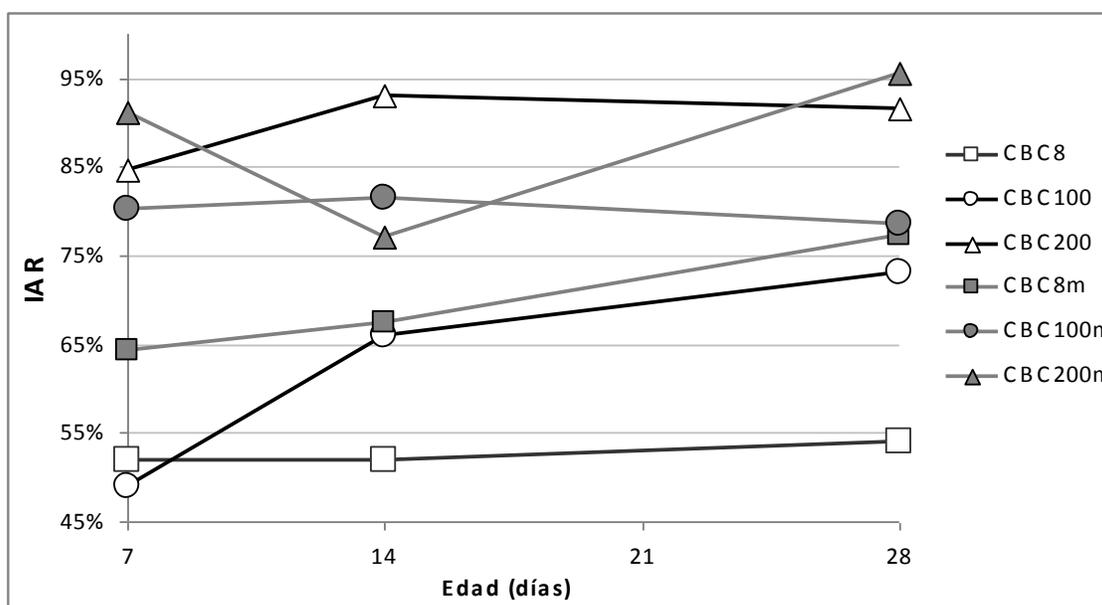


Fig.4.1. IARs a 7, 14 y 28 días de edad de las CBCs

Estas tendencias corroboran el conocimiento, sobre que una ceniza mejora su IAR cuando tiene un menor tamaño de partícula y menores contenidos de carbón. Al cribar la ceniza se está disminuyendo el tamaño de partícula y se está disminuyendo el contenido de carbón de la misma, ya que el mayor contenido de carbón se encuentra en las partículas de mayor tamaño; al molerla solo se disminuye su tamaño de partícula.

Los dos tratamientos con mayor IAR son los de la CBC200 y la CBC200m. Debido a que no existe mucha diferencia en los IARs a 7 y 28 días (edades que especifica la norma) entre estas dos, y a que el molido implica un consumo adicional de energía, se opta por seleccionar la ceniza CBC200 para ser comparada contra la CCC y CHP y elegir una de éstas para la fase 2 del experimento.

En la Figura 4.2 se muestran los IARs de la CBC200, CCC, CHP y CV. En ésta se observa que los IARs de la CCC son muy bajos como para poder utilizarla como puzolana. Ésta disminución tan considerable en la resistencia en las mezclas con CCC podría deberse además de su bajo contenido de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) al elevado contenido de K_2O (Tabla 4.1).

Se observa que los IARs de la CHP a 7 y 28 días son prometedores ya que superan el 75%. La CHP podría utilizarse como puzolana; sin embargo, no existe a la fecha alguna actividad donde se genere suficiente CHP de la utilización de la hoja de pino como combustible.

La CBC200 presenta IARs a 7, 14 y 28 días superiores al 75%, y es superada solo por la CV. Se observa que la CV tiene un IAR a 28 días superior al 100%, lo cual corresponde con la literatura.

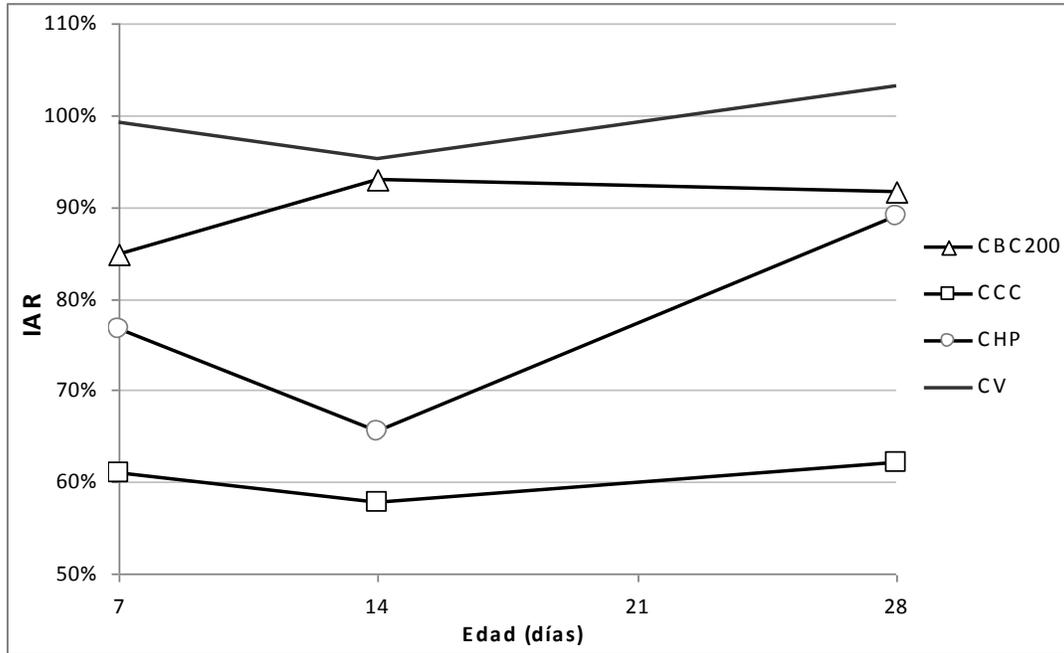


Fig.4.2. IARs a 7, 14 y 28 días de edad de la CCC, CHP, CBC200 y CV

Debido a que la **CBC200** tiene los mejores IARs de las tres cenizas analizadas y existe en grandes cantidades de las cuales se puede disponer en la industria azucarera y del etanol, se selecciona como material puzolánico de desperdicio agrícola para trabajar en la fase 2 del experimento. En lo sucesivo se le nombrará CBC a la CBC200.

4.2. Resultados de fase 2

4.2.1. Propiedades del mortero en estado fresco

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de las pruebas en estado fresco que fueron realizadas a todas las mezclas de mortero, se muestran los promedios de las pruebas de fluidez, peso volumétrico, contenido de aire y temperatura.

Los resultados de la prueba de fluidez indican que todas las mezclas elaboradas cumplieron satisfactoriamente con la fluidez de diseño considerada en el proporcionamiento de materiales de este experimento (105-115%). La norma ASTM C311-04, propone que una fluidez de $110\pm 5\%$, dará como resultado una mezcla de mortero cohesiva y trabajable y con poca o nula segregación, lo cual pudo verificarse en todas las mezclas realizadas. Como se mencionó en la metodología, para mantener una fluidez constante utilizando la misma relación agua/cementantes (0.63), fue necesario incorporar un aditivo hiperfluidificante. Para la mezcla 0%CBC y CV(20%) no se requirió el uso de dicho aditivo; sin embargo, en las mezclas que demandaron más agua como la 10%CBC fue necesario adicionar 9 ml de aditivo por kilogramo de cementantes y 17 ml para la mezcla 20%CBC (Tabla 3.8, página 70).

El incremento en la demanda de agua en las mezclas con CBC se debe a que ésta como otras cenizas son de naturaleza higroscópica, también su forma irregular permite que haya un gran porcentaje de vacíos, los cuales deben llenarse primero con agua para que las partículas puedan fluir. Ganesan reporta un incremento de hasta 53% en la demanda de agua de pastas de cemento con consistencia normal cuando se reemplazo 20% de cemento por CBC (Ganesan et al., 2007). En contraste con la CBC, la CV está constituida por partículas esféricas que actúan como lubricante del cemento denominado como “efecto cojinete de esferas”, por lo que pueden disminuir la demanda de agua sobre todo en relaciones a/c bajas (Neville, 1995).

El incremento en la demanda de agua en la mezcla 20% CBC fue de un 20%, es decir habría sido necesaria una relación a/c de 0.76 para lograr la fluidez requerida. La cantidad de aditivo hiperfluidificante incorporado para esta mezcla excede la máxima cantidad recomendada por la ficha técnica del producto (15 ml/Kg); sin embargo, la literatura reporta el uso de dosis mayores de hiperfluidificantes sin que se presenten efectos secundarios adversos. Se sabe que la eficacia de algunos aditivos químicos es disminuida por algunas características de las adiciones minerales, tales como contenido de carbón, pérdidas por ignición, álcalis solubles, entre otras (Neville, 1995, Cordeiro et al., 2009). Para el caso de los superplastificantes e hiperfluidificantes, éstos disminuyen su eficacia en mezclas con relaciones agua cemento medias y altas (Neville, 1995).

Durante el mezclado y colado de los especímenes no se observaron pérdidas de trabajabilidad excesivas en las mezclas que contenían aditivo, por lo que puede inferirse que existe compatibilidad entre el cemento (CPC TOLTECA 30) y la CBC200 con el aditivo hiperfluidificante PLASTOL 4000 EUCO.

Tabla 4.2. Propiedades en estado fresco de mezclas de mortero.

Mezcla	Fluidez (%)	Peso volumétrico (Kg/m ³)	Contenido de aire (%)	Temperatura (°C)
0% CBC	110.3	2.123	2.20	22.9
10% CBC	113.8	2.085	3.27	24.1
20% CBC	107.9	2.070	3.83	25.8
CV (20%)	107.5	2.070	2.20	24.6

Los pesos volumétricos obtenidos mediante prueba, presentados en la Tabla 5.3, son similares a los pesos volumétricos calculados. Puede observarse que conforme se incrementa el nivel de puzolana el peso volumétrico disminuye, lo cual es congruente, ya que estas adiciones tienen una menor densidad que el cemento.

La literatura menciona que concretos sin aire incluido deben tener de 1 a 3% de éste, el cual se encontrará ubicado en la pasta de cemento (Kosmatka et al., 2004), por esta razón al eliminar el agregado grueso, como en el caso de morteros, se incrementa la proporción de pasta de cemento y con ello también el contenido de aire.

El contenido de aire de las mezclas 10%CBC y 20%CBC fue 1.07% y 1.63% mayor que el de las mezclas 0%CBC y CV(20%) respectivamente. Se menciona que el uso de aditivos hiperfluidificantes pueden incrementar el contenido de aire en presencia de aditivos inclusores de aire, o pueden hacerlo por sí mismos sin estos últimos. Sin embargo, para el caso específico de hiperfluidificantes a base de policarboxilatos, el porcentaje de aire adicional incluido no excede el 0.3% (Rixom y Mailvaganam, 1999). No obstante, no puede descartarse la posibilidad de que la mayor cantidad de aire presente en las mezclas con CBC y aditivo se deba a una interacción entre éstos. Otra explicación posible es que este contenido adicional de aire corresponda a vacíos que queden en las partículas de CBC.

Finalmente, en la Tabla 4.2 se presentan las temperaturas promedio registradas a intervalos de 10 min durante una hora a partir del mezclado. Las variaciones observadas en las temperaturas son insignificantes, considerando que no se mezcló a temperatura controlada, por lo que no se espera algún efecto significativo en las variables respuesta en estado endurecido.

4.2.2. Resultados del mortero en estado endurecido

4.2.2.1. Resistencia a la compresión

A continuación se presentan en las Figuras 4.3 a 4.7 los resultados de resistencia a la compresión a las edades de 3, 7, 14, 28 y 90 días, de todas las mezclas con los 3 niveles de tiempo de curado estudiados en este trabajo.

Se observa que la resistencia a la compresión se incrementa con la edad, tal como se reporta en la literatura (Neville, 1995, Metha et al., 1998, Kosmatka et al., 2004).

En lo referente al efecto de la adición de CBC200, puede observarse de manera general que conforme se incrementa el contenido de ésta, disminuye ligeramente la resistencia a compresión.

A la edad de 7 días, las mezclas 10%CBC y 20%CBC que carecieron de curado por inmersión, presentaron una disminución de resistencia respecto al control (mezcla 0%CBC) de 3% y 25% respectivamente. A esta misma edad las mezclas 10%CBC, 20%CBC y CV(20%), curadas por inmersión durante 7 días, presentaron una disminución de resistencia respecto al control de 5%, 31% y 33% respectivamente. La resistencia a 7 días es importante porque es el tiempo que se recomienda para permanencia de las cimbras.

A 28 días de edad, las mezclas 10%CBC y 20%CBC que carecieron de curado, presentaron una disminución de resistencia respecto al control de 13% y 24% respectivamente. A esta misma edad las mezclas 10%CBC y 20%CBC, curadas durante 7 días, presentaron una disminución de resistencia respecto al control de 3% y 11% respectivamente. Por otra parte las mezclas 10%CBC, 20%CBC y CV(20%), curadas durante 28 días, presentaron un incremento de resistencia respecto al control de 3%, y una disminución de 11% y 22% respectivamente. La resistencia a 28 días, es utilizada universalmente como parámetro de diseño y control de calidad ($F'c$).

Finalmente a 90 días de edad, las mezclas 10%CBC y 20%CBC que carecieron de curado, presentaron una disminución de resistencia respecto al control de 17% y 28% respectivamente. A si mismo las mezclas 10%CBC y 20%CBC, curadas durante 7 días, presentaron una disminución de resistencia respecto al control de 6% y 22% respectivamente. Por último, las mezclas 10%CBC, 20%CBC y CV(20%), curadas durante 28 días, presentaron una disminución de resistencia respecto al control de 0%, 13% y 15% respectivamente. El conocimiento de la resistencia a 90 días da un indicativo del rumbo que tomará el desarrollo de resistencia a largo plazo, y es útil para prever efectos adversos como el fenómeno de regresión de resistencia.

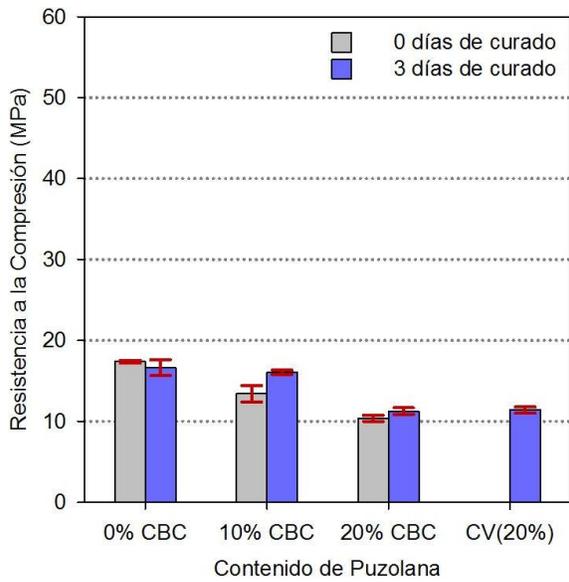


Fig.4.3. Resistencia a la compresión a 3 días de edad.

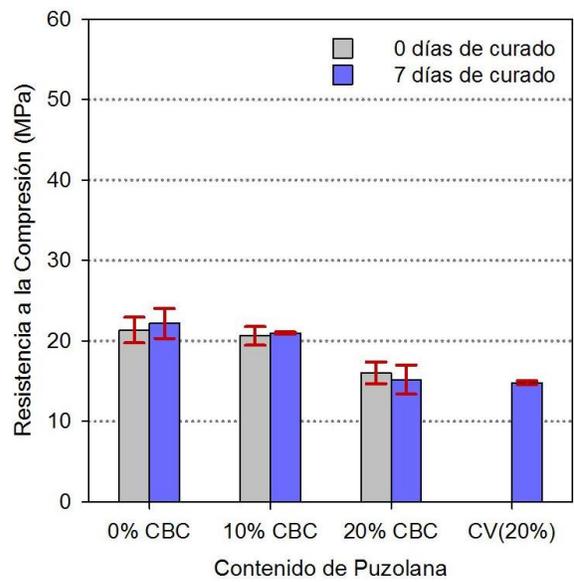


Fig.4.4. Resistencia a la compresión a 7 días de edad.

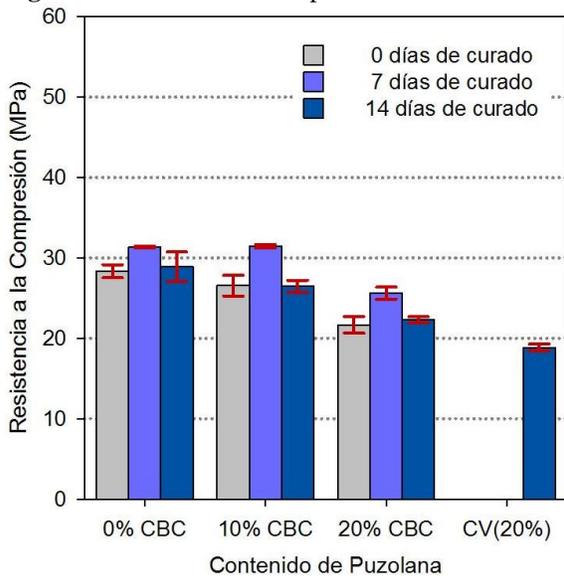


Fig.4.5. Resistencia a la compresión a 14 días de edad.

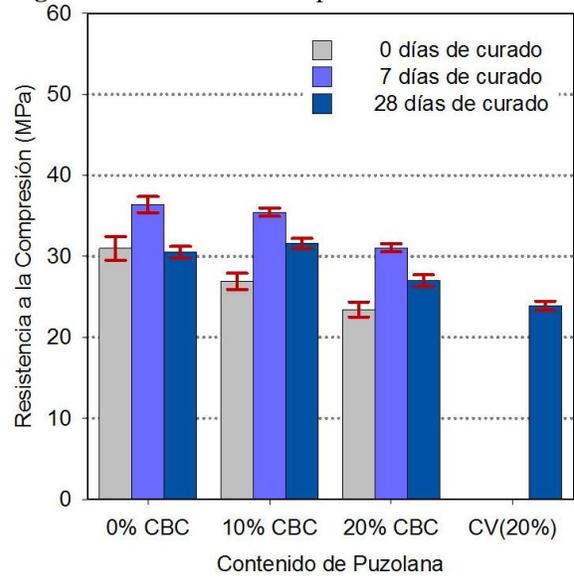


Fig.4.6. Resistencia a la compresión a 28 días de edad.

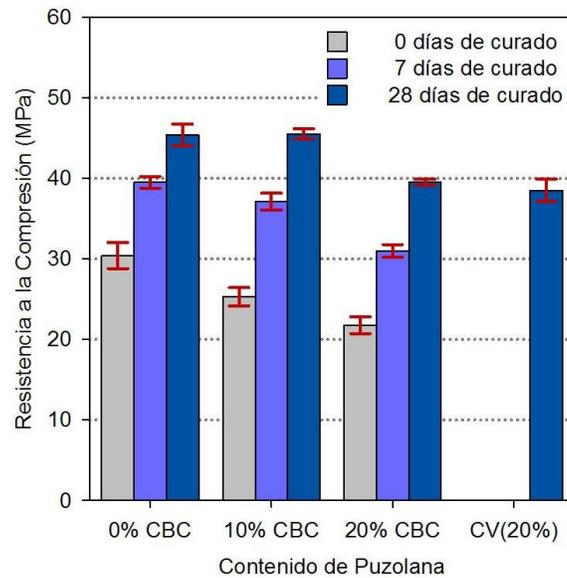


Fig.4.7. Resistencia a la compresión a 90 días de edad.

