



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

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

“EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON CENIZAS
PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA
DE LAS VIAS TERRESTRES**

PRESENTA:
INGENIERO CIPRIANO BERNABÉ REYES

ASESOR:
MAESTRO EN ADMINISTRACIÓN WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

COASESOR:
DOCTOR EN INGENIERÍA QUÍMICA JOSÉ TRINIDAD PÉREZ QUIROZ

Morelia Michoacán, Febrero de 2015.



Tabla de contenido

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
DEDICATORIA	xi
AGRADECIMIENTOS	xii
1 RESUMEN	1
2 ABSTRACT.....	2
3 JUSTIFICACIÓN	3
3.1 Enfoque Estructural.....	3
3.2 Enfoque Ambiental	4
4 HIPÓTESIS.....	5
5 OBJETIVOS.....	5
5.1 General.....	5
5.2 Específicos	5
6 ANTECEDENTES	6
6.1 Fundamentos generales de un Mortero.....	6
6.1.1 Definición y antecedentes.....	6
6.1.2 Clasificación de los Morteros.....	8
6.1.3 Componentes de un mortero.....	9
6.1.4 Tipos de mezclado.....	29
6.1.5 Morteros Adicionados con puzolanas en estudio.....	30
6.2 Patologías de elementos fabricados con CP: Concretos y morteros	37
6.2.1 Ataque por sulfatos.....	37
6.2.2 Reacción álcali-sílice (RAS)	38
6.2.3 Ataque por cloruros	40
6.3 Fenómeno de corrosión del acero	42
6.3.1 Teoría del fenómeno de corrosión.....	42
6.3.2 Corrosión del acero estructural	44
6.3.3 Técnicas para el cálculo de la velocidad de corrosión	46
7 DESARROLLO EXPERIMENTAL	55



7.1	Organigrama de Actividades	55
7.2	Caracterización del Material Inerte	56
7.3	Análisis del agua	62
7.4	Materiales de estudio	62
7.5	Consistencia normal y Tiempos de fraguado	64
7.6	Proporcionamiento	66
7.7	Prueba de Fluidéz.....	67
7.8	Elaboración de especímenes.....	69
7.9	Pruebas Físico-Mecánicas y electroquímicas.....	72
7.9.1	Destructivas.....	72
7.9.2	No destructivas	90
8	RESULTADOS	96
8.1	Caracterización del Material inerte: arena	96
8.2	Caracterización del agua de mezclado.....	97
8.3	Resultados de fluorescencia de Rayos X	98
8.4	Análisis de partícula de las cenizas de sustitución.....	100
8.4.1	Caracterización Estadística.....	100
8.4.2	Morfología de partículas	101
8.4.3	Curvas de distribución granulométrica	102
8.4.4	Distribución Normal de los tamaños de partícula.....	103
8.5	Tiempos de fraguado y Consistencia Normal.....	104
8.6	Pruebas Físico-Mecánicas	105
8.6.1	Índice de Actividad Puzolánica.....	105
8.6.2	Resistencia a compresión en cubos	106
8.6.3	Adherencia	108
8.6.4	Resistencia a Tensión directa en Briquetas.....	110
8.6.5	Resistividad Eléctrica en Cubos.....	112
8.6.6	Velocidad de pulso Ultrasónico en cubos	114
8.6.7	Resistividad Eléctrica en Prismas con barras de acero inmerso	116
8.7	Ensayos electroquímicos.....	125



8.7.1	Potencial de Corrosión (E_{corr}).....	125
8.7.2	Velocidad de corrosión	131
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	138
10	CONCLUSIONES	140
11	RECOMENDACIONES.....	142
12	BIBLIOGRAFÍA.....	144
13	ANEXO FOTOGRÁFICO.....	154

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Distribución de puentes por tipo de material (IMT-pt-380, 2011).	4
Ilustración 2	Producción del cemento gris en México en el periodo 2000-2012 (Cámara Nacional del Cemento, 2014).	12
Ilustración 3	Consumo de cemento por habitante (Cámara Nacional del Cemento, 2014).	12
Ilustración 4	Materias primas y compuestos que aportan al cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014)	13
Ilustración 5	Esquema general del proceso de producción del cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014).....	14
Ilustración 6	Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros. ..	17
Ilustración 7	Morfología del gel de sílice formado por la reacción álcali-sílice.....	40
Ilustración 8	Proceso de corrosión del acero embebido en concreto o mortero. Tomado de Aguirre y Mejía.	43
Ilustración 9	Fasores de corriente (I) y potencial (E) separados por un ángulo de fase ϕ (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002)	47
Ilustración 10	Diagrama fasorial para una resistencia (R) y un capacitor (C) en serie. E corresponde al potencial total a través de la combinación de R y C, RI representa el componente resistivo y $jXcI$ representa el componente capacitivo. (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002)	49
Ilustración 11	Similitud de la interfase electrificada con un circuito eléctrico equivalente. (Pérez T. , 2002)	50



Ilustración 12 Diagrama equivalente con los elementos de resistencia y un capacitor, fungiendo como la resistencia de la solución, R_{tc} y como la doble capa entre metal y electrolito (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).....	51
Ilustración 13 Diagrama de Bode Freq vs $ Z $. Se obtienen los valores de R_{sol} y R_{tc} de manera directa (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).	52
Ilustración 14 Organigrama de actividades durante el procedimiento de experimentación.	55
Ilustración 15 Localización del lugar donde se obtuvo la arena, Huajúbaro, Michoacán. Por el autor.....	56
Ilustración 16 Lugar geográfico de obtención del material inerte, Huajúbaro, Michoacán. Por C. Bernabé.	57
Ilustración 17 Secado del arena en parrilla para obtener el dato de M_s	58
Ilustración 18 Procedimiento para obtener el secado superficial NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004.....	59
Ilustración 19 Equipo para realizar la prueba de MVSS.....	59
Ilustración 20 Varillado de la arena en la prueba de MVSV	60
Ilustración 21 Análisis colorimétrico.....	60
Ilustración 22 Análisis de contenido de finos.	61
Ilustración 23 Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Por C. Bernabé.	62
Ilustración 24 Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Por C. Bernabé.	62
Ilustración 25 Proceso de transporte de residuos de molienda de caña.	63
Ilustración 26 Obtención de la EAH en los patios de Arcelor Mittal, Lázaro Cárdenas, Michoacán.....	64
Ilustración 27 una muestra de MK tal como se distribuye	64
Ilustración 28 Aparato de Vicat utilizado para realizar las pruebas de consistencia normal y tiempos de fraguado inicial y final.....	65
Ilustración 29 Aparato de Gillmore para la realización de los tiempos de fraguado.	66
Ilustración 30 Método de mezclado de áridos mediante aspas de acero impulsadas por el taladro.	67
Ilustración 31 a) Llenado de molde sobre la mesa de fluidez, b) Medición del radio de expansión de la mezcla.....	68
Ilustración 32 Moldes de acrílico para la elaboración de las probetas a emplearse en las pruebas electroquímicas. Por el autor.	69
Ilustración 33 Etapas de llenado del cubo de 5cm x 5cm x5cm.....	71



Ilustración 34 Llenado de moldes para cubos de 5x5x5cm.....	71
Ilustración 35 a) Aplicación de carga sobre espécimen, b) Operación de la máquina universal Tinius Olsen. Por el autor.....	73
Ilustración 36 Muestra de un cubo probado a compresión de MK con 20% de sustitución.	74
Ilustración 37 Ruptura ideal en cubos. Cubo de MK con el 30% de sustitución.	74
Ilustración 38 Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.	76
Ilustración 39 Ejemplo de la prueba de flexión estática en los prismas. a) Aplicación de la carga, b) Falla al centro del prisma.	76
Ilustración 40 Perforación de las losas para la prueba de adherencia.	77
Ilustración 41 Elaboración de la mezcla del epóxico.....	77
Ilustración 42 Pegado de los discos de acero en el recubrimiento de mortero.....	78
Ilustración 43 Relación de dimensiones de las perforaciones y discos utilizados.	78
Ilustración 44 Disco y perno de acero para realizar la prueba de adherencia	79
Ilustración 45 Equipo para prueba Pull Off marca CONTROLS.....	79
Ilustración 46 Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.	80
Ilustración 47 Falla entre epóxico y el disco metálico.	81
Ilustración 48 Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material MK.	81
Ilustración 49 Falla en el revestimiento. Tipo 4.....	82
Ilustración 50 Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off. ..	82
Ilustración 51 Recipiente conteniendo probetas en inmersión con agua de mar artificial..	83
Ilustración 52 Elementos de la celda electroquímica. La placa funciona como contra-electrodo, el electrodo central es de referencia y la varilla en la probeta es el electrodo de trabajo.	84
Ilustración 53 Equipo de Gamry para la realización de las pruebas electroquímicas. Derecha: Conexión de los electrodos. Por el autor.....	84
Ilustración 54 Electrodo de referencia de media celda tipo calomel. Por el autor.	85
Ilustración 55 Placa de acero inoxidable AISI 316L/2B. Por C. Bernabé.	85
Ilustración 56 Configuración del sistema electroquímico. (ASTM-G59, 2003).....	86
Ilustración 57 Gráfico de la Resistencia a la polarización obtenido con el equipo y software Gamry Instruments.....	87



Ilustración 58 Resultados de ajuste utilizando el modelo de Randles. Utilizando el software Gamry, Izquierda; utilizando Zview2, lado derecho.	90
Ilustración 59 Medición de las dimensiones utilizando vernier.	91
Ilustración 60 Medición de la masa utilizando instrumentos electrónicos.....	91
Ilustración 61 a) Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico, b) espécimen prismático colocado sobre los transductores al ser realizada la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (ASTM-C-597, 2009).....	93
Ilustración 62 Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.....	93
Ilustración 63 Izquierda- Espécimen prismático colocado entre las dos placas de cobre para tomar la resistencia eléctrica. Derecha- Medición de la resistencia eléctrica en las probetas con barras de acero. Por C. Bernabé.	95
Ilustración 64 Distribución Granulométrica de las arenas empleadas en la experimentación: Huajúbaro y Lerma; límites de arenas para morteros ASTM C778-02.	97
Ilustración 65 Morfología de la CBC analizada en el MEB a 500x	101
Ilustración 66 Morfología de la EAH analizada en el MEB a 500x.	101
Ilustración 67 Morfología del MK analizado en el MEB a 1000x.	101
Ilustración 68 Distribución granulométrica de las partículas de MK, EAH, CBC Y CPC empleadas en la elaboración de los morteros.	103
Ilustración 69 Curvas de distribución normal de las partículas de MK, EAH, CBC Y CPC empleadas en la elaboración de los morteros.	103
Ilustración 70 Gráfica de Resistencia a la compresión en cubos de mortero de cemento sustituido parcialmente con CBC a edades de 14,28, 45, 90 y 180 días.	106
Ilustración 71 Gráfica de Resistencia a la compresión en cubos de mortero de cemento sustituido parcialmente con EAH a edades de 14,28, 45 y 90 días.	107
Ilustración 72 Gráfica de Resistencia a la compresión en cubos de mortero de cemento sustituido parcialmente con MK a edades de 14,28, 45, 90 y 180 días.....	107
Ilustración 73 Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con CBC a edades de 14, 28, 45 y 180 días.....	108
Ilustración 74 Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.....	109
Ilustración 75 Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con MK a edades de 14, 28, 45 y 180 días.....	109
Ilustración 76 Gráfico de esfuerzos por tensión directa en briquetas de mortero con sustituciones de CBC a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.....	110



Ilustración 77 Gráfico de esfuerzos por tensión directa en briquetas de mortero con sustituciones de EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.	111
Ilustración 78 Gráfico de esfuerzos por tensión directa en briquetas de mortero con sustituciones de MK a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.	111
Ilustración 79 Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de CBC a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.	112
Ilustración 80 Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.	113
Ilustración 81 Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de MK a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.	113
Ilustración 82 Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados a cubos de mortero con sustituciones de CBC a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.	115
Ilustración 83 Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados a cubos de mortero con sustituciones de EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.	115
Ilustración 84 Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados a cubos de mortero con sustituciones de MK.	116
Ilustración 85 Resistividad en las probetas testigo con diferente agregado. TH, arena de Huajúmbaro; TL, arena de río Lerma. Probetas con resultados más favorables del total de ensayos realizados.	117
Ilustración 86 Resistividad en las probetas testigo con diferente agregado. TH, arena de Huajúmbaro; TL, arena de río Lerma. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.	117
Ilustración 87 Resistividad en las probetas testigo con diferente agregado. TH, arena de Huajúmbaro; TL, arena de río Lerma. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.	118
Ilustración 88 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 5% y 15% de EAH. Probetas con resultados más favorables del total de ensayos realizados.	119
Ilustración 89 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 10%, 20% y 30% de EAH. Probetas con resultados más favorables del total de ensayos realizados.	119
Ilustración 90 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 5% y 15% de EAH. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.	120
Ilustración 91 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 10%, 20% y 30% de EAH. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.	120
Ilustración 92 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 5% y 15% de EAH. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.	121



Ilustración 93 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 30% de EAH. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.....	121
Ilustración 94 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de CBC. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.....	122
Ilustración 95 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de CBC. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.....	122
Ilustración 96 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de CBC en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20%. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.....	123
Ilustración 97 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de MK. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.....	123
Ilustración 98 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de MK. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.....	124
Ilustración 99 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de MK en porcentajes de 5%, 10% y 30%. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.....	124
Ilustración 100 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados más favorables del total de ensayos realizados. ...	126
Ilustración 101 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados promedio del total de ensayos realizados.....	127
Ilustración 102 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.	127
Ilustración 103 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de EAH y morteros testigo. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.....	128
Ilustración 104 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de EAH y morteros testigo. Resultados promedio del total de ensayos realizados.....	128
Ilustración 105 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de EAH y morteros testigo. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.	129
Ilustración 106 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de MK y morteros testigo. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.....	129
Ilustración 107 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de MK y morteros testigo. Resultados promedio del total de ensayos realizados.....	130
Ilustración 108 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.	130
Ilustración 109 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con CBC y en mortero sin adición. Resultados más favorables del total de ensayos realizados. ...	132



Ilustración 110 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con CBC y en mortero sin adición. Resultados promedio del total de ensayos realizados..... 132

Ilustración 111 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con CBC y en mortero sin adición. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados. 133

Ilustración 112 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con EAH y en mortero sin adición. Resultados más favorables del total de ensayos realizados. .134

Ilustración 113 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con EAH y en mortero sin adición. Resultados promedio del total de ensayos realizados..... 134

Ilustración 114 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con EAH y en mortero sin adición. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados. 135

Ilustración 115 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con MK y en mortero sin adición. Resultados más favorables del total de ensayos realizados. ..136

Ilustración 116 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con MK y en mortero sin adición. Resultados promedio del total de ensayos realizados..... 136

Ilustración 117 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con MK y en mortero sin adición. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados. 137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero (ASTM-C270, 2014) 8

Tabla 2 Tipos de Morteros, clasificación SCT..... 9

Tabla 3 Componentes de Cemento..... 14

Tabla 4 Clasificación por el tipo de Cemento..... 16

Tabla 5 Denominación del Cemento por sus características especiales (NMX-C414, 2010)..... 16

Tabla 6 Clasificación por clase resistente (NMX-C414, 2010) 16

Tabla 7 Tipos de cemento Portland (ASTM-C150, 2005). 17

Tabla 8 Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)..... 20

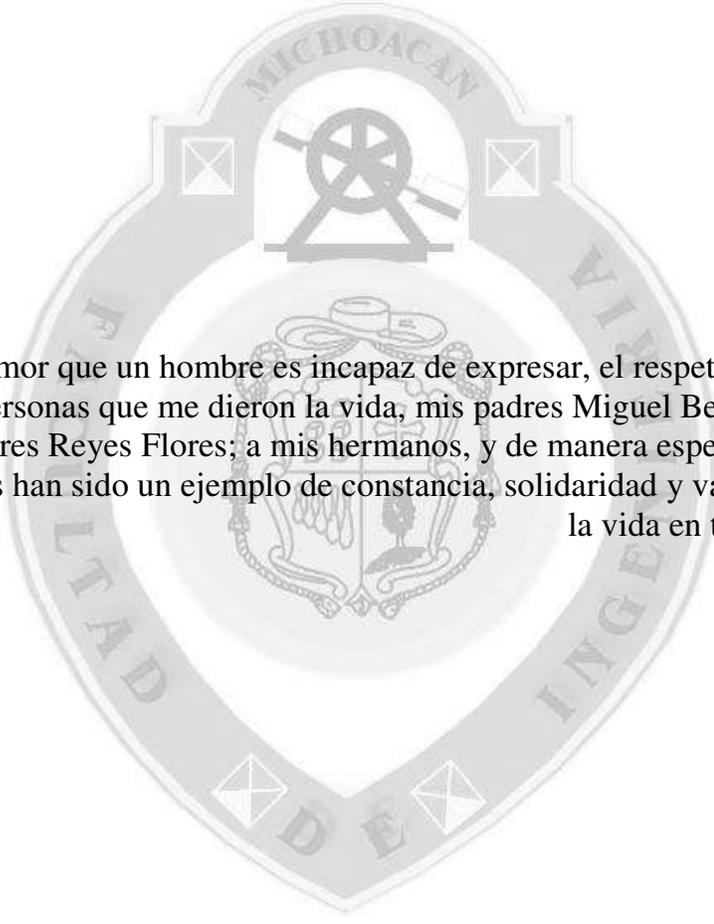
Tabla 9 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción (NMX-C-122-ONNCCE, 2004) 21



Tabla 10 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias (Instituto del Concreto, 1997).....	22
Tabla 11 Factores del agua que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)	22
Tabla 12 Clasificación de los aditivos minerales que pueden adicionarse a una mezcla, según el contenido de compuesto (Norma ASTM C618).....	25
Tabla 13 Reacciones de hidratación del cemento	27
Tabla 14 Rocas y minerales potencialmente reactivos con los álcalis.	39
Tabla 15 Proporción de la mezcla con que se elaboró el mortero.	66
Tabla 16 Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión de Faraday	89
Tabla 17 Resultados obtenidos de las pruebas de caracterización realizadas al material inerte.....	96
Tabla 18 Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero.....	98
Tabla 19 Composición química en porcentaje, en masa, de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por Fluorescencia de rayos X, ASTM E 2465 (ASTM-E-2465)...	99
Tabla 20 Caracterización estadística y numérica del tamaño de partícula de la CBC, EAH, MK y CPC 30R-RS.....	100
Tabla 21 Resultados de tiempo de fraguado y consistencia normal de las pastas de cemento con sustituciones de CBC, MK, EAH y sin sustitución.....	104
Tabla 22 Especificaciones físicas que deben cumplir los morteros (NMX-C-O21-ONNCE., 2004).....	104
Tabla 23 Índice de actividad puzolánica para las diferentes cenizas en sustitución, utilizando el esfuerzo a compresión en cubos como parámetro (ASTM-C-311, 2002)....	105
Tabla 24 Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 1998).....	114
Tabla 25 Criterio General de valores de resistividad eléctrica del hormigón. (CYTED-DURAR, 1998)	116
Tabla 26 Criterio de valoración de Potenciales del Acero en hormigón vs Cu/CuSO4....	125
Tabla 27 Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil.....	131



DEDICATORIA



Con todo el amor que un hombre es incapaz de expresar, el respeto y orgullo hacia
Las personas que me dieron la vida, mis padres Miguel Bernabé Rebollar y
Ma. Dolores Reyes Flores; a mis hermanos, y de manera especial a Salvador y
Miguel, quienes han sido un ejemplo de constancia, solidaridad y valor para afrontar
la vida en todas sus facetas.

Ser el hombre más feliz del mundo no depende del mundo, si no del hombre.



AGRADECIMIENTOS

A nuestros asesores pertenecientes al primer cuerpo académico consolidado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (CAC-147-UMSNH): M.A. Wilfrido Martínez Molina, Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, Dr. Hugo Luis Chávez García y a la M.I. Cindy Lara Gómez, y como co-asesor del Instituto Mexicano del Transporte al Dr. José Trinidad Pérez Quiroz quienes nos aportaron sus conocimientos, su valioso tiempo e incondicional apoyo en la realización de éste proyecto; se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante el periodo de estudios. También a los trabajadores y prestadores de servicio social del Laboratorio de Materiales “Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, quienes han aportado mucho al desarrollo del presente proyecto. También se agradece al Proyecto IRSES MARIE CURIE, Acrónimo STRAVAL: Studies, Training, Socio-Cultural Valorisation And Management Of Natural, Cultural And Monumental Property for The Promotion of the Local Societies of Latin America (Argentina, Brasil And México), PIRSES-GA-2009-269227, FP7 DE LA COMISIÓN EUROPEA, por su ayuda técnica.





1 RESUMEN

En el presente estudio se muestran los resultados correspondientes a la utilización de ceniza de bagazo de caña (CBC), Escoria de alto horno (EAH) y Metacaolín (MK) como sustitutos del CP en la elaboración de morteros, con el objetivo de reducir la cantidad de cemento, aprovechar los residuos originados en los procesos agroindustriales de la región y evaluar su comportamiento ante un medio agresivo por cloruros. La CBC se obtuvo del ingenio azucarero de Taretan Michoacán, México. Para su utilización se tamizó y se utilizó el material que pasó por la malla ASTM 200. El MK se utilizó tal como se obtuvo del proceso industrializado. La EAH se obtuvo de la siderúrgica Arcelor Mittal, para su utilización se trituró en un molino de bolas y se tamizó, utilizando para el estudio el material que pasó la malla ASTM No. 200. Los morteros se prepararon con arena del río El Cuervo, localizado en la comunidad de Huajúmbaro, en Cd. Hidalgo, Michoacán, y arena del río Lerma. Se utilizó la arena con graduación entre la malla ASTM No. 16 y ASTM No. 30. La normativa de la ASTM y las normas mexicanas NMX son el referente para la caracterización de los materiales y el desarrollo de las pruebas tanto destructivas como no destructivas. Las probetas en las que se evaluó la velocidad de corrosión fueron barras corrugadas de acero grado 60 inmersas en los morteros de CP con sustituciones del 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CBC, EAH y MK, y como referencia un mortero con 0% de sustitución. Las técnicas empleadas para la evaluación de la velocidad de corrosión fueron la resistencia a la polarización lineal (R_{pl}) y Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) utilizando un potenciostato marca Gamry. Se utilizó un electrodo calomel saturado de media celda como electrodo de referencia y como contra-electrodo una placa de acero inoxidable AISI 316L.

Palabras clave: Morteros, Sustituciones Puzolánicas, Corrosión.



2 ABSTRACT

The present study shows the results relating to the use of ash from bagasse (CBC), blastfurnace slag (EAH) and Metakaolin (MK) as a substitute for CP in the preparation of mortars, in order to reduce the amount of cement, take advantage of the waste generated in agro-industrial processes in the region and assess their behaviour before an aggressive means by chlorides. The CBC was obtained from the sugar mill of Taretan-Michoacan, Mexico. To use it sifted and used the material that passed through the ASTM 200 mesh. MK was used as it was obtained from the industrialized process. The EAH was obtained from the steel Arcelor Mittal, for use, it was ground in a ball mill and was sifted, using to study the material that passed the ASTM No. 200 mesh. The mortars were prepared with sand from the river El Cuervo, located in the community of Huajúbaro, in Ciudad Hidalgo, Michoacán, and sand of the River Lerma. We used the sand with graduation between the ASTM mesh No. 16 and ASTM No. 30. The rules of the ASTM and the Mexican standard NMX are the benchmark for the characterization of materials and the development of both destructive and non-destructive testing. The specimens in which assessed the corrosion rate were corrugated steel bars grade 60 immersed in CP mortars with substitutions of 5%, 10%, 15%, 20% and 30% of CBC, EAH and MK, and as a reference a mortar with 0% substitution. The techniques used for the assessment of the corrosion rate were the linear polarization resistance (R_{pl}) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS, for its acronym in English) using a potentiostat brand Gamry. We used an electrode calomel-saturated half cell as reference electrode and a plate of stainless steel AISI 316L as counter-electrode

Keywords: Mortars, pozzolanic substitutions, Corrosion.



3 JUSTIFICACIÓN

3.1 Enfoque Estructural

La corrosión del refuerzo metálico embebido se reconoce como uno de los mayores problemas en estructuras de concreto convirtiéndose en un tema que requiere la atención de especialistas en el área de mantenimiento y rehabilitación.

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Se calculan gastos en corrosión por 276 billones de dólares al año en E.U.A., según el estudio de CC Technologies for the Federal Highway Administration (FHWA), en el informe del 2001. En México no se han hecho estudios para estimar los gastos que representan las pérdidas por corrosión (Orozco Cruz, 2007; Cadena Franco, Veloz Rodríguez, Reyes Cruz, Coreño Alonso, & Vázquez García, 2010). Y en general, se estiman gastos del 3.5% del PIB asociados al fenómeno de corrosión de cada país (González Fernández & Miranda Vidales, 2007)

La infraestructura en México como en cualquier otro país es la base para el desarrollo. Las vías de comunicación juegan un papel importante en el crecimiento de las economías y son el medio con que se logra la necesidad básica de la comunicación. Para mantener la funcionalidad del sistema es necesario que todos sus componentes estén en constante mantenimiento.

La publicación técnica No. 380 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) contiene la clasificación y cuantificación de los 7,351 puentes existentes en nuestro país de acuerdo al tipo de material empleado en su construcción (IMT-pt-380, 2011). El 68% de los puentes están contruidos de concreto reforzado, lo cual repercute en la aplicación de técnicas y metodologías de mantenimiento, reparación o reconstrucción, y con lo cual el presente estudio fortalece su justificación, ilustración 1.

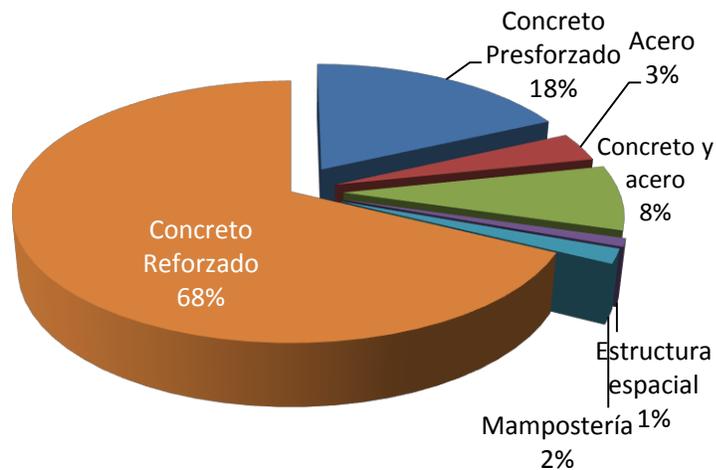


Ilustración 1 Distribución de puentes por tipo de material (IMT-pt-380, 2011).