Recordando lo presentado en la sección de antecedentes, la eficacia de una puzolana de origen agrícola en términos de densificación de la matriz y desarrollo de resistencia, depende de la temperatura y tiempo de quemado, y tratamientos posteriores como el molido y cribado. De la composición química y la eficacia del quemado dependen los contenidos finales de óxidos de la ceniza (Villar-Cociña et al., 2003, Frías et al., 2005, Martirena et al., 2006 Cordeiro et al., 2008).

Para analizar los resultados obtenidos, éstos se comparan en términos de IAR con otras investigaciones realizadas donde se utilizó CBC. En la Tabla 4.3 se presentan IARs de CBC de otras investigaciones y los IARs de la CBC estudiada en este trabajo.

Tabla 4.3. Comparativo de IARs de CBC con otras investigaciones

Autor	Material	% de CBC	Índice de Actividad Resistente			
			7	14	28	90
Hernández, 2009	mortero	10	94.6%	91.6%	103.5%	100.3%
		20	68.5%	77.2%	88.5%	87.0%
Ganesan et al. (2007)	mortero	10	124%		118%	
		concreto	10	121%	130%	122%
	concreto	20	99%		98%	
		20	118%	112%	111%	106%
Águila et al. (2008)	mortero	20	41%		39%	
Cordeiro et al. (2009)	concreto	20			95%	

Para un nivel de sustitución del 10% y curado mayor a 0 días, la CBC parece no afectar significativamente la resistencia en ninguna de las edades estudiadas, ya que los IARs se mantienen superiores al 90% (posteriormente se discutirá el efecto del tiempo de curado). Sin embargo, se observa en la Tabla 4.3 que el mortero y concreto de Ganesan con el mismo nivel de sustitución tiene incrementos en la resistencia de considerable importancia a edades de 7 a 90 días, obteniendo IARs que van de 117 a 130%.

Cuando se utiliza un nivel de sustitución del 20% y curado mayor a 0 días, se observa un efecto negativo en el desarrollo de resistencia para la CBC, por lo que los IARs se mantienen entre 70 y 90%, mientras que en los morteros y concretos de Ganesan y Cordeiro los IARs se encuentran entre 95 y 118%.

El desempeño mostrado de la CBC y la CBC de otros trabajos en términos de IAR, además de las características de la mezcla (relación a/c, proporción de agregados, fluidez, es función de las características físico-químicas de la CBC. En la Tabla 4.4 se muestran algunas de estas características que tienen mayor influencia en el IAR.

La CBC cuenta con una temperatura adecuada de quemado (550-700 °C), lo cual favorece que la sílice presente, sea predominantemente amorfa y pueda reaccionar con el hidróxido de calcio liberado de las reacciones de hidratación del cemento. La sumatoria de los óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ está cercana al valor de referencia que orienta hacia la selección de posibles puzolanas (70%). El contenido de Ca puede aportar reactividad, en el caso de la CBC el contenido es insignificante. Las pérdidas por calcinación están compuestas principalmente de carbón, cuando el contenido de éste aumenta, afecta disminuyendo el contenido de los otros óxidos benéficos, además, el introducirlo en la pasta de cemento disminuye la resistencia como lo hace el contenido de aire por tener muy baja resistencia mecánica y se observa que la CBC tiene un contenido de PxC muy alto. Finalmente el % retenido en la malla no. 325 (45 μm) es un indicativo de la fineza de las partículas, la fineza solo influye químicamente en la velocidad con que se lleva a cabo la reacción puzolánica (no en la magnitud final de ésta) y contribuye físicamente a mejorar el empaquetamiento de las partículas de cemento densificando la matriz de cemento, especialmente en la zona de

transición con los agregados. La CBC como se indicó en el diseño del experimento, es la CBC que pasó al 100% el tamiz no. 200(75 μ m), pero se observa en la Tabla 4.4 que un gran porcentaje (60%) es retenido en el tamiz no. 325, lo cual indica que el 60% de la partículas son mayores a 45 μ m. En este sentido comparada con otras CBCs, ésta tendrá una velocidad de reacción relativamente lenta, por esta razón después de los 7 días de edad los IARs se mantienen similares hasta los 90 días y no se presentan mayores en edades tempranas y medias como es el caso con CBCs más finas.

De esta manera se explican los IARs altos de la CBC utilizada por Ganesan. En el caso de la CBC utilizada por Cordeiro, puede ser que a pesar de que tiene un excelente contenido de óxidos y un tamaño de partícula muy fino, parte de la sílice se haya tornado cristalina por las temperaturas mayores de quemado (700-900°C).

Por otra parte, se observa que la adición de un 10% de CBC no afecta la resistencia a compresión, pero al adicionar 20% de la misma ya es visible una disminución de resistencia considerable. Este comportamiento se debe a que todas las adiciones minerales tienen efectos encontrados positivos y negativos en la resistencia a compresión y en muchas otras propiedades, y el tamaño de estos efectos varía en función del tipo y calidad de la adición y de la cantidad sustituida (Neville, 1995). Por ejemplo, la cantidad de adición hasta donde los efectos benéficos son mayores que los negativos para el desarrollo de la resistencia a compresión en concretos con ceniza volante es aproximadamente del 20% (Neville, 1995, Metha y Monteiro., 1998, Kosmatka et al., 2004). Así pues, no se debe olvidar que la CBC es una adición puzolánica que fue recolectada de un tiradero a cielo abierto donde se depositó sin ningún cuidado o control y que una vez recolectada se le dio un sencillo tratamiento de cribado. Por lo tanto, parece ser que en base a los resultados de resistencia a la compresión y con las características de las mezclas realizadas en este trabajo, la CBC tiene como límite apropiado una sustitución del 10%.

Tabla 4.4. Características físico-químicas de CBCs de relevancia para el IAR

	Temperatura de quemado (°C)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	Ca (%)	P xC (%)	Ret. en malla no. 325 (%)
CBC	700	63.9	2.59	24.15	“60”
CBC(Ganesan)	650	78.72	8.14	4.9	1%
CBC(Cordeiro)	700-900	90.5	2.15	0.42	0%
CBC(Águila)	-----	38.05	2.69	26.4	22.76%

A continuación se analizará el efecto que tuvo el tiempo de curado y la interacción de éste con el contenido de CBC en la resistencia a compresión.

“Las normas tanto británicas como de la ASTM requieren que todos los especímenes sean probados en una condición saturada. Esta condición tiene la ventaja de poderse reproducir mejor que una condición seca, la cual incluye grados ampliamente variables de sequedad” (Neville, 1995); sin embargo, no es posible aplicar esta recomendación si lo que se desea hacer es estudiar el efecto de tiempos de curado menores a las edades de prueba de resistencia a compresión, ya que inevitablemente, al terminar los periodos de curado, los especímenes comenzarán a secarse a partir de ese tiempo y hasta el momento en que sean ensayados. Para tales casos, los cuales han sido poco estudiados, como es el presente trabajo, debe considerarse además del efecto del tiempo curado, el efecto de la humedad en la resistencia a compresión.

En las Figuras 4.8 a 4.10 se presentan los resultados de resistencia a compresión agrupados de manera distinta en las Figuras 5.3 a 5.7, para resaltar el efecto del curado a distintas edades para cada mezcla, excluyendo únicamente a la CV(20%).

Debido que a la edad de 90 días todos los especímenes, independientemente del tiempo de curado, tuvieron un tiempo suficiente para secarse, se dará mayor énfasis a esta edad para ver el efecto del curado.

En la Fig. 4.8 se presenta la resistencia a la compresión de especímenes 0%CBC (mezcla control), en ésta se observa que la resistencia a 90 días de edad se incrementa considerablemente conforme se incrementa el tiempo de curado, lo cual concuerda con la

literatura: “Es indispensable curar el concreto y mortero para que las reacciones de hidratación puedan seguirse llevando a cabo en cemento aun sin hidratar, con esto, la matriz se densifica, se reducen poros y se incrementa la resistencia mecánica” (Neville, 1995, Metha y Monteiro, 1998,). La resistencia a compresión a 90 días de edad de especímenes con 7 y 0 días de curado es solo el 87% y 67 % respectivamente, de la resistencia de los especímenes curados durante 28 días.

En la Fig. 4.9 se presenta la resistencia a la compresión de especímenes con 10% CBC, se observa que al igual con la mezcla control, la resistencia a 90 días de edad se incrementa considerablemente conforme se incrementa el tiempo de curado. La resistencia en los especímenes curados 7 y 0 días es el 82% y 56% respectivamente la resistencia de los que fueron curados 28 días.

En la Fig. 4.10 se presenta la resistencia a la compresión de especímenes 20%CBC, se observa nuevamente que la resistencia a 90 días de edad se incrementa considerablemente conforme aumenta el tiempo de curado. La resistencia en los especímenes curados 7 y 0 días es el 78% y 55% respectivamente la resistencia de los que fueron curados 28 días.

Con base en lo anterior puede afirmarse que las disminuciones de resistencia, ocasionadas por el menor tiempo de curado, se incrementan con la cantidad de CBC adicionada. Esto también concuerda con lo mencionado en la literatura: El efecto del curado inadecuado sobre la resistencia, es mayor a relaciones agua/cemento altas, y también es mayor en concretos con una rapidez baja de desarrollo de resistencia, como es el caso de concretos elaborados con cemento tipo I , ceniza volante o escoria granulada de alto horno y la mayoría de adiciones puzolánica de acción lenta (Neville, 1995, Malhotra y Ramezani-pour, 1999, Atis et al., 2005, Atis y Bilim, 2007, Cakir y Aköz, 2008, Al-Gahtani, 2010).

Ahora bien, analizando las edades restantes, se observa en las Figuras 4.3 a 4.10 que en las edades de 3 y 7 días no se define claramente una tendencia por el efecto del curado, y no es posible identificar tampoco el efecto de la humedad de los especímenes ya que se necesita

de mayor tiempo para tener diferencias mayores en el contenido de humedad (por acción del secado al ambiente) entre los que fueron curados y los que no. En cambio a 14 y 28 días de edad puede identificarse la acción de ambos factores.

Se observa en las Figuras 4.5 y 4.6 que los mayores valores de resistencia a las edades de 14 y 28 días en todos los contenidos de CBC los presentan los especímenes curados por 7 días y no los de 28. Una explicación sugerida para esto, es que la humedad presente en un espécimen de prueba a compresión ocasiona la dilatación del gel de cemento por el agua adsorbida: entonces disminuyen las fuerzas de cohesión de las partículas sólidas. A la inversa, cuando durante el secado cesa la acción tipo cuña del agua, se registra un aumento evidente en la resistencia del espécimen. Se han registrado incrementos de resistencia de 10% en especímenes secos con concreto de 34 MPa (Neville, 1995), en otros casos de 4% y 25% (Metha y Monteiro, 1998, Ozer y Ozkul, 2004).

A 14 días de edad la resistencia de los especímenes de las mezclas 0%CBC, 10%CBC y 20%CBC (Fig. 4.5) con 0 días de curado es el 90%, 84% y 85% respectivamente de la resistencia de los especímenes curados durante 7 días. Mientras que a 28 días de edad la resistencia de los especímenes de las mezclas 0%CBC, 10%CBC y 20%CBC (Fig. 4.6) con 0 días de curado es el 85%, 76% y 75% respectivamente de la resistencia de los especímenes curados durante 7 días. Esto indica también que el efecto del curado es mayor con la adición de CBC.

Observando las Figuras 4.8 a 4.10, se aprecia en las tres mezclas que la línea correspondiente a un curado de 28 días tiene valores iguales o menores que las líneas de 0 y 7 días de curado en las edades de ensayo a 14 y 28 días ya que en ese momento los especímenes tienen mucha mayor humedad, pero a la edad de 90 días cuando tienen tiempo suficiente para secarse, se incrementa bruscamente y supera sus valores. Este comportamiento denota que finalmente un curado mayor será benéfico, pero el contenido de humedad al momento del ensayo puede enmascarar su efecto.

Este efecto explicado, es más notorio en especímenes con a/c altas ya que hay más poros capaces de almacenar agua. Un cálculo realizado para los especímenes de este trabajo, mostró que el volumen promedio de agua pérdida de un espécimen saturado, que se dejó secar al ambiente durante 90 días es el 17% del volumen total, dicha cantidad es bastante significativa y pudo haber influir adversamente al momento de realizar las pruebas a compresión.

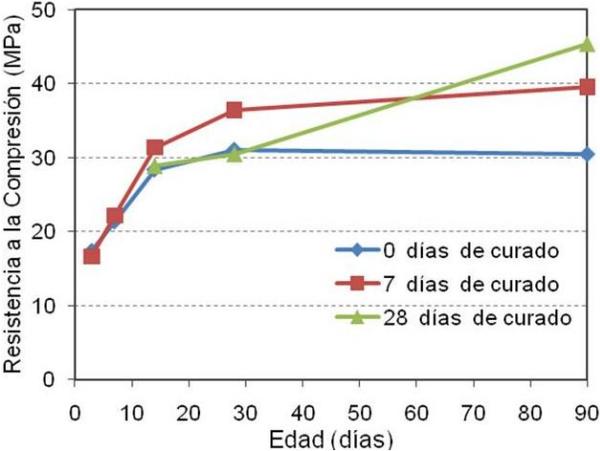


Fig.4.8. Resistencia a la compresión de especímenes **0%CBC** (mezcla control)

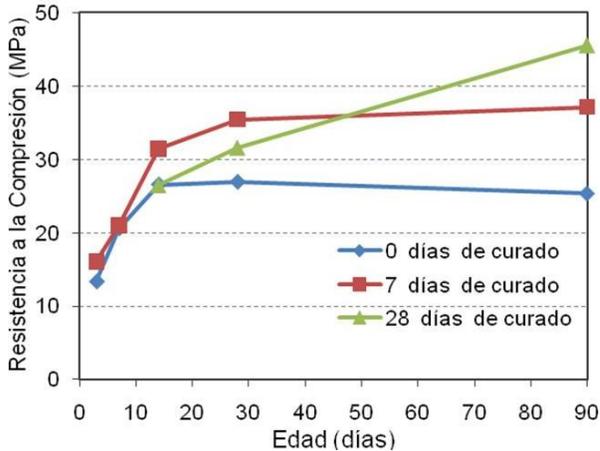


Fig.4.9. Resistencia a la compresión de especímenes **10%CBC**

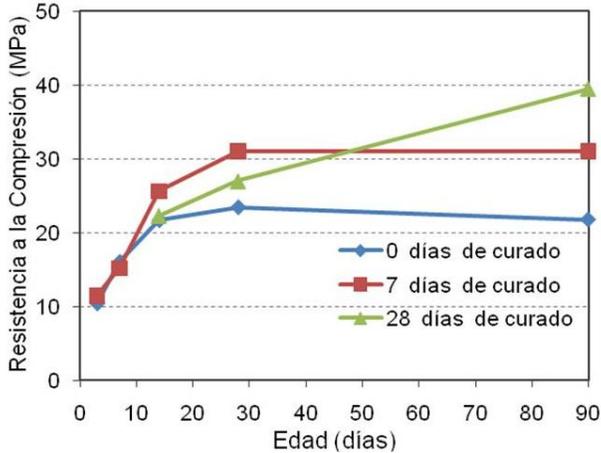


Fig.4.10. Resistencia a la compresión de especímenes **20%CBC**

En la Tabla 4.5 se presentan los IARs de todos los tratamientos para todas las edades calculados con respecto a la mezcla control. Los IARs con 10% de CBC son superiores a los que contienen 20% de CBC. Los IARs en ambos contenidos de CBC se incrementan con el tiempo de curado.

Tabla 4.5. IARs de todas las mezclas con CBC

Mezcla	3d	7d	14d	28d	90d
10% CBC, 0c	77%	97%	94%	87%	83%
10% CBC, 7c	97%	95%	100%	97%	94%
10% CBC, 28c	97%	95%	92%	103%	100%
20% CBC, 0c	60%	75%	76%	76%	72%
20% CBC, 7c	68%	69%	82%	85%	78%
20% CBC, 28c	68%	69%	77%	89%	87%
CV(20%), 28c	68%	67%	65%	78%	85%

4.2.2.2. Comparación de VPUs

La velocidad de las ondas de un pulso ultrasónico que viajan a través de un material sólido, depende de la densidad, propiedades elásticas y de las diferentes fases presentes dentro del material, así la calidad puede ser relacionada con esta medida (Neville, 1995, Romagnoli et al., 2007, Solís-Carcaño y Moreno, 2008).

La técnica de VPU se basa en el hecho de que la velocidad ultrasónica es mucho mayor en un material sólido que en el agua o aire. El aire en la ruta de la señal (debido a grietas o vacíos, etc.) causa un incremento en el tiempo de tránsito y una reducción en la velocidad de pulso (Romagnoli et al., 2007). La aplicación más confiable para esta técnica es la de monitorear cambios en el concreto en el tiempo (Komlos et al., 1996).

Otros factores que afectan la VPU son la relación agua/cemento, el tipo de agregado y el contenido de humedad (Neville, 1995). La humedad en el interior del material contribuye a

incrementar los valores de VPU pero puede afectar de manera inversa la resistencia a compresión, tal como se observó en la sección anterior.

A continuación se muestra en las Figuras 4.11 a 4.15 los resultados de VPU de especímenes de mortero a edades de 3, 7, 14, 28 y 90 días.

De manera general, el promedio VPU tiene un incremento de 5.6% de 3 a 7 días de edad, 4.2% de 7 a 14 días de edad, 0.6% de 14 a 28 días de edad y un decremento de 4.8% de 28 a 90 días de edad. Esto contrasta con la literatura y otros trabajos realizados en donde la VPU continúa incrementándose hasta los 90 días de edad (Gutiérrez, 2008, Hernández, 2009). Nuevamente el principal factor al que se le atribuye éste comportamiento es al contenido de humedad. Chang y colaboradores reportaron que especímenes secos registraron velocidades de pulso hasta 5% menores que especímenes saturados (Chang et al., 2006).

Por otra parte, los resultados mostrados indican que conforme se incrementa el nivel de adición de CBC disminuyen las VPU, esto es similar con algunos trabajos en donde se menciona que: “El incremento en la tasa de desarrollo de la velocidad de pulso en especímenes de concreto es significativamente disminuida por adiciones minerales (Ashraf, 2009), especialmente en periodos de curado cortos y edades tempranas (Demirboga et al, 2004)”.

Las disminuciones de VPU con la adición de CBC son congruentes con los resultados de resistencia a la compresión, ya que el sonido viaja más rápido en morteros y concretos más resistentes.

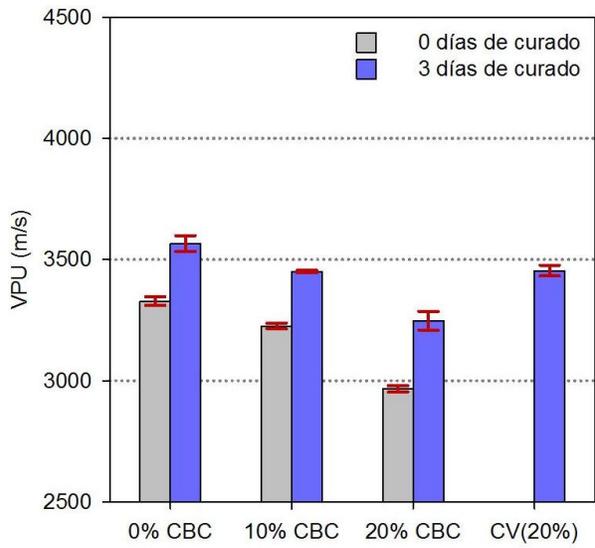


Fig.4.11. VPU a 3 días de edad.