3.2 Enfoque Ambiental

La construcción de elementos fabricados a base de cemento Portland (CP) contribuyen al deterioro del medio ambiente, ya que la producción de una tonelada de CP genera aproximadamente entre 0.67 y 1.0 tonelada de CO₂, siendo responsable, según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) del 7% de las emisiones de CO₂ en el mundo, lo cual es preocupante por las repercusiones negativas asociadas al efecto invernadero (Escalante, Navarro, & Gomez, 2011; Ruchansky, 2013), tomando en cuenta que para el año 2012 la producción mundial de cemento fue de 3.9 billones de toneladas (FICEM, 2013; CEMBUREAU, 2013). Lo anterior ha despertado la preocupación e interés de la industria y la academia para generar opciones alternativas de materiales y tecnologías de construcción con criterios de sostenibilidad. Para esto, es necesario promover el uso de los recursos cementicios alternativos, ya sea naturales o como subproductos de actividades industriales. Una medida viable para contribuir al cuidado del medio ambiente es la utilización de puzolanas, naturales o sintéticas, como sustitutos minerales del CP en mezclas de mortero.



4 HIPÓTESIS

Son las cenizas generadas de procesos agroindustriales e industriales sustitutos de cemento que confieren a los morteros mejoras en las propiedades mecánicas y de durabilidad, en comparación con los morteros convencionales

5 OBJETIVOS

5.1 General

Determinar el porcentaje óptimo de sustitución puzolánica en morteros de cemento, utilizados como materiales de reparación, para su uso en la rehabilitación de estructuras de concreto armado, tales como puentes y muelles, que sujetas a la acción destructiva del medio ambiente, por consecuencia de la concentración de cloruros y sulfatos, disminuyan la degradación de las mismas.

5.2 Específicos

- A. Determinar las propiedades físicas y mecánicas del Mortero de cemento con sustituciones parciales de puzolanas.
- B. Evaluar el comportamiento electroquímico del acero embebido en morteros de cemento sustituidos parcialmente con puzolanas.
- C. Aprovechar residuos industriales generados en la región de Michoacán que tengan actividad puzolánica, para incluirlos en morteros y disminuir la contaminación del medio ambiente.



6 ANTECEDENTES

6.1 Fundamentos generales de un Mortero.

6.1.1 Definición y antecedentes

Los albañiles de la antigua Roma denominaban *mortarius*, mortero, al recipiente en el cual amasaban y transportaban la mezcla de pasta de cal y arena. Con el paso del tiempo, este nombre fue adoptado para designar a la propia mezcla, que se ha utilizado para la construcción de cimentaciones, muros, pavimentos y revestimientos hasta la aparición del cemento Portland (Pérez A. , 2012).

El cemento para albañilería (mortero) es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado que puede contener uno o más de los materiales siguientes: Clinker Portland, piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso; que al agregarle agua y arena tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo (NMX-C-O21-ONNCE., 2004).

La cal como ligante y el mortero de cal se mencionan ya en la Biblia (Deuteronomio-5-27). El uso de morteros sólo de cal tiene su primer empleo conocido en la Máscara de Jericó, una calavera cubierta con un emplasto de cal pulido, que data del año 7.000 a.c. El uso de morteros de yeso queda excluido casi únicamente a los morteros egipcios, quienes fueron los primeros en utilizar el yeso para el mamposteado de los bloques de la pirámide de Keops (hacia 2600 a.c.) (ASTM-C270, 2014). Puede afirmarse que el empleo de la cal como ligante tiene su origen en el período neolítico y que el uso del mortero de cal propiamente dicho corresponde a los griegos y romanos.



Vitrubio, (arquitecto Romano, siglo I a.c.) describe el pulimentado de morteros como una antigua técnica griega, y afirma que este cuidadoso tratamiento ayuda a impedir la contracción y las rupturas. El origen de los morteros modernos se encuentra en Théra, Grecia, donde se introducía a las mezclas cal-arena polvo volcánico o “Tierra de Santorin”, lo cual daba como resultado morteros estables al agua. Esto junto con la técnica de pulimentado de la superficies fueron técnicas adoptados por los romanos para la construcción de cisternas y acueductos. A falta de roca volcánica se utilizaba tejo o ladrillo, producto de tierra cocida el cual fue denominado *cocciopesto*. El primer uso conocido de tierra cocida (tejas, ladrillos,...) se remonta a la época de construcción de los aljibes de Jerusalén (bajo el reinado de Salomón, en el s. X a.c.) (Santarelli, 1960). Este uso parece que fue introducido por obreros fenicios que conocían empíricamente las propiedades de estos materiales puzolánicos. También se han encontrado en análisis de morteros venecianos de los siglos XIV al XVIII, fragmentos de *cocciopesto*, que indican el uso de la tecnología de los morteros hidráulicos al menos en estos periodos (Sepulcre Aguilar A. , 2005b).

Son los romanos los herederos de la tecnología de la construcción griega, y concretamente del empleo de mortero de cal, mejorando los procesos de producción de la cal y las técnicas de aplicación del mortero. Las aplicaciones fueron diversas resaltando en importancia el Panteón, el Coliseo y acueductos como el de Segovia o Pont du Garde.

Sin duda Vitrubio es la mejor fuente para el estudio de los elementos constitutivos del mortero de cal romano, ya que por él conocemos que la mezcla de materiales se hacía empleando una proporción de cal por tres de arena. Además menciona la utilización de aditivos como puzolana, que son cenizas volcánicas provenientes de los yacimientos descubiertos en Pozzuoli cerca de Nápoles.



Durante la época medieval decayó la calidad de los morteros. Se atribuye este descenso de la calidad particularmente a la pérdida de los procedimientos romanos de fabricación de la cal; esto implica su selección, la cocción y extinción, y también la homogeneidad y proporción de las mezclas, así como el tratamiento y pureza de los agregados pétreos. En este periodo, alrededor del año 1200, parece comprobado el uso de cerveza, cera de abejas, huevos, jugos de frutas, gluten, malta, arroz, azúcar y orina; además de pelos de animales, los cuales se han encontrado en enlucidos del Renacimiento (Alvarez Galindo, Martín Pérez , & García Casado, 1995).

6.1.2 Clasificación de los Morteros.

La norma ASTM C270 (ASTM-C270, 2014) menciona los diferentes tipos de morteros así como parámetros de resistencia y contenido de aire que deben cumplir; describe también la combinación entre ellos y algunas de las propiedades, tabla 1.

Tabla 1 Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero (ASTM-C270, 2014)

Mortero	Tipo	Esfuerzo a compresión promedio a 28 días, mínimo, psi (MPa)	Retención de agua, mínimo, %	Contenido de aire, máximo, %, b
Cemento-Cal	M	2500 (17.2)	75	12
	S	1800 (12.4)	75	12
	N	750 (5.2)	75	14c
	O	350 (2.4)	75	14c
Mortero Cemento	M	2500 (17.2)	75	12
	S	1800 (12.4)	75	12
	N	750 (5.2)	75	14c
	O	350 (2.4)	75	14c
De cemento para albañilería	M	2500 (17.2)	75	18
	S	1800 (12.4)	75	18
	N	750 (5.2)	75	20d
	O	350 (2.4)	75	20d

ESPECIFICACIONES:



Todas las especificaciones de la tabla deben ser obtenidas en laboratorio

b) El contenido de aire de morteros de CPC-cal sin inclusión de aire es generalmente menor que 8%.

c) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento-cal o mortero cemento, el contenido máximo de aire debe ser de 12%.

d) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento para albañilería, el contenido máximo de aire debe ser de 18%.

La norma ASTM C270 hace también una clasificación general, mencionando propiedades de morteros fluidos o plásticos y en estado endurecido.

La normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) hace una clasificación de los morteros como se muestra en la tabla 2 (SCT, 2002):

Tabla 2 Tipos de Morteros, clasificación SCT.

Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena
I	1	0	0 a 0.25	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a 0.5	0	
II	1	0	0.25 a 0.5	
	1	0.5 a 1	0	
III	1	0	0.5 a 1.25	

Nota: Partes en volumen; medido en estado seco y suelto

6.1.3 Componentes de un mortero

Los morteros de cemento Portland se elaboran con arena, agua y cemento Portland. Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar tabiques y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina que penetren en pequeñas ranuras ya sea para reparar, sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Esto es importante debido a que los morteros no llevan grava, por lo tanto son más fáciles de manejar y se consume



menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos.

Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia. Las proporciones de materiales para la fabricación de mortero estándar debe de ser 2.75 partes de agregado estándar por una parte de cemento en peso para una relación agua-cemento de 0.485 para todos los cementos Portland, y de 0.460 para cementos Portland inclusores de aire (ASTM C 109M I. , 2002). Para otras relaciones agua-cemento se deberá de cumplir con la fluidez de 110 ± 5 conforme a la norma ASTM-C109.

Los parámetros anteriores pueden ser evaluados mediante ensayos normalizados, de manera que es relativamente sencillo controlar la calidad del mortero. Sin embargo en muchos trabajos el control se deja al albañil, el albañil controla de una manera empírica la calidad de la mezcla, casi siempre atendiendo exclusivamente la facilidad de colocación del mortero y sin ninguna prueba extra. Además, contrario a la creencia de que el costo de los morteros es bajo, debe considerarse que en ellos se consume más cemento por unidad de volumen de lo que se puede consumir en muchos concretos de uso común, ya que por el simple hecho de emplearse exclusivamente arena como agregado, es necesario consumir altos volúmenes de pasta (cemento + agua) para rodear las partículas, esto debido a la gran superficie específica que ofrecen las arenas.

6.1.3.1 Aglutinante

Los aglutinantes son materiales que mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica. Las cuales pueden ser cal, cemento, yeso, arcilla entre otros, sustancias o materiales que sirven para aglomerar, adherir, unir, etc. De acuerdo con sus características proporcionan al mortero resistencia, tiempo de fraguado,



durabilidad y economía diferentes. Como los aglutinantes puros (aparte del yeso de estuco) presentan cambios volumétricos, se agrietan durante el endurecimiento, por lo consiguiente habrá que mezclarlos con arena en proporción estándar conforme a la norma ASTM-C109 (Rivera Flores).

El aglutinante que se utilizó en la realización de este proyecto fue un cemento CPC 30R-RS, por tanto se describe a continuación las características de los cementos Portland y una breve reseña de su utilización en nuestro país.

6.1.3.1.1 Antecedentes del CP

A principios del siglo XX (1902), en México se comenzó a utilizar cemento importado de Inglaterra y para 1906 se constituyó la primera Compañía de Cementos Portland, en Toluca estado de Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909. La revolución mexicana de 1920 y la crisis mundial de 1929 fueron factores determinantes que retrasaron el desarrollo de la industria cementera mexicana; sin embargo, desde principios del siglo XX el uso del cemento se ha popularizado hasta convertirse en un producto estratégico para el crecimiento económico. Actualmente México tiene la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, refiriéndonos a CEMEX con más de 50,000 empleados en el mundo y con una capacidad de producción de 94 millones de toneladas (Pacífica, 2008; CEMEX, 2011; IMCYC, 2005).

Como empresa CEMEX se constituyó el 2 de febrero de 1931, nació de la fusión de dos plantas: Cementos Hidalgo (1906) y Cementos Portland Monterrey, S. A. (1920) (Rojas Sandoval, 2011).

La producción de cemento gris en México y consumo per cápita se presenta en las ilustraciones 2 y 3 respectivamente.

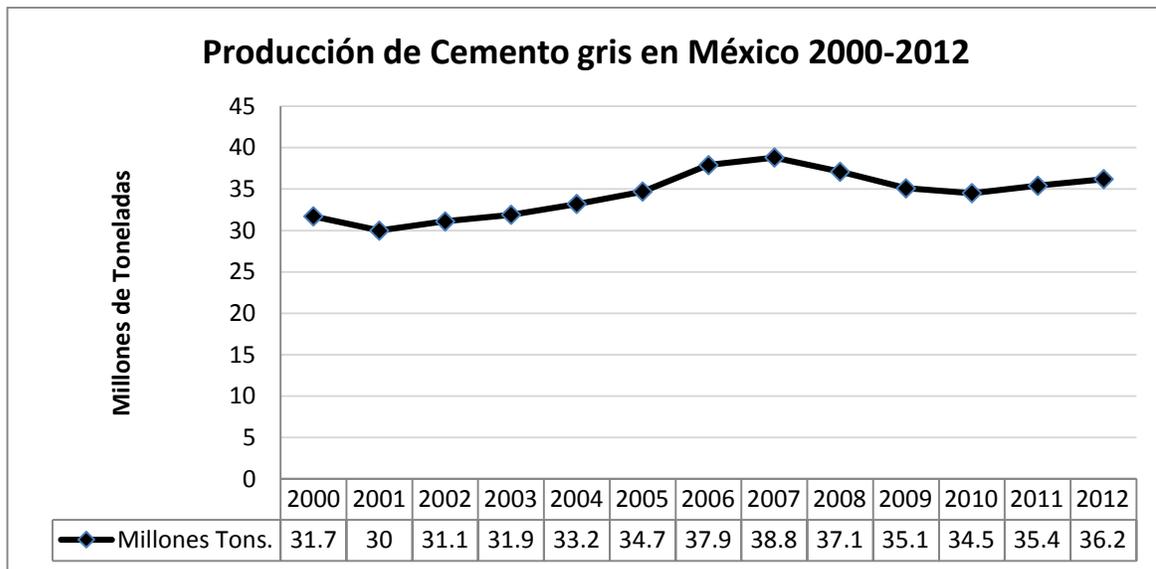


Ilustración 2 Producción del cemento gris en México en el periodo 2000-2012 (Cámara Nacional del Cemento, 2014).

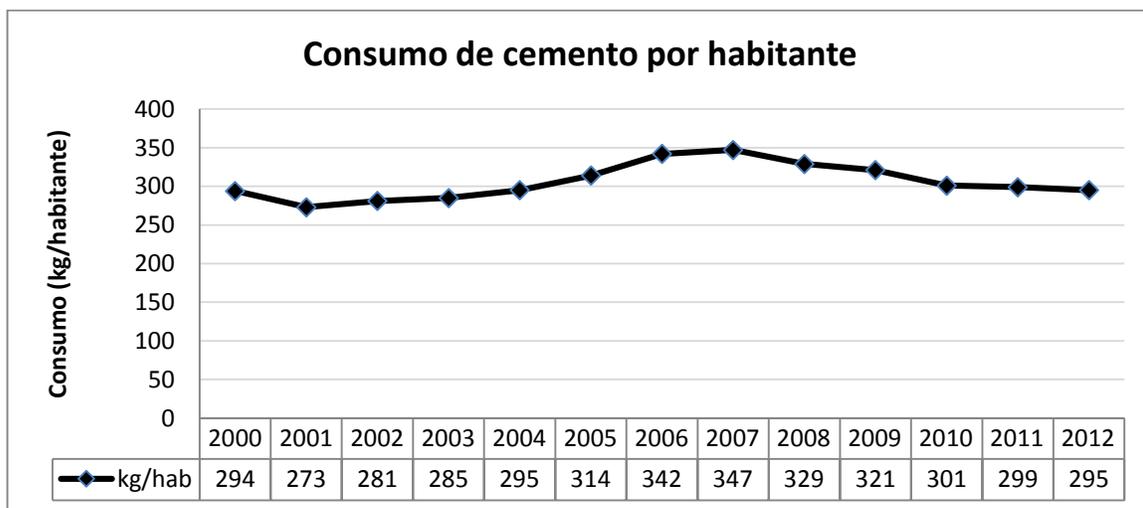


Ilustración 3 Consumo de cemento por habitante (Cámara Nacional del Cemento, 2014).

6.1.3.1.2 Proceso de producción del Cemento

La fabricación de cemento es una actividad industrial de procesado de minerales, la cual se divide en tres grandes etapas:

Primer Etapa

Obtención, preparación y molienda de materias primas (caliza, marga, arcilla, pizarra, etc.) que aportan los siguientes compuestos minerales: carbonato cálcico (CaCO_3), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), ilustración 4. Se obtiene una mezcla en forma de polvo de los minerales denominada crudo o harina (Cámara Nacional del Cemento, 2014).

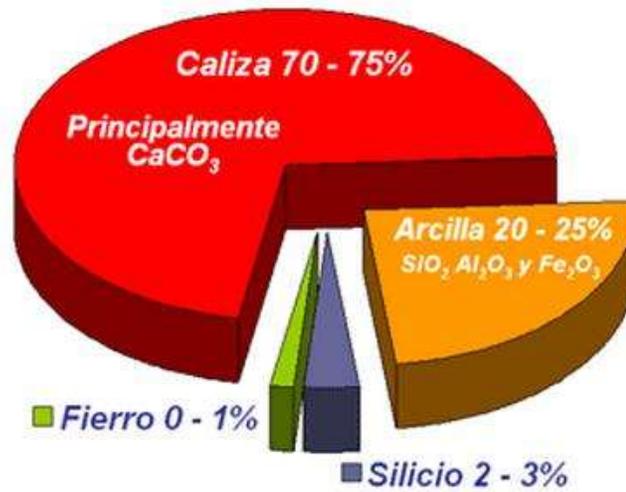


Ilustración 4 Materias primas y compuestos que aportan al cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014)

Segunda Etapa

Cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura del material cercana a los 1450°C , para ser enfriado bruscamente y obtener un producto intermedio denominado clínker.

Tercera Etapa

Molienda del clínker con otros componentes: yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escorias de alto horno, cenizas volantes, caliza, puzolanas), para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

En la ilustración 5 se muestra el esquema general de la producción de cemento, desde la inclusión de la materia prima hasta el envasado del producto final.

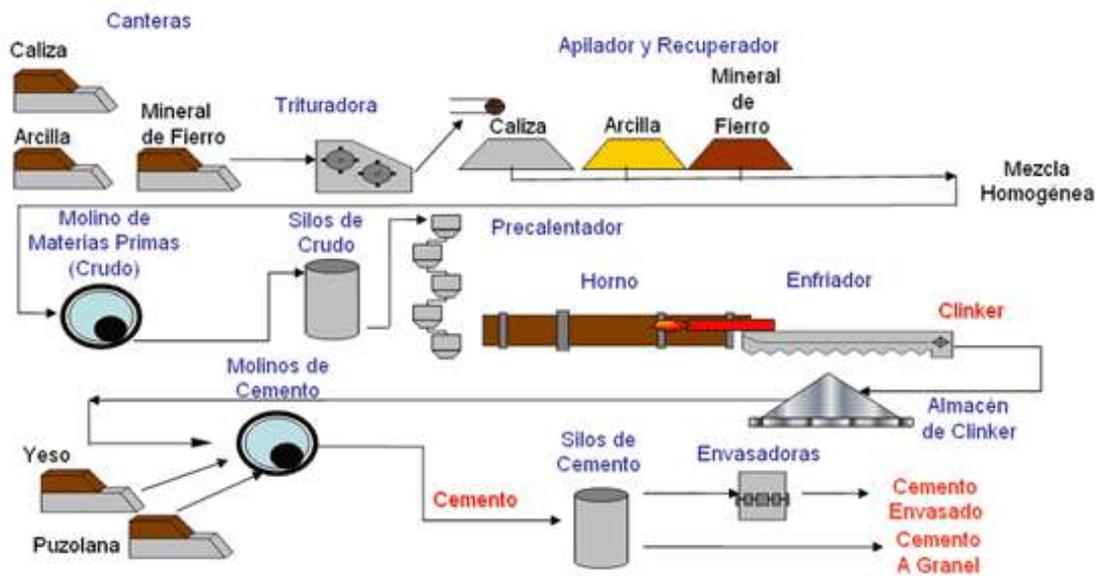


Ilustración 5 Esquema general del proceso de producción del cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2014)

Todos estos compuestos reaccionan dando como resultado nuevas especies químicas que son los principales componentes del cemento, tabla 3 (Del Valle Moreno, Pérez López , & Martínez Madrid, 2001).

Tabla 3 Componentes de Cemento

Componente	Fórmula	Fórmula Abreviada
Silicato Dicálcico (belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Silicato Tricálcico (alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferrialuminato tetracálcico o Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3	C_4AF

El silicato tricálcico (C_3S , alita) es la fase más abundante, y que le confiere las propiedades características al CP, con una hidratación rápida, resistencias iniciales altas y finales buenas, calor de hidratación moderadamente alto y responsable de las mayores resistencias mecánicas del cemento. El silicato



dicálcico (C_2S , velita) es de hidratación lenta, resistencias iniciales bajas y finales buenas, y calor de hidratación bajo. Aluminato tricálcico (C_3A), de hidratación muy rápida, calor de hidratación elevado que proporciona resistencias tempranas pero produce retracción en la hidratación. Además es el componente que reacciona con los sulfatos produciendo fases expansivas como la etringita. EL ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), es de hidratación lenta y regular, apenas contribuye al desarrollo de resistencias, con calor de hidratación moderado, tiene un color pardo oscuro, que junto con la magnesia (MgO), da un color verde grisáceo oscuro, siendo por tanto responsable del color característico del CP. Es la fase que menos importancia tiene en las propiedades del cemento, variando según la proporción de aluminio o hierro disponible (Sepulcre Aguilar A. , 2005).

6.1.3.1.3 Clasificación del Cemento

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

- De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.
- De origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones.

La norma Mexicana clasifica a los cementos de acuerdo a tres aspectos (NMX-C414, 2010):

1. Tipo de Cemento
2. Clase Resistente
3. Características especiales

La clasificación se proporciona en las tablas se tabla 4, 5 y 6.



Tabla 4 Clasificación por el tipo de Cemento.

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
TPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno

La clasificación de acuerdo a sus características especiales se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Denominación del Cemento por sus características especiales (NMX-C414, 2010).

NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS CEMENTOS
R	Alta resistencia Inicial
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alcalina agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Tabla 6 Clasificación por clase resistente (NMX-C414, 2010)

Clase Resistente	Resistencia a la compresión N/mm ²		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

La ASTM clasifica a los cementos como se indica en la tabla 7 (ASTM-C150, 2005)



Tabla 7 Tipos de cemento Portland (ASTM-C150, 2005).

Cemento	Uso
Tipo I	Cemento de uso general
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en concretos con aguas negras domésticas concentradas.

La resistencia normal de un cemento es la resistencia mínima mecánica a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30 ó 40 Mega Pascales (MPa).

El cemento utilizado en este trabajo fue un Cemento Tolteca gris CPC 30R-RS.



Ilustración 6 Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros.



6.1.3.1.4 El Cemento en los últimos años

El alto consumo de recursos naturales y energéticos y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de cemento como material de construcción.

En la actualidad, la importancia del sector de la construcción en todos los países, desde el punto de vista económico y social, junto con la menor disponibilidad de los recursos naturales y artificiales necesarios, y su desarrollo sostenible, han provocado que desde hace varias décadas a esta parte, se haya tenido que aumentar, en cantidad y tipos, la incorporación de adiciones minerales naturales y/o artificiales al cemento Portland. Las interacciones que se generan entre dichas adiciones minerales tan diversas y el cemento Portland, sumadas al resto de variables químico-físicas que intervienen en cada caso, tanto en el momento de su fabricación y primeras edades, como en sus prestaciones futuras sobre todo, es decir, su durabilidad, constituye una materia de investigación muy extensa (Sata, Jaturapitakkul, & Kiattikomol, 2007).

Todo ello, se ha visto además acelerado en la actualidad, al tratar de conseguir dos objetivos fundamentales: el primero, que queda circunscrito a la industria del cemento, y que es el de reducir los costos de producción mediante la sustitución parcial del cemento Portland por dichas adiciones, obteniendo así un ahorro de energía, y el segundo, de carácter medioambiental, por el que se consiguen fabricar las cantidades de cemento necesarias disminuyendo la fabricación de Clinker. Este proceso lleva asociado por tanto, la valorización material de diferentes residuos minerales de otros sectores industriales los cuales dejan de serlo para ganarse por este motivo el apelativo de subproductos. Por consiguiente, no es de extrañar que existan innumerables líneas de investigación encaminadas a la búsqueda, detección y consecución de nuevas adiciones minerales naturales y/o artificiales que puedan ser incorporadas al cemento Portland, si bien y en cualquier caso, las nuevas que se encuentren pertenecerán



al grupo de las “activas” o al grupo de las “no activas” o mal llamadas “inertes”. Entre las “activas” se encuentran las adiciones puzolánicas y las adiciones siderúrgicas, y entre las no activas se encuentran los “fílleres”, los cuales a su vez pueden ser de naturaleza silíceo (menos abundantes) o caliza (más abundantes) (Talero, Pedrajas, Delgado, & Rahhal, 2009).

Para atenuar esta situación se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta, con el objeto de disminuir el consumo energético y la de disminuir el consumo de cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto negativo al medio ambiente.

6.1.3.2 Material Inerte

La arena funciona como relleno inerte que favorece la economía de la producción, trabajabilidad y reduce la contracción, además que favorece el incremento de la resistencia a compresión. Un aumento en el contenido de arena aumenta el tiempo de fraguado de un mortero de albañilería, pero reduce el potencial de agrietamiento debido a la contracción de la articulación del mortero.

Agregado bien graduado reduce la separación de materiales en mortero plástico, que reduce el sangrado y mejora trabajabilidad. Arenas deficientes de finos producen morteros ásperos, mientras que arenas con finos excesivos producen morteros débiles y aumentan la contracción (ASTM-C270, 2014).

Sin duda los agregados juegan un papel importante en el desempeño de las mezclas, no solo por el hecho de proporcionar resistencia mecánica, si no que una mala elección del árido puede representar problemas graves a la estructura. Estos problemas pueden ser derivados de las propiedades físicas del agregado, pero también pueden deberse a las reacciones químicas desarrolladas entre los álcalis del cemento y los componentes minerales del agregado. En la tabla 8 se observan algunos de los factores característicos de los agregados y la forma en que se manifiestan (NMX-C003, 2010).



Tabla 8 Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)

Componente	Factor	Se manifiesta en:
Agregados	Contaminación por materia orgánica o vegetal (troncos, hojas, raíces, etc.)	Inhibición de reacciones puzolánicas, falta de resistencia, agrietamientos, poca trabajabilidad y plasticidad.
	Alto índice de lajas	Problemas estructurales y de resistencia.
	Granulometría no adecuada	Falta de adhesión, problemas de resistencia, mayor requerimiento de aglomerante.
	Alto contenido de finos	Mayor requerimiento de aglomerantes, problemas de adhesión entre partículas.