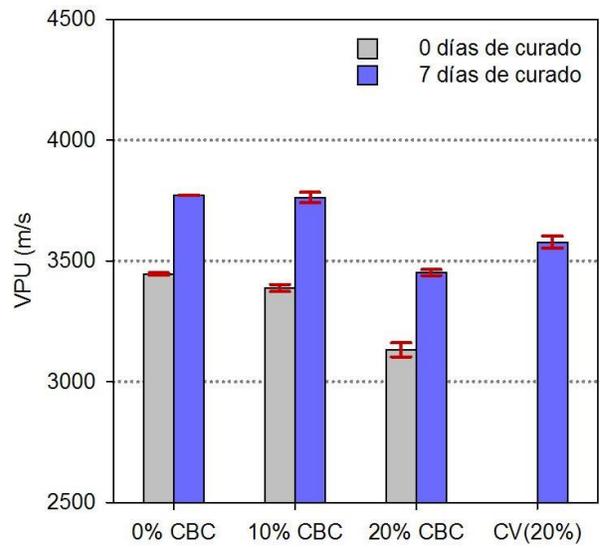


Fig.4.12. VPU a 7 días de edad.

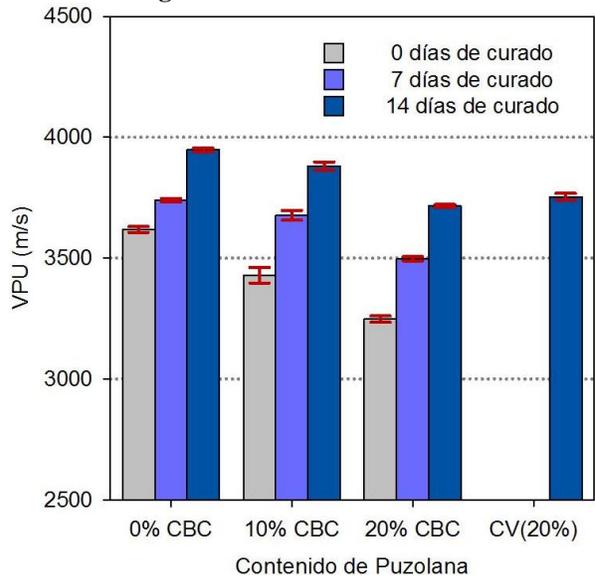


Fig.4.13. VPU a 14 días de edad.

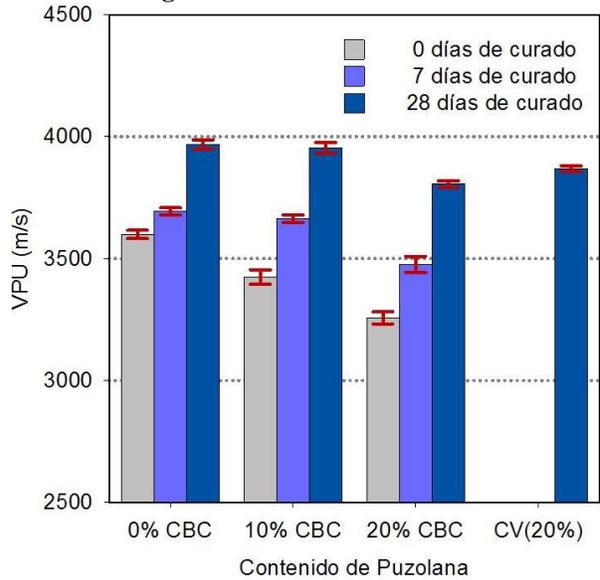


Fig.4.14. VPU a 28 días de edad.

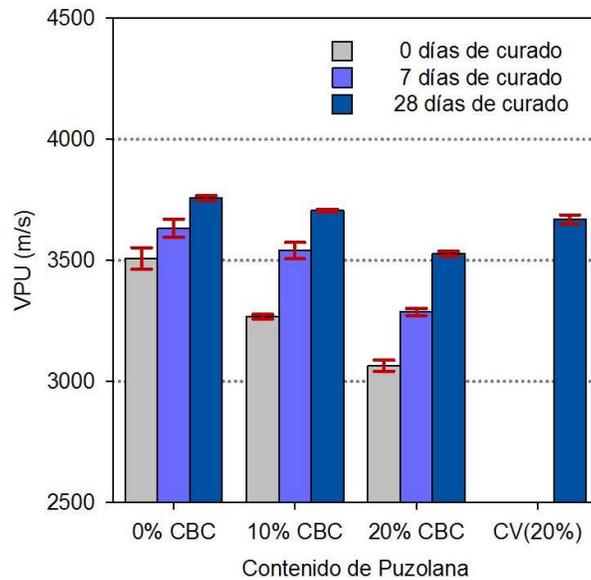


Fig.4.15. VPU a 90 días de edad.

El efecto positivo del tiempo de curado en la VPU es bastante notorio independientemente del contenido de CBC y de la edad. En las Figuras 4.16 a 4.18 se muestra las VPUs registradas diariamente de 3 a 90 días de edad. En éstas se observa con mayor claridad el incremento de las VPUs con el incremento en el tiempo de curado, lo cual se manifiesta durante todo el periodo de estudio.

El efecto del contenido de humedad en la VPU es claramente identificado con el descenso abrupto de ésta que se presenta en los 2 a 3 días posteriores al término de los periodos de curado (a 7 y 28 días). Por ejemplo, en la Figura 4.16 se observa que los especímenes con 7 días de curado alcanzan su mayor VPU precisamente a esta edad, pero al día siguiente cuando ya han comenzado a perder humedad por el secado al ambiente, la VPU desciende drásticamente y así sucede durante los dos días siguientes. Si este descenso no se debiera mayoritariamente a la pérdida de humedad, se observaría también un descenso en la resistencia a compresión.

Puede apreciarse también, que el efecto del curado se incrementó con el contenido de CBC. Las VPUs a 90 días de edad de los especímenes de la mezcla 0%CBB con 0 y 7 días de curado fueron 6.7% y 3.3% menores respectivamente comparados con los especímenes curados 28 días. Esta misma comparación entre especímenes de la mezcla 10%CBC arroja

disminuciones de 11.8% y 4.5% y para la mezcla 20%CBC disminuciones de 13.1% y 6.9%

Finalmente, con base en los resultados de VPU y resistencia a la compresión, se observa que el efecto de la humedad en éstos no solo es de distinta magnitud sino que generalmente tiene influencia inversa. Por lo tanto, esto será considerado al momento de establecer una correlación entre la resistencia a compresión y la VPU.

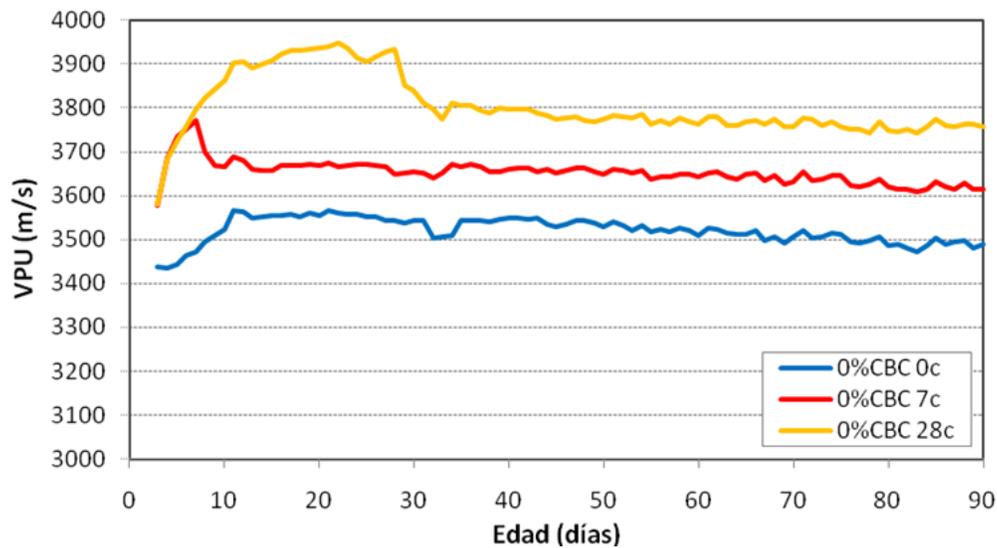


Fig.4.16. VPU en especímenes 0%CBC (mezcla control)

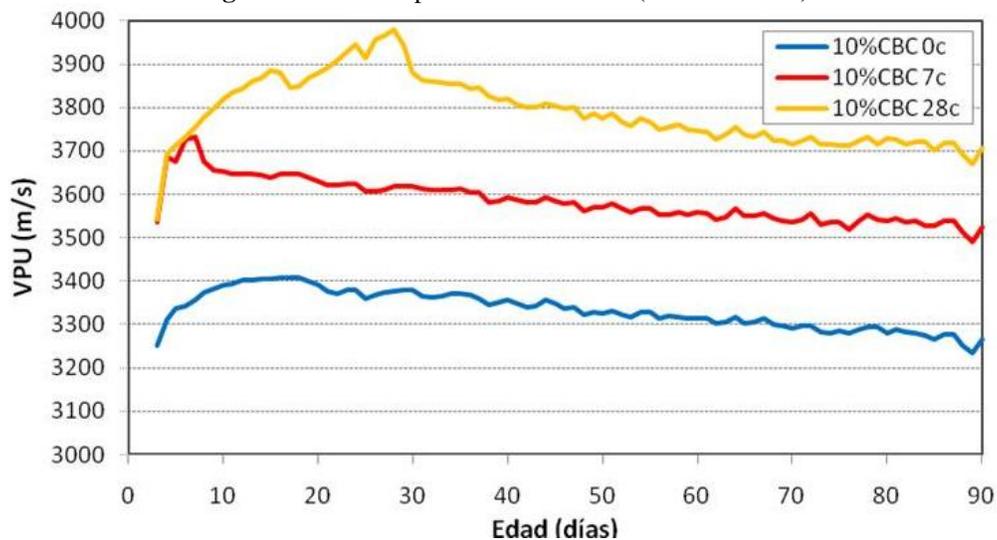


Fig.4.17. VPU en especímenes 10%CBC

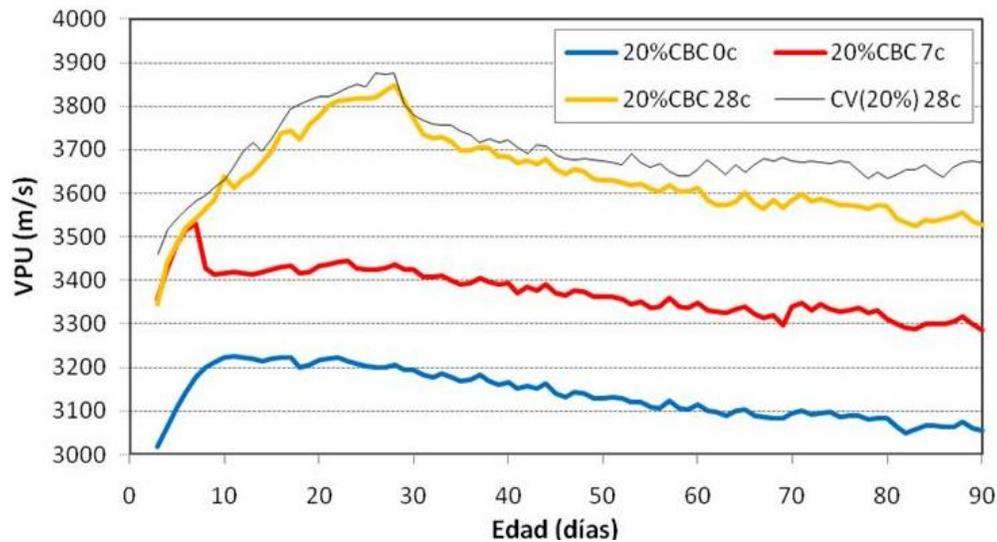


Fig.4.18. VPU en especímenes 20%CBC

4.2.2.3. Perfiles y coeficientes de penetración de cloruros

La norma NT Build 443 recomienda que se analice el contenido de cloruros en concreto por lo menos a una profundidad media de 15 mm, ya que generalmente a dicha profundidad se obtienen contenidos de cloruros cercanos a cero. En éste trabajo se analizó el contenido de cloruros hasta una profundidad media de 19 mm, puesto que se esperaba una mayor penetración de cloruros por tratarse de especímenes de mortero con una relación agua/cemento alta.

Se sabe que los principales factores que generalmente afectan el desempeño del concreto al ingreso de los cloruros son las condiciones de curado, la edad de prueba, la relación agua/cementantes y el uso de adiciones minerales, etc. (Suryavanshi et al., 2002, Günesyist et al., 2009). Y respecto a los constituyentes del concreto, la pasta de cemento es la que tiene mayor influencia ya que los agregados generalmente tienen poco impacto (Song et al., 2008).

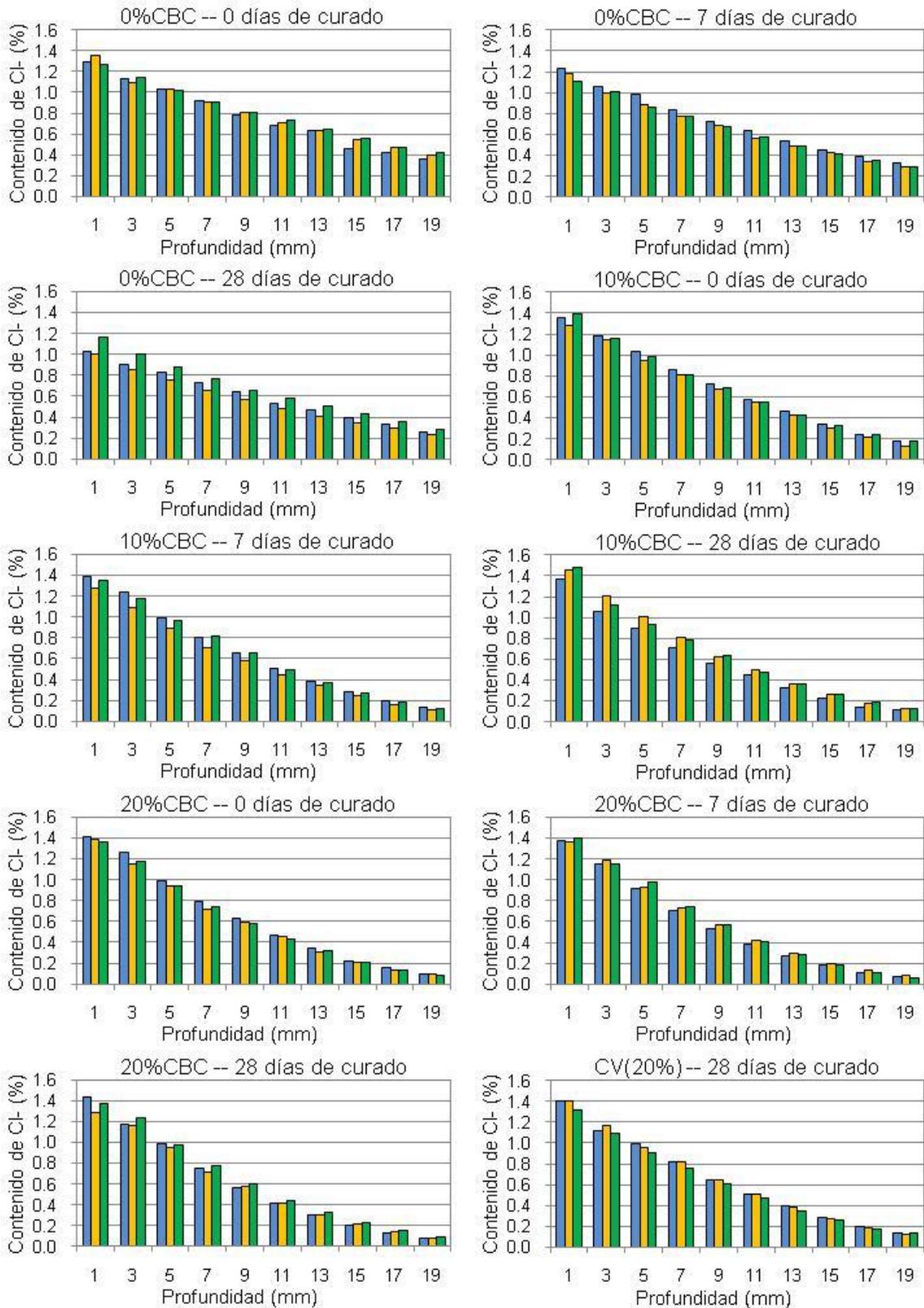


Fig. 4.19. Perfiles de penetración de cloruros de especímenes de mortero de todas las mezclas y tratamiento (% de Cl⁻ totales respecto al peso del mortero).

En la Figura 4.19 se presentan los perfiles de penetración de cloruros de los especímenes de mortero (3 réplicas) de las mezclas 0%CBC, 10%CBC, 20%CBC y CV(20%) con 0, 7 y 28 días de curado en % de Cl^- totales respecto al peso del mortero. Se observan de manera general altos contenidos de cloruros en todas las mezclas, esto se debe principalmente a la alta relación agua/cementantes (0.63) y que por tratarse de un mortero la pasta de cemento representa un porcentaje mayor del volumen total del compuesto. En concretos, la pasta de cemento es aproximadamente de un 20% a 35% del volumen del concreto, mientras que en el mortero elaborado en este trabajo la pasta es el 46% al 49% del volumen del mismo dependiendo de la cantidad de CBC adicionada.

Por tales motivos, mientras que en concretos evaluados en las mismas condiciones con relaciones agua/cementantes que van de medias a bajas, difícilmente se encontrarán concentraciones de cloruros en la superficie mayores a 0.7 %, en los morteros evaluados en el presente estudio las concentraciones de cloruros son de hasta 1.4%. También pueden observarse concentraciones altas para la profundidad de 19 mm (hasta 0.4%) sobre todo en la mezcla 0%CBC.

En la Figura 4.20 se presentan los perfiles de penetración de cloruros promedio de las mezclas 0%CBC, 10%CBC y 20%CBC agrupados por tiempo de curado. En éstas puede observarse de mejor manera el efecto del contenido de CBC en el contenido de cloruros en el mortero.