6.1.3.3 Agua

El agua de las mezclas desarrolla tres funciones: dar trabajabilidad, hidratar al cemento y facilita la carbonatación de la cal. La cantidad de agua dependerá de los ingredientes del mortero, y usualmente el agua potable es aceptada para las mezclas (ASTM-C270, 2014).

Las aguas a las que se refiere la norma NMX-C-122-2004-ONNCCE, que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la tabla 9. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la tabla 9, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.



Tabla 9 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en ppm.	Cementos sulfuresistentes Límites en ppm.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como $SO_4=$ (a)	3000	3500
Magnesio como Mg^{++} (a)	100	150
Carbonatos como CO_3	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO_2	5	3
Álcalis totales como Na^+	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5
<p>(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.</p> <p>(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX -C-088.</p> <p>(c) Cuando se use cloruro de calcio $CaCl_2$ como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.</p>		

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos



adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). En la tabla 10 se da a conocer los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

Tabla 10 Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias (Instituto del Concreto, 1997).

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencias	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire incluido	Hidratación
pH	x	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	x	x	x	x	x	---	---	---
Sulfatos	x	x	x	x	x	x	---	---
Cloruros	x	x	x	x	---	---	---	---
Hidratos de carbono	x	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas solubles en éter	x	x	---	---	---	---	x	x
x Causa efecto negativo				--- No causa efecto negativo				

La norma mexicana NMX-C-003 describe efectos que causa el agua en las mezclas según su calidad, tabla 11.

Tabla 11 Factores del agua que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C003, 2010)

Componente	Factor	Se manifiesta en:
Agua de Mezcla	Contaminación con aceite	Inhibición de las reacciones de la cal con los componentes de la mezcla, falta de resistencia, agrietamientos y poca plasticidad.
	Alta acidez	Mayor requerimiento de aglomerante
	Alto contenido de sales	Inhibición de las reacciones de la cal con los componentes de la mezcla, falta de resistencia, agrietamientos y poca plasticidad.



6.1.3.4 Puzolanas

6.1.3.4.1 Definición y antecedentes

Una puzolana es un material silíceo o sílico-aluminoso que posee poco o nulo valor cementante, pero finamente divididos, y en presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) a temperaturas ordinarias para formar compuestos con propiedades cementantes (NMX-C-199, 2010; ASTM-C618, 2003).

Malholtra y Mehta definen las adiciones puzolánicas como aquellos materiales inorgánicos naturales o artificiales que, pese a carecer de actividad hidráulica y propiedades cementicias, contienen no obstante constituyentes químicos que a temperatura ambiente y en presencia de agua, se combinan con cal apagada, cal grasa, cal hidráulica, o la Portlandita procedente de la hidratación de los cementos Portland, para formar compuestos hidratados semejantes a los originados por el propio cemento Portland en su hidratación (C-S-H) (Malholtra & Mehta, 1996).

Las puzolanas están formadas por fases activas ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, (ASTM-C618, 2003)) capaces de reaccionar con la cal proveniente de la hidratación del cemento Portland. Esto lleva a que la puzolana se integre a dicho proceso de hidratación y dé como resultado más bajo contenido de Portlandita e incremento en los silicatos cálcicos hidratados. Todas estas fases activas son termodinámicamente inestables y, en general, están constituidas por materiales amorfos (MASSAZZA, 1993). La reacción puzolánica favorece los concretos adicionados, pues incrementa las resistencias mecánicas (compresión y flexión), reduce la permeabilidad y la porosidad capilar, aumenta resistencias frente al ataque químico y la posibilidad de prevenir la reacción árido-álcali (MEHTA, 1989).



Los objetivos de utilizar puzolanas en la elaboración de concretos es mejorar sus propiedades físico-mecánicas y utilizar los residuos que generan los procesos agroindustriales.

6.1.3.4.2 Clasificación

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Los materiales puzolánicos naturales están constituidos principalmente por rocas eruptivas y en particular efusivas y volcánicas (aquellas consolidadas a poca profundidad de la corteza terrestre), y dentro de éstas, por extrusivas, salvo las de naturaleza orgánica que son de origen y formación sedimentaria (Salazar, 1968).

Como se muestra en la tabla 3-1, las puzolanas se clasifican, según la norma ASTM C-618:

Puzolanas naturales (N), crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como lo indica la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 12, tales como algunas diatomeas; sílex opalinos y lutitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinado o sin calcinar; y diversos materiales que requieran calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.

Puzolanas Clase F, Dentro de esta clase se encuentran las cenizas volantes, por ejemplo las cenizas volantes de centrales eléctricas; normalmente se producen de la quema de antracita o carbón bituminoso que cumple con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 12.



Puzolanas Clase C, Cenizas volantes normalmente producidas a partir de lignito o carbón sub-bituminoso que cumple con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 12. Esta clase de ceniza, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

Dentro de la clase (F) se encuentra el Metacaolín (MK), el humo de sílice (HS) y las cenizas de cascara de elementos orgánicos (como la del bagazo de caña). En la clase C se encuentra la escoria granulada de alto horno.

En los residuos agrícolas combustionados, con propiedades puzolánicas reconocidas, la actividad puzolánica depende principalmente de la temperatura de combustión, que debe oscilar entre 400°C a 800°C para evitar la formación de fases cristalinas de sílice producto de las altas temperaturas en la combustión (Martirena Hernández & Betancourt Rodríguez, 2000).

Tabla 12 Clasificación de los aditivos minerales que pueden adicionarse a una mezcla, según el contenido de compuesto (Norma ASTM C618).

CLASE DE ADITIVO MINERAL	NORMA ASTM C618			NORMA ASTM C1240
	N	F	C	Humo de Sílice
Especificaciones Químicas y Físicas				
SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ , mín. %	70.0	70.0	50.0	85+
SO ₃ , % máx.	4.0	5.0	5.0	-
Humedad, % máx.				
Pérdidas por ignición, % máx.	10.0	6-12	6.0	6.0
Alcalis, N ₂ O, % máx. opcional	1.5	1.5	1.5	1.5
Retenido Tamiz N°325, % máx.	34	34	34	10
Índice de Act. Puz. Con cemento Portland 28 días, % mín. respecto al de control	75	75	75	85 7d.
Requerimiento de agua, % máx. vs. Control	115	105	105	-

+ referido a SiO₂

Actualmente se elaboran cementos puzolánicos, de los llamados eco materiales por el hecho de contener puzolanas¹. En México, las empresas como CEMEX, CRUZ AZUL, HOLCIM Y MOCTEZUMA con cobertura en todo el territorio nacional, producen los cementos puzolánicos, cuya clasificación se basa

¹ De acuerdo a la normativa vigente actualmente en España (RC-03), el cemento Portland puede contener hasta un 35% de Puzolana, y hasta un 55% si es cemento Puzolánico.



en la normativa mexicana (NMX-C414, 2010) y la norteamericana (ASTM-C150, 2005) según las fichas técnicas de los productos.

Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico sobre el resto se describen a continuación (CEMEX, 2011; CruzAzul, 2008; CMOCTEZ, 2010; HOLCIM, 2004; Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004; Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013; Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010)

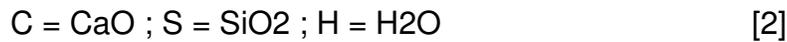
- Fraguado rápido
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Resistencia a la reacción álcali agregado
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducción del calor de Hidratación.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del concreto
- Disminuye la necesidad de agua.
- Menor tiempo para el descimbrado

La reacción química de la puzolana consume la cal sobrante del proceso de hidratación. Esta cal es vulnerable a disolverse y reaccionar en presencia de agua y ácidos, de tal forma que reduciendo este residuo de cal se obtiene un efecto positivo en la resistencia y durabilidad del concreto. Los silicatos de calcio resultantes de la reacción puzolánica actúan como relleno de los poros capilares, generando concretos poco permeables, lo que acentúa su durabilidad y resistencia ante el ataque de sustancias nocivas para el concreto (HOLCIM, 2004).

La reacción química del fraguado del cemento es como sigue [1] y [2]:



Dónde:



Siendo el Gel C-S-H el responsable de las propiedades mecánicas del cemento. Podemos observar que se produce un tercer producto, portlandita, abreviado CH en la fórmula, que no es sino el $Ca(OH)_2$, con poco valor cementante, y responsable de la reacción con los sulfatos que degradan la calidad del mismo. La CH se estima entre un 20 y 30% en masa de los productos de la reacción y mantiene un ambiente alcalino necesario para evitar la corrosión del acero embebido (Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004; IMT-PT-327, 2010). En la tabla 13 se muestran las reacciones de hidratación del cemento, que sirven de apoyo para el entendimiento de los resultados electroquímicos (Pérez T. , 2002).

Tabla 13 Reacciones de hidratación del cemento

Componente		Productos de hidratación
$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O$ Silicato tricálcico + agua	→ ←	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$ Gel de tobermorita+ portlandita
$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O$ Silicato dicálcico + agua	→ ←	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$ Gel de tobermorita+ portlandita
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 10H_2O + 2Ca(OH)_2$ Ferrialuminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio	→ ←	$6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12H_2O$ Ferrialuminato hexacálcico hidratado
$3CaO \cdot Al_2O_3 + 12H_2O + Ca(OH)_2$ Aluminato tricálcico + agua + portlandita	→ ←	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$ Aluminato tricálcico hidratado
$3CaO \cdot Al_2O_3 + 10H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Aluminato tricálcico+agua+yeso	→ ←	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ Monosulfoaluminato tricálcico



Para hacer frente a este problema se adicionan puzolanas, las cuales contienen sílice amorfa y componentes de alúmina que reaccionan con el componente CH de la forma siguiente (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013) [3]:



Donde:

S = Aluminosilicatos de la Puzolana (Composición tipo SiO_2 (75%) + Al_2O_3 (10%) y otros); CH = $\text{Ca}(\text{OH})_2$; H = H_2O .

Tal como se ha dicho hasta ahora, existen otros materiales que tienen actividad puzolánica en mayor o menor medida. Entre ellas se encuentran las escorias de fundiciones de acero, la microsílica o humo de sílice que se genera como producto secundario en la fundición de aleaciones de ferrosilicatos, metacaolines procedentes del tratamiento térmico del CaO , cenizas subproducto de procesos agroindustriales como cascarilla de arroz, bagazo de caña o paja (Martirena Hernández & Betancourt Rodríguez, 2000; Castellano, Bonavetti, & Irassar, 2013).

La alta presencia de material cristalino en las cenizas procesadas es motivada por las elevadas temperaturas de combustión, tanto en las calderas, como en las piras que se realizan en los campos. Este mineral cristalino es poco reactivo, y, por ende, la actividad puzolánica de las cenizas es relativamente baja. Si se logra que la combustión ocurra bajo condiciones controladas, a temperaturas bajas y tiempos de residencia fijos, la presencia de mineral amorfo se incrementa, lo que incide de forma directa sobre la reactividad de las cenizas (Martirena Hernández & Betancourt Rodríguez, 2000).

El uso de adiciones minerales en la producción del cemento Portland implica una disminución de la erosión y la deforestación del suelo, una reducción del uso de recursos naturales (materias primas y combustibles). Consecuentemente, el reemplazo de cemento por adiciones constituye una solución global adecuada a algunos problemas de índole tecnológica, económica y de protección del medio



ambiente. Desde hace muchos años se realizan esfuerzos para encontrar adiciones procedentes de recursos naturales (puzolana, material calcáreo), de desechos de otras industrias (escoria, ceniza volante, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz) o bien activadas térmicamente (arcillas, metacaolín) (Carrasco, Bonavetti G., & Menéndez E., 2005).

6.1.4 Tipos de mezclado.

La normativa especifica un método mecánico para el mezclado de morteros (ASTM-C-305, 2013) y la posibilidad de que el mezclado se realice de forma manual (ASTM-C270, 2014); manuales de construcción mencionan que el proceso de mezclado y fabricación puede ser por medios manuales, mecánicos en obra o premezclados (García Rivero, 2004).

Por medios manuales.

Solo se realizará de esa manera cuando lo permita el proyecto mediante procedimientos especificados (ASTM-C270, 2014). Si es así, primeramente se mezclarán en seco la arena y el o los aglutinantes hasta alcanzar una mezcla homogénea la cual se distinguirá visualmente ya que su coloración se torna uniforme. Posteriormente se agrega el agua hasta lograr la consistencia deseada pero sin descuidar la dosificación respectiva. La mezcla debe realizarse sobre un entarimado de madera o piso de concreto para evitar la contaminación de los materiales con el terreno natural. Si se realiza inevitablemente sobre el suelo, debe cuidarse de no resolver fragmentos de éste con el mortero, ya que el suelo puede contener iones sulfato que al reaccionar con la matriz cementicia causan reacciones químicas expansivas (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013), las cuales se describen en la sección 6.2.



Por medios mecánicos.

En general, es deseable fabricar los morteros con este procedimiento para garantizar la homogeneidad. La norma (ASTM-C-305, 2013) establece la forma y equipo para llevar a cabo el mezclado mecánico. El tiempo de mezclado debe ser de entre 3 y 5 min. Sin importar cuál sea el método las mezclas no deben ser usadas después de 2.5 h del mezclado (ASTM-C270, 2014).

6.1.5 Morteros Adicionados con puzolanas en estudio

Con la incorporación de puzolanas se producen tres efectos que, dependiendo de las proporciones de los materiales y de sus características físicas y químicas, varían su importancia en función del tiempo. Estos efectos son: la dilución del CP, estimulación (aceleración en la reacción del clinker Portland) y la reacción cementante. El efecto de dilución del cemento Portland se encuentra presente durante toda la hidratación; el efecto de estimulación es preponderante en las primeras edades de la misma y la reacción cementante, generalmente, se encuentra diferida en el tiempo. Las consecuencias negativas del efecto de dilución, tienden a ser compensadas en principio por el efecto de estimulación y posteriormente, por la actividad cementante. Sin embargo, el grado de compensación entre estos efectos depende fundamentalmente de la reactividad (morfología, mineralogía, tamaño) y de la cantidad de adición (Bonavetti, 2004; Castellano, Bonavetti, & Irassar, 2013)

6.1.5.1 Morteros con Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)

La caña de azúcar suministra, en primer lugar, sacarosa para azúcar blanco o moreno. También tiene aproximadamente 40 kg/tm de melaza (materia prima para la fabricación del ron). Se obtienen 150 kg/tm de bagazo. Según los datos de SAGARPA, en México se producen al año 50 millones de toneladas de caña, lo cual nos arroja una producción de bagazo de caña de 7.5 millones de toneladas al



año. Esto es una cifra abundante, por lo cual es una opción viable como material de construcción.

Estudios realizados por Martirena y Mehrotra demuestran que los desechos agrícolas e industriales de la Industria Azucarera, principalmente las Cenizas de Bagazo de Caña (CBC), y las Cenizas de Paja de Caña (CPC) tienen actividad puzolánica, debido al alto contenido de sílice (SiO_2) presente en estos materiales (Martirena, 1994; Mehrotra & Masood, 1992).

6.1.5.2 Morteros con Escoria de Alto Horno (EAH)

Dentro de una fábrica de siderurgia integral, el alto horno es la instalación base para la obtención del arrabio, el cual, a su vez, constituye la materia prima para la fabricación de acero. El alto horno es un horno de cuba en el que se introduce un gas reductor a presión (generalmente CO_2) por la parte inferior, y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior, separándose dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno (crisol), formándose los dos materiales finales arrabio y escoria. Estos productos fluyen juntos en estado líquido, a través de un orificio situado en la parte baja del crisol denominado piquera, a una especie de balsa, produciéndose la separación definitiva del arrabio y la escoria por diferencia de densidad (UNESID & IECA, 2011).

La composición química de la escoria depende de los minerales de hierro, de las cenizas de coque utilizado como combustible y de los óxidos de los fundentes empleados. Los principales componentes de la EAH son: CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , S , FeO , MnO , K_2O , siendo los límites más utilizados el índice de basicidad ($I_b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$) y el índice de basicidad simple ($I_{bs} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$).



La escoria que sale por la piquera a una temperatura aproximada de 1500 °C, se puede enfriar siguiendo diferentes técnicas, obteniéndose materiales con características de utilización claramente diferenciadas:

- Escoria cristalizada
- Escoria vitrificada (granulada o peletizada)
- Escoria expandida

La escoria cristalizada se obtiene por enfriamiento lento; la escoria granulada se obtiene por enfriamiento brusco, dejándola caer sobre un chorro de agua fría. La granulación vitrifica la escoria, convirtiéndola en un sólido cuyos átomos no han tenido tiempo de orientarse al estado cristalino por la rapidez del enfriamiento. Para su utilización, la escoria granulada debe molerse en molinos de bolas, que consiste en un tambor de acero, horizontal y giratorio que contiene una carga considerable de bolas de acero con un tamaño entre 25 y 50mm.

La escoria peletizada se obtiene dejando caer la escoria fundida sobre un tambor giratorio, regando con agua. Los ajustes en la velocidad del tambor, relación agua/escoria, etc., hacen posible controlar las proporciones de los tamaños de partículas, así como su grado de vitrificación. La escoria expandida se obtiene añadiendo a la escoria fundida una pequeña cantidad de agua (UNESID & IECA, 2011).

La escoria granulada puede ser utilizada en diferentes aplicaciones, entre las que destacan:

- Cemento con adiciones
- Suelo-cemento
- Concreto compactado con rodillo
- Capa base de carreteras
- Agricultura/Mejora del suelo



En trabajos previos (Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2007; Carrasco, Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2005) se ha determinado que el empleo de escoria granulada de alto horno en la formulación de cementos compuestos conduce a una menor velocidad de hidratación del sistema y a una disminución de las propiedades resistentes a temprana edad, a medida que aumenta el nivel medio de adición en el cemento.

Un estudio realizado por Claudia Castellano et al. en 2013, en pastas de cemento con relación a/c de 0.40 y diferentes contenidos de escoria (20%-80%), concluye que cuando se reemplaza cemento por escoria y la finura del clinker se mantiene constante, el desarrollo de la resistencia a diferentes edades otorgada por esta adición dependerá de la distribución de tamaño de sus partículas. Las partículas de tamaño menor a 10 μm cumplen un rol fundamental en la contribución de la resistencia mecánica a las primeras edades, mientras que partículas cuyos tamaños se encuentran comprendidos entre los 10 a 45 μm contribuyen a edades más avanzadas (Castellano, Bonavetti, & Irassar, 2013).

Considerando que la hidratación inicial comienza sobre la superficie de las partículas de la escoria, el material de la superficie de partícula será quien reaccionará. De este modo la velocidad y el grado de hidratación que se podrá alcanzar dependerán, entre otras razones, de la superficie específica y la distribución de tamaño de partículas de escoria granulada de alto horno. Es decir, que si se controlan estos parámetros, pueden producirse especialmente a primeras edades, cementos mezclas con alto contenido de adición con propiedades similares o superiores a las obtenidas por el cemento Portland (Malhotra & Hemmings, 1995).

El aumento de la finura de la adición permite la obtención de concretos de alta resistencia con elevado contenido de la adición (Bonavetti, 2004).

Niu et al., al analizar el efecto del empaquetamiento de cementos con contenidos de 20 a 70 % de escoria y finuras Blaine de 300-800 m^2/kg , concluyeron que a 3



días el grado de hidratación alcanzado por los morteros con escoria finura Blaine 800 m²/kg es el doble que el obtenido por los morteros con menor finura y estos resultados se correlacionan linealmente con las resistencias a compresión obtenidas (Niu, Feng, Yang, & Xheng, 2002).

La EAH utilizada en las experimentaciones hechas por otros autores, es activada con álcalis que pueden ser Na₂SiO₃, NaOH, Ca(OH)₂, Na₂SO₄. (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010; Espinoza & Escalante, 2008)

6.1.5.3 Morteros con Metacaolín (MK)

Los Caolines son rocas formadas fundamentalmente por minerales del grupo del Caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados. Para su utilización en algunas de sus aplicaciones, deben ser refinados y procesados, para aumentar su blancura, pureza u otras características comerciales importantes.

El Metacaolín (MK) es un producto de síntesis, manufacturado mediante la calcinación del caolín, de gran finura (hasta 1-2 μm) y con elevada actividad puzolánica, ésta última regida por la norma ASTM C311. Se ha demostrado en un gran número de estudios que el MK proporciona mejoras significativas en la resistencia mecánica (De Silva & Glasser, 1993).

De acuerdo con Moya (Moya, 1998), el tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales, que llevan a la obtención de Metacaolín (2SiO₂.Al₂O₃) o Mulita (3Al₂O₃.2SiO₂).

La reacción que indica la formación del Metacaolín es la siguiente [4]:





De estos productos, el Metacaolín (MK), es un aluminosilicato de carácter amorfo y alta reactividad, que mezclado con cal o cemento actúa como puzolana y les concede a los morteros y concretos excelentes propiedades cuando se adiciona al cemento, tal como una resistencia a la compresión superior y excelentes propiedades de durabilidad. Así mismo, su color blanco lo hace muy interesante para aplicaciones arquitectónicas (Caldarone, Gruber, & Burg, 1994).

El Metacaolín (MK) ² cuando se adiciona a morteros y concretos mejora sustancialmente el desempeño mecánico y de durabilidad, debido a que éste se combina químicamente con el hidróxido de calcio, procedente de la reacción de hidratación del cemento, para formar silicatos de calcio, sílico-aluminatos y aluminatos de calcio hidratados (CALDARONE, 1994), considerado una puzolana de alta reactividad. Esta reactividad está relacionada con la naturaleza de la materia prima de la cual proviene (composición mineralógica y grado de cristalinidad de los minerales que formen el Caolín), las condiciones del proceso térmico (temperatura y tiempo de deshidroxilación) y sus características propias, tales como el tamaño de partícula, entre otros (KAKALI, 2001). Así la actividad puzolánica de las arcillas cocidas está asociada a la eliminación del agua estructural de las capas cristalinas de la arcilla, generando un producto amorfo o semiamorfo con alta superficie específica y alta reactividad química. La principal reacción cementicia esta propiciada por la disolución de la sílice vítreo-amorfa, produciendo sílice en disolución, que reacciona con el CH para formar gel CSH. La alúmina también se disolverá en el medio con alto pH. Una pequeña cantidad se incorporará al gel CSH, pero la mayoría reacciona para formar CAH y CASH, normalmente cristalinas, las cuales pueden contribuir al proceso de cementación y a su resistencia (Sepulcre Aguilar A. , 2005b).

² Los proveedores más comunes de MK son los Chinos y Ucrania, los chinos con los costos de hasta 500 dólares por tonelada, ucrania más barato con precios de 240 dólares con pedidos de 1000 toneladas. Estos no son los únicos proveedores.



La norma ASTM C618 precisa como valor mínimo un índice resistente igual o superior al 75% a 28 días para considerar un material como puzolana en relación a su resistencia total.

El MK ha sido uno de los de mayor estudio en diferentes lugares del mundo y con una gran variedad de aplicaciones. A continuación se mencionan algunos autores que han trabajado con Metacaolín en adiciones a morteros, destacando algunos de sus resultados.

En estudios de algunos autores se estudia y se comprueba que el MK cumple con las especificaciones para ser considerada como una puzolana, con un alto índice puzolánico y un efecto importante en las propiedades de permeabilidad capilar. En estos estudios se han utilizado Caolines con contenidos de caolinita entre el 38% y el 52% con desempeños bastante aceptables (Badogiannis, 2005).

Un estudio realizado en el año 2007, donde se evalúan morteros adicionados con MK, destaca la importancia de estudiar el comportamiento de las reacciones puzolánicas no solo con pruebas destructivas, si no también evaluando propiedades físicas como absorción capilar y permeabilidad de cloruros. Los resultados obtenidos muestran la similitud de resultados, en las pruebas físicas y mecánicas, en morteros adicionados con caolines de alta y baja pureza para las adiciones de 10% y 20% (Torres Agredo & Mejia de Gutierrez, 2007).

Una publicación actual muestra un estudio sobre adiciones de MK y humo de sílice (HS) a concretos. Los mejores resultados reportados para las pruebas mecánicas y de durabilidad se obtienen con el HS, siendo muy satisfactorios los de MK. En el estudio se concluye que el porcentaje óptimo de adición de MK es del 20%, resultado obtenido por Wild y Khatib en 1996. (Wild, Khatib, & Jones, 1996)



6.2 Patologías de elementos fabricados con CP: Concretos y morteros

Los materiales cerámicos constan en su mayoría de más de una fase. Tanto el concreto como el mortero son cerámicos multifásicos, cuyo deterioro ofrece sugestivo interés en vista de su exposición a la intemperie en carreteras, al mar y las instalaciones portuarias y a sustancias químicas en extensas instalaciones manufactureras o sanitarias. Tanto el ataque interno como externo puede ocasionar su deterioro; en ambos casos, su durabilidad depende de la composición química de los agregados (arena, grava, etc.), y del CP. Para resistir el ataque exterior, un concreto debe de ser impermeable a las soluciones reactivas, propiedad que depende de la correcta formulación, del mezclado, la compactación y el curado (Guy, 1980, pág. 421).

6.2.1 Ataque por sulfatos

Algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto son los iones de sulfatos del suelo, del agua de mar o del agua freática. El sulfato reacciona primero con el aluminato tricálcico; una reacción subsecuente con la cal libre (CaO) produce una masa voluminosa que agrieta al concreto y fomenta un ataque extra. Por tanto un elemento elaborado con CP que contenga menos de 6% de aluminato tricálcico tiene óptima resistencia a las soluciones de sulfatos (Guy, 1980, págs. 421-422), mientras que aquellos con más de 8% no se recomiendan para ser usados en ambientes que puedan estar contaminados de sulfatos (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013) .

El ataque por sulfatos se manifiesta por la pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Los productos expansivos generan agrietamientos por donde posteriormente ingresan otros agentes que pueden acelerar el deterioro, como por ejemplo, los iones cloruro (Bertolini, Elsener , Pedferri, & Polder, 2004; Mehta & Monteiro, 2006)



El hidróxido de calcio y los aluminosilicatos presentes en el cemento son los más susceptibles al ataque por sulfatos. Los iones sulfatos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio para formar yeso según [5] (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013):



Y con los aluminatos cálcicos para formar etringita, según [6]:



Los iones sulfato pueden reaccionar con el silicato cálcico hidratado (C-S-H) y el hidróxido de calcio para formar taumasita, lo cual genera una pérdida completa de la resistencia en los concretos, esto bajo condiciones particulares (presencia de CO_2 , humedad relativa mayor del 95% y bajas temperaturas) (Bertolini, Elsener, Pedferri, & Polder, 2004).