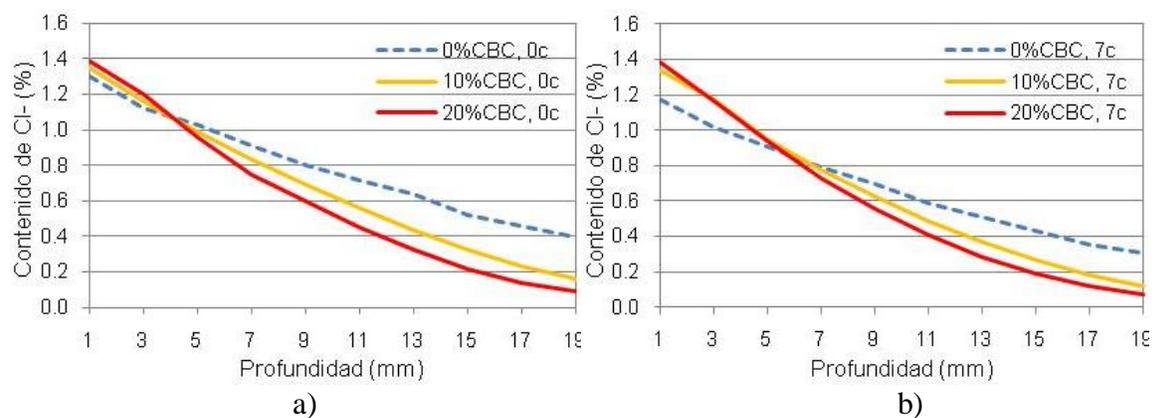
En las mezclas con 0 días de curado se observan valores similares de contenido de cloruros a 1 mm; sin embargo, conforme se va profundizando los morteros con CBC presentan contenidos de cloruros menores. En las mezclas con 7 días de curado el contenido de cloruros a 1mm es similar con 10 y 20% de CBC y es significativamente mayor que en la mezcla 0%CBC, de igual manera los morteros con CBC presentan un menor contenido de cloruros en capas internas. Con 28 días de curado se observa el mismo efecto pero ahora el incremento en la concentración de cloruros a 1mm por la adición de CBC es más evidente que la disminución en las capas internas. Un comportamiento similar se ha observado en

concretos con el incremento en la adición de ceniza volante (Bai et al., 2003). En párrafos posteriores se dará una posible explicación a éste efecto.

En términos generales se observa que conforme se incrementa el contenido de CBC se incrementa el contenido de cloruros en capas superficiales y se disminuye en capas internas.

En lo referente al efecto del curado, se observó definidamente en la mezcla 0%CBC que los contenidos de cloruros disminuyeron en todo el perfil conforme se incrementó el tiempo de curado. En la mezcla 10%CBC se notó una disminución menor y solo comparando 0 días de curado con 7 y 28 días, ya que entre estos dos no hubo una diferencia significativa. En la mezcla 20%CBC el tiempo curado no influyó significativamente en el contenido de cloruros.

En lo referente a la interacción del contenido de CBC y tiempo de curado, se puede decir de manera general, que el efecto de disminución del contenido de cloruros por causa del incremento en el tiempo de curado, disminuye con el incremento de CBC. Esto se deberá observar en los resultados de los coeficientes de difusión de cloruros (De).



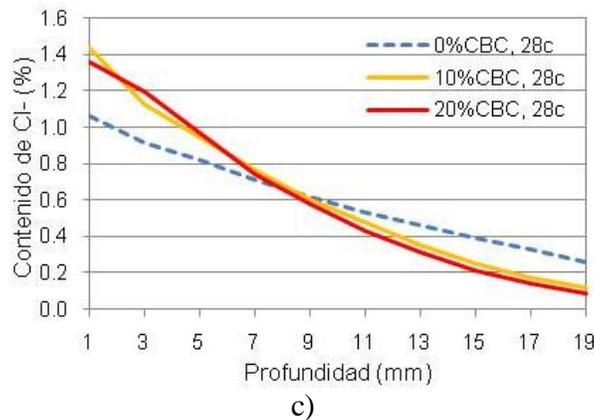


Fig. 4.20. Perfiles de penetración de cloruros promedio de especímenes de mortero de mezclas 0%CBC, 10%CBC y 20%CBC con a) 0, b) 7 y c) 28 días de curado.

En la Fig. 4.21 se muestran los coeficientes de difusión a los cloruros (De) de todas las mezclas, éstos fueron obtenidos a partir del promedio del De de tres réplicas. Los coeficientes de variación (C.V.) para el De de estas réplicas fue del 2 al 12% con lo cual se cumple con el requisito de la NT Build 443 que indica que el C.V. del De no debe exceder el 15%. También se establece que el contenido teórico de cloruros en la superficie de las réplicas no exceda un C.V. del 20%, lo cual también se cumplió ya que se obtuvieron C.V.s que van de 1 al 9%.

Los De de la mezcla 0%CBC con 0 y 7 días de curado, son similares a los obtenidos en una investigación previa realizada de acuerdo a las normas NT Build 208 y 443 en concreto con relación agua/cementantes de 0.60, en la cual se obtuvo un De de 6.12 y $4.85 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ con 0 y 7 días de curado respectivamente (Caballero, 2008). Con base en la aplicación estricta de la normatividad y la comparación con los resultados previos, se confirma que los De obtenidos en el presente estudio son correctos.

Es bien conocido que el uso de materiales puzolánicos en concreto reduce considerablemente su permeabilidad y la velocidad de difusión de la humedad y especies agresivas como los cloruros hacia el interior del mismo (Malhotra y Ramezani-pour, 1994, Neville, 1995, Aitcin, 1998, Günesyist et al., 2005, Günesyist et al., 2009). A su vez, se reporta que la difusión de iones cloruro se somete a una interacción química con la matriz de cemento hidratado, y que ésta puede ser la causa dominante para la mejora en la

resistencia a la difusión de cloruros a través de concretos con adiciones minerales (Shafiq y Cabrera, 2004). Para el caso de CBC, Ganesan y colaboradores reportaron que el De en concreto con relación agua/cementantes de 0.53 y 383 Kg de cementantes, disminuyeron un 38% y 57% respecto al control, cuando se agregó 10% y 20% de CBC respectivamente (Ganesan et al., 2007).

Con los perfiles de penetración de cloruros y los De obtenidos se observa que no es determinante el contenido de cloruros en las capas iniciales en el De y que tiene más influencia el contenido en las capas más profundas, ya que los especímenes que tuvieron los contenidos más altos de cloruros en las capas iniciales son los que obtuvieron los valores de De más bajos. Una posible explicación para la mayor reducción en el contenido de cloruros conforme se profundiza en el mortero con CBC, es que los algunos de los componentes de la misma (C, SiO₂, Al₂O₃) o los productos resultantes de la combinación de éstos con el cemento hidratado (S-H-C) atraigan y se combinen químicamente con una mayor cantidad de cloruros, lo cual a su vez podría generar un efecto de taponamiento que dificultaría el ingreso de cloruros en capas más profundas.

Algunas investigaciones reportan al respecto, que en concretos con adiciones minerales se incrementa el contenido de cloruros en la superficie y se disminuye el De , presumiblemente por el refinamiento de la estructura porosa y la alta capacidad relativa de combinación con los cloruros, sustentado por la observación de cloroaluminatos en la superficie (sales de Friedel), también se informa que el Na⁺ y su acompañante (Cl⁻) puede combinarse con el silicato hidratado de calcio (Bai et al., 2003, Song et al., 2008).

En este estudio se aprecia claramente que la adición de 10 y 20% de CBC disminuye el De a aproximadamente el 50%; sin embargo, no se observa una disminución muy grande entre la mezcla 10%CBC y 20%CBC. En lo referente al efecto del curado, no se observan diferencias significativas en el De entre un curado de 7 días y uno de 28 días. Además se observa un incremento en el De en las mezclas 0%CBC y 10%CBC cuando carecen de curado. Respecto a la interacción entre la CBC y el tiempo de curado, se observa que el efecto del curado entre 0 y 7 días, disminuye con el contenido de CBC.

Se esperaría encontrar un interacción en sentido inverso, es decir, que al incrementar el tiempo de curado el efecto benéfico se incrementara al aumentar el contenido de CBC, tal como se observó en los resultados de resistencia a la compresión y VPU. Una posible explicación podría ofrecerse con base en la hipótesis del ligado de cloruros con la CBC, donde un tiempo de curado menor dejaría mas CBC sin reaccionar, la cual estaría disponible para combinarse con mas cloruros y producir un mayor taponamiento el cual compensaría el efecto inverso de tener una estructura menos densa y más permeable.

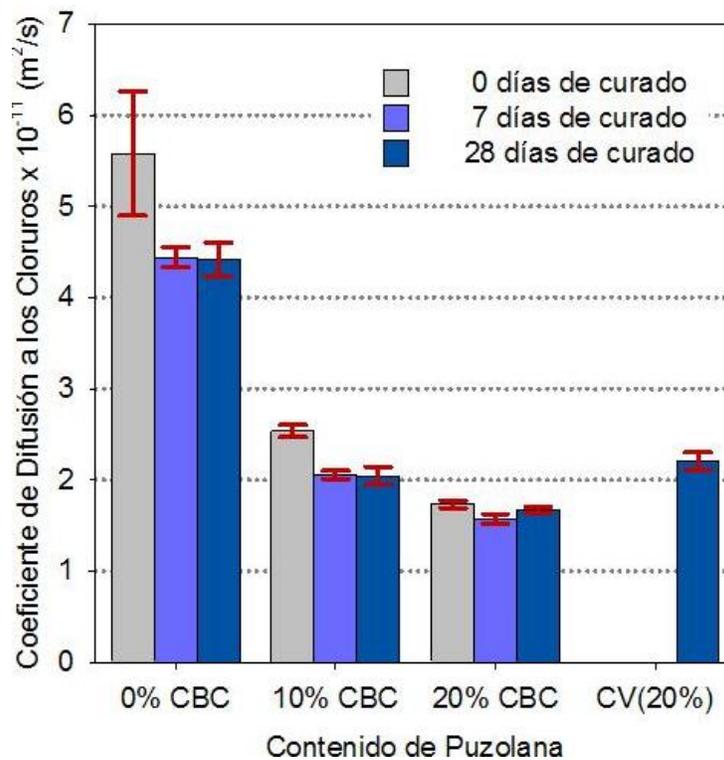


Fig. 4.21. Coeficientes de difusión de cloruros a 63 días de edad

4.2.3. Resultados de corrosión en ferrocemento

A continuación se presentan los resultados del estudio de la corrosión en las placas de ferrocemento expuestas al ambiente agresivo simulado, éstos incluyen la inspección visual realizada al final del periodo de estudio, los potenciales de corrosión registrados diariamente y las velocidades de corrosión semanalmente.

4.2.3.1. Inspección visual

En la inspección visual realizada a los especímenes de ferrocemento a 170 días de exposición al ambiente agresivo simulado se observó que no existen daños visibles ocasionados por la posible ocurrencia de la corrosión de la malla de refuerzo de acero galvanizado.

En la Figura 3.18 (página 74) se muestra la apariencia de las placas de ferrocemento después de ser desmoldadas y antes de ser sometidas al ambiente agresivo. En la Figura 4.22 se muestra la apariencia de los especímenes de ferrocemento después de 120 ciclos de humedeciendo y secado en la solución salina. Comparando ambas Figuras se observa que las placas de ferrocemento han perdido la uniformidad en su color debido a la presencia de eflorescencias (manchas por sal), manchas ocasionadas por impurezas presentes en los agregados o en la solución salina y en menor medida a la degradación de una delgada capa superficial de la pasta de cemento que expone parte del agregado fino.

Las eflorescencias son ocasionadas por la acumulación de sal debido a la evaporación del agua salina durante el periodo de secado. Tanto las eflorescencias como la degradación de la capa superficial de la pasta de cemento no tienen un efecto nocivo significativo en el interior del mortero.

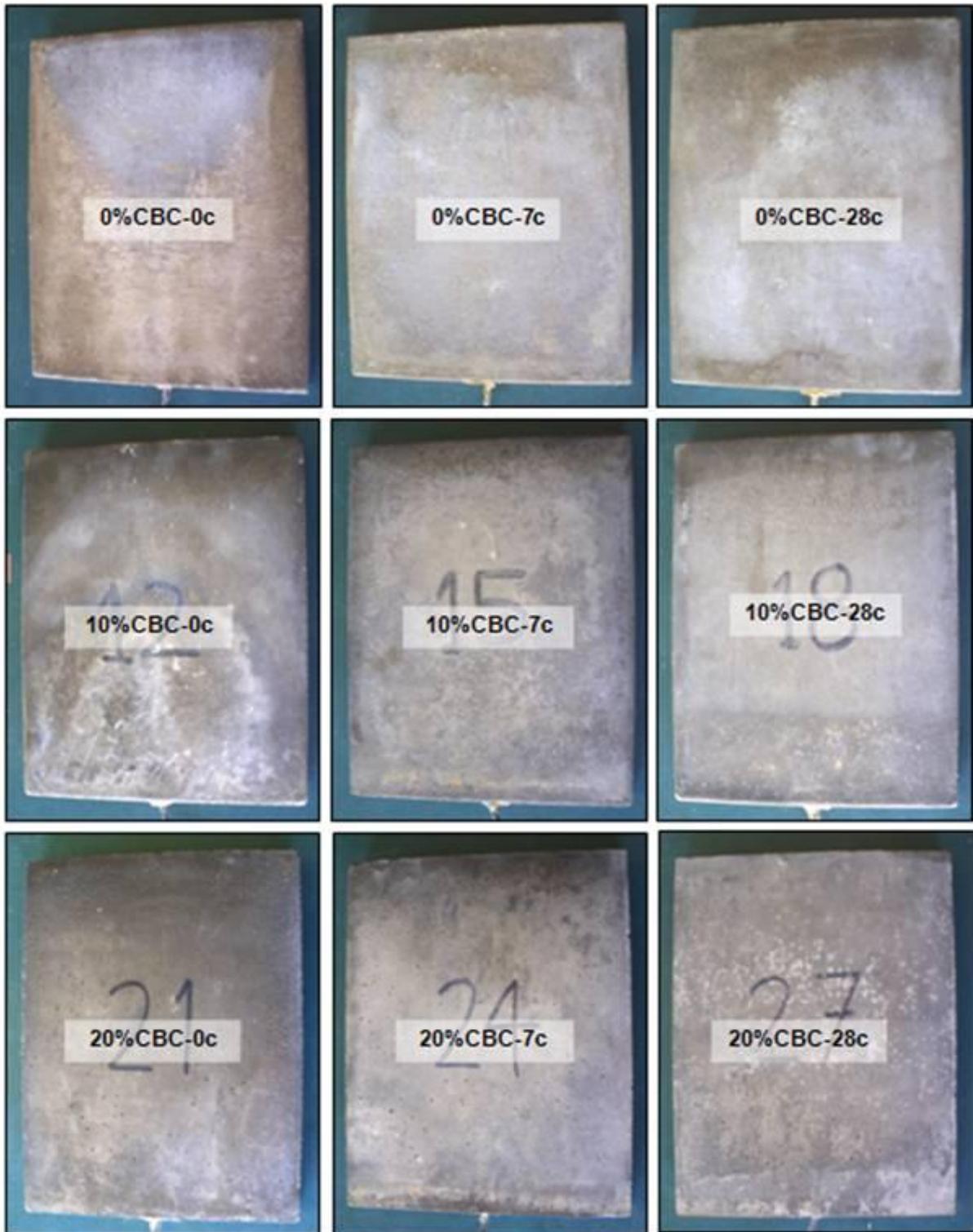


Fig. 4.22. Placas de ferrocemento representativas de mezclas 0%CBC, 10%CBC, 20%CBC con 0, 7 y 28 días de curado después de ser expuestas al ambiente agresivo simulado

Se observan también algunas manchas dispersas con una coloración rojiza muy tenue las cuales son más fáciles de distinguir en especímenes con un color más claro, pero no se puede asegurar que hayan sido originadas por la corrosión del refuerzo, por ejemplo se observa una en la Figura 4.22 en la parte superior del espécimen 0%CBC-7c. También se observan algunas pequeñas manchas menos dispersas de un color rojizo, de las cuales si se puede aseverar que fueron originadas por la corrosión de refuerzo, por ejemplo la que se observa en la parte baja central del espécimen 10%CBC-7c de la Figura 5.28.

No se observó ningún tipo de agrietamiento. Generalmente cuando la corrosión en concreto es significativa y se tiene poco recubrimiento se presentan agrietamientos producidos por la expansión de los productos de corrosión.

Se sabe que la cubierta de zinc es una barrera física que obstaculiza el contacto de los agentes agresivos con el sustrato de acero, además el zinc actúa como ánodo de sacrificio en la celda de corrosión y el volumen de los productos de corrosión que genera son mucho menores que los producidos por el acero al carbón, esto disminuye el deterioro del concreto reforzado (Cheng et al., 2005, Hamad y Mike, 2005, Sánchez et al., 2006). Por la razón antes mencionada y lo disperso del acero de refuerzo en las placas de ferrocemento se espera que si ocurren agrietamientos posteriormente, sean menores que los que ocurren en concreto.

4.2.3.2. Potenciales de corrosión

En las Figuras 4.23 a 4.25 se presentan los resultados de potenciales de corrosión de todos los especímenes. En éstas es posible observar de manera general que todos los valores en el tiempo estudiado son bastante negativos. La Tabla 2.4 de la ASTM para evaluar el riesgo de corrosión en estructuras de concreto (página 43) indica que con valores de -256 a -405 mV se tiene un alto riesgo de corrosión y para valores menores a -406 mV puede esperarse corrosión severa; sin embargo, estos valores son una referencia para estructuras de concreto reforzadas con acero al carbón. La serie electromotiva de metales ubica al zinc en 300 mV

más negativo que el hierro por lo cual puede explicarse los potenciales más negativos registrados. También en otras investigaciones en acero galvanizado se registran potenciales de corrosión muy negativos, que pueden alcanzar hasta -1200 mV (Farina y Duffó, 2007, Tan y Hansson, 2008, Tittarelli y Bellezze, 2010).

En el periodo de tiempo estudiado no se observa un efecto significativo en los potenciales de corrosión producido por el nivel de CBC adicionada. Sin embargo, los resultados de difusión de cloruros mostraron que conforme se adicionó CBC se redujo el coeficiente de difusión de cloruros, por lo que se esperaba también un menor riesgo de corrosión al adicionar más CBC. A esto podría argumentarse que en el ambiente simulado al que fueron sometidos los especímenes de ferrocemento el fenómeno por el cual penetraron los cloruros fue predominantemente absorción (inducida por el humedeciendo y secado), sin embargo, se sabe que en concreto y mortero existe una alta relación directa entre el coeficiente de difusión y la absorción, por lo cual puede inferirse que la capacidad de las placas para absorber agua está relacionada con los coeficientes de difusión a los cloruros obtenidos para el mortero con que fueron elaboradas.

Por otra parte, generalmente se espera un efecto positivo de la reducción de agua y densificación de la microestructura por la incorporación de adiciones minerales, pero también es posible la depasivación del acero a partir de la baja alcalinidad producida por la reacción puzolánica (Sujavanich et al., 2005).

Considerando lo mencionado, es posible que existan efectos encontrados producidos por la adición de CBC: por una parte adicionar mas CBC reduce el ingreso de iones cloruros pero por otra, una mayor cantidad de CBC consume más hidróxido de calcio con lo que puede disminuirse el pH e incrementarse el riesgo de depasivación del acero.

Respecto al efecto del curado, se observa en las mezclas 0%CBC y 10%CBC (Figuras 4.23 y 4.24) que no existe una diferencia significativa en los potenciales de corrosión entre especímenes con 0 y 7 días de curado, pero cuando se aplicó un curado de 28 días los potenciales se reducen aproximadamente -50 mV después de los 50 días de exposición.

Las diferencias en las lecturas de corrosión no permiten identificar una interacción significativa entre el contenido de CBC y el tiempo de curado, pero se observa que aparentemente en la mezcla 20%CBC el curado no tuvo mucho efecto.

Por otra parte en la Figura 4.23 se observa en los especímenes 0%CBC 7c un incremento en la negatividad de los potenciales en el periodo de 40 a 100 días, no se sabe exactamente a que se deba pero se cree que tiene que ver con la formación de la capa pasivante ya que en este mismo periodo de tiempo las velocidades de corrosión prácticamente dejaron de incrementarse, tal como se observa en la Figura 4.26 (página 113).