6.2.2 Reacción álcali-sílice (RAS)

Entre los años 1940 y 1942 Stanton presentó dos trabajos acerca de deterioros en construcciones de concreto en California, E.U.A. Las fallas se presentaban marcadamente en obras de la región de Kansas-Nebraska en las que, por falta de agregados gruesos para el concreto, habían usado una mezcla más fina, que denominaban arena-grava (Stanton, Porter, Meder, & Nicol, 1942). La reacción que provocaba los deterioros es la originada entre los álcalis del cemento liberados por la hidrólisis y la sílice hidratada, en presencia del agua. Por esa razón la llamaron “reacción álcali-agregado” (Veronelli, 1978).

Los álcalis se incorporan al crudo de fabricación provenientes de arcillas, pizarras, esquistos, micas, feldespatos, entre otros minerales empleados en el proceso de clinkerización.

Las RAS se dan principalmente con áridos que contienen ciertas formas amorfas de sílice, son muy lentas y sus efectos solo se pueden observar a través del tiempo. Las condiciones necesarias para que se produzca la reacción son: la



presencia de álcalis (Na_2O y K_2O), un árido reactivo, humedad del orden de 80-85% y temperatura. La concentración permisible de álcalis en el concreto debe ser de 3 kg/m^3 y de 0.6% en cementos expresado en Na_2O (Mejía & Rodríguez , 1999; Bertolini, Elsener , Pedferri, & Polder, 2004; Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

Hasta ahora se ha conducido a la explicación del mecanismo reaccional de la RAS para dos modelos distintos, el modelo topoquímico y el modelo de disolución–precipitación (Santos Silva, 2006). En el modelo topoquímico la reacción es descrita como siendo desarrollada en la superficie de los áridos reactivos, sin que necesariamente exista un traslado de especies reactivas del árido para la solución. En el modelo de disolución – precipitación la reacción es desarrollada en la solución intersticial después del cambio al estado iónico de las diversas especies reactivas (Barreto Santos , De Brito, & Santos Silva, 2009).

Los iones hidróxilo causan la destrucción de los enlaces atómicos de los compuestos de silicio; los iones álcali reaccionan con $\text{Si}(\text{OH})_4$ y forman un gel (Na, K)-Si-OH) en el que se intercambian Na y K por Ca hasta que el gel se solidifica, el cual al absorber agua expande generando esfuerzos de tensión y por consecuencia agrietamientos (Bertolini, Elsener , Pedferri, & Polder, 2004). En la tabla 14 se muestran las rocas y minerales potencialmente reactivos con los álcalis.

Tabla 14 Rocas y minerales potencialmente reactivos con los álcalis.

Rocas/Minerales	Composición Química	Características
Ópalo	$\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$	Amorfo
Calcedonia	SiO_2	Micro a criptocristalina, comúnmente fibrosa.
Formas de Cuarzo	SiO_2	Micro a criptocristalino o intensamente fracturado y/o con intrusiones
Vidrios riolíticos, dacíticos y andesíticos o los respectivos productos criptocristalinos de desvitrificación. Algunas filitas.	Silicatos con menor proporción de Al_2O_3 ; Fe_2O_3 ; Tierras alcalinas	Vidrios o materiales criptocristalinos, tales como matrices de rocas volcánicas o fragmentos en tufas.



Las condiciones necesarias para que una puzolana logre inhibir la reacción álcali-agregado deben ser (Veronelli, 1978):

- a) Que la puzolana presente sílice reactiva
- b) Que presente muy alta superficie específica, es decir, que sea muy finamente molida.
- c) Que se encuentre íntimamente mezclada con el cemento.

Los materiales puzolánicos ayudan a mitigar la expansión provocada por la reacción álcali-sílice, siendo el más efectivo la adición de humo de sílice en porcentajes de 8 a 10% (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013)

En la investigación realizada por Valdez Tamez, et al., reporta reducción de más del 40% en la expansión de la reacción álcali-agregado en morteros sustituidos con puzolanas naturales de origen ígneo, con relación a morteros con cemento ordinario. La ilustración 7 muestra la morfología del gel de sílice (Valdez , Fajardo , Hermosillo, & Flores, 2008).

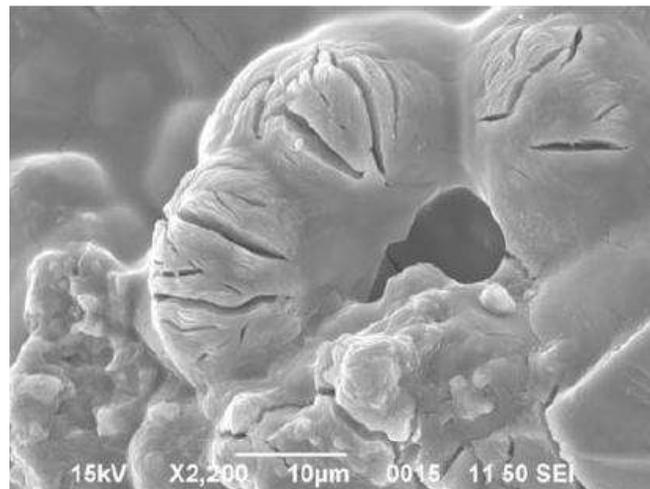


Ilustración 7 Morfología del gel de sílice formado por la reacción álcali-sílice

6.2.3 Ataque por cloruros

El ataque por cloruros al concreto puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la



mezcla (por ejemplo: áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al hormigón, entre otros (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

Los iones cloruros una vez penetran el concreto se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente al reaccionar con el aluminato tricálcico (C_3A) presente en la pasta para así formar cloroaluminatos cálcicos, compuesto conocido como “Sal de Friedel”, que a diferencia de la etringita, no resulta ser expansiva (Mejía & Rodríguez, 1999; Otieno, Alexander, & Beushausen, 2010). En este sentido es recomendable la utilización de cementos con alto contenido de C_3A para concretos expuestos a cloruros. El contenido de C_3A del cemento es aproximadamente del 12%. A partir de las reacciones entre el C_3A y los cloruros se puede evaluar el porcentaje máximo de cloruros que puede ser retenido por la parte de CP hidratada del concreto. Así, para un contenido de C_3A del 12% en peso de CP, el porcentaje de cloruros retenidos es del 3.15% en peso (Lanza, Bermúdez, & Alaejos, 2006).

Por el contrario, los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo, donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo.

La movilidad de los iones cloruro dentro del hormigón está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. La presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando igualmente la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013). El límite de cloruros para despasivar una estructura de concreto armado debe ser más elevado que el que consideran las normas, que es de 0.4% respecto del peso del cemento (López Celis, Pérez Quiroz, & et al., 2006).



6.3 Fenómeno de corrosión del acero

6.3.1 Teoría del fenómeno de corrosión

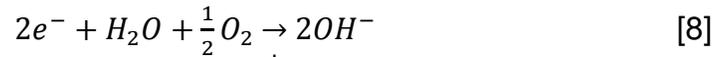
El término corrosión se aplica aquellos procesos que conducen a la destrucción química o electroquímica de un metal. Al exponer superficies limpias de metales a acción del aire seco, éstas reaccionan con el O₂ oxidándose, en este caso el proceso de corrosión transcurre en un medio no iónico y se denomina corrosión química. Si esos mismos metales se ponen en contacto con una solución acuosa conductora, se producen procesos de óxido – reducción con el paso de iones del metal a la solución (oxidación) y con la reducción de alguna especie presente en el medio corrosivo. Estos fenómenos transcurren con una disminución de energía libre e implican la vuelta del metal a la forma en que se encuentra en la naturaleza (Medina Custodio, 2006).

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

La reacción anódica se muestra en [7]



La reacción catódica se expresa en [8]



Los iones hidroxilo presentes en la reacción catódica reaccionan con Fe^{2+} y producen hidróxido ferroso [9] mostrado en la ilustración 8, el cual a su vez reacciona con el oxígeno y el agua presente en el hormigón produciendo hidróxido férrico [10]; el último componente corresponde al óxido de hierro hidratado [11], el cual aumenta hasta 10 veces el volumen original (EN206-1, 2000).

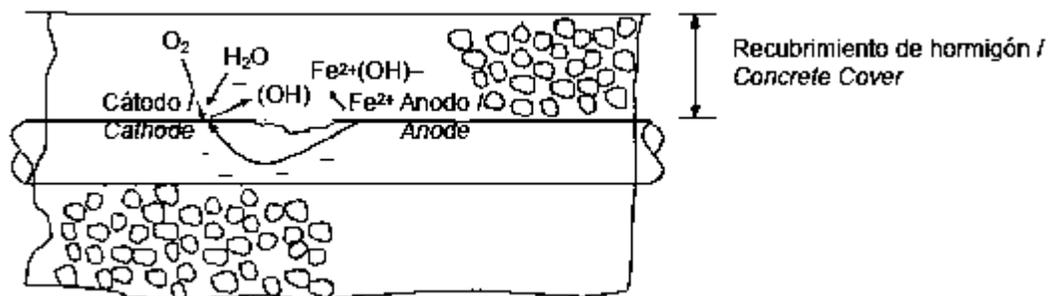
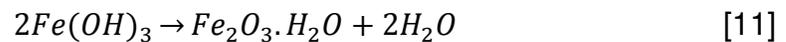
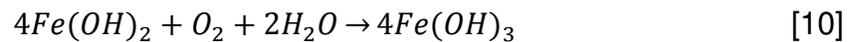


Ilustración 8 Proceso de corrosión del acero embebido en concreto o mortero. Tomado de Aguirre y Mejía.

6.3.1.1 Tipos de Corrosión

Los tipos de corrosión pueden ser clasificados de acuerdo a diferentes criterios, tales como ambiente de exposición que induce a la corrosión, mecanismos de corrosión, daños causados, etc. Su clasificación puede ser de varios tipos: corrosión uniforme, corrosión por picado, corrosión bacteriana,



corrosión galvánica, corrosión por agrietamiento y fragilización de hidrógeno, entre otros. A continuación se presentan dos de los tipos más importantes presentes en la corrosión del acero de refuerzo, particularmente ante la exposición a cloruros y/o carbonatación (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

Corrosión Uniforme. En algunos casos las zonas anódicas y catódicas se encuentran a distancias muy pequeñas y tienden a unirse en la barra de acero, de esta manera los procesos corrosivos ocurren uniformemente a través de la barra de acero de refuerzo; este tipo de corrosión, denominada corrosión uniforme, se observa usualmente en estructuras expuestas a carbonatación (Song & Shayan, 1998).

Corrosión localizada o por picadura. En este caso la zona anódica es más pequeña que la zona catódica, pero la velocidad de penetración de la corrosión en el área anódica es muy alta, es decir, la zona anódica se corroe rápidamente; se afirma entonces que la corrosión es de tipo localizada y, debido a la formación de pequeñas “picaduras” en la superficie del acero, se le denomina corrosión por picadura (Song & Shayan, 1998).

6.3.2 Corrosión del acero estructural

La corrosión de las barras de refuerzo es una de las principales causas de la degradación del hormigón armado; su fuente principal, en ambientes marinos, es el ion cloruro, que causa graves daños a la estructura puesto que las barras de acero presentes dentro del hormigón son susceptibles a la corrosión al penetrar estos iones en la profundidad del acero (Jamil, Montemor, Boulif, & Shrirri, 2003; Lee, Moon, & Swam, 2005; Ki-Yong & Ha-Won, 2007; Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010)

En la hidratación del cemento Portland las principales fases mineralógicas producen C-S-H (silicatos de calcio hidratados) y además Portlandita a la solución, lo cual se estima entre un 20 y 30% en masa (Ramachandran & Beaudain, 2001).



La Portlandita no aporta un beneficio a la acción mecánica de la matriz cementante, sin embargo, mantiene un ambiente alcalino (alto pH, 12-13) necesario para evitar la corrosión del acero de refuerzo promovida por la carbonatación del concreto (Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004).

Cuando se da el proceso de corrosión en el concreto, la sección transversal de la barra de refuerzo se hace más pequeña, reduciendo así la capacidad de carga del elemento de hormigón armado (Kondratova, Montes, & Bremner, 2003). En el ambiente marino, el acero de refuerzo a la corrosión es el resultado natural de la penetración de cloruros en el hormigón, bajo estas condiciones, la despasivación de barras de acero puede conducir a la formación localizada de capas de óxido porosas en la interfase acero/concreto. Como las capas de óxidos de hierro tienen un volumen dos o cuatro veces mayor que el volumen de hierro, se pueden generar tensiones en el hormigón y crear fisuras que pueden causar una aceleración del proceso de corrosión (Villabona Ortiz, Tejada Tovar, & Villabona Durán, 2013)

Evaluación y diagnóstico de Estructuras

La evaluación del comportamiento de adición de materiales sustitutos de cemento en la elaboración de morteros y/o concretos y su efecto en la resistencia a la corrosión puede determinarse por medio de técnicas electroquímicas, tales como Resistencia a la polarización Lineal (ASTM-G3, 2004; ASTM-G5, 2004; ASTM-G59, 2003), Extrapolación de Tafel (ASTM-G3, 2004; ASTM-G5, 2004; ASTM-G59, 2003) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (ASTM-G106, 2004).

Mediante el ensayo de resistencia lineal a la polarización (LPR) se han estudiado sistemas de concreto Portland armado (Feliu, Gonzalez, Miranda, & Feliu, 2005). Otras investigaciones incluyen medidas de corrosión por iones cloruros, comparadas por métodos electroquímicos y pérdida de peso (Poupard, L'hostis, Catunaud, & Petrelazar, 2006).



6.3.3 Técnicas para el cálculo de la velocidad de corrosión

6.3.3.1 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

El uso de la impedancia en corriente alterna ya se conocía y aplicaba en el área de ingeniería eléctrica. Se comenzó a utilizar para el estudio y caracterización de materiales hasta la década de 1970, y alcanzó gran aceptación por su característica de señales en función de la frecuencia, lo que permite analizar un sistema y sus componentes (Pérez T. , 2002).

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de Ohm [12].

$$E = IR \quad [12]$$

En donde E es en volts, I en amperes y R en ohms. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente [13].

$$E = IZ \quad [13]$$

En la ecuación 13, Z representa la impedancia del circuito, con unidades de ohm. La impedancia difiere de la resistencia en que esta última depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de Hertz (Hz) o número de ciclos por segundo. Y así como la resistencia tiene a la conductividad como recíproco, la impedancia tiene la admitancia (Y) (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

Para comprender la teoría que soporta la técnica de EIS, es conveniente describir a la corriente y al voltaje como vectores giratorios o “fasores”, los cuales pueden ser representados en un plano complejo o “Diagrama de Argand”.



Un voltaje sinusoidal puede ser representado por la siguiente expresión [14].

$$E = \Delta E \text{ sen } \omega t \quad [14]$$

Donde E es el valor instantáneo del potencial, ΔE es la amplitud máxima y ω es la frecuencia angular, misma que se relaciona con la frecuencia f ($\omega = 2\pi f$). En la mayoría de los casos, la corriente (I) asociada a una señal de potencial, es también sinusoidal, de la misma frecuencia (ω) pero de amplitud y fase diferente a la del potencial. Esto se representa de la siguiente manera [15].

$$I = \Delta I \text{ sen } (\omega t + \phi) \quad [15]$$

De manera esquemática esto se observa en la ilustración 9.

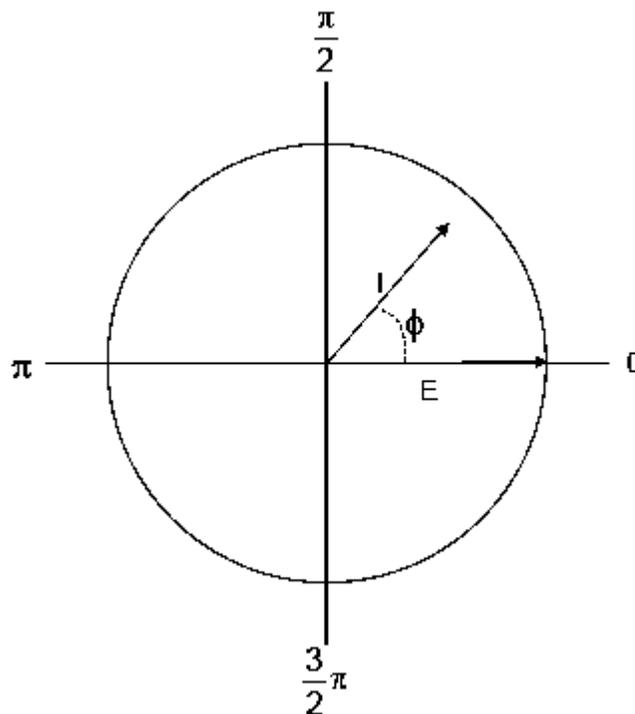


Ilustración 9 Fasores de corriente (I) y potencial (E) separados por un ángulo de fase ϕ (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

Lo anterior es establecido para circuitos simples, sin embargo, en el tema de corrosión surgen mecanismos que necesitan ser resueltos mediante un circuito eléctrico equivalente, siendo el empleo de capacitores una solución a muchos



sistemas electroquímicos. Por ello, a continuación se desarrollan los argumentos matemáticos incluyendo un capacitor al sistema.

Cuando un capacitor se considera en el circuito eléctrico diferentes aspectos deben tomarse en cuenta. El concepto de “capacitancia” (C), puede definirse a partir de las relaciones entre el potencial E, aplicado entre las placas del capacitor y la carga (q), según la siguiente expresión [16]:

$$q = CE \quad [16]$$

Manipulando la ecuación anterior para convertir la carga q en corriente, y considerando la ecuación 14, puede obtenerse:

$$I = \omega C \Delta E \cos(\omega t) \quad [17]$$

Si el término $1/\omega C$ es reemplazado por X_c factor denominado reactancia capacitiva) se tiene la siguiente expresión:

$$I = \frac{\Delta E}{X_c} \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad [18]$$

La ecuación 18 tiene una forma similar a la ley de ohm, donde X_c toma el papel de R y se considera un ángulo de fase diferente a cero e igual a $\pi/2$. Como el ángulo de fase es positivo se dice que la corriente esta adelantada al potencial.

En notación de fasores, la caída de potencial total para una resistencia (R) y un capacitor (C) es:

$$E = E_R + E_C = I(R - jX_C) \quad [19]$$

O bien:

$$E = IZ \quad [20]$$



En donde el término $Z=(R-jX_c)$ recibe el nombre de “impedancia”. Así el ángulo de fase (ϕ) puede definirse como:

$$\tan \phi = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{\omega RC} \quad [21]$$

La relación entre las ecuaciones 19 a 21 puede representarse de manera gráfica en la ilustración 10.

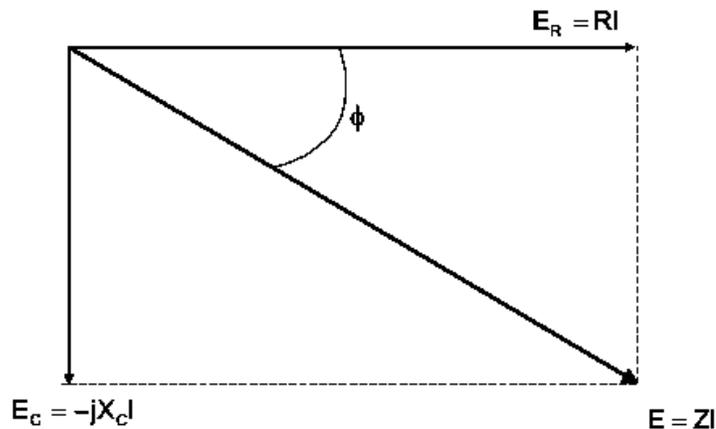


Ilustración 10 Diagrama fasorial para una resistencia (R) y un capacitor (C) en serie. E corresponde al potencial total a través de la combinación de R y C , RI representa el componente resistivo y $jX_c I$ representa el componente capacitivo. (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002)

La finalidad de establecer la solución de un circuito eléctrico que incluya un capacitor es poder aplicarlo al cálculo de la velocidad de corrosión, tomándolo como un circuito equivalente que represente al sistema en conjunto. Para ello se debe de considerar la resistencia propia de la transferencia de carga, la resistencia de la solución que funge como electrolito y el fenómeno de la doble capa que ocurre en la interfase metal-electrolito, ilustración 11, en la que las cargas positivas y negativas están separadas a una distancia muy pequeña desde la superficie del electrodo hasta el seno de la solución, por lo que se le puede considerar como un capacitor cargado con una capacitancia C_{dl} .

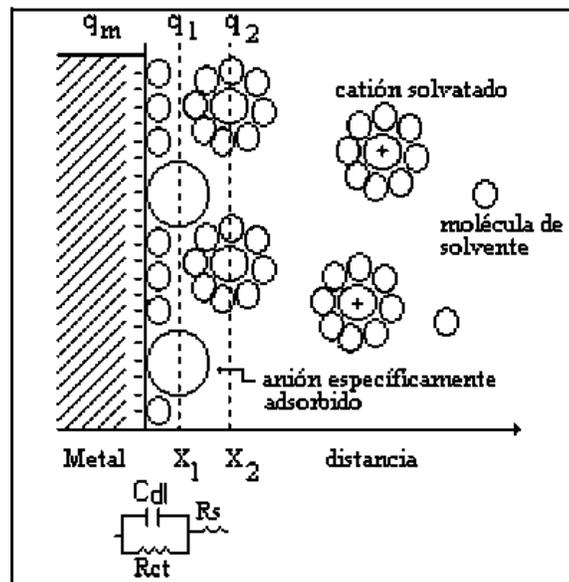


Ilustración 11 Similitud de la interfase electrificada con un circuito eléctrico equivalente. (Pérez T. , 2002)

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

En la ilustración 12 se muestra un ejemplo de circuito eléctrico equivalente (Randles) para una celda de corrosión, así como la interpretación en un diagrama de Nyquist (Z' vs $-Z''$).

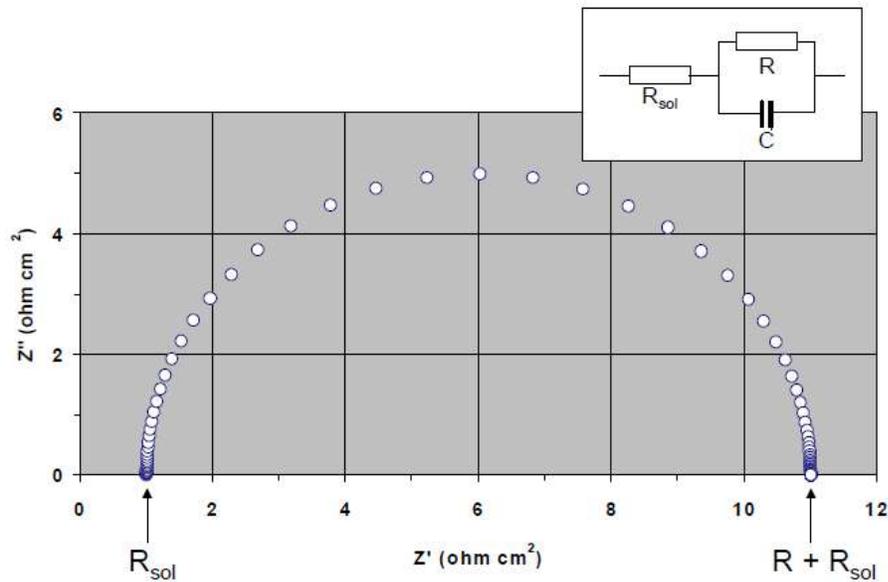


Ilustración 12 Diagrama equivalente con los elementos de resistencia y un capacitor, fungiendo como la resistencia de la solución, R_{tc} y como la doble capa entre metal y electrolito (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

Del mismo ensayo, se obtienen los gráficos de Bode, que pueden ser frecuencia (Hz) vs $|Z|$ y frecuencia (Hz) vs ángulo de fase ($^\circ$), sin descartar otras configuraciones que pueden ayudar en análisis complejos.

En la ilustración 13 se presenta el diagrama de Bode- Z_{mod} , que corresponde al mismo análisis mostrado en la ilustración 12, y del cual se pueden obtener los mismos resultados con referencia a las frecuencias.

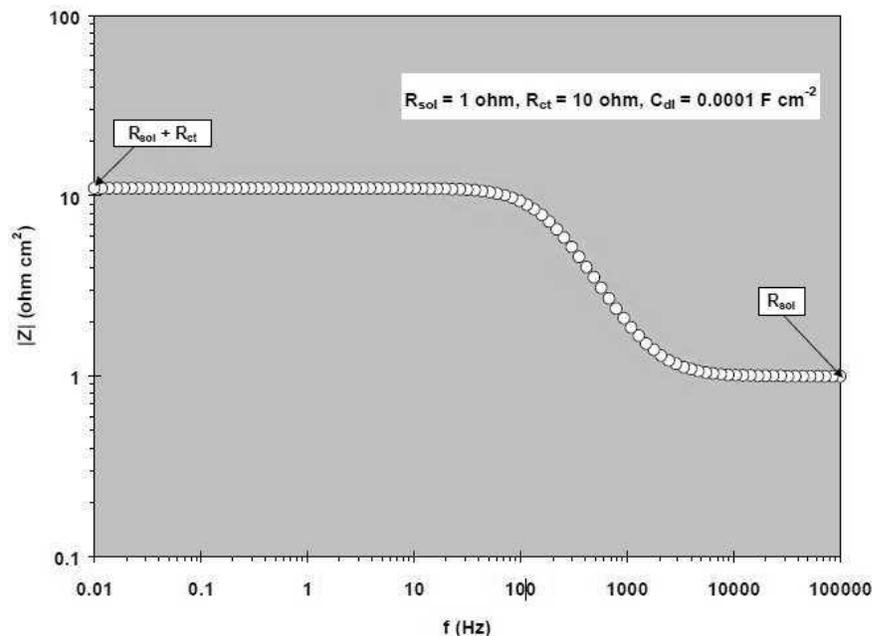


Ilustración 13 Diagrama de Bode Freq vs $|Z|$. Se obtienen los valores de R_{sol} y R_{ct} de manera directa (Mendoza F., Durán R., & Genescá LL., 2002).

Al conjunto de puntos graficados para diagrama es a lo que se le llama espectros de impedancia.

Se debe destacar que la configuración de diferentes circuitos eléctricos pueden arrojar el mismo resultado, sin embargo la elección de la configuración debe ser congruente con el sistema real.

6.3.3.2 Resistencia a la polarización lineal (Rpl)

Una de las técnicas utilizadas para el cálculo de la velocidad de corrosión es la Resistencia a la Polarización Lineal (Rpl), siguiendo los lineamientos que enmarca la norma ASTM G59 (ASTM-G59, 2003).

La técnica electroquímica de la resistencia a la polarización, permite medir la velocidad instantánea de corrosión, ha sido la más utilizada en los últimos 50 años y se define como la pendiente de la tangente a la curva de polarización en las vecindades del potencial de corrosión E_{corr} , en caso de una reacción controlada



por transferencia de carga (Medina Custodio, 2006). En 1978 C. Andrade presenta resultados de mediciones de la velocidad de corrosión en morteros utilizando ésta técnica (Andrade & González, 1978).

Los resultados de la Rpl permiten conocer comportamientos activos o pasivos del sistema en estudio y la velocidad con que ocurren, es decir, se puede inferir mediante estos resultados la velocidad de corrosión. Para ello es necesario conocer las pendientes de Tafel (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

Cuando los electrones circulan por el electrolito encuentran una cierta dificultad al moverse, a esta "dificultad" se le llama Resistencia a la polarización. La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Así esta ecuación es una analogía de la ley de Ohm, que establece que la intensidad de la corriente eléctrica i que circula por un elemento resistivo, es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada V , e inversamente proporcional a la resistencia del mismo R , según expresa la ecuación [22] y [23] (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010):

$$i = \frac{V}{R} \quad \text{ley de ohm} \quad [22]$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Stern y Geary} \quad [23]$$

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



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

La ventaja de utilizar la técnica de Rpl es que proporciona velocidad de corrosión instantánea, y teniendo como limitaciones la necesidad de un potencial estable, una adecuada velocidad de barrido y la caída óhmica en sistemas altamente resistivos (Rodríguez Gómez F. , 2002).



7 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La necesidad de realizar el presente proyecto condujo a aplicar una metodología que se basa en el método científico, con elementos propios del estudio y etapas necesarias para su conclusión. A continuación se presenta un diagrama de secuencias de trabajos realizados.

7.1 Organigrama de Actividades



Ilustración 14 Organigrama de actividades durante el procedimiento de experimentación.



7.2 Caracterización del Material Inerte

El material inerte utilizado para la elaboración de morteros es la arena de origen volcánico; el más utilizado es la arena negra triturada proveniente de basalto, aunque la arena de río o las calizas funcionan bien.

El material inerte utilizado en la elaboración de los morteros fue arena del río “el cuervo”, con ubicación en Huajúmbaro, Municipio de Zinapécuaro en el Estado de Michoacán, ilustraciones 15 y 16.



Ilustración 15 Localización del lugar donde se obtuvo la arena, Huajúmbaro, Michoacán. Por el autor.

La ubicación de la población de Huajúmbaro está en las coordenadas GPS:

Longitud (dec): -100.741667 Latitud (dec): 19.681944

Es importante mencionar que las pruebas que se presentan a continuación se efectuaron a la arena para tener un poco más de información acerca de ella, ya que para este caso las mezclas no conllevan un proporcionamiento de mezcla.



Ilustración 16 Lugar geográfico de obtención del material inerte, Huajúmbaro, Michoacán. Por C. Bernabé.

Humedad actual.

La humedad actual se determinó según la norma NMX – C – 166 (NMX-C-166-ONNCCE, 2006). Se realizaron 3 ensayos de los cuales se obtuvo un promedio.

Se utilizó la fórmula [24]:

$$\% \text{ de Humedad actual} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad [24]$$

Dónde:

M_h= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

M_s = masa seca del material en gramos, secada en charola sobre parrilla, ilustración 17.



Ilustración 17 Secado del arena en parrilla para obtener el dato de Ms.

Humedad de absorción

La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación NMX – C – 165 (NMX-C-165-ONNCCE, 2004), mediante la siguiente fórmula [25]:

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad [25]$$

Dónde:

M_h = masa saturada y superficialmente seca en gramos, ilustración 18.

M_s = masa seca del material en gramos.

Se realizaron 3 pruebas con las que se promediaron resultados.



Ilustración 18 Procedimiento para obtener el secado superficial NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004.

Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS).

La prueba se realizó según la norma NMX-C-073 (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

El resultado se obtuvo del promedio de la realización de tres pruebas, ilustración 19.



Ilustración 19 Equipo para realizar la prueba de MVSS.

Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV).

Se realizó en base a la norma NMX – C – 073 (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Se utilizó un recipiente metálico y una barra de $\frac{3}{4}$ de pulgada con “punta de bala” para varillar el material, ilustración 20.



Ilustración 20 Varillado de la arena en la prueba de MVSV
Colorimetría.

Esta prueba permitió determinar el contenido de materia orgánica en el agregado conforme lineamientos de la norma mexicana, ilustración 21 (NMX-C-088-ONNCCE, 1997).



Ilustración 21 Análisis colorimétrico.

Sedimentación.

Se realizaron 3 pruebas:



En las 3 pruebas el resultado fue “Contenido de finos aceptable”, ilustración 22.



Ilustración 22 Análisis de contenido de finos.

Determinación del material fino

Determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200 (NMX-C-084-ONNCCE, 2006).

Prueba de terrones de arcilla.

Es útil para conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando se encuentran en abundancia formando parte de la arena (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).

Gravedad Específica

Se realizó siguiendo los procedimientos del manual de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil. Se evaluaron dos procedimientos, mediante inmersión del material, ilustración 23, y por diferencias gravimétricas, ilustración 24, empleando un frasco de vidrio.



Ilustración 23 Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Por C. Bernabé



Ilustración 24 Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Por C. Bernabé

7.3 Análisis del agua

El agua utilizada en la elaboración de concretos y morteros debe cumplir con parámetros indicadores de calidad, que se tomarán en cuenta para aceptar su uso. El análisis del agua empleada en el presente trabajo fue realizado por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes expidieron los resultados con referente bajo normativa mexicana (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). Los datos del reporte se presentan en la tabla 18 de la sección de resultados.

7.4 Materiales de estudio

Los materiales de sustitución CBC, EAH y MK fueron caracterizados mediante pruebas de tamaño de partícula, análisis en el MEB para determinar



morfología de partícula y por fluorescencia de rayos X (FRX) en que se determinó la composición química.

La ceniza de bagazo de caña (CBC) se obtuvo del ingenio azucarero localizado en el municipio de Taretan, en el estado de Michoacán, ilustración 25. El tratamiento al que se sometió fue de secado y cribado, utilizando las partículas que pasan la malla ASTM No. 200 (0.074 mm) para la elaboración del mortero.



Ilustración 25 Proceso de transporte de residuos de molienda de caña.

La EAH utilizada para las sustituciones se obtuvo de la siderúrgica Arcelor Mittal en el puerto de Lázaro Cárdenas, en el estado de Michoacán, México, ilustración 26. La cantidad disponible en los patios de Arcelor Mittal es de 550,000 MT.

La EAH obtenida fue pulverizada mediante molinos de bolas y posteriormente cribada, utilizando las partículas que pasan la malla No. 200 ASTM para la elaboración de los morteros.



Ilustración 26 Obtención de la EAH en los patios de Arcelor Mittal, Lázaro Cárdenas, Michoacán.

El metacaolín utilizado para la investigación se obtuvo de un proceso industrializado, adquirido en sacos de 50 kg, ilustración 27.



Ilustración 27 una muestra de MK tal como se distribuye

7.5 Consistencia normal y Tiempos de fraguado

La consistencia normal (CN) de una pasta se obtiene cuando al agregar un porcentaje de agua, respecto a la cantidad de cementante seco (cemento o cemento+adición), se obtiene una penetración de 10 ± 1 mm en la pasta de

cemento utilizando la aguja de 1mm del aparato de Vicat, ilustración 28 (NMX-C-057, 2010).

Obtenida la CN, la determinación del tiempo de fraguado inicial se calcula por interpolación entre la lectura menor y la mayor más cercanas de una penetración de 25 mm de la aguja del equipo de Vicat. El tiempo de fraguado final es el tiempo transcurrido desde que el cemento se puso en contacto con el agua hasta que la aguja del aparato de Vicat no deja una huella completa del círculo sobre la pasta de cemento (NMX-C-059, 2010).

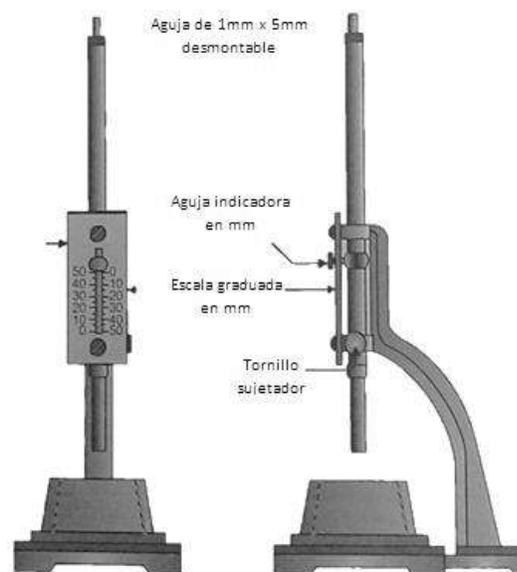


Ilustración 28 Aparato de Vicat utilizado para realizar las pruebas de consistencia normal y tiempos de fraguado inicial y final.

Otro método para el cálculo de los tiempos de fraguado es mediante la utilización del Aparato de Gillmore, ilustración 29. El tiempo de fraguado inicial es el tiempo transcurrido desde que se agrega el agua a la pasta hasta que la aguja de menor masa deja huella apreciable sobre la superficie. La determinación del tiempo de fraguado inicial sigue el mismo procedimiento utilizando la aguja con masa mayor (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011).



Ilustración 29 Aparato de Gillmore para la realización de los tiempos de fraguado.

7.6 Proporcionamiento

Se utilizó la cantidad de 1481gr de cementante, puesto que se cuantificó el volumen que se debía llenar en los especímenes que se elaborarían, ya que después de varias pruebas se determinó que el rendimiento de cementante era de 0.47gr/cm³, ya que si se utilizaba lo que indica la norma correspondiente (ASTM C 109M I. , 2002) para llenar de mezcla 6 cubos de dimensiones 5cm x 5cm x 5cm, se desperdiciaría demasiado material al elaborar los especímenes.

Se elaboraron dos mezclas por cada sustitución, ambas con la misma proporción. En la primer mezcla que se elaboró con la cual se obtuvo la fluidez deseada, se utilizaron las cantidades de material y se registraron las características de la mezcla indicadas en la tabla 15.

Tabla 15 Proporción de la mezcla con que se elaboró el mortero.

Agregado o característica	Cantidad
Cemento	1481 g
Arena	4072g
Agua	1495 ml



Relación agua/cemento(A/C)	1.01
Fluidez	108%

7.7 Prueba de Fluidez

Previo a la elaboración de los especímenes se realizaron las pruebas para determinar la cantidad de agua necesaria para que el mortero tuviese una fluidez de $110\% \pm 5\%$ (ASTM C 109M I. , 2002), (NMX-C-061, 2010).

La mezcla se realizó dentro de recipiente plástico con capacidad de 18 litros aproximadamente, ilustración 30.



Ilustración 30 Método de mezclado de áridos mediante aspas de acero impulsadas por el taladro.

Para el mezclado se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, implementado con Aspas Mezcladoras.

La prueba de fluidez consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, sobre la mesa de fluidez; el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie, como se observa en la figura 31. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de



mezcla sobre la parte superior, después se le dan a ésta capa otros 25 golpes con el pisón, posteriormente se enraza el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 15 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos.

La medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas por medio de una hélice truncada que la levanta y la deja caer súbitamente. El diámetro final se mide con un vernier apropiado para realizar dicha operación, ilustración 31-b. Las dimensiones del equipo se establecen en la normativa norteamericana (ASTM-C-230, 2003).



Ilustración 31 a) Llenado de molde sobre la mesa de fluidez, b) Medición del radio de expansión de la mezcla.

Una vez determinada la cantidad de agua se estableció la elaboración de las mezclas con las diferentes materiales de sustitución para posteriormente realizar la elaboración de los especímenes.

Cabe destacar que para la realización de algunas sustituciones como fueron 15%, 20% y 30% de MK, fue necesario agregarle a dicha mezcla un fluidificante, debido a que con la cantidad de agua fijada en un principio para que se cumpliera la relación agua/cemento, no se obtenía la fluidez establecida por la norma ASTM



C109. El fluidificante utilizado fue SikaCem Fluidificante. La cantidad de fluidificante agregada a la mezcla con el 20% de sustitución fue de 2gr/kg de cementante y para la mezcla con el 30% de sustitución fue de 8gr/kg de cementante.

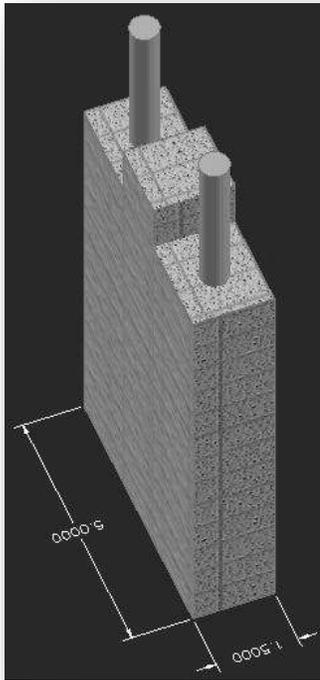
7.8 Elaboración de especímenes

Lolipops

Estos moldes están hechos de material acrílico y Nylamid, con dimensiones de 5cmx1.5cmx8c. Las dos varillas que se colocaron son corrugadas grado 60 de 7/32" de diámetro, con una área expuesta al ataque de 13.67cm², tal como se muestra en la figura 32. La forma de la probeta es similar a la establecida en un trabajo de la Dra. Carmen Andrade, en el cual las dimensiones son 5.5cmx2cmx8cm, con una área expuesta de 11cm² (Andrade & González, 1978).



Ilustración 32 Moldes de acrílico para la elaboración de las probetas a emplearse en las pruebas electroquímicas. Por el autor.



Para el colado de las muestras, al molde se le dio el mismo tratamiento que para el colado de especímenes cúbicos o cilíndricos, se le impregnó aceite para facilitar el desmolde posteriormente.

Una vez fabricadas las probetas se colocaron dentro de bolsas para evitar que estuvieran en contacto con el CO₂ atmosférico y oxidara la barra de acero. Posteriormente se dejaron las muestras sin ningún tipo de curado por 11 meses, a excepción de los testigos (1 mes) y las sustituciones con 15 y 20% de EAH (3 y 5 meses respectivamente), para posteriormente iniciar la inmersión en la solución de cloruro de sodio al

3.5% en peso.

Cubos

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para la fabricación de cubos.

En la fabricación de los cubos de mortero se recubrieron los moldes con aceite como desmoldante.

Una vez que se determinó la fluidez se procedió al llenado de los moldes. El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109M I. , 2002), cada capa de mortero fue apisonada con 8 golpes, como se ilustra en las ilustraciones 33 y 34. El pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5cm x 1.25cm.

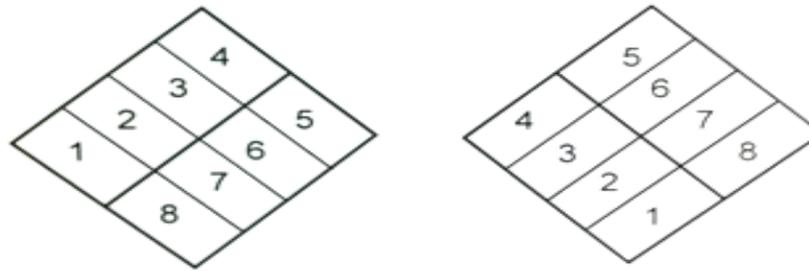


Ilustración 33 Etapas de llenado del cubo de 5cm x 5cm x 5cm

En el transcurso de 24h aproximadamente, se procedió a descimbrar y comenzar el proceso de curado, el cual fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 511, 2003).

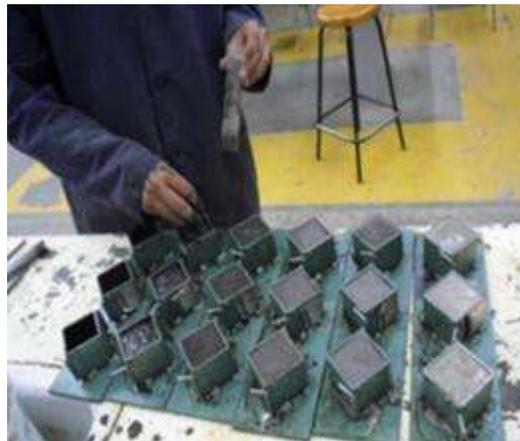


Ilustración 34 Llenado de moldes para cubos de 5x5x5cm.

Prismas

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 4cm x 4cm x 16cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable. El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (2cm), cada capa se compactó con 12 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos.

Transcurridas 24 horas de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes para iniciar el proceso de curado por inmersión.



Briquetas

La elaboración de briquetas no tiene una reglamentación por norma, para su elaboración se procedió conforme el manual del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011).

7.9 Pruebas Físico-Mecánicas y electroquímicas

7.9.1 Destructivas

Las pruebas destructivas se realizaron poco después de terminar con las pruebas no destructivas, siempre se tuvo la precaución de mantener las muestras húmedas y/o sumergidas en agua.

7.9.1.1 Índice de actividad Puzolánica

El índice de actividad de las puzolanas, así como de las cenizas volantes, se comprueba empleando el método de la norma ASTM C311, el cual es un método físico de resistencia mecánica empleando cemento Portland.

El método especifica la elaboración de la mezcla de acuerdo a la norma ASTM-C109, y el cemento Portland utilizado deberá encontrarse dentro de los parámetros de la norma ASTM-C150, incluyendo el contenido de álcalis permisibles. La prueba se realiza en probetas sustituidas con el 20% de puzolana, a 7 o 28 días, siendo el índice de actividad puzolánica la relación entre la resistencia del mortero de cemento sustituido y el testigo (ASTM-C-311, 2002).

7.9.1.2 Prueba a compresión en cubos (5cm)

La prueba de compresión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se aplicó a una velocidad constante en el rango de 50000kg con una aproximación a 0.5kg, esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la



falla del cubo registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109M I. , 2002).

Se probaron 3 cubos por edad para obtener un promedio y por tanto resultados con mejor aproximación, ilustraciones 35-a y 35-b.



Ilustración 35 a) Aplicación de carga sobre espécimen, b) Operación de la máquina universal Tinius Olsen. Por el autor.

En los cálculos para determinar la resistencia a compresión se usó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [26]$$

Dónde:

σ = Esfuerzo a compresión, kg/cm².

P = Carga, kg.

A = Área transversal del cilindro, cm².

En las ilustraciones 36 y 37 se muestran las fallas en las probetas cúbicas de morteros con sustitución del 20 y 30% de MK.



Ilustración36 Muestra de un cubo probado a compresión de MK con 20% de sustitución.



Ilustración37 Ruptura ideal en cubos. Cubo de MK con el 30% de sustitución.

7.9.1.3 Prueba a flexión Indirecta

Esta prueba se realiza a los especímenes prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm. Se probaron tres muestras en cada fecha, el procedimiento seguido se describe a continuación:

- Se marcó el prisma a 1" de sus extremos y al centro donde se aplica la carga.



- Se montó en los soportes cilíndricos metálicos y se aplicó carga sin impacto y a una velocidad constante (ASTM C 293, 2002), (NMX-C-303-ONNCE, 2010) *ilustraciones 38 y 39*.
- Se registró la carga de falla y la ubicación de la misma, ya que la ecuación para el Módulo de Ruptura es diferente si la falla se da en el tercio medio marcado o fuera de él.

Los cálculos se realizaron con el empleo de la siguiente ecuación [27]:

$$MR = \frac{3WL}{2BD^2} \quad [27]$$

Dónde:

MR=Módulo de ruptura, kg/cm²

W=Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, kg

L= Longitud entre apoyos de la muestra, cm

B= Ancho promedio de la muestra, cm

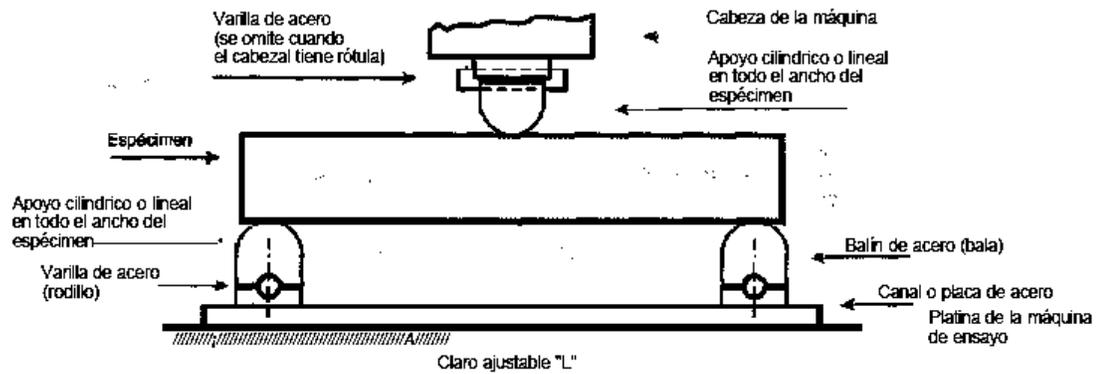
D= Espesor promedio de la muestra, cm

Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en no más que 5% de la longitud del tramo, el Módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera [28]:

$$R = \frac{3Wa}{BD^2} \quad [28]$$

Dónde:

a = Distancia media entre la línea de fractura y el soporte más cercano medida en la superficie de tensión de la viga, cm.



La presente figura es ilustrativa

Ilustración 38 Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.

Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en más de un 5% de la longitud del tramo, se deberán desechar los resultados de la prueba.

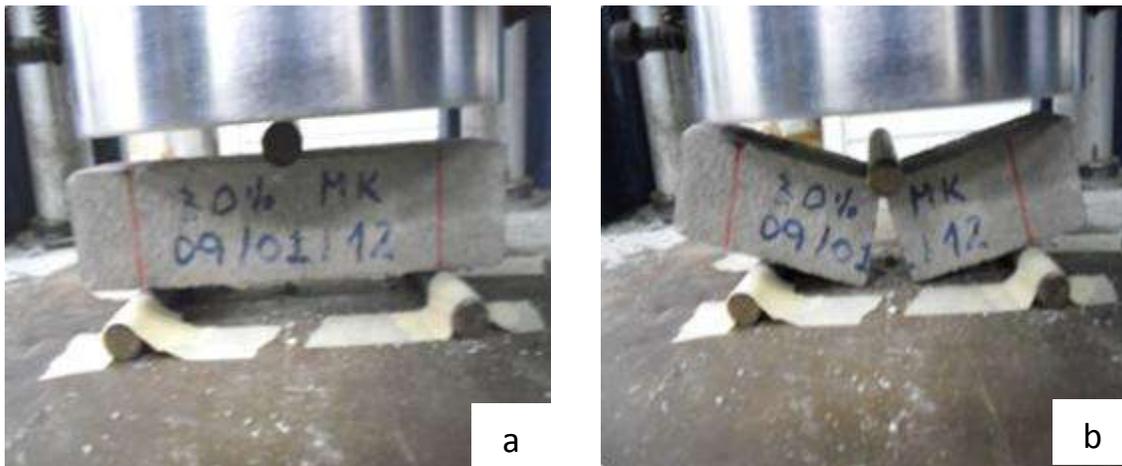


Ilustración 39 Ejemplo de la prueba de flexión estática en los prismas. a) Aplicación de la carga, b) Falla al centro del prisma.

7.9.1.4 Prueba de Adherencia

El estudio de una propiedad intangible como es la adherencia, requiere de una prueba física que pueda cuantificar un parámetro de resistencia de la unión e identificar un tipo de falla.

Una vez que se llegó a la edad de prueba, se comenzó por hacer una perforación en la superficie de la losa de concreto de 7cm de espesor recubierta por el mortero en estudio lo cual se observa en la ilustración 40. La perforación se hizo con un esmeril angular portátil marca Black & Decker con una potencia de 750w y 11000rpm adicionada de una broca circular con punta de diamante de 50mm de espesor, la perforación se hizo a un cm por debajo del sustrato de concreto.



Ilustración 40 Perforación de las losas para la prueba de adherencia.

Una vez realizadas las perforaciones se adhirieron discos de acero inoxidable de 1.5cm de diámetro, los discos se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel, ilustración 41.



Ilustración 41 Elaboración de la mezcla del epóxico.



Ilustración 42 Pegado de los discos de acero en el recubrimiento de mortero.



Ilustración 43 Relación de dimensiones de las perforaciones y discos utilizados.

Una vez que el epóxico estuvo seco se procedió a realizar la prueba de adherencia, ilustración 44, la cual consistió en insertar el perno con cabeza cilíndrica en el disco de metal adherido a la superficie de la muestra, después se colocó el instrumento de medición Pull Off (ilustración 45), se aplicó carga lenta y constante en el rango que indica la norma, hasta que se obtuvo la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004).



Ilustración 44 Disco y perno de acero para realizar la prueba de adherencia



Ilustración 45 Equipo para prueba Pull Off marca CONTROLS.

En la ilustración 46 se observa el tipo de falla que puede presentarse al momento de realizar la prueba con el equipo Pull Off.

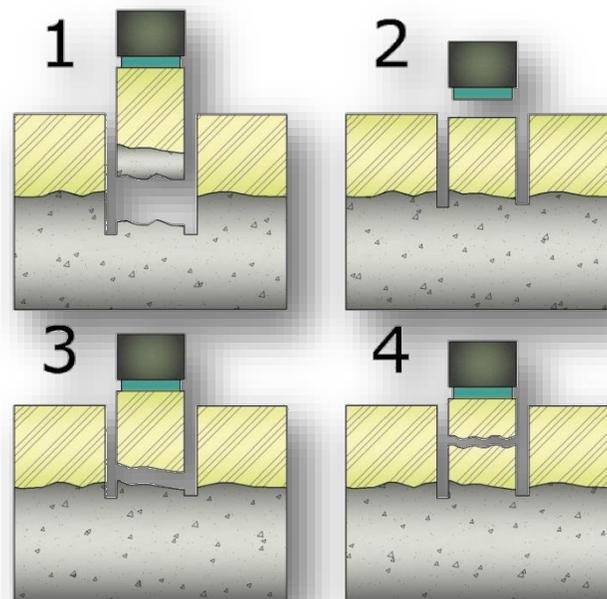


Ilustración 46 Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.

1. En el sustrato.
2. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero.
3. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
4. En el material de reparación o revestimiento.

Cuando la falla se presenta entre el disco de acero y el epóxico (tipo 2) la prueba se debe realizar nuevamente, ilustración 47 (ASTM C 1583, 2004).



Ilustración 47 Falla entre epóxico y el disco metálico.

Según el resultado obtenido, se le llama fuerza de adherencia cuando se produce el fallo en la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento, ilustración 48, y resistencia a la tensión cuando el fallo se produce en el sustrato o el material de reparación o revestimiento, ilustración 49.