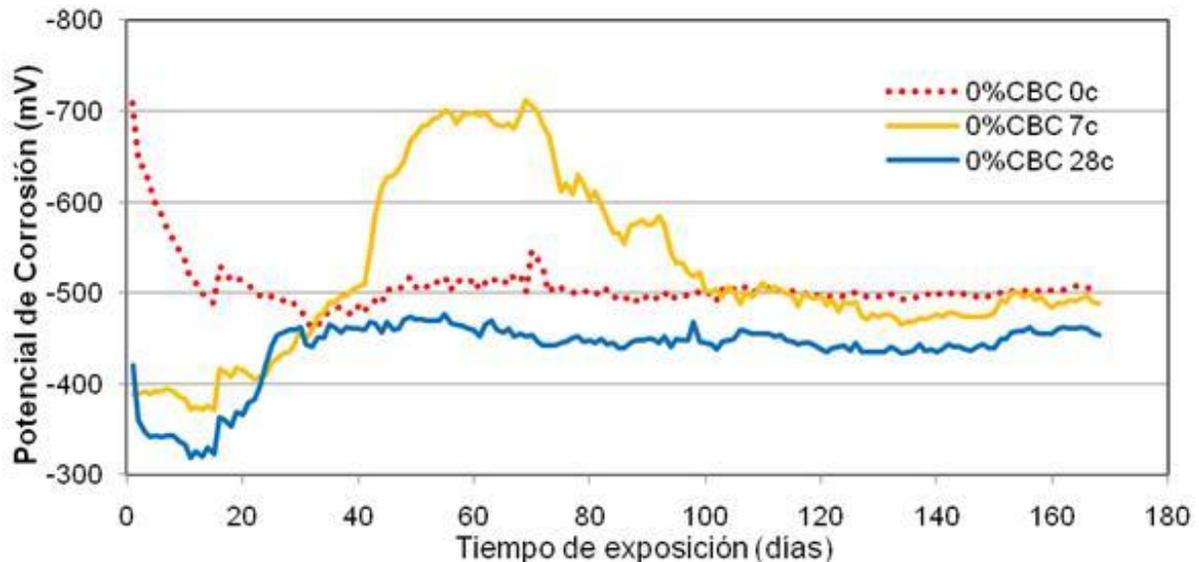


Fig.4.23. Potencial de corrosión en especímenes 0%CBC

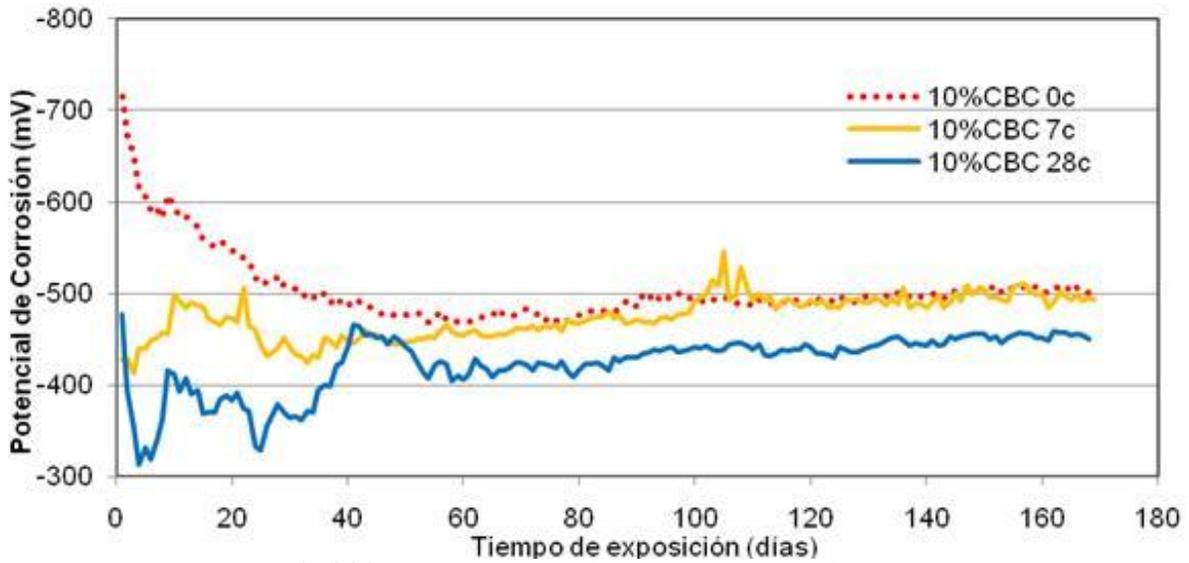


Fig.4.24. Potencial de corrosión en especímenes 10%CBC

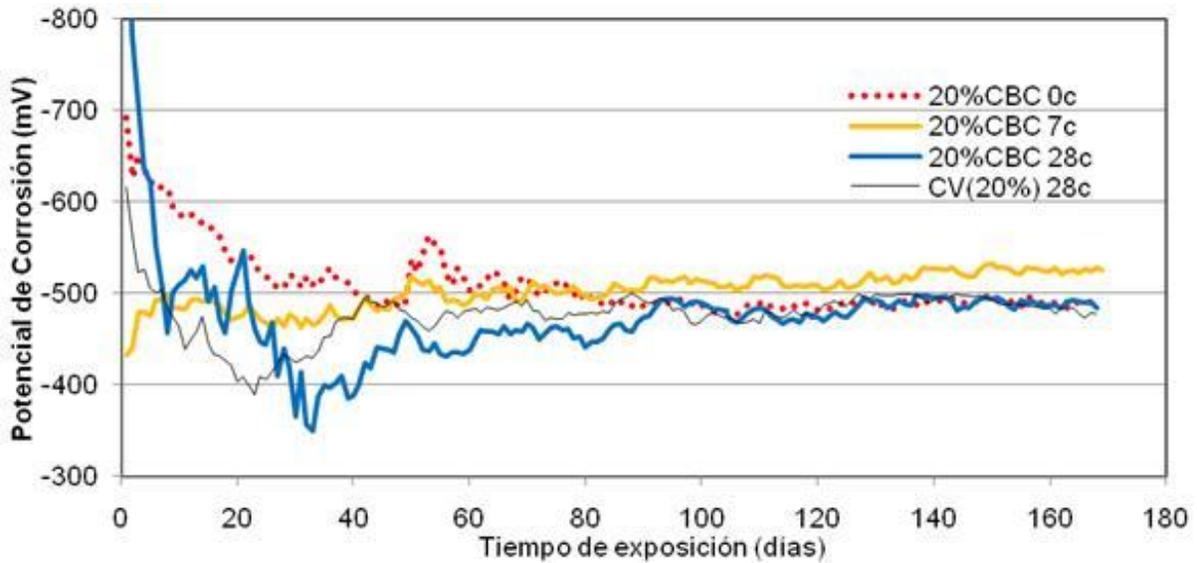


Fig.4.25. Potencial de corrosión en especímenes 20%CBC

4.2.3.3. Velocidad de corrosión

En las Figuras 4.26 a 4.28 se presentan los resultados de densidad de corrosión de todos lo especímenes.

Las densidades de corrosión se encuentran en la zona de corrosión baja a moderada ($0.1-0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, ver Tabla 2.5 de página 44), y son también bajas para un estudio de corrosión en

un ambiente agresivo simulado. Lo anterior puede ser explicado en parte por la capacidad del acero galvanizado para resistir una mayor concentración de cloruros antes de iniciarse la corrosión (Cheng et al., 2005). Resultados de esa investigación muestran que el potencial de corrosión del acero galvanizado es mucho más negativo que el del acero al carbón en una solución con 3.5% de NaCl, pero la velocidad de corrosión es el 60% de la velocidad del acero al carbón (Cheng et al., 2005). En el presente estudio se observó que tratamientos con potenciales de corrosión menos negativos presentaron velocidades de corrosión ligeramente mayores.

En lo referente al efecto del contenido de la CBC se observa que en las mezclas 0% CBC y 10% CBC no existe una diferencia significativa en las densidades de corrosión, pero en la mezcla 20% CBC se presentan densidades de corrosión ligeramente mayores en el periodo de exposición ubicado entre 50 y 170 días.

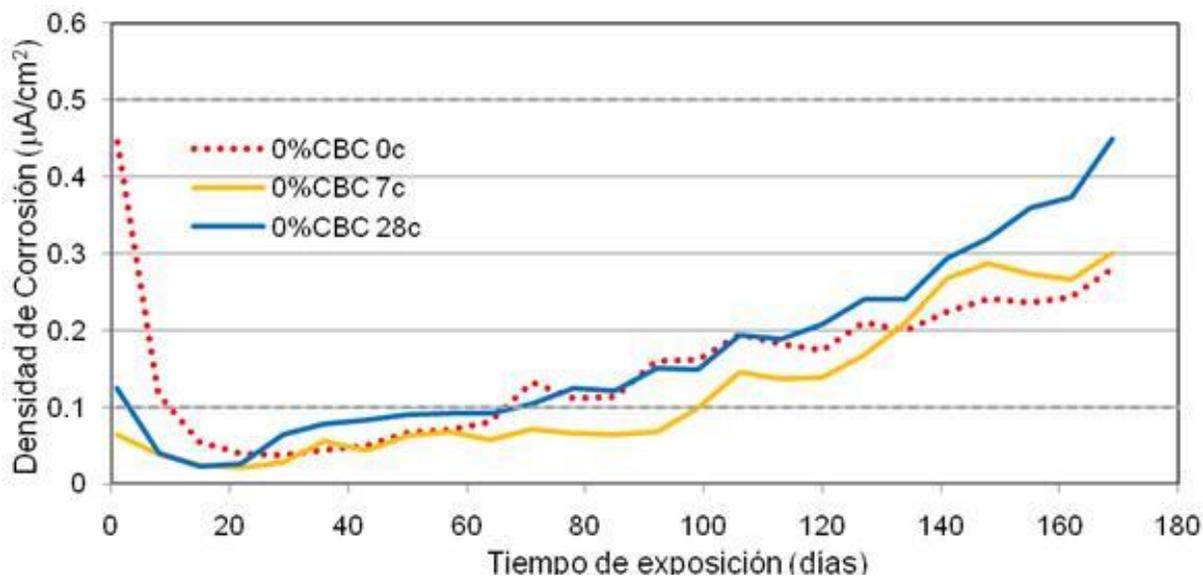


Fig.4.26. Densidad de corrosión en especímenes 0%CBC

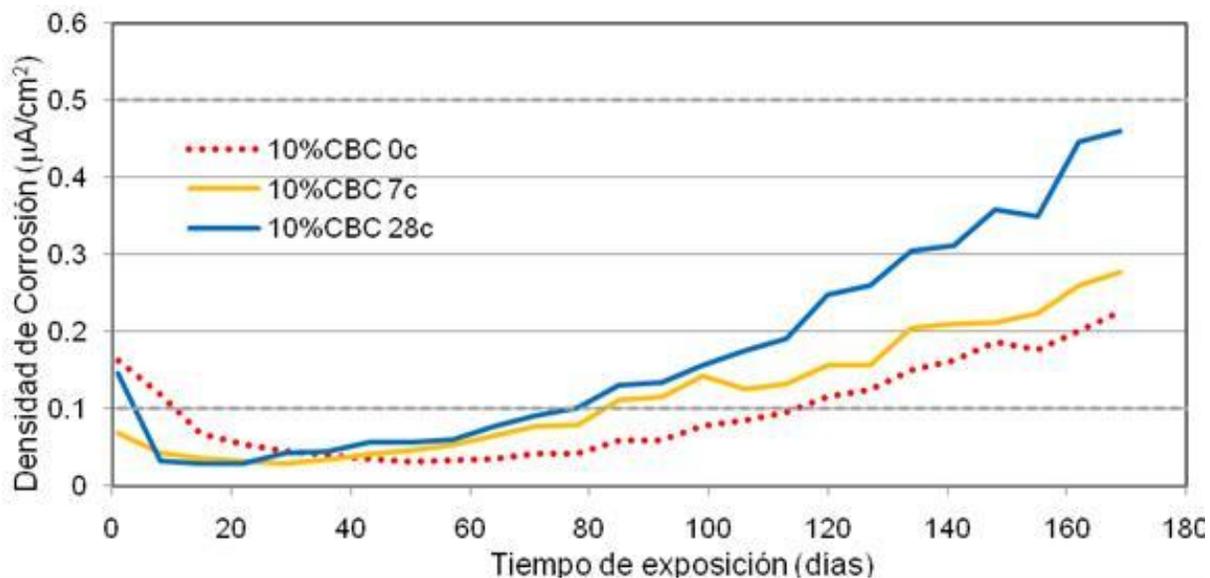


Fig.4.27. Densidad de corrosión en especímenes 10%CBC

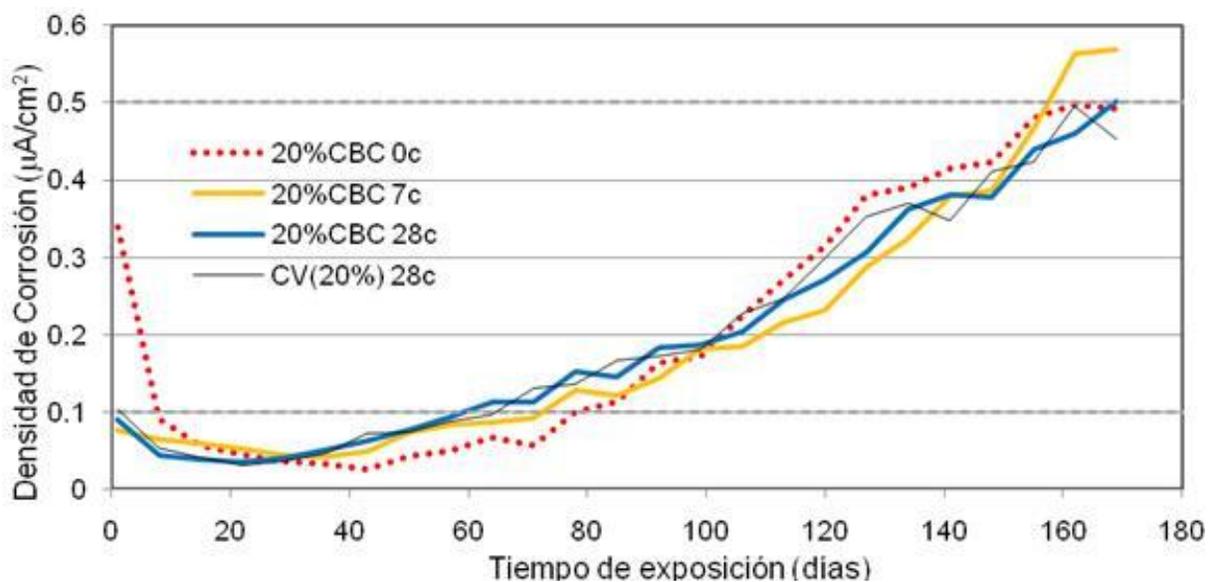


Fig.4.28. Densidad de corrosión en especímenes 20%CBC

Los coeficientes de difusión obtenidos por la mezcla 20%CBC (que son los más bajos) deberían proveer una resistencia a la corrosión mayor, sin embargo, como ya se mencionó esto no fue así. Puede especularse que dicho comportamiento se deba a la menor alcalinidad originada por el mayor consumo de hidróxido de calcio. Se ha observado que el umbral de cloruros para el inicio de la corrosión no sólo está en función de la cantidad de cloruros en la solución de poro, sino que depende de la relación Cl^-/OH^- existente en la

solución, mientras esta relación es más alta, el porcentaje de cloruros respecto al peso de cementantes requerido para que se inicie la corrosión será menor (Hamad y Mike, 2005, Muralidharan et al., 2005, Vedalakshmi et al., 2008); en acero al carbón se produce la depasivación cuando la relación Cl^-/OH^- es igual o mayor a 0.6 (Song et al., 2008). Se sabe también que en el acero galvanizado en presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se forma una capa pasivante protectora y densa de hidrozincato de calcio $[\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2]$ que es la responsable de la pasivación en el concreto (Farina y Duffó, 2007, Tan y Hansson, 2008), por lo que es probable también que al haber menos hidróxido de calcio a causa de la reacción puzolánica la capa pasivante de hidrozincato de calcio sea más delgada o menos densa y proporcione una protección menor a la corrosión.

En lo que respecta al efecto del curado, se observa que en las mezclas 0%CBC y 10%CBC el incrementar el tiempo de curado incrementaron las velocidades de corrosión, en la mezcla 20%CBC el curado no tuvo un efecto significativo. Al respecto se ha observado en concreto normal y con ceniza volante reforzado con acero galvanizado curado a 7 y 28 días, que cuando los potenciales de corrosión se hacen menos negativos (menor riesgo de corrosión) por efecto de un mayor tiempo de curado, aumenta la velocidad de corrosión y viceversa (Kayali y Zhu, 2005, Guo et al., 2009). Éste mismo comportamiento se observó en el presente estudio en los especímenes de las mezclas 0%CBC y 10%CBC curados 28 días los cuales presentaron potenciales de corrosión menos negativos que los especímenes curados menos tiempo, pero en cambio presentaron velocidades de corrosión mayores.

En los resultados de coeficientes de difusión (Figura 4.21, página 106) se observó que no existe una variación significativa de los mismos en las mezclas mencionadas en el párrafo anterior con 7 y 28 días de curado, por lo que probablemente el comportamiento observado se deba a la mayor disponibilidad de oxígeno inicial en los especímenes sin curar y que éste haya permitido la formación de una capa pasivante más densa y compacta. Una capa pasivante producida por el efecto de una corrosión uniforme como es en el caso del zinc registra potenciales de corrosión más negativos, pero una vez formada la velocidad de corrosión disminuye.

Al la fecha no es posible identificar una interacción significativa entre la CBC y el tiempo de curado.

Con base en los resultados de inspección visual, potenciales y densidad de corrosión obtenidos hasta el momento, puede decirse que el nivel de sustitución de 10% de CBC no afecta el desempeño a la corrosión del ferrocemento reforzado con acero galvanizado expuesto a un ambiente salino con las condiciones particulares de éste experimento. Un contenido de 20% de CBC parece afectar ligeramente.

Sin embargo, debido a que el fenómeno de la corrosión es bastante complejo y aún mas en concreto y mortero con adiciones puzolánicas, se requiere de un mayor tiempo de exposición para poder tener mayores velocidades de corrosión y pérdidas de masa (las pérdidas de masa teróricas acumuladas hasta el momento no exceden los 250 mg) y de ésta manera verificar lo ya observado y analizado en el presente estudio.

4.2.4. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU

La VPU a través del concreto es influenciada por algunos factores ya mencionados que afectan de diferente manera la resistencia. Consecuentemente, no existe ninguna relación única entre la VPU y la resistencia a compresión (Neville, 1995, Solís-Carcaño y Moreno, 2008). Por lo tanto para una adecuada estimación de la resistencia deberá tenerse primero una curva de calibración específica (Komlos et al., 1996). El modelo que predominantemente es utilizado para la correlación de la VPU y la resistencia es el exponencial (Demirboga et al, 2004), pero otros pueden ajustarse bastante bien.

En la Figura 4.29 se presenta la correlación obtenida de resistencia a la compresión y VPU de todas las mezclas, el coeficiente de determinación obtenido es de 0.39 para el modelo potencial utilizado. Por lo antes mencionado y los resultados de las secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2, no se esperaba encontrar un coeficiente de correlación alto.

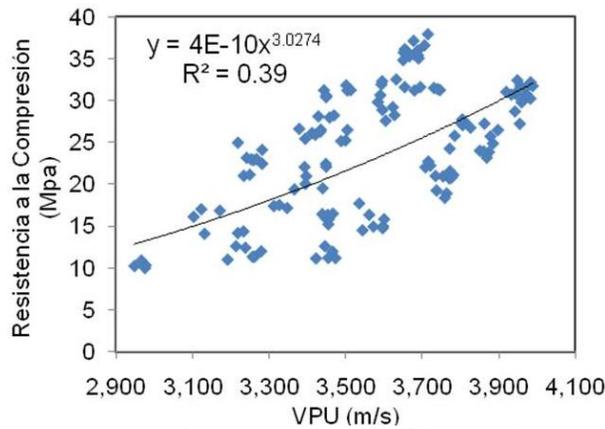


Fig.4.29. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU de especímenes con edad de 3 a 28 días y tiempo de curado de 0, 7 y 28 días

En las secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2 se mencionó que el efecto de la humedad resultó ser generalmente opuesto y significativo en la resistencia y la VPU, por lo que puede ser considerada una variable perturbadora de gran influencia. Al tratar de bloquear este efecto perturbador en la búsqueda de una correlación con R^2 mayor, se analizaron separadamente especímenes con grados de sequedad variables y especímenes completamente saturados.

En la Figura 4.30 se presenta la correlación obtenida de resistencia a la compresión y VPU de todas las mezclas con especímenes secos al momento del ensayo de VPU y resistencia, el coeficiente de correlación obtenido fue de 0.82. Así mismo, En la Figura 4.31 se presenta la correlación obtenida de todas las mezclas con especímenes saturados al momento del ensayo, el coeficiente de determinación obtenido fue de 0.91.

Sólo en el caso de especímenes saturados es posible decir que la humedad no es una variable perturbadora, ya que en todos fue siempre cercana al 100%, en los especímenes “secos” la humedad fue variable ya que ésta dependía de la humedad ambiental y del distinto tiempo que éstos tuvieron para secarse. Se probó la correlación para especímenes con 0 días de curado, es decir los más secos, y R^2 se incrementó hasta 0.91.

Éste incremento tan notorio en los coeficientes de determinación, indica que efectivamente el contenido de humedad tiene un efecto en la resistencia a compresión de distinta magnitud y sentido al efecto en la VPU.

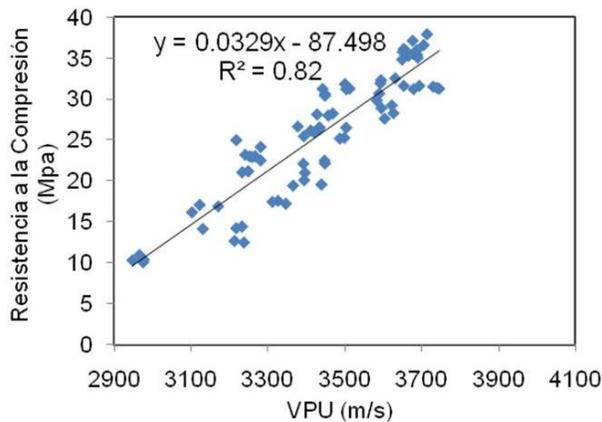


Fig.4.30. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU de especímenes con edad de 3 a 28 días, curado variable y **secos** al momento del ensayo

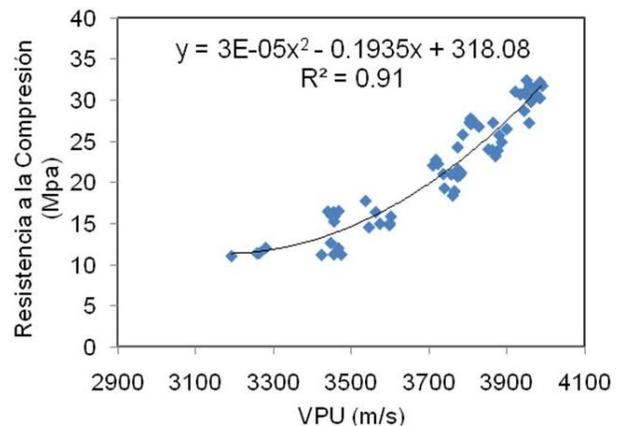


Fig.4.31. Correlación entre resistencia a la compresión y VPU de especímenes con edad de 3 a 28 días, curado variable y **saturados** al momento del ensayo

Otro factor que afectó de distinta forma la resistencia y la VPU, aunque en menor grado, fue el contenido de CBC. Al correlacionar la variables antes mencionadas para cada contenido de CBC y bloqueando la humedad, se encontraron coeficientes de correlación mayores, que van de 0.94 a 0.98. Esto concuerda con las afirmaciones de la literatura, sobre que no existe una correlación única entre resistencia y VPU y que es necesaria una curva de calibración específica, si se quiere poder llegar a hacer estimaciones adecuadas de resistencia con base en lecturas de VPU.

4.2.5. Análisis estadístico de resultados

A continuación se mostrará un resumen del análisis estadístico de los resultados, donde se evalúa por medio del ANOVA la existencia de efectos principales (CBC y Tiempo de curado) e interacciones en cada variable respuesta. En el Anexo II pueden consultarse los resultados del análisis estadístico completo.

4.2.5.1. Resistencia a la compresión

Para cada edad de prueba, se realizó un ANOVA independiente.

Efectos principales

Los resultados del ANOVA mostrados en la Tabla 4.6, indican que los dos efectos principales (el contenido de CBC y el tiempo de curado) son altamente significantes ($p < 0.05$), excepto a la edad de 7 días, donde el curado no tiene significancia.

Con base en el análisis descriptivo-explicativo de resultados de la sección 4.2.2.1 y el análisis estadístico, se pueden hacer de manera general las siguientes afirmaciones:

1. La adición de 10 y 20% de CBC disminuye la resistencia a compresión en todas las edades estudiadas.
2. La aplicación de un curado por inmersión de 7 y 28 días, incrementa la resistencia a compresión en todas las edades, excepto a 7 días donde no se observó este efecto.

Sin embargo, con base en las graficas mostradas en la sección 4.2.2.1 se detectó que en algunos niveles específicos de ambos factores, no existió una afectación importante en la resistencia, por lo que se realizaron ANOVAs adicionales para poder aseverarlo. Estas afirmaciones son las siguientes:

- La resistencia a compresión a 14 días de edad es similar en los morteros con un contenido de 0% y 10% de CBC cuando se aplica un curado de 7 días ($p=0.558$).
- La resistencia a compresión a 28 días de edad es similar en los morteros con un contenido de 0 y 10% de CBC cuando se aplica un curado de 7 o 28 días ($p=0.851$).
- La resistencia a compresión a 90 días de edad es similar en los morteros con un contenido de 0 y 10% de CBC cuando se aplica un curado de 28 días ($p=0.894$).

Interacciones

Una interacción indica que el efecto del curado en sus distintos niveles no es el mismo en cada nivel de CBC.

Con base en los resultados del ANOVA se observa que solamente en las edades de 3, 28 y 90 días la interacción es significativa. A pesar de ello, puede decirse según lo presentado en la sección 4.2.2.1 que es probable que esta interacción exista en todas las edades, pero el efecto del contenido de humedad en los resultados de resistencia a compresión no permita afirmarlo.

Tabla 4.6. Resultados del ANOVA de resistencia a la compresión

Resistencia a la edad de:	Factores	Niveles	Homogeneidad de Varianzas – Levene (p)	ANOVA (p)
3 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.040	<<0.05
	TC	0, 3		0.003
	CBC*TC			0.001
7 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.654	<<0.05
	TC	0,7		0.849
	CBC*TC			0.524
14 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.544	<<0.05
	TC	0,7,14		<<0.05
	CBC*TC			0.24
28 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.148	<<0.05
	TC	0,7,28		<<0.05
	CBC*TC			<<0.05
90 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.436	<<0.05
	TC	0,7,28		<<0.05
	CBC*TC			0.002

CBC: Sustitución de cemento por CBC en peso.

TC: Tiempo de curado por inmersión en días.

CBC*TC: La interacción de CBC y TC.

4.2.5.2. Velocidad de pulso ultrasónico

Para cada edad de prueba, se realizó un ANOVA independiente.

Efectos principales

Los resultados del ANOVA mostrados en la Tabla 4.7, indican que los dos efectos principales (el contenido de CBC y el tiempo de curado) son altamente significantes ($p < 0.05$).

Con base en el análisis descriptivo-explicativo de resultados de la sección 4.2.2.2 y el análisis estadístico, se pueden hacer de manera general las siguientes afirmaciones:

1. La adición de 10 y 20% de CBC disminuye la VPU en todas las edades estudiadas.

2. La aplicación de un curado por inmersión de 7 y 28 días, incrementa la VPU en todas las edades estudiadas.
3. La VPU se incrementa de 3 a 14 días de edad, de 14 a 28 días son similares y a 90 días de edad disminuye considerablemente y presenta valores de VPU ubicados aproximadamente entre 3 y 7 días de edad.

Interacciones

Con base en los resultados del ANOVA se observa que solo en las edades de 14, 28 y 90 días la interacción entre CBC y TC es altamente significativa. Sin embargo, con base en la sección 4.2.2.2 se puede decir que la interacción a 3 y 7 días de edad también es significativa, pero el efecto del contenido de humedad en los resultados de VPU enmascara la interacción.

Tabla 4.7. Resultados del ANOVA de VPU

Resistencia a la edad de:	Factores	Niveles	Homogeneidad de Varianzas – Levene (p)	ANOVA (p)
3 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.568	<<0.05
	TC	0, 3		<<0.05
	CBC*TC			0.063
7 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.178	<<0.05
	TC	0,7		<<0.05
	CBC*TC			0.055
14 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.512	<<0.05
	TC	0,7,14		<<0.05
	CBC*TC			<<0.05
28 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.109	<<0.05
	TC	0,7,28		<<0.05
	CBC*TC			<<0.05
90 días	CBC	0%, 10%, 20%	0.144	<<0.05
	TC	0,7,28		<<0.05
	CBC*TC			<<0.05

CBC: Sustitución de cemento por CBC en peso.

TC: Tiempo de curado por inmersión en días.

CBC*TC: La interacción de CBC y TC.

Nota temporal: Analizando con CV para 28 c, se encontró significancia en todas las edades.

4.2.5.3. Coeficientes de difusión de cloruros

Efectos principales

Los resultados del ANOVA mostrados en la Tabla 4.8, indican que los dos efectos principales (el contenido de CBC y el tiempo de curado) son altamente significantes ($p < 0.05$).

Con base en el análisis descriptivo-explicativo de resultados de la sección 4.2.2.3 y el análisis estadístico, se pueden hacer de manera general las siguientes afirmaciones:

1. La adición de 10 y 20% de CBC disminuye el *De* a 63 días de edad.
2. La aplicación de un curado por inmersión de 7 y 28 días no tiene un efecto significativo en el *De*, sin embargo un curado de 0 días incrementa los *De* sobre todo en la mezclas 0%CBC y 20%CBC.

Interacciones

Con base en los resultados del ANOVA se observa que la interacción es significativa. Sin embargo, según lo analizado en la sección 4.2.2.3 puede afirmarse que esta interacción solo existe entre un tiempo de curado de 0 a 7 y de 0 a 28 días, ya que entre 7 y 28 días no la hay. Lo cual significa que el decremento del *De* con el incremento del tiempo de curado de 0 a 7 o 28 días es menor al adicionar mayor cantidad de CBC.

Tabla 4.8. Resultados del ANOVA de Coeficientes de difusión de cloruros

Factores	Niveles	Homogeneidad de Varianzas – Levene (p)	ANOVA (p)
CBC	0%, 10%, 20%	0.599	<<0.05
TC	0,7,28		<<0.05
CBC*TC			0.009

CBC: Sustitución de cemento por CBC en peso.

TC: Tiempo de curado por inmersión en días.

CBC*TC: La interacción de CBC y TC.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de las mezclas y especímenes estudiados en el presente trabajo se concluye lo siguiente:

- La adición de CBC reduce la trabajabilidad de las mezclas de mortero debido a que incrementa la demanda de agua.
- La humedad instantánea en el ensayo de resistencia a compresión disminuye los valores registrados e incrementa las lecturas de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.
- La adición de 10% de CBC y un curado de 0 días afecta negativamente la resistencia a la compresión del mortero en todas las edades estudiadas; cuando se aplica un curado de 7 días la afectación es menor, y cuando se aplica un curado de 28 días la resistencia es disminuida ligeramente a edades tempranas. A edades tardías (28 y 90 días de edad) se obtiene una resistencia similar a la obtenida con el mortero elaborado solamente con cemento. La adición de 20 % de CBC disminuye la resistencia a compresión en todas las edades y tiempos de curado estudiados, sobre todo a edades tempranas y tiempos de curado menores.
- La adición de CBC en mortero disminuye las velocidades de pulso ultrasónico en todas las edades estudiadas (desde 3 a 90 días), sobre todo con tiempos de curado menores.
- El uso de CBC en 10 y 20% no incrementó (fueon reducidos a casi un 50%) los coeficientes de difusión de cloruros en mortero en todos los periodos de curado estudiados.
- En el periodo de tiempo estudiado la CBC no parece incrementar significativamente los potenciales y velocidad de corrosión de los especiemens de ferrocemento; sin

embargo, se requiere continuar con el monitoreo a largo plazo para concluir de manera definitiva, ya que los niveles de corrosión actuales son bajos.

RECOMENDACIONES

Las observaciones generadas en el desarrollo del presente trabajo permiten proponer las siguientes recomendaciones:

- Al realizar estudios de resistencia a la compresión y VPU con periodos de curado menores a algunas de las edades de ensayo, deberá esperarse el efecto perturbador de los distintos grados de humedad presentes, por lo que se recomienda realizar pruebas adicionales para cuatificar dicho efecto.
- Continuar con las lecturas de potenciales y velocidad de corrosión en los especímenes de ferrocemento elaborados para evaluar el efecto de la adición de la CBC en su deterioro por corrosión.
- Obtener micrografías de muestras de mortero almacenadas para complementar los estudios del efecto de la CBC en la propiedades evaluadas.
- Buscar posibles correlaciones entre pruebas electroquímicas con la temperatura y humedad relativa ambiental.

REFERENCIAS

- (ASTM) American Society for Testing and Materials.
- (UNC 2009) Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR, Comité Ejecutivo Nacional 2007-2010, “Estadísticas de la Caña de Azúcar - Consolidado Nacional 2000-2009”.
- ACI Comité 549, “Guide for the Design, Construction & Repair of Ferrocement”, (1993), ACI Manual of Concrete Practice 2001 Part 5: Masonry; Precast Concrete; Special Processes, 549.1R-93.
- ACI Committee 232, “Use of Fly Ash in Concrete”,(1996), ACI Manual of Concrete Practice 2001 Part 1: Materials and General Properties of Concrete, 232.2R-1: 9.
- Águila, I., Sosa, M., “Evaluación físico química de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos”, (2008), Revista de la facultad de ingeniería U.C.V., vol. 23, n° 4, pp. 55–66.
- Aitcin, P., “High-Performance Concrete”, (1998), Ed. E & FN SPON, Cap. 6 Review of de relevant properties of some ingredients of high-performance concrete, pages. 139-156.
- Al-Gahtani, A.S., “Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes”, (2010), ELSEVIER, Construction and Building Materials 24, 308–314.
- Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P., “Chloride threshold values todepassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar”, (2000), Journal Cement and concrete research, 30 1047-1055.
- Ashraf, M., Khan, A.N., Ali, Q., Mirza, J., Goyal, A., Anwar, A.M., “Physico-chemical, morphological and thermal analysis for the combined pozzolanic activities of minerals additives”, (2009), ELSEVIER, Construction and Building Materials 23, pages. 2207–2213.
- Askeland, D., “Ciencia e Ingeniería de los Materiales”,3ª Edicion, Cap 6 Control de la microestructura y propiedades mecánicas de los materiales. Pag 130-136.
- Atis, C. D., y Bilim, C., "Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag”, (2007), ELSEVIER, Building and Environment 42, 3060–3065.
- Atis, C.D., Ozcan, F., Kılıc, A., Karahan, O., Bilim, C., y Severcan, M.H., “Influence of dryand wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete”, (2005), ELSEVIER, Building and Environment 40, 1678–1683.
- Awal, A., Hussin, W., “The Effectiveness of Palm Oil Fuel Ash in Preventing Expansion Due to Alkali-silica Reaction”, (1997), Cement and Concrete Composites 19 367-312.
- Bai, J., Wild, S., Sabir, B.B., “Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater”, (2003), Pergamon, Cement and Concrete Research 33, pages. 353–362.

- Bhargava, A. y Banthia, N., “Permeability of concrete with fiber reinforcement and service life predictions” (2008), RILEM, Materials and Structures, vol. 41, pags. 363-372.
- Broomfield, J., “Corrosion of steel in concrete”, (1997), Ed. Fn Spon., Cap. 4 Condition evaluation, pags. 36 – 50
- Caballero A. T., “Pantallas de Ferrocemento para la captación de agua de lluvia” (2001), IPN, pags. 1-12.
- Caballero, F.J., “Secado, absorción de agua y difusión de cloruros en concreto conteniendo extracto de nopal”, (2008), Tesis de Maestría, Oaxaca, México: CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.
- Cakır, O., y Aköz, O., “Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS”, (2008), ELSEVIER, Construction and Building Materials 22, 308–314.
- Carino, N., “Non destructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures”, (1999), Journal of Performance of Constructed Facilities, August 1999, Vol. 13, No. 3, pags.96-106.
- Castro, B. P., “Corrosión en estructuras de concreto armado”, (2001), México. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C.
- Chang, TP., Lin, HC., Chang, WT., Hsiao, JF., “Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods”, (2006), ELSEVIER, Cement & Concrete Composites 28, pags. 57–68.
- Cheng, A., Huang, R., Wu, J.K., Chen, C.H., “Effect of rebar coating on corrosion resistance and bond strength of reinforced concrete”, (2005), ELSEVIER, Construction and Building Materials 19, pags. 404–412.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. y Jaturapitakkul, C., “Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash” (2007),Elsevier, Construction and Building Materials, vol. 21, pags. 1492-1499.
- CNS Electronics, a Division of Fulton Group Limited, “Operating Manual of Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester, PUNDIT 6, HUMBOLDT Mod. H-2853^a.
- Cordeiro, G., Filho, R., Tavares, L., Fairbairn, E., “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”, (2008), ELSEVIER, Cement and Concrete Composites, , vol. 30, pags. 410-418.
- Cordeiro, G., Filho, R., Tavares, L., Fairbairn, E., “Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete”, (2009), ELSEVIER, Cement and Concrete Research, vol. 39, pags. 110-115.
- Day, K.W., “Concrete Mix Design, Quality Control and Specification”, (2006), Taylor & Francis, 3^{ra} Edición, Cap 8, pags. 202-217.
- Del valle, M.A., Pérez, L.T., Martínez, M.M., “El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado”, (2001), Sanfandila, Qro. México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

- Demirboga, R., Turkmen, I., Karakoc, M. B., "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete", (2004), Pergamon, Cement and Concrete Research 34 pags. 2329–2336.
- Farina, S.B., Duffó, G.S., "Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions", (2007), ELSEVIER, Electrochimica Acta 52, pags. 5131–5139.
- Fontana, M., "Corrosion Engineering", (1986), Ed. Mc Graw Hill, Cap. 4 Corrosion Testing, pags. 171-174.
- Frías, M., Villar-Cociña, E., Sanchez de Rojas, M., Valencia-Morales, E., "The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: Application of a kinetic-diffusive model", (2005), ELSEVIER, Cement and Concrete Research, vol. 35, pags. 2137-2142.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material", (2007), ELSEVIER, Cement and Concrete Composites, , vol. 29, pags. 515-524.
- García, Escalante, José Iván "Materiales alternativos al cemento Portland" (2002).
- Genescá, L., "Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión", (2002), UNAM, Cap.2, Técnicas electroquímicas de corriente directa para el estudio de la corrosión, pags. 9-50.
- Gu, P., Beaudoin, J., "Obtaining Effective Half-Cell Potential Measurements in Reinforced Concrete Structures", (1998), Institute for Research in Construction (IRC), Construction Technology Update No.18.
- Güneysi, E., Gesoglu, M., Özturan, T., Özbay, E., "Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age", (2009), ELSEVIER, Construction and Building Materials, pags. 23 469–481.
- Güneysi, E., Özturan, T., Gesoglu, M., "A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions", (2005), ELSEVIER, Cement & Concrete Composites 27, pags. 449–461.
- Guo, L., Nobuakib, O., Ying-shua, Y., "Effects of the initial water curing time on the corrosion behavior of steel bar corrosion in fly ash concrete", (2009), ELSEVIER, Procedia Earth and Planetary Science 1, pags. 742–749, The 6th International Conference on Mining Science & Technology.
- Gutiérrez, J.F., "Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico", (2008), Tesis de Maestría, Oaxaca, México: CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.
- Hamad, B.S., Mike, J.A., "Bond strength of hot-dip galvanized reinforcement in normal strength concrete structures", (2005), ELSEVIER, Construction and Building Materials 19, pags. 275–283.