Ilustración 48 Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material MK.



Ilustración 49 Falla en el revestimiento. Tipo 4.

La fuerza de adherencia o resistencia a la tensión la calcula automáticamente el Equipo Pull Off mediante la división de la carga de tensión de falla y el área del espécimen de prueba.



Ilustración 50 Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off.

7.9.1.5 Resistencia a la Polarización Lineal (Rpl)

Para ambas técnicas, tanto Rpl y EIS, se utilizó la misma probeta y el mismo arreglo de la celda electroquímica. Las partes que conforman el sistema electroquímico son:



- Electrodo de Referencia, calomel de media celda
- Electrodo de Trabajo, varilla de acero de 7/23" de diámetro
- Contraelectrodo, placa de acero inoxidable AISI 316
- Solución salina, al 3.5% de NaCl en peso

Preparación de la solución salina

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

Las probetas se mantuvieron sin curado hasta después de los 11 meses de la elaboración (excepto testigos y sustituciones de 15 y 20% de EAH), después se realizó la inmersión en una solución de NaCl al 3.5% con agua destilada, ilustración 51, porcentaje que se sugiere como equivalente a la concentración de sales en el agua de mar (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010; Corral H., Arredondo R., Almaral S., & Gómez S., 2013).



Ilustración 51 Recipiente conteniendo probetas en inmersión con agua de mar artificial.



Ilustración 52 Elementos de la celda electroquímica. La placa funciona como contra-electrodo, el electrodo central es de referencia y la varilla en la probeta es el electrodo de trabajo.

Equipo de pruebas

El equipo utilizado es un potenciostato marca Gamry modelo 600, se procedió conforme a las normas ASTM G3, G5 y G59. Las pruebas se realizaron con las probetas y los electrodos inmersos en la solución de NaCl. El área de acero en contacto fue de 13.67 cm², y el intervalo de la prueba se realizó de -0.02V a +0.02V, con una velocidad de barrido de 0.125 mV/s.



Ilustración 53 Equipo de Gamry para la realización de las pruebas electroquímicas. Derecha: Conexión de los electrodos. Por el autor.



El electrodo de Referencia es de la marca Cole Parmer. Es un electrodo de referencia de media celda tipo Calomel recomendado por la norma ASTM G5 (ASTM-G5, 2004), ilustración 54.



Ilustración 54 Electrodo de referencia de media celda tipo calomel. Por el autor.

Como contra electrodo se utilizó una placa de acero inoxidable con especificación de la norma AISI 316L/2B, ilustración 55.



Ilustración 55 Placa de acero inoxidable AISI 316L/2B. Por C. Bernabé.

Así la configuración del sistema es como se muestra en la ilustración 56.

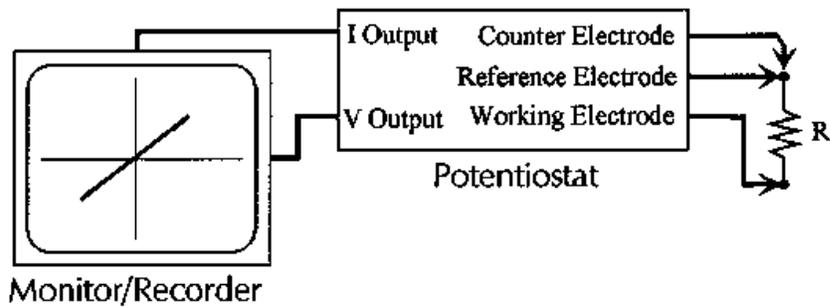


Ilustración 56 Configuración del sistema electroquímico. (ASTM-G59, 2003)

Método de cálculo

Antes de comenzar con la prueba de resistencia a la polarización, se debe de comprobar que las perturbaciones eléctricas inducidas al sistema no causen un cambio mayor a ± 20 mV en el potencial de corrosión o intensidad de corriente (CYTED-DURAR, 1998).

El comienzo del cálculo se basa en la gráfica de corriente vs voltaje que se forma al activar el sistema, de donde resulta el valor de la resistencia total a la polarización, la cual posteriormente será dividida entre el área atacada, para obtener la resistencia a la polarización en $\Omega\text{-cm}^2$ (R_p), ilustración 57. Recordando siempre que pendientes con valores grandes corresponden a resistencias a la polarización (R_p) más altas y en general mejores condiciones protectoras del metal (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

La conversión de los valores de corriente para obtener la velocidad de corrosión, se debe a la ley de Faraday (ASTM-G102, 1999).

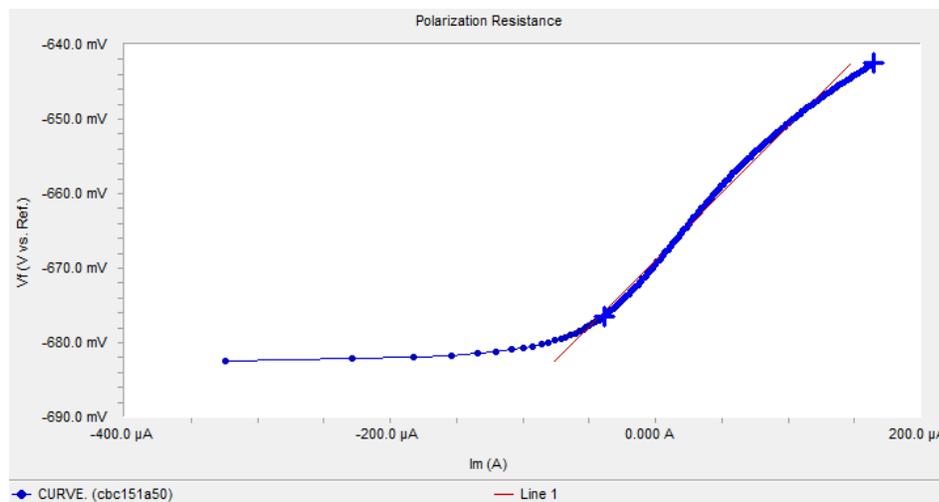


Ilustración 57 Gráfico de la Resistencia a la polarización obtenido con el equipo y software Gamry Instruments.

Una vez obtenido el valor de R_{pl} , se procede a calcular la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) mediante la ecuación de Stern y Geary [29] y [30](1957) (ASTM-G59, 2003):

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p} \quad [29]$$

$$B = \frac{b_a b_c}{[2.303(b_a + b_c)]} \quad [30]$$

Donde i_{corr} es la densidad de corriente en $\mu A/cm^2$; B es el factor de Stern-Geary que depende de las pendientes de Tafel: anódica (b_a) y catódica (b_c), en V; R_p es la resistencia a la polarización en $ohm \cdot cm^2$.

De la ecuación [30], b_a y b_c , son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente (ASTM-G5, 2004).

Se recurrió a utilizar un valor de B de 0.026 V, el cual indica un fenómeno de corrosión libre. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década, y para obtener



los 0.026 V del valor de B, se considera solo el segundo valor (Rodríguez Gómez F. , 2000; Tres G. & E. Saborio, 2004).

Si se cuenta con el valor total de la corriente, la densidad de corriente se calcula con (ASTM-G102, 1999):

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad [31]$$

Donde I_{corr} es la corriente total en μA ; A es el área expuesta en cm^2 .

Las siguientes ecuaciones representan el cálculo de la velocidad de corrosión en términos de velocidad de penetración [32] y [33].

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad [32]$$

$$MR = K_2 i_{corr} EW \quad [33]$$

Donde CR es la velocidad de corrosión, las unidades dependerán del valor de K1; MR es la velocidad de corrosión medida en pérdida de masa, las unidades dependerán del valor de K2; EW es el peso equivalente, se considera adimensional; ρ es la densidad del material. El factor y las unidades de los elementos de la fórmula se obtienen de la tabla 16 que proporciona la norma ASTM G102.



Tabla 16 Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión de Faraday.

A				
Penetration Rate Unit (CR)	i_{cor} Unit	ρ Unit	K_1	Units of K_1^A
mpy	$\mu A/cm^2$	g/cm^3	0.1288	mpy $g/\mu A$ cm
mm/yr ^B	A/m^{2B}	kg/m^{3B}	327.2	mm kg/A m y
mm/yr ^B	$\mu A/cm^2$	g/cm^3	3.27×10^{-3}	mm $g/\mu A$ cm y
B				
Mass Loss Rate Unit	i_{cor} Unit	K_2	Units of K_2^A	
g/m^2d^B	A/m^{2B}	0.8953	g/Ad	
mg/dm ² d (mdd)	$\mu A/cm^2$	0.0895	mg $cm^2/\mu A$ dm ² d	
mg/dm ² d (mdd)	A/m^{2B}	8.953×10^{-3}	mg m^2/A dm ² d	

^AEW is assumed to be dimensionless.

^BSI unit.

El manual de la Red Durar establece un factor de cálculo para velocidad de corrosión a partir de la densidad de corriente de corrosión, el cual se muestra en la ecuación [34] (CYTED-DURAR, 1998).

$$CR = \frac{M}{n \cdot F \cdot \rho} i_{corr} = 11.6 * i_{corr} \quad [34]$$

Donde CR es la velocidad de corrosión en $\mu m/año$; M es la masa atómica del metal en gramos; F es la constante de Faraday (96500 coulombios); ρ es la densidad en g/cm^3 . El valor de i_{corr} está dado en $\mu A/cm^2$.

7.9.1.6 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

El desarrollo de esta técnica se basó en la misma configuración de elementos del sistema electroquímico que la utilizada para la Rpl, por tanto describiremos solo la parte del cálculo.

Una vez comprobada la estabilidad del potencial ($\pm 20mV$) se desarrolló la prueba dentro del rango de frecuencia de 79.65 mHz a 2×10^5 Hz. Obteniendo así los



diagramas de Nyquist y Bode, con las variables Z' (ohm), Z'' (ohm), frecuencia (Hz) y ángulo de fase ($^{\circ}$).

Para el análisis se hizo un ajuste con un circuito eléctrico equivalente, siendo el modelo de Randles el que menos error arrojó, considerando un elemento de fase constante (CPE) en vez de un capacitor, tal como se muestra en la ilustración 58.

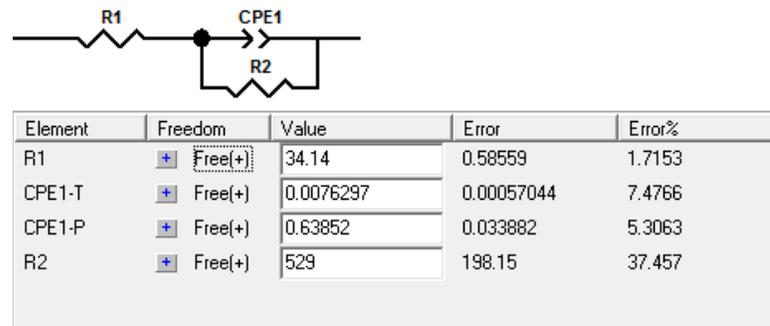


Ilustración 58 Resultados de ajuste utilizando el modelo de Randles. Utilizando el software Gamry, Izquierda; utilizando Zview2, lado derecho.

Para el análisis de los resultados se utilizó el software *Gamry Echem Analyst*, corroborando los resultados obtenidos con un software auxiliar, *Zview*.

7.9.2 No destructivas

Las pruebas no destructivas se realizan a los especímenes para conocer sus propiedades sin tener que someterlas a cargas y causar su fractura. La ventaja de algunas de estas pruebas es que se pueden realizar *“in situ”*, sin necesidad de tener que elaborar una probeta para su traslado al sitio de prueba.

Una definición general de prueba no destructiva es una revisión, prueba, o evaluación realizada en algún tipo de objeto sin cambiar o alterar dicho objeto en alguna forma, para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener un efecto en la utilidad del objeto. Las pruebas no destructivas también pueden realizarse para medir otras características de



prueba del objeto como tamaño, dimensión, configuración, estructura, incluyendo contenido de aleación, dureza, tamaño de grano, etc. (Charles, 2001)

En el año de 1941 se funda la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNDT por sus siglas en inglés), la cual es la sociedad técnica más grande en el mundo de pruebas no destructivas. Esta sociedad es promotora del intercambio de información técnica sobre las técnicas no destructivas, así como de materiales educativos y programas. Es también creadora de estándares y servicios para la Calificación y Certificación de personal que realiza ensayos no destructivos, bajo el esquema estadounidense (Charles, 2001).

7.9.2.1 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

Para poder comenzar con las pruebas se obtuvieron las masas y dimensiones de los especímenes, tal como se muestra en las *ilustraciones 59 y 60*.

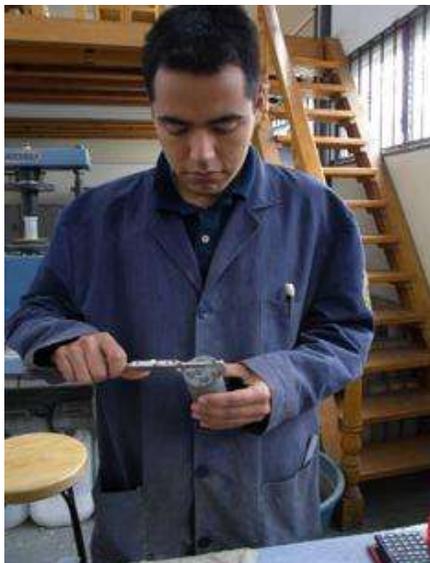


Ilustración 59 Medición de las dimensiones utilizando vernier.



Ilustración 60 Medición de la masa utilizando instrumentos electrónicos.



La prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se rige por la normativa ASTM (ASTM-C-597, 2009).

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, ilustración 61-a; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie de prueba y para tal fin se emplea un gel, ilustración 61-b.

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas.



Ilustración 61 a) Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico, b) espécimen prismático colocado sobre los transductores al ser realizada la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (ASTM-C-597, 2009).

7.9.2.2 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cúbicos y prismáticos, los especímenes se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012), marca Nilsson, ilustración 62.



Ilustración 62 Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.



El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:

Cubos: lado 1, lado 2 y espesor.

Prismas: base (lado1), espesor (lado2) y longitud.

2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas figura 5-8.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios.

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente fórmula [35] (ASTM-G57, 2012; CYTED-DURAR, 1998):

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad [35]$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en $K\Omega\text{-cm}$ (ohm-m)

R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en Ω o $K\Omega$

A = Área transversal del espécimen en cm^2

L = Longitud del espécimen en cm



Ilustración 63 Izquierda- Espécimen prismático colocado entre las dos placas de cobre para tomar la resistencia eléctrica. Derecha- Medición de la resistencia eléctrica en las probetas con barras de acero. Por C. Bernabé.

Para los prismas con las barras de acero inmersas, la resistividad se calculó utilizando como área (A) la sección rectangular formada por la vista en dos planos de la barra, es decir, el diámetro de la barra por la longitud embebida en el mortero. Y la longitud (L), como la distancia entre las barras de acero, tomada entre paños internos.



8 RESULTADOS

8.1 Caracterización del Material inerte: arena

La tabla 17 muestra los resultados obtenidos de la caracterización de las arenas en las diferentes pruebas de laboratorio; la distribución granulométrica se puede observar en la ilustración 64, junto con los perfiles granulométricos recomendados por la norma ASTM C778.

Tabla 17 Resultados obtenidos de las pruebas de caracterización realizadas al material inerte.

Prueba	Arena de Huajúbaro	Arena del Río Lerma
Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)	0.75 %	0.78%
Humedad de Absorción (NMX-C-165-ONNCCE, 2004)	3.18 %	1.89 %
M.V.S.S. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.226 (gr/cm ³)	1.383 (gr/cm ³)
M.V.S.V (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.331 (gr/cm ³)	1.462 (gr/cm ³)
Sedimentos	Aceptable (<30ml)	Aceptable (<30ml)
Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)	Escala 3 (aceptable)	Escala 3 (aceptable)
Contenido de material fino (pasa malla ASTM No 200) (NMX-C-084-ONNCCE, 2006)	1.98 %	-----
Contenido de Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)	2.43 %	7.5%
Densidad (g/cm ³)	2.31	2.4
Módulo de Finura (<2.3-	2.42 (mediana)	2.03 (fina)



3.1>)		
Gravedad Específica	2.36	2.48

La utilización del árido no solo influye en la resistencia mecánica, la densidad, la porosidad, etc., si no que permite la dosificación reológica de la argamasa o incluso, la modificación de su mecanismo de fraguado posibilitando usos totalmente diferentes (Barbero Encinas & Sepulcre Aguilar , 1998).

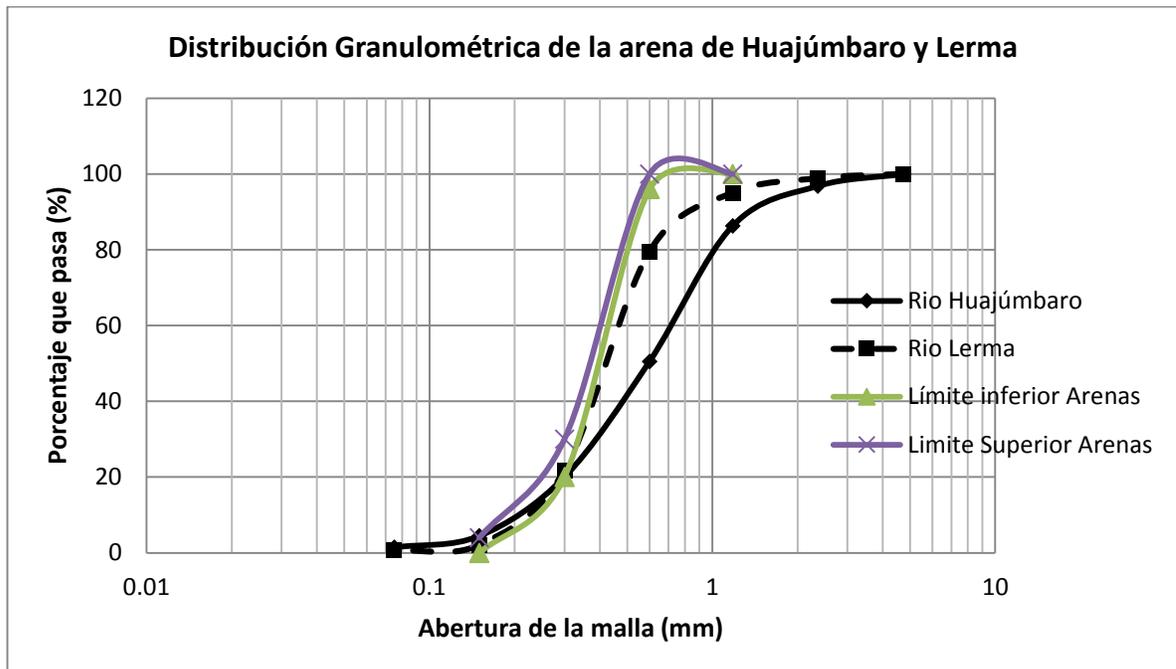


Ilustración 64 Distribución Granulométrica de las arenas empleadas en la experimentación: Huajúmbaro y Lerma; límites de arenas para morteros ASTM C778-02.

8.2 Caracterización del agua de mezclado

Los resultados del agua empleada en las mezclas se presentan en la tabla 18.



Tabla 18 Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero

Muestra: Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Sitio de muestreo: Laboratorio de Materiales
Fecha de muestreo: 18 de mayo de 2014
Norma de referencia: NMX-C-122-ONNCCE-2004

Parámetro	Resultado	Límite Permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	3.37	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálcida	21	-----	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

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

8.3 Resultados de fluorescencia de Rayos X

En la tabla 19 se muestra el análisis químico cualitativo y cuantitativo de los materiales en estudio, como podemos observar la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en



el MK y EAH supera el 70% establecido por la norma ASTM C618 (ASTM-C618, 2003).

Ninguna de las puzolanas muestran un carácter ácido ($\text{SiO}_2 > 65\%$); la CBC presenta un carácter intermedio ($55\% < \text{SiO}_2 < 65\%$); MK y EAH no presentan carácter ácido ($\text{SiO}_2 < 55\%$) (Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004).

Tabla 19 Composición química en porcentaje, en masa, de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por Fluorescencia de rayos X, ASTM E 2465 (ASTM-E-2465).

Muestra	CBC	MK	EAH	CPC 30R RS
SiO ₂	56.62	51.09	48.12	23.88
Al ₂ O ₃	4.293	45.27	31.29	4.997
TiO ₂	0.422	1.749	1.994	0.217
Fe ₂ O ₃	5.488	0.487	5.239	2.972
MgO	1.573	0	0.868	0.88
MnO	0.227	0	0	0.096
CaO	2.013	0.032	6.268	54.6
Na ₂ O	0.24	0.219	0.258	1.23
K ₂ O	2.178	0.172	1.11	1.666
SO ₃	0.244	0.036	0.847	3.791
ZrO ₂	0	0	0.081	0
Cl	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0	0.033	0	0
SrO	0.057	0	0.296	0.061
ZnO	0	0	0	0.076
PXC/PPI	26.65	0.913	3.63	5.54
BaO	0	0	0	0
P ₂ O ₅	0	0	0	0
Suma	100.005	100.001	100.001	100.006

Las fases cristalinas no poseen actividad puzolánica, sin embargo, aquéllas que se encuentran desordenadas, presentan algo de actividad puzolánica como el



caso de la cristobalita (SiO_2), sin embargo, su reactividad depende adicionalmente de la cantidad de iones en disolución que se encuentran en su red atómica, ya que estos iones generan una estabilidad estructural del material (Valdez Tamez, Das Roy, & Rivera Villareal, 2004).

8.4 Análisis de partícula de las cenizas de sustitución

8.4.1 Caracterización Estadística

La tabla 20 muestra los tamaños de partículas de los materiales utilizados como sustitutos de CPC en la elaboración de morteros. En referencia a los resultados del CPC 30 R-RS, se observa que el material con tamaño de partícula menor es el MK. LA EAH presenta valores que asemejan al CPC, mientras que la CBC presenta un promedio de tamaño de partícula de tres veces el promedio del tamaño del CPC. Los resultados del coeficiente de uniformidad (Cu) obtenidos de las distribuciones granulométricas, indican una buena uniformidad para el CPC, CBC y la EAH, pues el valor es menor de 4 (presenta partículas en el mismo rango de tamaños), esto haciendo analogía con el análisis de suelos (M. Das, 2001).

Tabla 20 Caracterización estadística y numérica del tamaño de partícula de la CBC, EAH, MK y CPC 30R-RS.

Medida Estadística del tamaño de partícula	CBC	EAH	MK	CPC-30R RS
Mediana (μm)	43.774	11.544	5.777	10.857
Promedio (μm)	48.274	22.731	5.653	17.313
Varianza (μm^2)	939.000	1023.300	12.158	202.440
Desviación Estándar (μm)	30.643	31.989	3.487	14.228
Moda (μm)	55.049	10.744	6.302	8.270
D10 (diámetro efectivo) (μm)	14.950	7.559	0.157	6.029
D30 (μm)	27.572	9.692	4.426	8.229
D50 (μm)	43.774	11.544	5.777	10.857
D60 (μm)	51.301	12.870	6.433	13.108
D90 (μm)	86.041	53.441	9.479	38.747
Cu	3.432	1.703	40.878	2.174
Cc	0.991	0.966	19.347	0.857

8.4.2 Morfología de partículas

En las ilustraciones 65, 66 y 67 se muestran las partículas de CBC, EAH Y MK respectivamente, analizadas en el microscopio electrónico de barrido (MEB) a 500 magnificaciones (500x). La CBC presenta una morfología de partícula alargada y porosa, características propias de las fibras de la caña de azúcar de la cual se obtiene, con un promedio de tamaño de partícula de $48.27\mu\text{m}$. La EAH presenta formas de partículas angulosas y lajeadas debido al proceso de molienda previo al tamizado, con tamaño promedio de partícula de $22.73\mu\text{m}$. Una forma lajeada supone una mayor área de humectación, y por lo tanto una mayor reacción.

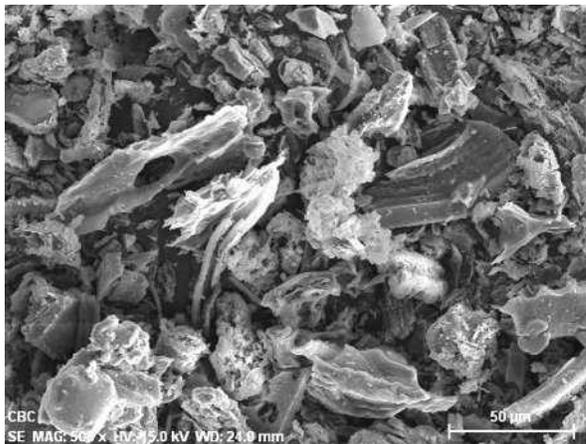


Ilustración 65 Morfología de la CBC analizada en el MEB a 500x

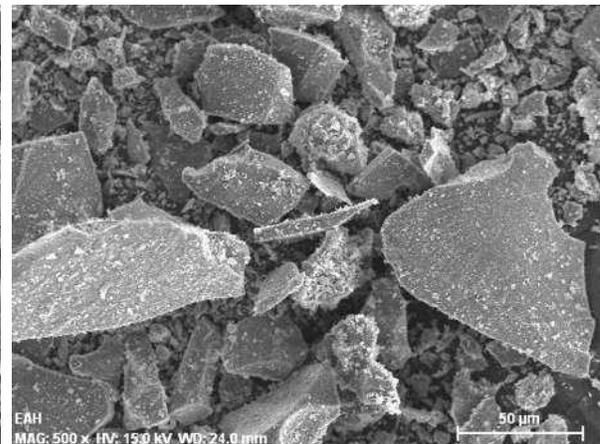


Ilustración 66 Morfología de la EAH analizada en el MEB a 500x.

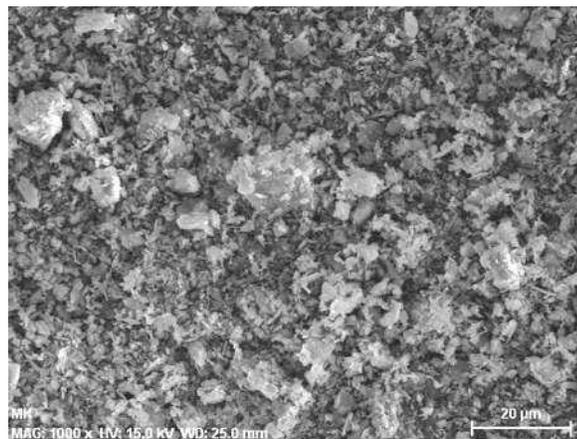


Ilustración 67 Morfología del MK analizado en el MEB a 1000x.