- Hernández, A.M., “Evaluación del efecto de adiciones industriales y naturales en la resistencia a la penetración de cloruros en concreto hidráulico”, (2009), Tesis de Maestría, Oaxaca, México: CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., Saeting, T., “Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash”, (2007), *Construction and Building Materials* 21 pags. 1399–1405.
- Jiménez, Q. V.G., “Aspectos de durabilidad y seguridad estructural para el mejoramiento de micropresas de ferrocemento” (2007), Informe Técnico de Proyecto de Investigación IPN.
- Kayali, O., Zhu, B., “Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution”, (2005), *ELSEVIER, Cement and Concrete Composites* 27, pags. 117-124.
- Komlos, K., Popovics, S., Nürnbergerová, T., Babál, B., Popovics, J.S.,” Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards”, (1996), *ELSEVIER, Cement and Concrete Composites* 18, pags. 357-364.
- Kosmatka, H. S., Kerkhoff, B., Panarese, C. W. y Tanesi J., “Diseño y Control de Mezclas de Concreto” (2004), Portland Cement Association, Cap.3 Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice y puzolanas Naturales, pags. 77-90, Cap. 6 Aditivos para Concreto, pags. 138-141.
- Lea, F., Desch, C., “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, (2004), 4^{ta} Edición editada por Peter Hewlett, Elsevier Butterworth-Heinemann, pags. 471-637.
- Maekawa, K., Chaube, R. y Kishi, T., “Modelling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport”(1999), Ed. Taylor & Francis, Cap. 1 Introduction, pags. 7-9.
- Malhotra, V.M., Ramezaniapour, A.A., “Fly Ash in Concrete”, (1994), Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Cap.1 , pag. 4, Cap.6 pag. 83.
- Martirena, F., Middendorf, B., Day, R., Gehrke, M., Roque, P., Martínez, L., Betancourt, S., “Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw”, (2006), *ELSEVIER, Cement and Concrete Research*, vol. 36, pags.1056-106.
- Mehta K. y Monteiro P., “Concreto, Estructura, propiedades y materiales. México: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C” (1998)., pag 44.
- Montes, P., Theodore, W.B., Derek, H. L., “Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosión of steel ir high performance concrete subjected to a simulated marine environment”, (2004), *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp 243-253.
- Montgomery, D., “Diseño y Análisis de Experimentos”, (2006), Ed. Limusa, Caps. 1 Introducción, 5 Introducción a los diseños factoriales y 9 Diseños factoriales y factoriales fraccionados con tres niveles y con niveles mixtos, pags. 1-19, 170-200 y 363-373.

- Morgan, J. E. y Morgan, R. G., “The armature that made history: The boats of Joseph Luis Lambot” (1998), Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement, pags. 11-34.
- Muralidharan, S., Vedalakshmi, R., Saraswathi, V., Joseph, J., Palaniswamy, N., “Studies on the aspects of chloride ion determination in different types of concrete under macro-cell corrosion conditions”, (2005), ELSEVIER, Building and Environment 40, pags. 1275-1281.
- Naaman, A.E., “Ferrocement and Laminated Cementitious Composites”, (2000), Techno Press 3000, Cap. 1 y 5, págs. 1-42, 159-177.
- Naaman, E. A., “Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites: Four decades of progress” (2006), Eighth International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 3-21.
- Nedwell, J. P., y Nakassa, S. A., “High Performance Ferrocement Using Stainless Steel Mesh and High Strength Mortar” (1998), Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement, págs. 277-284.
- Neville, A., “Properties of Concrete” (2000), Ed. Prentice Hall., Cap. 12 Testing of hardened concrete, pags. 631-633, Cap. 13 Concretes with particular properties, pag. 660.
- Neville, A., “Tecnología del Concreto” (1995), Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., Cap. 2 Materiales cementantes de diferentes tipos. pags. 57-60, Cap. 5 Aditivos. pags. 176-181, Cap. 10 Durabilidad del concreto, pag. 337 y Cap. 13 Concretos con diferentes materiales cementantes pags. 455-473. Pag, 220, pag 418, Cap.12, pag 441-443.
- Newman, J., Choo, B.S., “Advanced Concrete Technology Constituent Materials”, (2003), First published, Butterworth-Heinemann, imprint of Elsevier, pags. 3/1-59.
- Olvera, A.L., “El ferrocemento y sus aplicaciones”, (2002), Instituto Politécnico Nacional, Ed. Alfaomega, págs. 75-99.
- Ozer, B., y Ozkul, M. H., “The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes”, (2004), PERGAMON, Cement and Concrete Research xx, xxx–xxx.
- Paramasivam, P., “Model Code of Ferrocement” (1998), International Ferrocement Society, cap. 7, pags. 663-671.
- Paul, B.K., Pama, R.P., “Ferrocemento”, (1991), Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Ed. Limusa, 2^{da} reimpresión, Cap. 2 y 4, págs. 31-50 y 71-177.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M., Serna, P., Velázquez, S., Ordóñez, L., “El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas” (2002), VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia 2002, págs. 591-600.
- Rixom, R., Mailvaganam, N., "Chemical Admixtures for Concrete" (1999), Third edition, E & FN Spon, Taylor & Francis Group, Cap 1 Superplastizers, pags 30-31.

- Robles, A. L., “Alternative Cementitious Products: The Philippine Experience” (2006), Eighth International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 513-524.
- Robles, A. L., “Evolution of Ferrocement” (2001), Seventh International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 17-23.
- Romagnoli, M., Burani, M., Tari, G., Ferreira, J.M.F., “A non-destructive method to assess delamination of ceramic tiles”, (2007), ELSEVIER, Journal of the European Ceramic Society 27, pags. 1631–1636.
- Rukzon, S. y Chindapasirt, P.,” Strength and Carbonation of Ternary Blended Portland Rice Husk Ash and Fly Ash Cement Mortar” (2006), Eighth International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 525-533.
- Rukzon, S., Chindapasirt, P., “Use of waste ash from various by-product materials in increasing the durability of mortar”, (2008), Songklanakarin Journal of Science and Technology, 30 (3), 485-489.
- Sánchez, M., Alonso, M.C., Cecílio, P., Montemor, M.F., Andrade, C., “Electrochemical and analytical assessment of galvanized steel reinforcement pre-treated with Ce and La salts under alkaline media”, (2006), ELSEVIER, Cement & Concrete Composites 28, pags. 256–266.
- Sata, V., Sujivorakul, C., Jaturapitakkul, C. y Naaman E. A.,” Effect of Pozzolanic Materials on Tensile and Bending of Fiber Reinforced Cement Composites” (2006), Eighth International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 503-512.
- Shafiq, N., Cabrera, J.G., “Effects of initial curing condition on the fluid transport properties in OPC and fly ash blended cement concrete”, (2004), ELSEVIER, Cement & Concrete Composites 26, pags. 381–387.
- Solís-Carcaño, R., Moreno, E.I., “Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity”, (2008), ELSEVIER, Construction and Building Materials 22, pags. 1225–1231.
- Song, H-W., Lee, C-H., Ann, K.Y., “Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments”, (2008), ELSEVIER, Cement & Concrete Composites 30, pags. 113–121.
- Song, H-W., Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., “Tolerance limit of chloride for steel in blended cement mortar using the cyclic polarisation technique”, (2008), Springer, J Appl Electrochem 38, pags. 445-450.
- Stern, M., Geary, A., “Electrochemical Polarization”, (1957), Journal of the Electrochemical Society, Jan 1957, 104/1, pags, 56-63.
- Sujjavanich, S., Sida, V., Suwanvitaya, P., “Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range wáter reducer”, (2005), ACI Materials Journal, V.102 no. 3, pags. 177-182.

- Suryavanshi, A.K., Swamy, R.N., Cardew, G.E., “Estimation of diffusion coefficients for chloride ion penetration into structural concrete”, (2002), ACI Materials Journal V.99 no. 5, pags. 441-449.
- Tan, Z.Q., Hansson, C.M., “Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete”,(2008), ELSEVIER, Corrosion Science 50, pags. 2512–2522.
- Tay, J., Show, K., “Use of ash derived from oil-palm waste incineration as a cement replacement material” (1995), ELSEVIER, Resources Conservation and Recycling, vol. 13, pags. 27-36.
- Taylor, H., “Cement Chemistry”, (1997), Ed. Thomas Telford, 2^{da} Edición, pags. 1-28.
- Tie-jun, Z., Xin-qi, M., y Folker, H. W., “Restrained Drying and Crack Formation of Strain Hardening Cement-Based Composites”, (2006), Eighth International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, pags. 549-559.
- Tittarelli, F., Bellezze, T., “Investigation of the major reduction reaction occurring during the passivation of galvanized steel rebars”, (2010), ELSEVIER, Corrosion Science 52, pags. 978–983.
- Vedalakshmi, R., Rajagopal, K., Palaniswamy, N., ”Longterm corrosion performance of rebar embedded in blended cement concrete under macro cell corrosion condition”, (2008), ELSEVIER, Construction and Building Materials 22, pags. 186–199.
- Vickridge, I. y Ranjbar, M., “The Combined Effect of Crack, Load and Aggressive Environment on the Corrosion Rate of Ferrocement Reinforcement”(1998), Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement, págs. 313-327.
- Vickridge, I. y Ranjbar, M., “The Effect an Aggressive Environment on the Flexural Performance of Ferrocement”(1998), Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement, págs. 313-327.
- Vickridge, I., Nakassa, S. A., y Turner, H. “High Durability Ferrocement”(1998), Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement, págs. 297-312.
- Villar-Cociña, E., Valencia-Morales, E., González-Rodríguez, R., Hernández-Ruíz, J., “Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model”, (2003), PERGAMON, Cement and Concrete Research, vol. 33, pags. 517-524.
- Wainshtok, H., “Ferrocemento: Diseño y Construcción”, (1992), Ed. Félix Varela, Cap. 2-3, págs. 34-72.

ANEXOS

I. Dosificación de mezclas de mortero

Colado no.:	1	Fecha:	Mar 22 sep 09
Mezcla:	0% CBC	Hora:	9:00 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	57.000	-0.855	59.320
Cemento	19.000	0.000	19.000
CBC	0.000	0.000	0.000
Agua	11.970	- 0.855	11.115
Super (ml/kg)	0.000	0.000	0.000

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	12
Placas 20x25	9
Cil 10 cm	

	%A	%H
Arena	2.57%	4.07%

Colado no.:	2	Fecha:	Vie 25 sep 09
Mezcla:	0% CBC	Hora:	12:20 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	53.100	-0.924	55.389
Cemento	17.700	0.000	17.700
CBC	0.000	0.000	0.000
Agua	11.151	- 0.924	10.228
Super (ml/kg)	0.000	0.000	0.000

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	36
Placas 20x25	0
Cil 10 cm	

	%A	%H
Arena	2.57%	4.31%

Colado no.:	3	Fecha:	Mar 29 sep 09
Mezcla:	10% CBC	Hora:	14:00 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	51.667	-0.987	53.981
Cemento	15.500	0.000	15.500
CBC	1.722	-0.022	1.744
Agua	10.850	- 1.102	9.748
Super (ml/kg)	9.000	-0.093	155 ml

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	15
Placas 20x25	9
Cil 10 cm	

	%A	%H
Arena	2.57%	4.48%
CBC		1.29%

Colado no.:	4	Fecha:	Vie 2 oct 09
Mezcla:	10% CBC	Hora:	14:35 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	46.333	-0.950	48.473
Cemento	13.900	0.000	13.900
CBC	1.544	-0.013	1.557
Agua	9.730	1.046	8.684
Super (ml/kg)	9.000	-0.083	139 ml

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	36
Placas 20x25	
Cil 10 cm	

	%A	%H
Arena	2.57%	4.62%
CBC		0.85%

Colado no.:	5	Fecha:	Mar 6 oct 09
Mezcla:	20% CBC	Hora:	19:00 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	49.500	-0.723	51.495
Cemento	13.200	0.000	13.200
CBC	3.300	-0.051	3.350
Agua	10.395	0.942	9.453
Super (ml/kg)	17.000	-0.168	280.5 ml

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	16
Placas 20x25	9
Cil 10 cm	

	%A	%H
Arena	2.57%	4.03%
CBC		1.54%

Colado no.:	6	Fecha:	Vie 9 oct 09
Mezcla:	20% CBC	Hora:	15:10 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	51.000	-0.770	53.080
Cemento	13.600	0.000	13.600
CBC	3.400	-0.068	3.467
Agua	10.710	1.011	9.700
Super (ml/kg)	17.000	-0.173	289 ml

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	39
Placas 20x25	0
Cil 10 cm	

	%A	%H
Arena	2.57%	4.08%
CBC		1.99%

Colado no.:	7	Fecha:	Mar 12 oct 09
Mezcla:	20% CV	Hora:	14:00 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	48.000	-0.773	50.006
Cemento	12.800	0.000	12.800
CV	3.200	0.000	3.200
Agua	10.080	0.773	9.308
Super (ml/kg)	0.000	0.000	0.000

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	22
Placas 20x25	3
Cil 10 cm	3

	%A	%H
Arena	2.57%	4.18%

Colado no.:	8	Fecha:	Vie 16 oct 09
Mezcla:	0% CBC	Hora:	14:30 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	39.000	-0.683	40.685
Cemento	13.000	0.000	13.000
CBC	0.000	0.000	0.000
Agua	8.190	-0.683	7.508
Super (ml/kg)	0.000	0.000	0.000

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	5
Placas 20x25	0
Cil 10 cm	9

	%A	%H
Arena	2.57%	4.32%

Colado no.:	9	Fecha:	mie 21 oct 09
Mezcla:	10% CBC	Hora:	12:30 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	38.333	-0.682	40.000
Cemento	11.500	0.000	11.500
CBC	1.278	-0.021	1.299
Agua	8.050	-0.773	7.277
Super (ml/kg)	9.000	-0.069	115 ml

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	5
Placas 20x25	0
Cil 10 cm	9

	%A	%H
Arena	2.57%	4.35%
CBC		1.68%

Colado no.:	10	Fecha:	Vie 23 oct 09
Mezcla:	20% CBC	Hora:	16:15 Hrs

Materiales	Masa (kg)	Correc por humedad (Kg)	Masa corregida (kg)
Arena	38.438	-0.723	40.148
Cemento	10.250	0.000	10.250
CBC	2.563	-0.043	2.606
Agua	8.072	-0.896	7.176
Super (ml/kg)	17.000	-0.131	217.8 ml

Especímenes	Cantidad
Cil 7.5 cm	5
Placas 20x25	0
Cil 10 cm	9

	%A	%H
Arena	2.57%	4.45%
CBC		1.68%

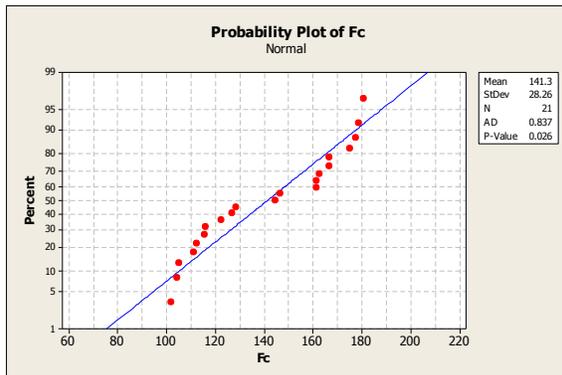
II. Análisis estadístico

En el presente anexo se muestran los resultados del principal análisis estadístico realizado con el software MiniTab 5.0 a las variables de resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y coeficientes de difusión de cloruros. El análisis incluyó la prueba de normalidad, homogeneidad de varianzas y el ANOVA. En las tres variables respuesta se analizó el efecto del contenido de la ceniza de bagazo de caña (CBC) en niveles de 0, 10 y 20% y el tiempo de curado (TC) en niveles de 0, 7 y 28 días.

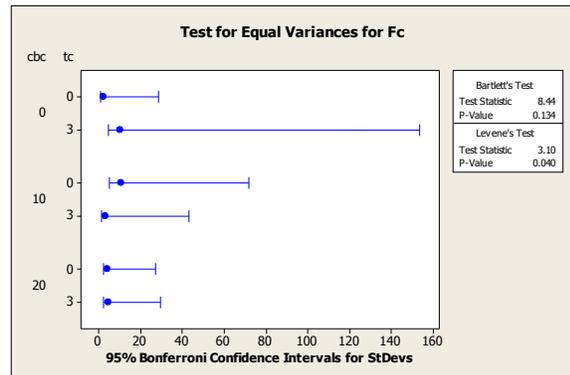
Debido a que las variables de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico fueron estudiadas a distintas edades (3, 7, 14, 28 y 90 días), se realizó un análisis independiente para cada edad. Cabe aclarar que por existir edades de estudio menores a los tiempos de curado se generaron también los niveles de 3 y 14 días de curado.