El MK presenta tamaños de partícula promedio de $5.65\mu\text{m}$, es decir, una tercera parte del tamaño de partícula del CPC. Esto le atribuye mayores velocidades de reacción, y en contra parte, una mayor demanda de agua por el incremento de área superficial (Sepulcre Aguilar A. , 2005).

Cabe mencionar que la normativa ASTM no especifica la estructura y morfología que deban tener las partículas de los materiales puzolánicos.

8.4.3 Curvas de distribución granulométrica

En el estudio realizado por Wang et al. (Wang, Trettin, & Rudert, 2005) han determinado la influencia fundamental que tiene la fracción de tamaño de $0-20\mu\text{m}$ sobre la reactividad de la escoria y el desarrollo de resistencia a edades tempranas. Por su parte, Mehta (1999) destaca el papel importante que cumplen las partículas de tamaño menor a $10\mu\text{m}$ en la contribución de la resistencia mecánica a las primeras edades, mientras que partículas cuyos tamaños se encuentran comprendidos entre los 10 a $45\mu\text{m}$ contribuye a edades tardías; y las partículas que superan este tamaño no se hidratan completamente, aún bajo tiempos prolongados de curado.

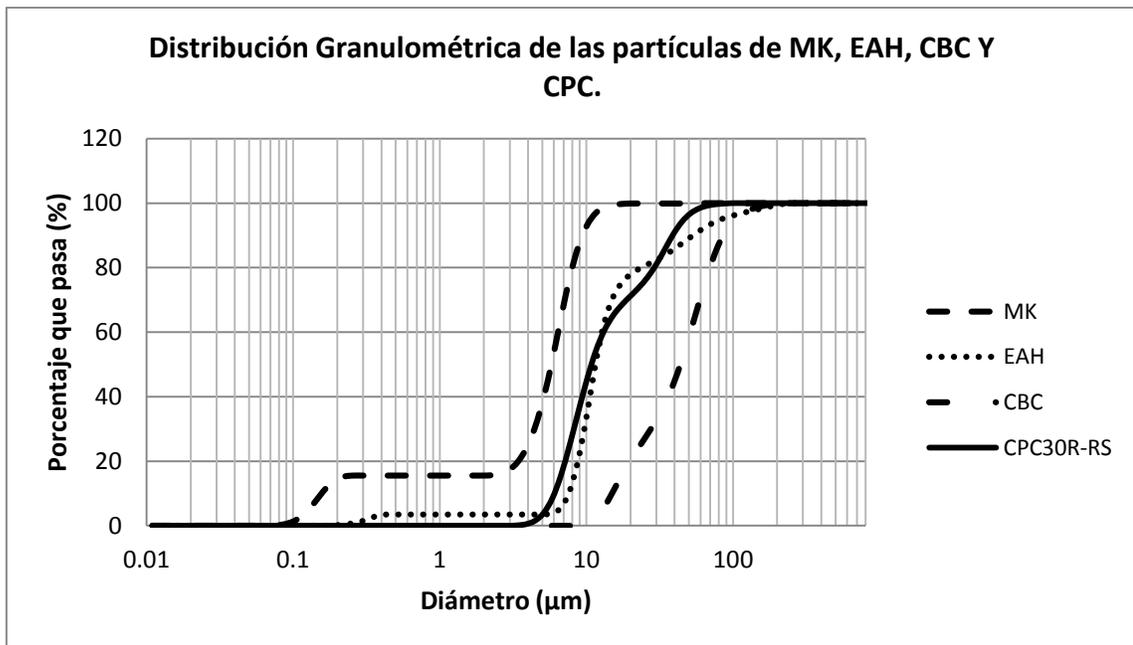


Ilustración 68 Distribución granulométrica de las partículas de MK, EAH, CBC Y CPC empleadas en la elaboración de los morteros.

8.4.4 Distribución Normal de los tamaños de partícula

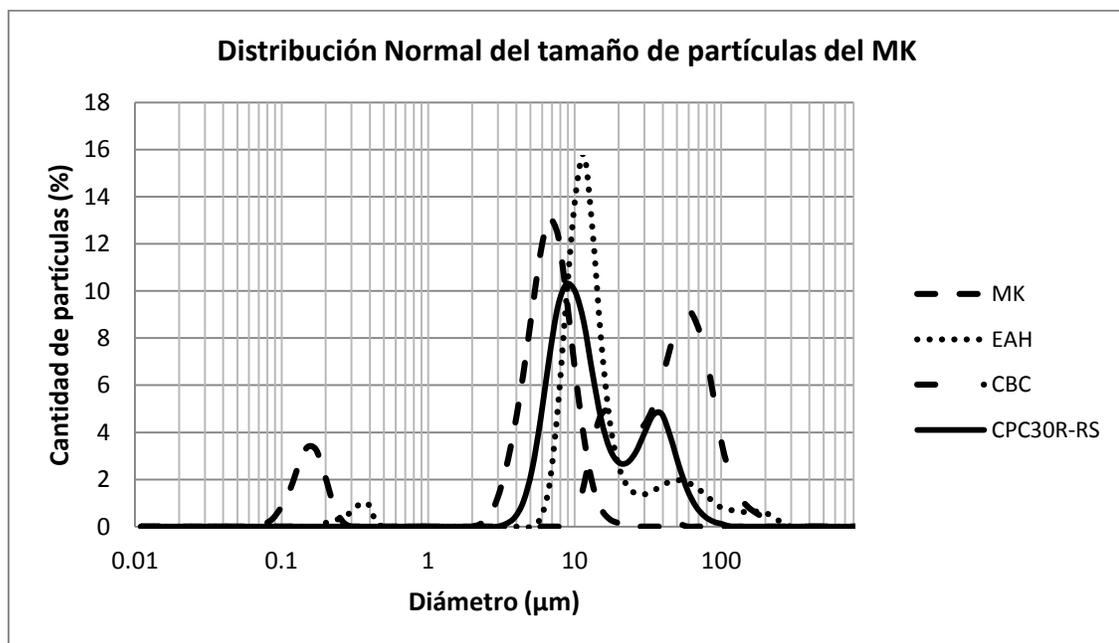


Ilustración 69 Curvas de distribución normal de las partículas de MK, EAH, CBC Y CPC empleadas en la elaboración de los morteros.



8.5 Tiempos de fraguado y Consistencia Normal

Las cantidades de agua para lograr la consistencia normal en los morteros elaborados con las diferentes sustituciones se presentan en la tabla 21.

Tabla 21 Resultados de tiempo de fraguado y consistencia normal de las pastas de cemento con sustituciones de CBC, MK, EAH y sin sustitución.

Materiales		Consistencia normal %	Tiempos de fraguado	
			Inicial (min)	Final (min)
T	0%	32	184	485
CBC	5%	38	427	732
	10%	44	424	813
	15%	50	393	750
	20%	60	412	868
	30%	74	547	1016
MK	5%	36	155	502
	10%	39	161	506
	15%	43	164	537
	20%	45	182	564
	30%	52	191	623
EAH	5%	29	262	472
	10%	29	245	462
	15%	29	245	460
	20%	29	255	443
	30%	30	262	447

La norma NMX-C-021 especifica las condiciones permisibles para los tiempos de fraguado, tabla 22.

Tabla 22 Especificaciones físicas que deben cumplir los morteros (NMX-C-021-ONNCE., 2004)

Determinación	Unidad	Condición	Especificación
Tiempo de fraguado inicial	min	Mínimo	90
Tiempo de fraguado final	min	Máximo	1080



8.6 Pruebas Físico-Mecánicas

8.6.1 Índice de Actividad Puzolánica

La evaluación del índice de actividad puzolánica se realizó conforme la norma ASTM C311. Como se observa en la tabla 23, los valores indican que las sustituciones de CBC y MK, con agregado del río Huajúbaro, presentan mayor actividad puzolánica a los 28 días, evaluado mediante la prueba a compresión en cubos. A excepción de los morteros sustituidos con EAH, la actividad puzolánica se incrementa en un 32% y 43% para la CBC y el MK respectivamente, esto con referencia al mortero control.

Tabla 23 Índice de actividad puzolánica para las diferentes cenizas en sustitución, utilizando el esfuerzo a compresión en cubos como parámetro (ASTM-C-311, 2002)

Testigo (28 días)	0	9.792
Material de sustitución Esfuerzo (MPa)	CBC	12.953
	EAH	7.926
	MK	14.004
Índice de actividad puzolánica (%)	CBC	132.28%
	EAH	80.94%
	MK	143.01%

Para los tres materiales de sustitución el porcentaje de índice de actividad puzolánica se encuentra por encima de 75%, límite inferior establecido en la norma ASTM C618. Por lo tanto los materiales en estudio son adecuados para realizar sustituciones de cemento en los morteros.

Para morteros de albañilería sin adiciones la norma mexicana establece que la resistencia a compresión de los morteros a 7 días debe ser de 4.4 MPa, y de 7.8 MPa a 28 días, como mínimo en ambos casos (NMX-C-O21-ONNCE., 2004).



8.6.2 Resistencia a compresión en cubos

En las gráficas 70 a 72 se muestran los resultados de la prueba a compresión en los cubos de mortero de cemento con las sustituciones de CBC, EAH y MK. El comportamiento es favorable para las sustituciones de CBC en los porcentajes de 5 y 20%, logrando resistencias de 14 MPa. La EAH no superó las resistencias de los testigos, siendo el porcentaje de sustitución de 15% quien marca una leve tendencia a mejorar. Los mejores resultados hasta los 180 días los presentan las sustituciones de MK, ya que todos los porcentajes de sustitución superan a los testigos, siendo la sustitución de 20% la de mejor comportamiento con resistencias de 20 MPa.

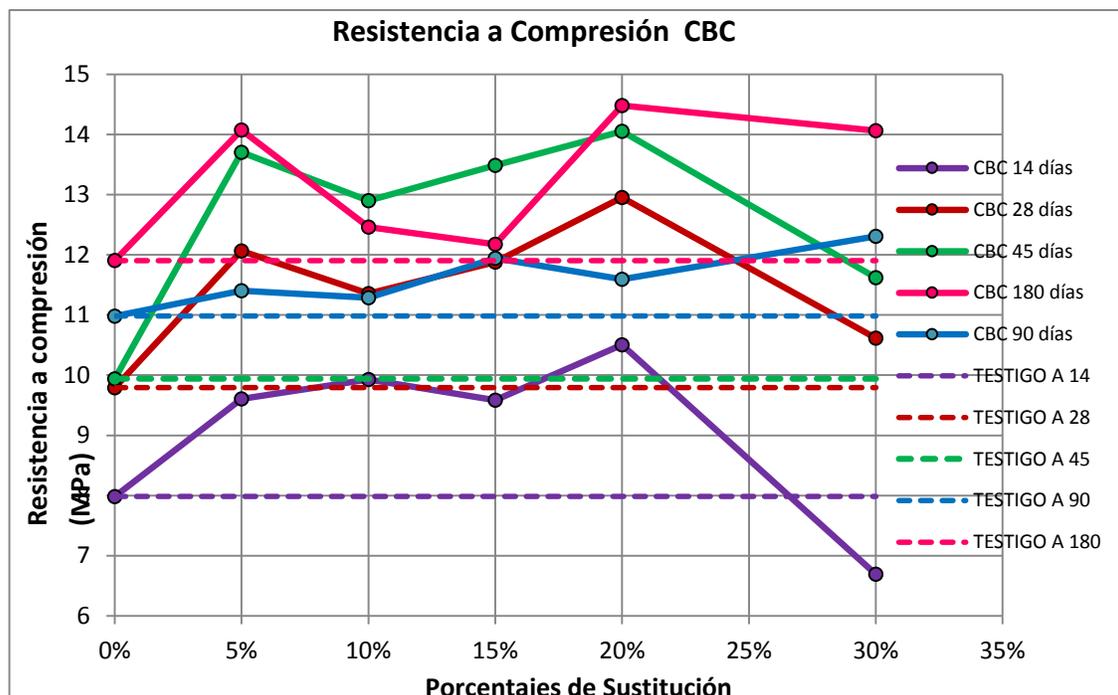


Ilustración 70 Gráfica de Resistencia a la compresión en cubos de mortero de cemento sustituido parcialmente con CBC a edades de 14,28, 45, 90 y 180 días.

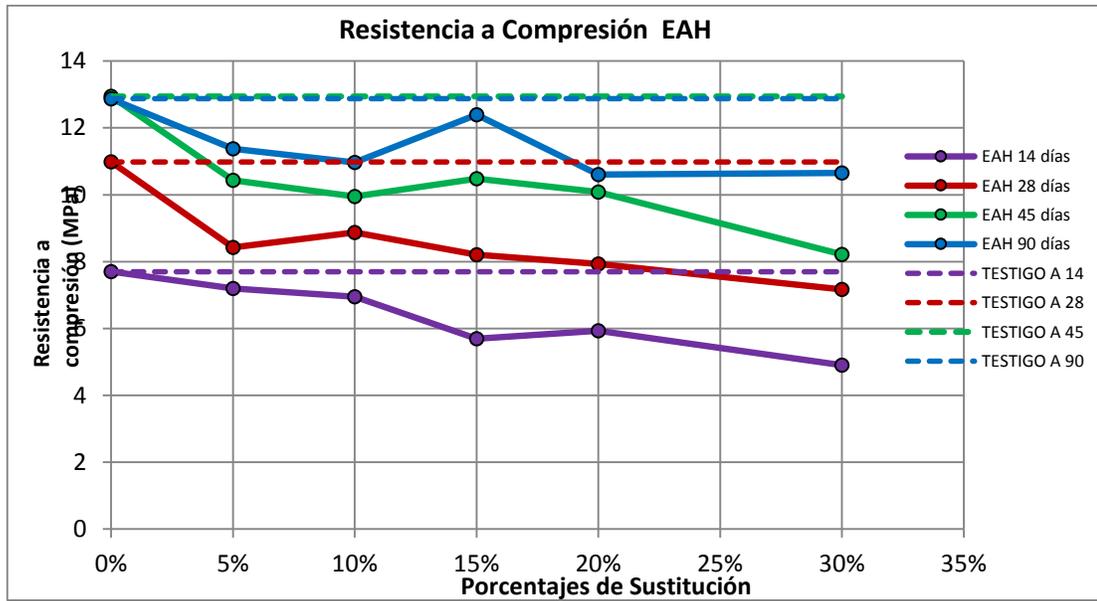


Ilustración 71 Gráfica de Resistencia a la compresión en cubos de mortero de cemento sustituido parcialmente con EAH a edades de 14,28, 45 y 90 días.

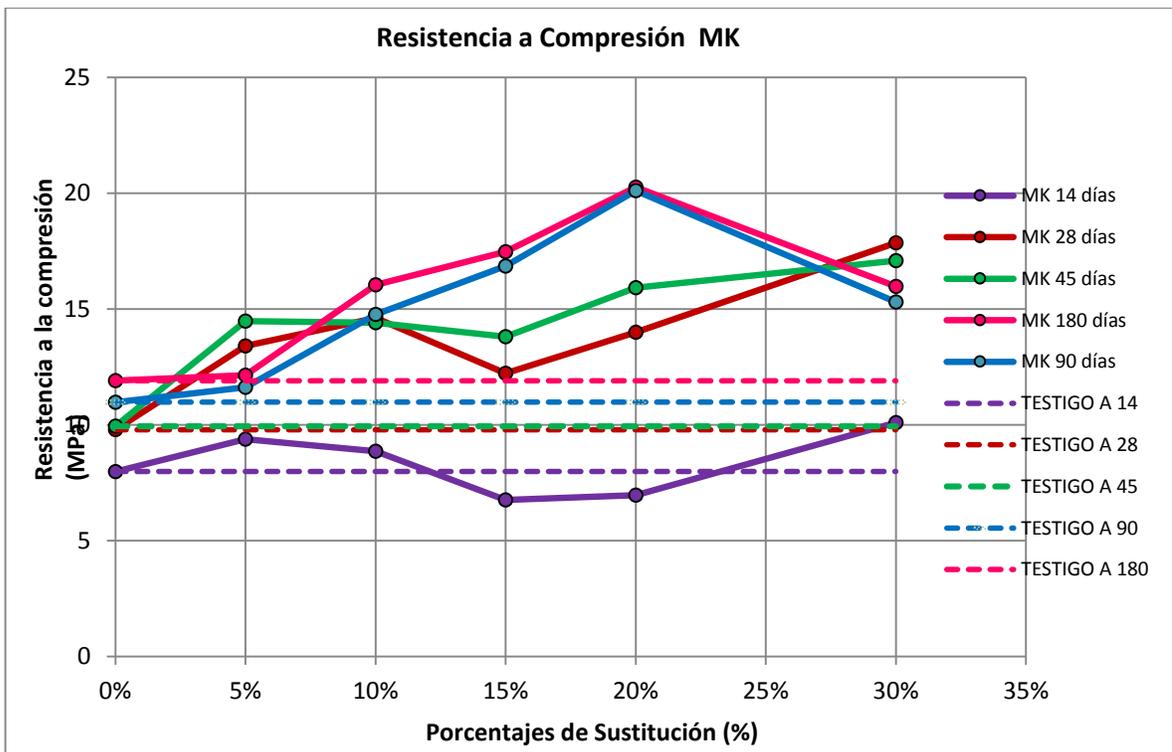


Ilustración 72 Gráfica de Resistencia a la compresión en cubos de mortero de cemento sustituido parcialmente con MK a edades de 14,28, 45, 90 y 180 días.



8.6.3 Adherencia

Como se puede observar en la ilustración 73, los mejores resultados de la prueba de adherencia se obtuvieron para los porcentajes de sustitución de CBC, específicamente para 15 y 20%. En la ilustración 74 se observa que para las sustituciones de EAH los resultados favorables se presentan con los porcentajes de 10 y 20%. Hasta la edad de 90 días el porcentaje de 15% de EAH, no presenta incrementos en la resistencia, manteniéndose en igualdad con el testigo. En la ilustración 75 se muestran los resultados de adherencia para las sustituciones de MK, notando que a los 180 días, sólo los porcentajes de 5 y 10% superan al mortero testigo.

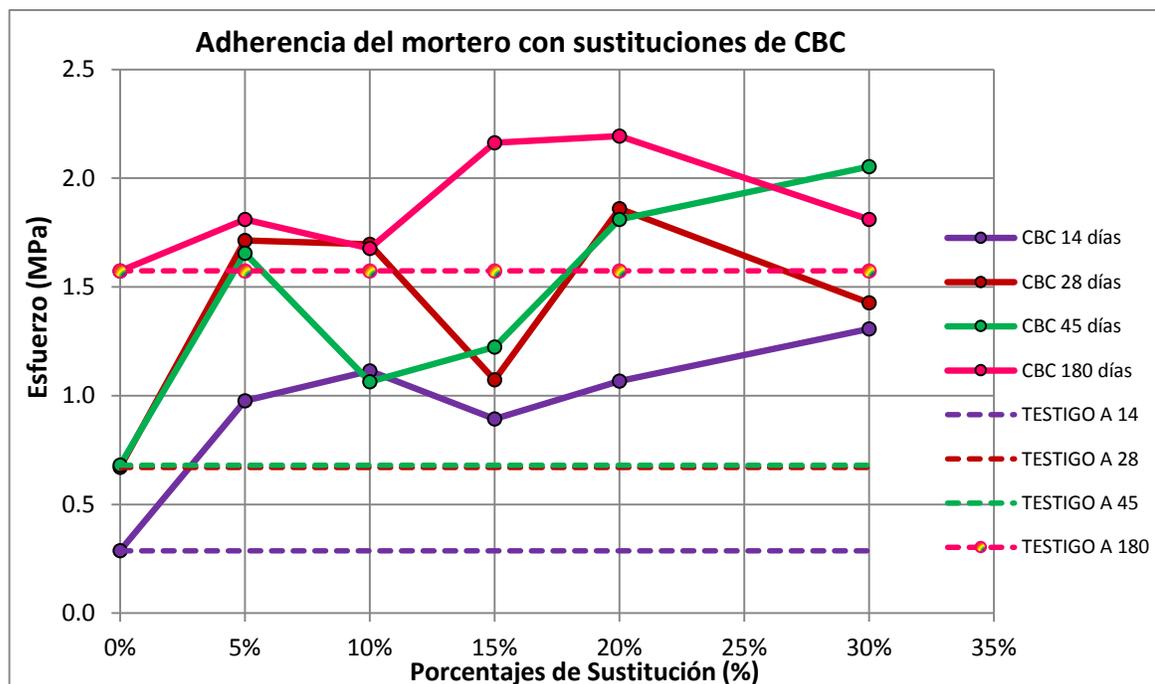


Ilustración 73 Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con CBC a edades de 14, 28, 45 y 180 días.

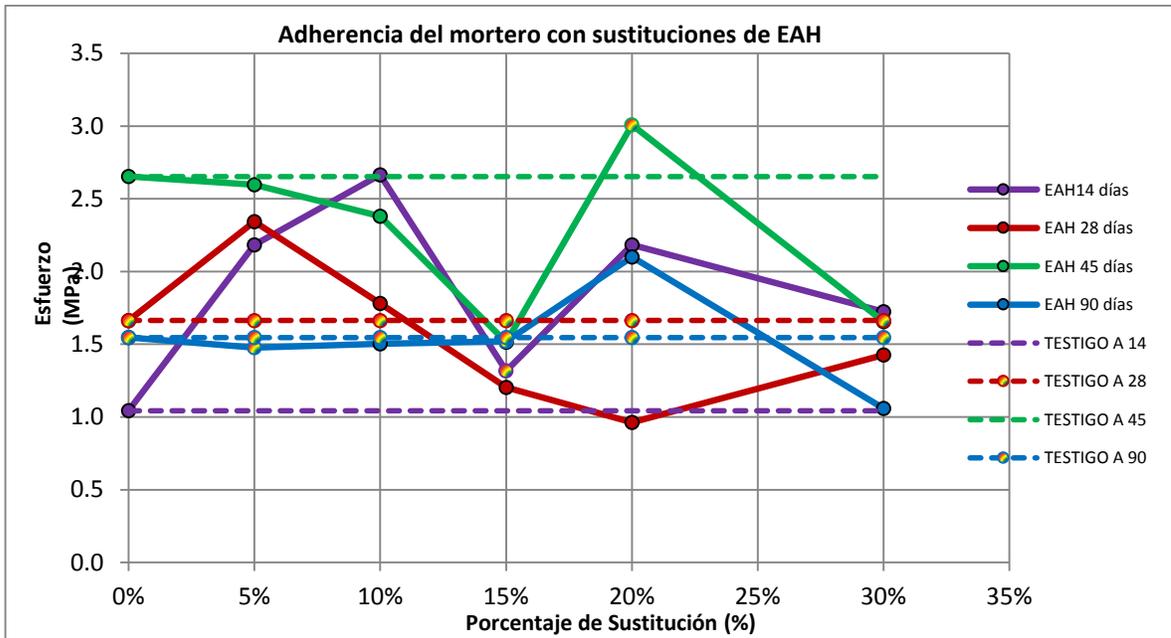


Ilustración 74 Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.

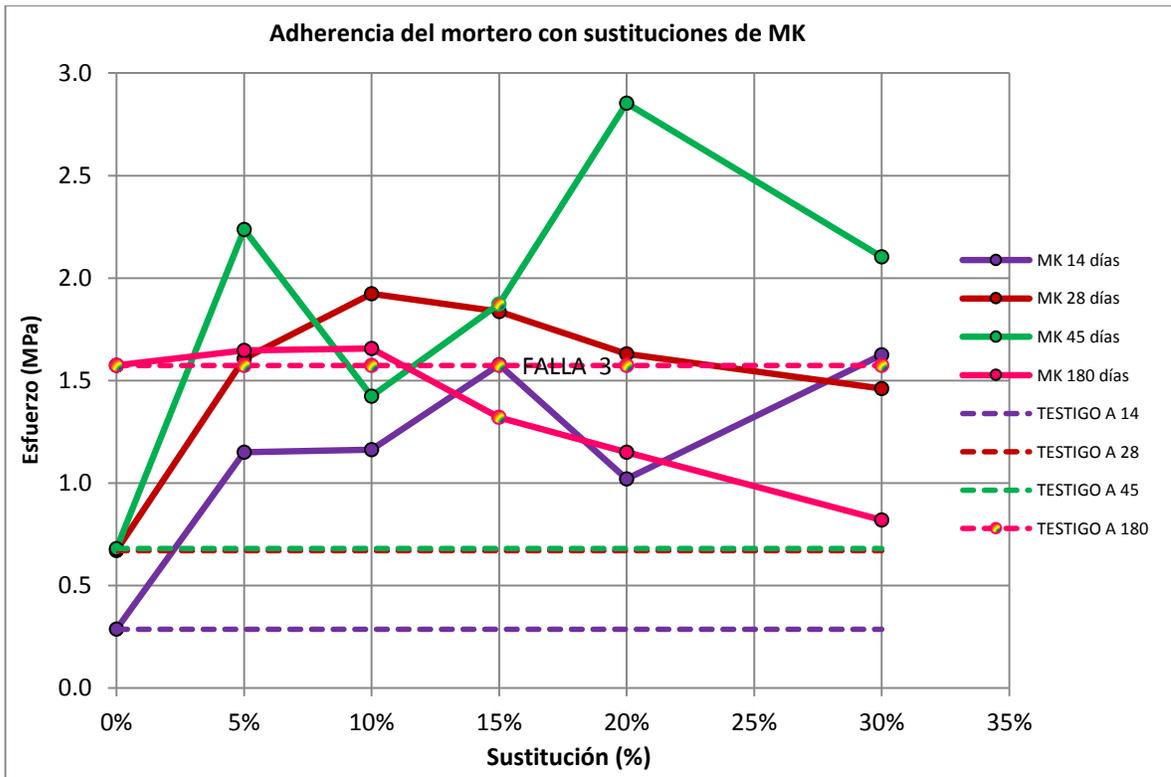


Ilustración 75 Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con MK a edades de 14, 28, 45 y 180 días.



8.6.4 Resistencia a Tensión directa en Briquetas

Los valores más prometedores que resultaron de esta prueba, son para los porcentajes de 15 y 20% de MK, ilustración 78, seguido de 15 y 20% de EAH, ilustración 77; 5 y 10% de sustitución de CBC son los porcentajes de mejor comportamiento a tensión directa, ilustración 76.