Resistencia a la compresión

A 3 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: Fc versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	2	0, 3

Analysis of Variance for Fc, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	13759.5	13955.6	6977.8	162.94	0.000

TC	1	620.1	529.1	529.1	12.36	0.003
CBC*TC	2	952.6	952.6	476.3	11.12	0.001
Error	15	642.4	642.4	42.8		
Total	20	15974.5				

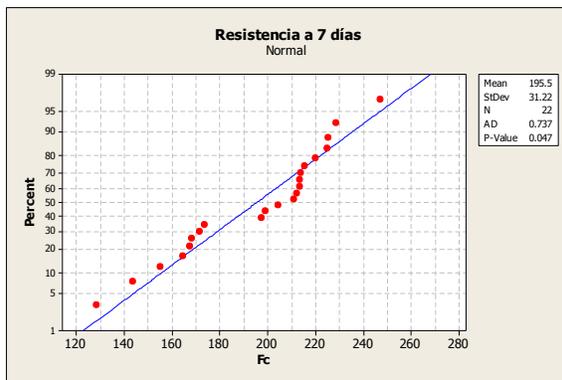
S = 6.54406 R-Sq = 95.98% R-Sq (adj) = 94.64%

Unusual Observations for Fc

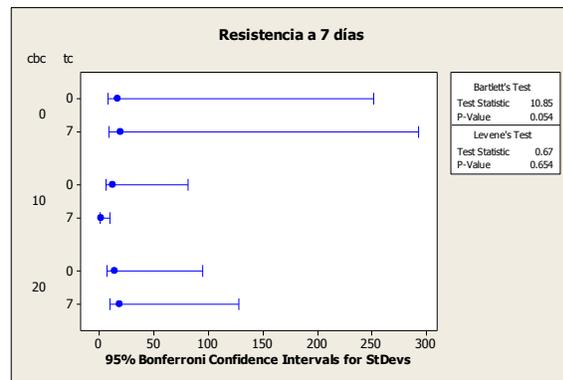
Obs	Fc	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
5	180.64	169.61	3.778	11.027	2.06 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

A 7 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: Fc versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	2	0, 7

Analysis of Variance for Fc, using Adjusted SS for Tests

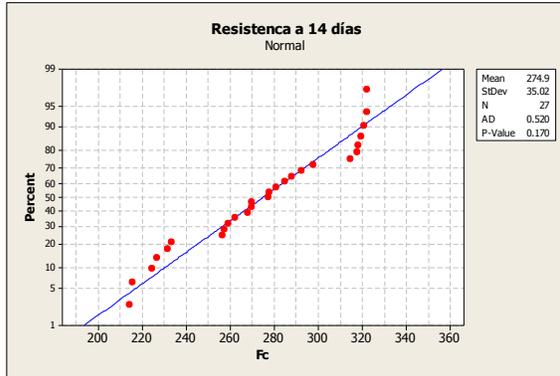
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	16926.0	16926.0	8463.0	41.47	0.000
TC	1	1.6	7.6	7.6	0.04	0.849
CBC*TC	2	274.8	274.8	137.4	0.67	0.524
Error	16	3265.0	3265.0	204.1		
Total	21	20467.3				

S = 14.2851 R-Sq = 84.05% R-Sq(adj) = 79.06%

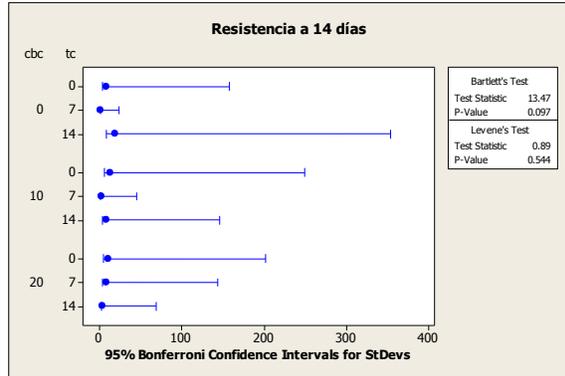
Unusual Observations for Fc

Obs	Fc	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
19	128.57	154.89	7.143	-26.325	-2.13 R

A 14 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: Fc versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 14

Analysis of Variance for Fc, using Adjusted SS for Tests

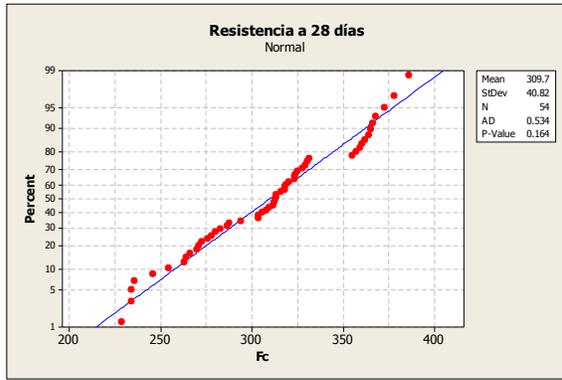
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	20746.3	20746.3	10373.1	111.33	0.000
TC	2	8896.3	8896.3	4448.2	47.74	0.000
CBC*TC	4	565.0	565.0	141.3	1.52	0.240
Error	18	1677.2	1677.2	93.2		
Total	26	31884.9				

S = 9.65290 R-Sq = 94.74% R-Sq(adj) = 92.40%

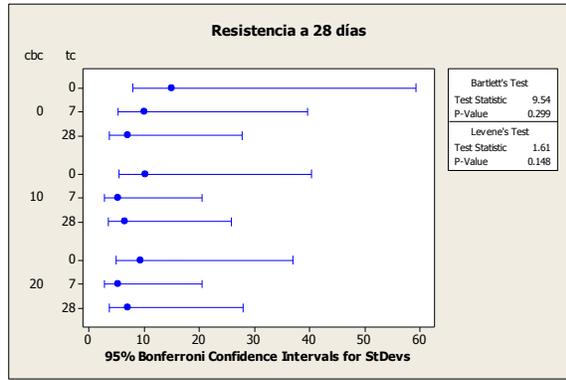
Unusual Observations for Fc

Obs	Fc	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	314.55	294.807	5.573	19.743	2.51 R
9	277.43	294.807	5.573	-17.377	-2.20 R

A 28 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: Fc versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 28

Analysis of Variance for Fc, using Adjusted SS for Tests

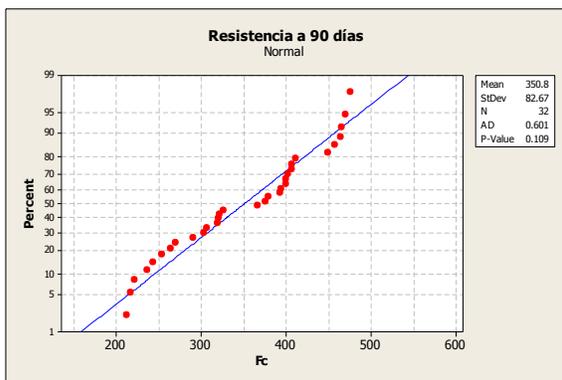
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	30405	30405	15202	191.33	0.000
TC	2	49654	49654	24827	312.46	0.000
CBC*TC	4	4657	4657	1164	14.65	0.000
Error	45	3576	3576	79		
Total	53	88291				

S = 8.91387 R-Sq = 95.95% R-Sq(adj) = 95.23%

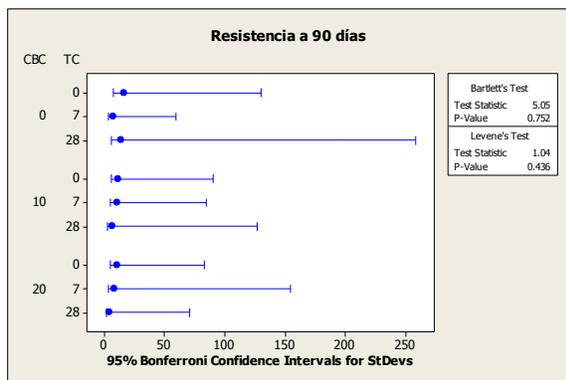
Unusual Observations for Fc

Obs	Fc	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	294.29	316.035	3.639	-21.745	-2.67 R

A 90 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: Fc versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
--------	------	--------	--------

CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 28

Analysis of Variance for Fc, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	35253	32573	16287	139.93	0.000
TC	2	171211	170972	85486	734.46	0.000
CBC*TC	4	2735	2735	684	5.87	0.002
Error	23	2677	2677	116		
Total	31	211877				

S = 10.7886 R-Sq = 98.74% R-Sq(adj) = 98.30%

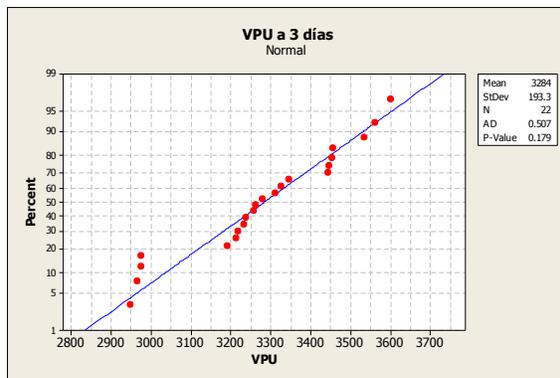
Unusual Observations for Fc

Obs	Fc	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	289.99	310.138	5.394	-20.148	-2.16 R

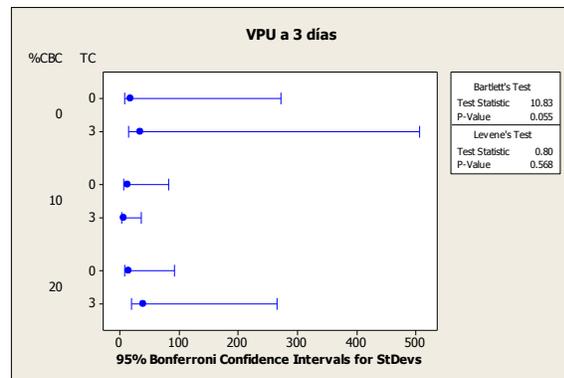
R denotes an observation with a large standardized residual.

Velocidad de Pulso Ultrasónico

A 3 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: VPU versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	2	0, 3

Analysis of Variance for VPU, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	433617	433617	216809	419.42	0.000
TC	1	339265	330487	330487	639.33	0.000
CBC*TC	2	3418	3418	1709	3.31	0.063
Error	16	8271	8271	517		

Total 21 784571

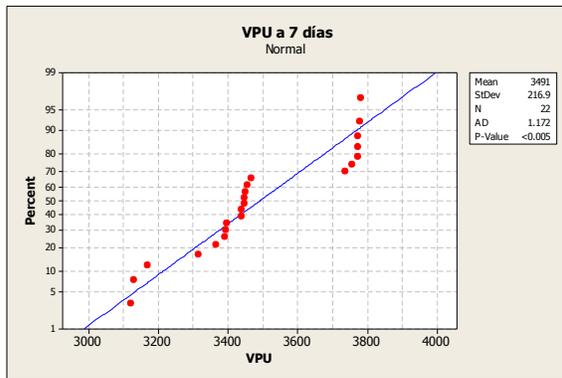
S = 22.7360 R-Sq = 98.95% R-Sq(adj) = 98.62%

Unusual Observations for VPU

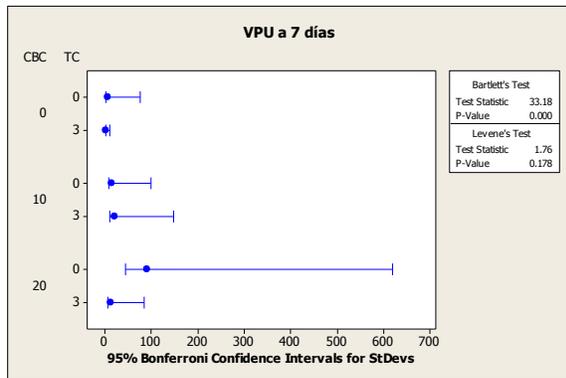
Obs	VPU	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
20	3191	3247.25	11.37	-56.25	-2.86 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

A 7 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: VPU versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	2	0, 3

Analysis of Variance for VPU, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	378051	378051	189026	113.18	0.000
TC	1	571228	562118	562118	336.56	0.000
CBC*TC	2	11650	11650	5825	3.49	0.055
Error	16	26723	26723	1670		
Total	21	987653				

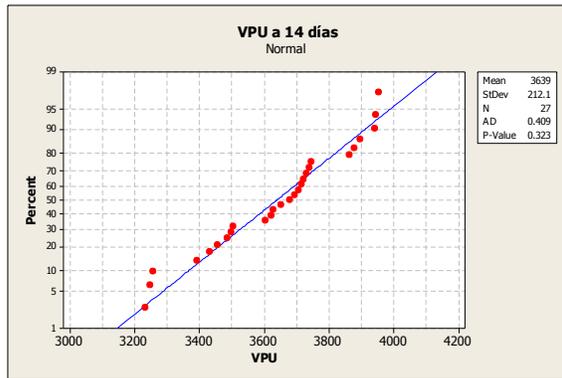
S = 40.8680 R-Sq = 97.29% R-Sq(adj) = 96.45%

Unusual Observations for VPU

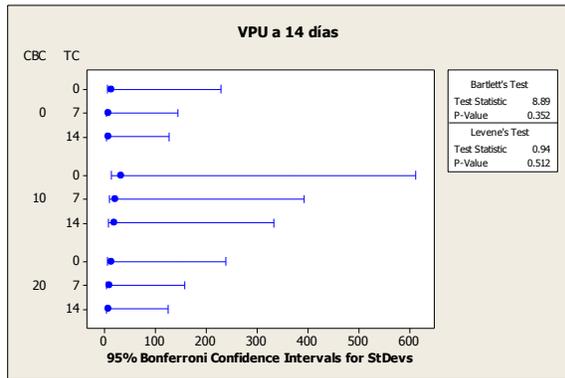
Obs	VPU	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
17	3316	3185.00	20.43	131.00	3.70 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

A 14 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: VPU versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 14

Analysis of Variance for VPU, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	364321	364321	182161	712.49	0.000
TC	2	778359	778359	389179	1522.21	0.000
CBC*TC	4	22657	22657	5664	22.16	0.000
Error	18	4602	4602	256		
Total	26	1169939				

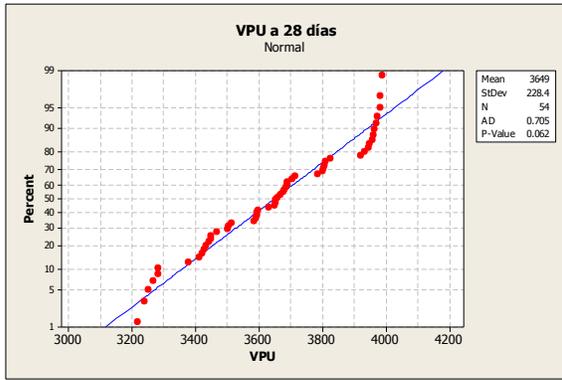
S = 15.9896 R-Sq = 99.61% R-Sq(adj) = 99.43%

Unusual Observations for VPU

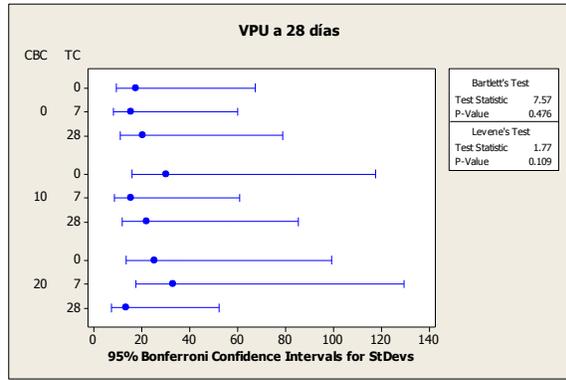
Obs	VPU	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	3458	3428.67	9.23	29.33	2.25 R
11	3394	3428.67	9.23	-34.67	-2.66 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

A 28 días de edad



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: VPU versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 28

Analysis of Variance for VPU, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	542283	542283	271142	557.16	0.000
TC	2	2133546	2133546	1066773	2192.08	0.000
CBC*TC	4	67015	67015	16754	34.43	0.000
Error	45	21899	21899	487		
Total	53	2764743				

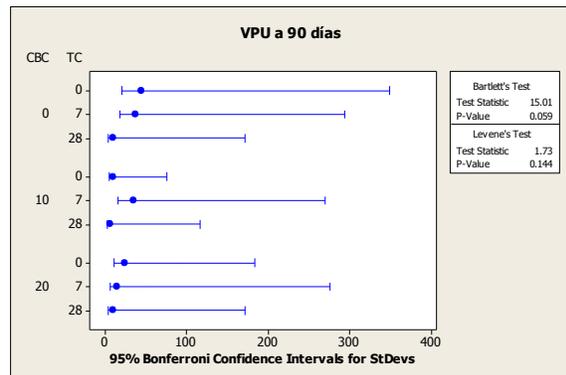
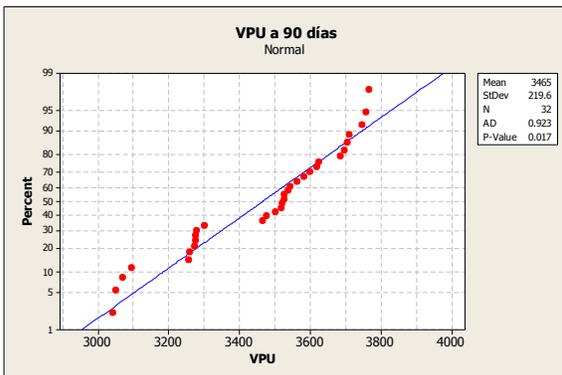
S = 22.0601 R-Sq = 99.21% R-Sq(adj) = 99.07%

Unusual Observations for VPU

Obs	VPU	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
19	3469	3423.83	9.01	45.17	2.24 R
24	3378	3423.83	9.01	-45.83	-2.28 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

A 90 días de edad



General Linear Model: VPU versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 28

Analysis of Variance for VPU, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	653189	601183	300591	423.73	0.000
TC	2	772039	771205	385603	543.57	0.000
CBC*TC	4	53469	53469	13367	18.84	0.000
Error	23	16316	16316	709		
Total	31	1495014				

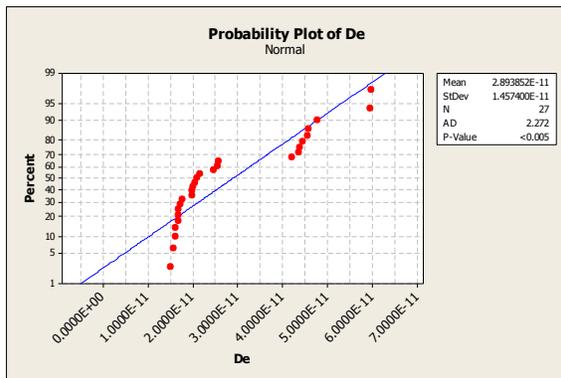
S = 26.6343 R-Sq = 98.91% R-Sq(adj) = 98.53%

Unusual Observations for VPU

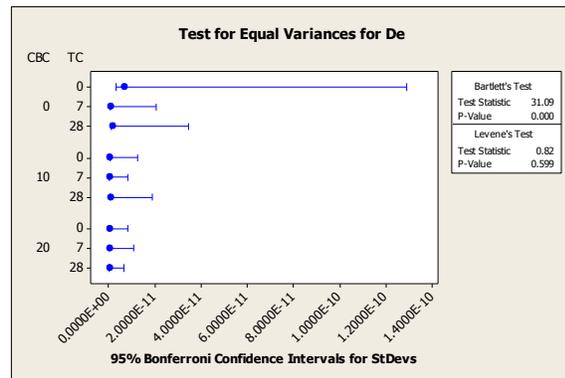
Obs	VPU	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	3563	3507.50	13.32	55.50	2.41 R
8	3687	3633.25	13.32	53.75	2.33 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Coeficiente de difusión de cloruros (De)



Prueba de distribución normal



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

General Linear Model: De versus CBC, TC

Factor	Type	Levels	Values
CBC	fixed	3	0, 10, 20
TC	fixed	3	0, 7, 28

Analysis of Variance for De, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
CBC	2	51.0249	51.0249	25.5125	432.78	0.000

TC	2	2.0351	2.0351	1.0176	17.26	0.000
CBC*TC	4	1.1033	1.1033	0.2758	4.68	0.009
Error	18	1.0611	1.0611	0.0590		
Total	26	55.2244				

S = 0.242797 R-Sq = 98.08% R-Sq(adj) = 97.22%

Unusual Observations for De

Obs	De	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	4.789	5.57533	0.14018	-0.78633	-3.97 R
3	5.985	5.57533	0.14018	0.40967	2.07 R

R denotes an observation with a large standardized residual.