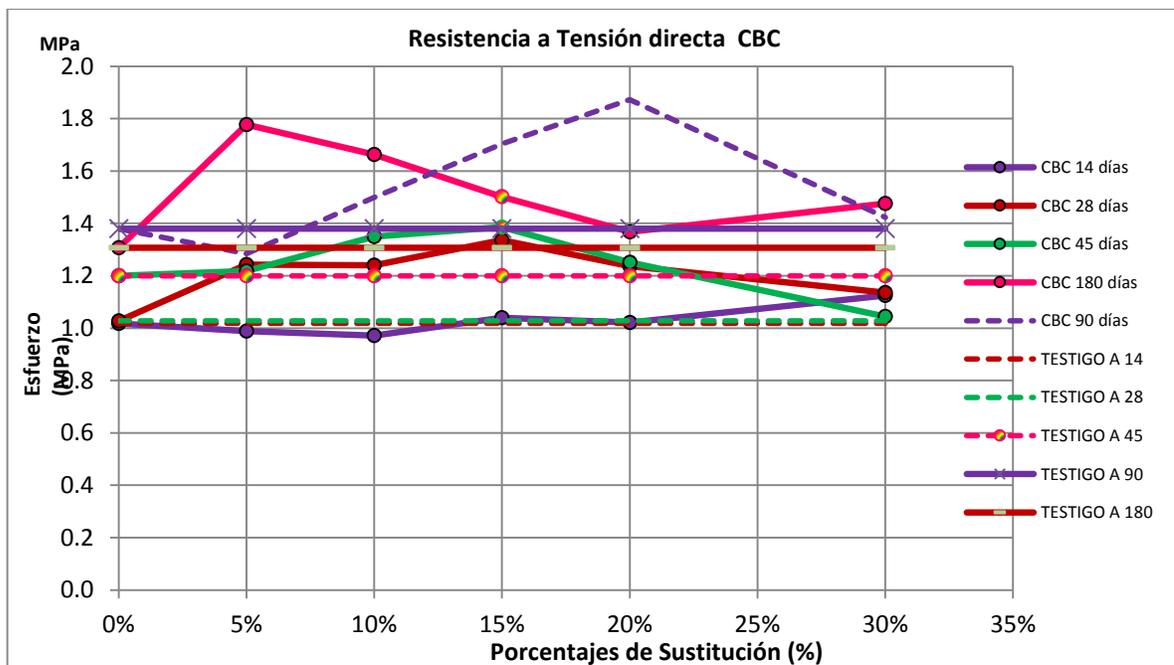


Ilustración 76 Gráfico de esfuerzos por tensión directa en briquetas de mortero con sustituciones de CBC a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.

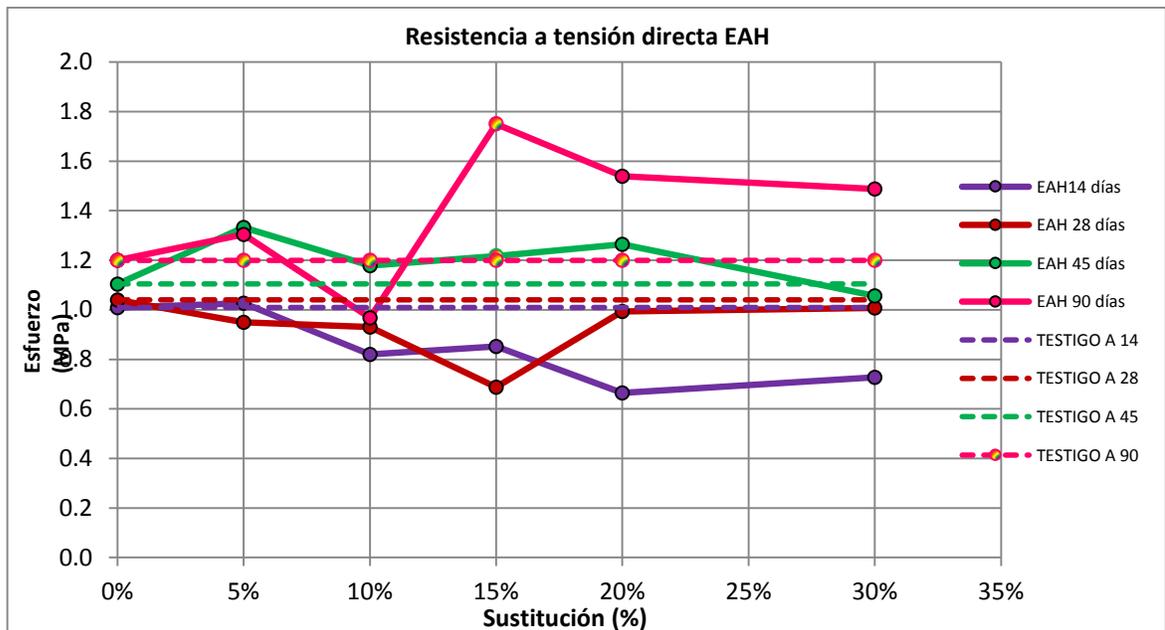


Ilustración 77 Gráfico de esfuerzos por tensión directa en briquetas de mortero con sustituciones de EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.

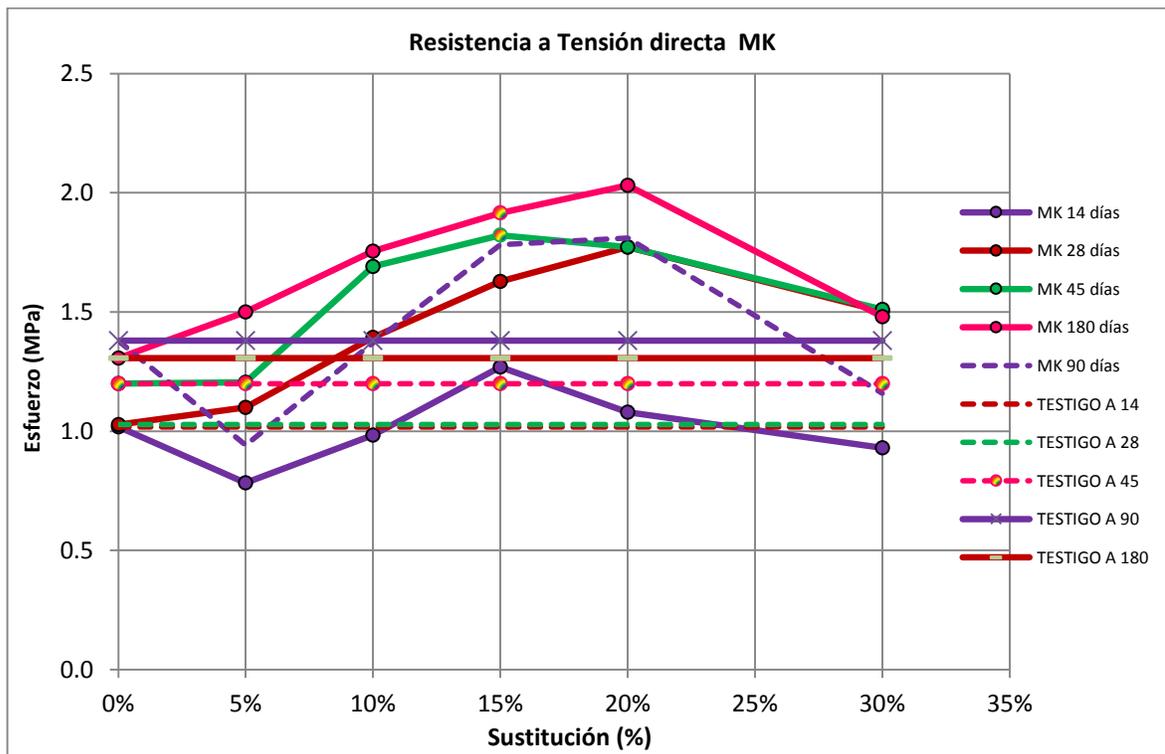


Ilustración 78 Gráfico de esfuerzos por tensión directa en briquetas de mortero con sustituciones de MK a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.



8.6.5 Resistividad Eléctrica en Cubos

El comportamiento resistivo de los morteros con sustitución de CBC presenta resultados por encima de los $10\text{k}\Omega\text{-cm}$, superando por más del doble a los morteros testigo, a excepción de la sustitución del 30%, ilustración 79. A los 90 días, las sustituciones de EAH superan también a los testigos, presentando mejor comportamiento la sustitución de 30%, ilustración 80. En términos generales, el material que mejor comportamiento presentó fue el MK, alcanzando resistividades de $45\text{k}\Omega\text{-cm}$ para el porcentaje de sustitución de 20%, destacando un buen desempeño de los porcentajes de 15 y 30% con valores de resistividad de más de 5 veces el valor alcanzado por el mortero testigo, ilustración 81.

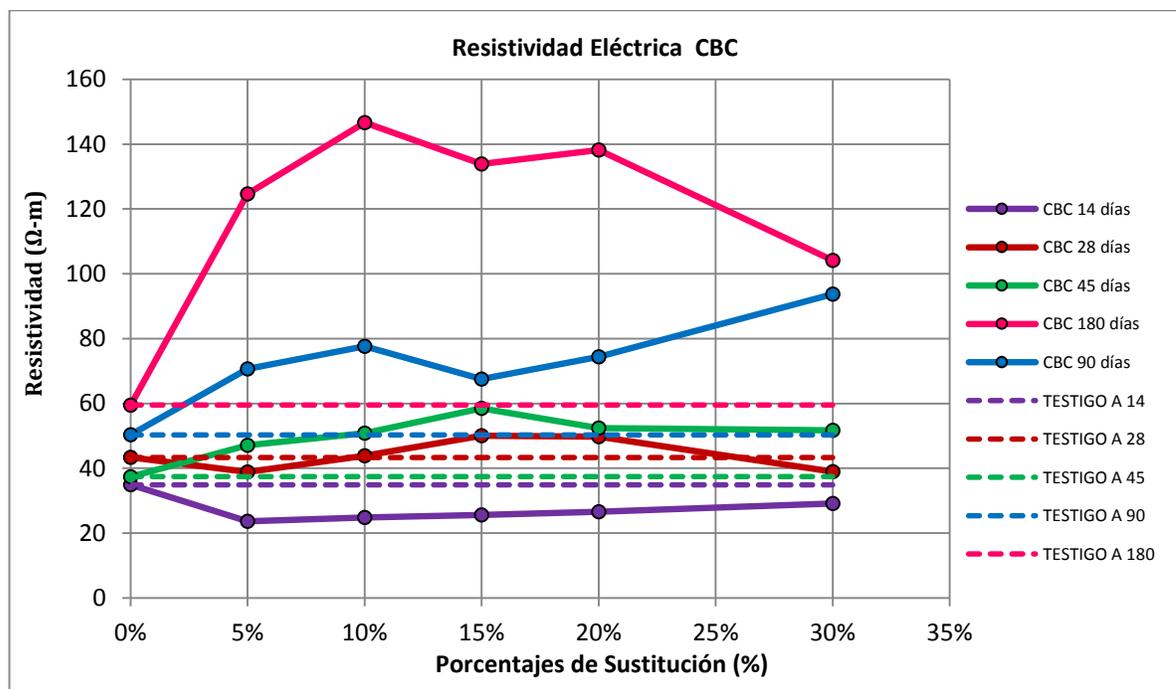


Ilustración 79 Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de CBC a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.

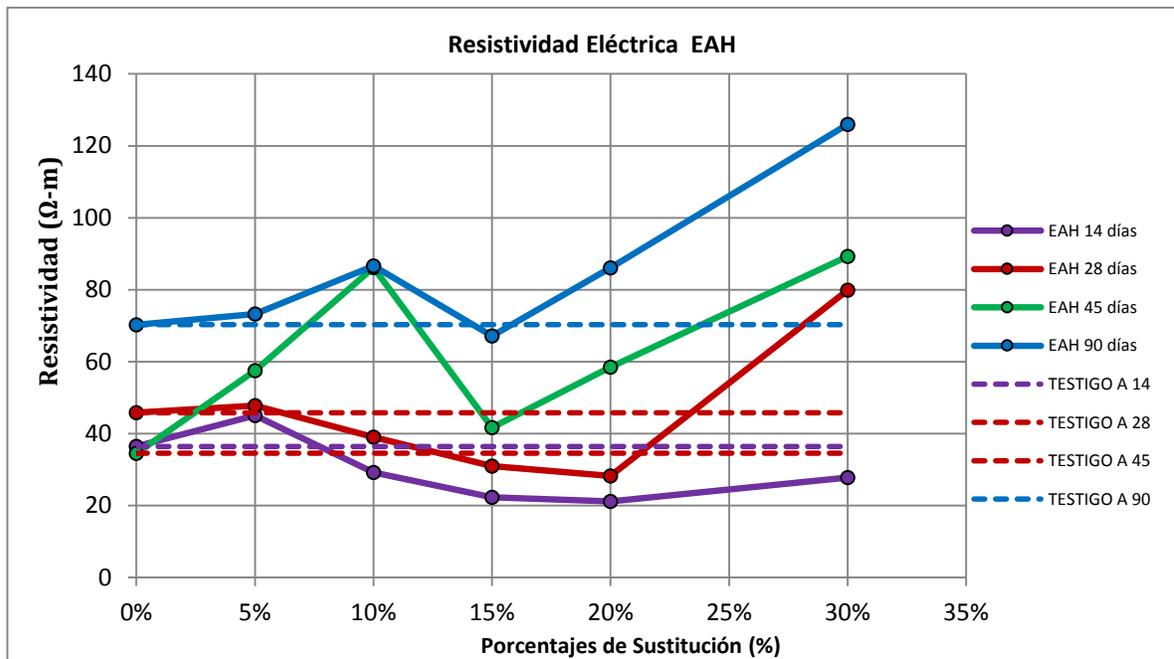


Ilustración 80 Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.

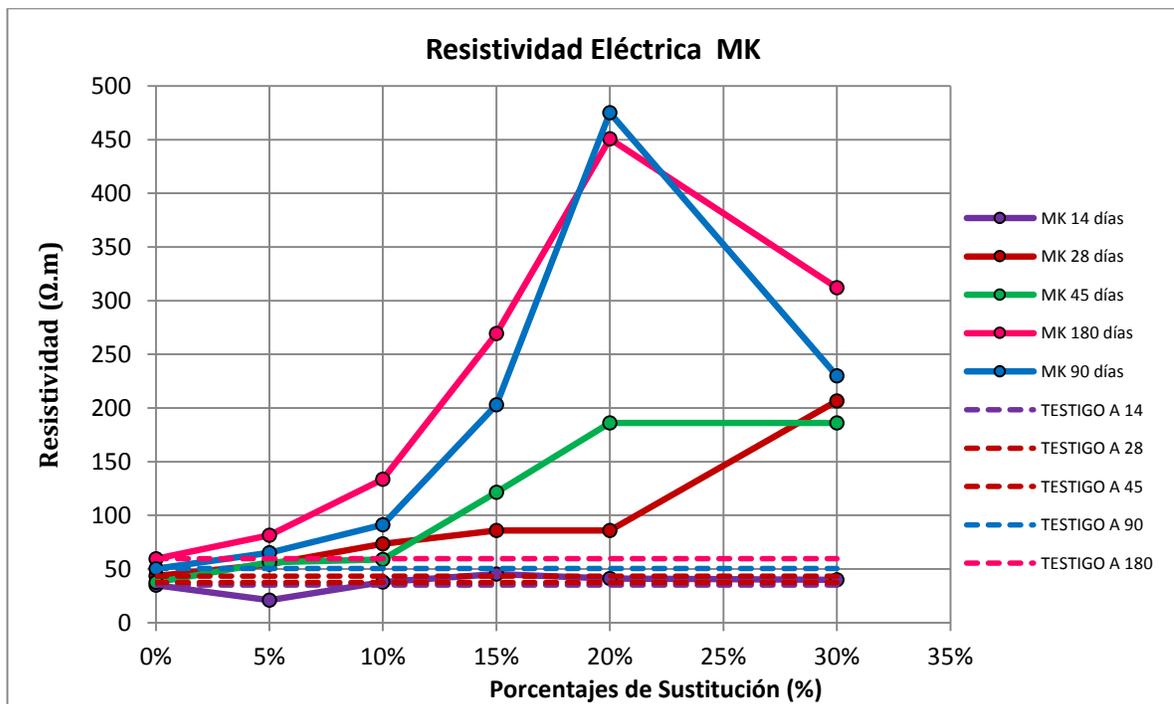


Ilustración 81 Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de MK a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.



8.6.6 Velocidad de pulso Ultrasónico en cubos

Un criterio de evaluación, utilizando como parámetro la velocidad de pulso ultrasónico, se presenta en la tabla 24. Este criterio especifica como material de análisis al concreto hidráulico. Sin embargo, el concreto hidráulico a su vez nos puede ubicar en el rango de calidad del mortero que estamos estudiando al ser evaluado con la VPU.

Tabla 24 Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 1998).

Velocidad de Propagación	Calidad del Hormigón
<2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001-4000 m/s	Alta
>4000 m/s	Durable

En base a la tabla 24, los valores de VPU obtenidos de los morteros con sustituciones de 10 y 20% de CBC, están dentro de una calidad alta, con valores superiores a los 3000 m/s a los 180 días. Para la CBC la VPU tiende a disminuir después de superar el 20% de sustitución, ilustración 82. A los 90 días, la EAH no supera los 2800 m/s en ninguno de sus porcentajes, manteniendo los resultados en el mismo rango que el testigo, ilustración 83. Los resultados de VPU para el MK, se ubican en el mismo rango de 2600-2800 m/s que para los morteros con sustitución de EAH, ilustración 84, con una tendencia a disminuir al incrementar la sustitución más del 20%.

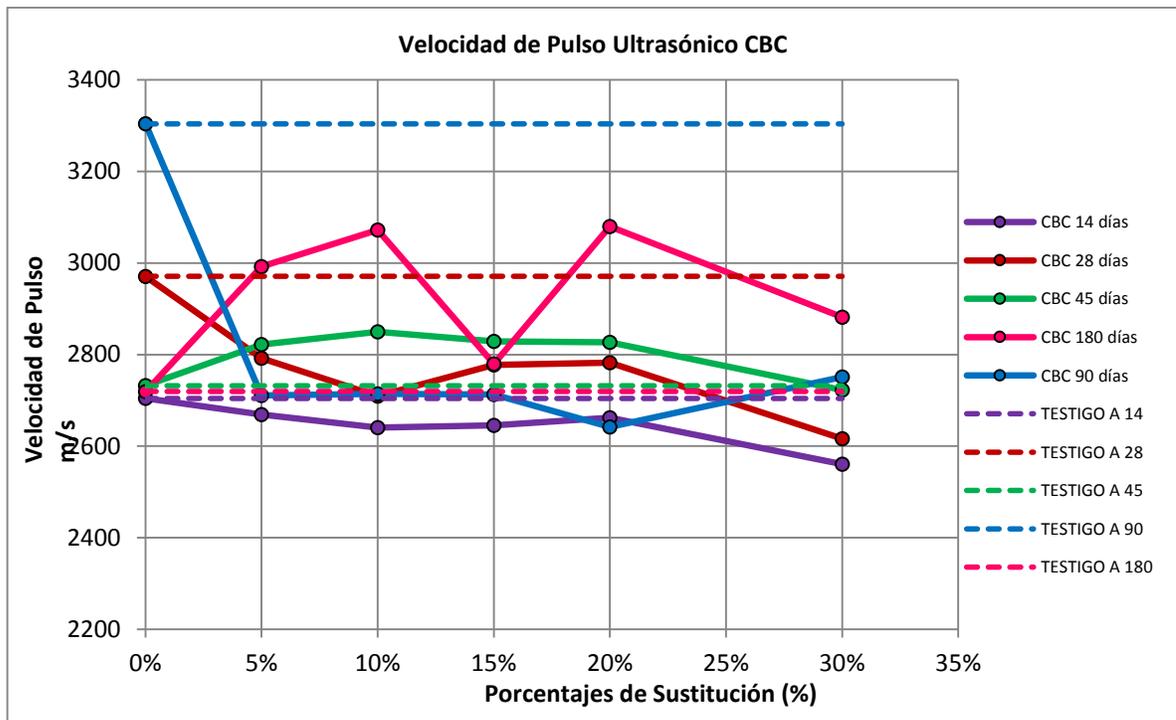


Ilustración 82 Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados a cubos de mortero con sustituciones de CBC a edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.

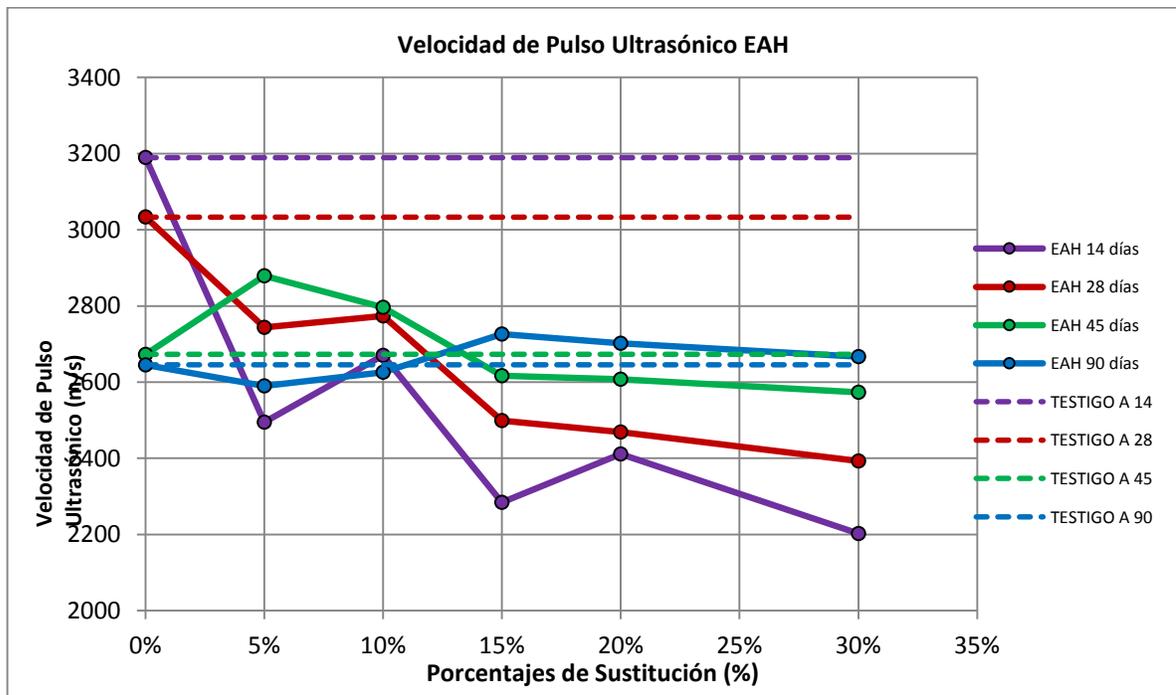


Ilustración 83 Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados a cubos de mortero con sustituciones de EAH a edades de 14, 28, 45 y 90 días.

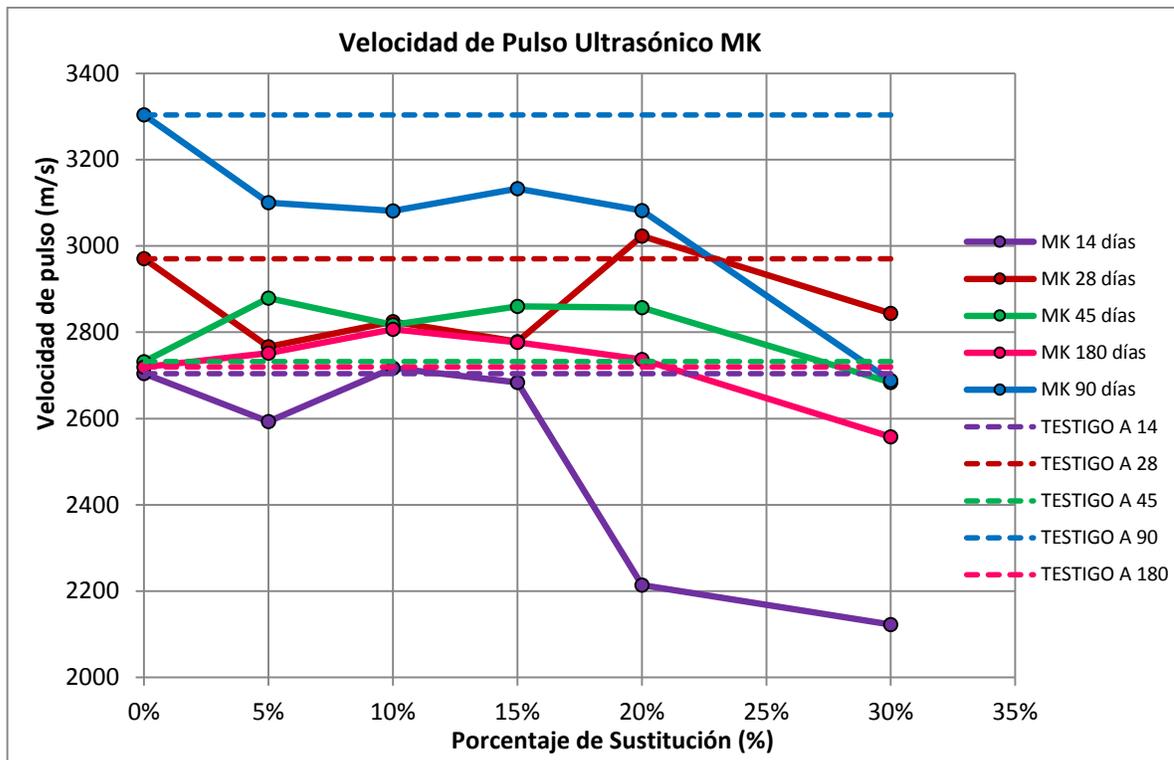


Ilustración 84 Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados a cubos de mortero con sustituciones de MK.

8.6.7 Resistividad Eléctrica en Prismas con barras de acero inmerso

No existe un criterio general para determinar los valores de resistividad que definan el estado de corrosión de una armadura. Sin embargo la práctica ha demostrado que se pueden utilizar los parámetros de la tabla 25 para estructuras de concreto armado (CYTED-DURAR, 1998).

Tabla 25 Criterio General de valores de resistividad eléctrica del hormigón. (CYTED-DURAR, 1998)

Valor	Criterio
$\rho > 200 \text{K}\Omega\text{-cm}$	Poco Riesgo
$200 > \rho > 10 \text{K}\Omega\text{-cm}$	Riesgo Moderado
$\rho < 10 \text{K}\Omega\text{-cm}$	Alto Riesgo



Como se observa en las ilustraciones 85 a 87, los resultados de resistividad para los testigos incrementan de manera constante durante las primeras 6 semanas, tal como si estuviese ocurriendo una reacción de hidratación y formación de productos de hidratación del cemento. Posteriormente se registran oscilaciones, que pueden deberse a las condiciones de desarrollo de las pruebas.

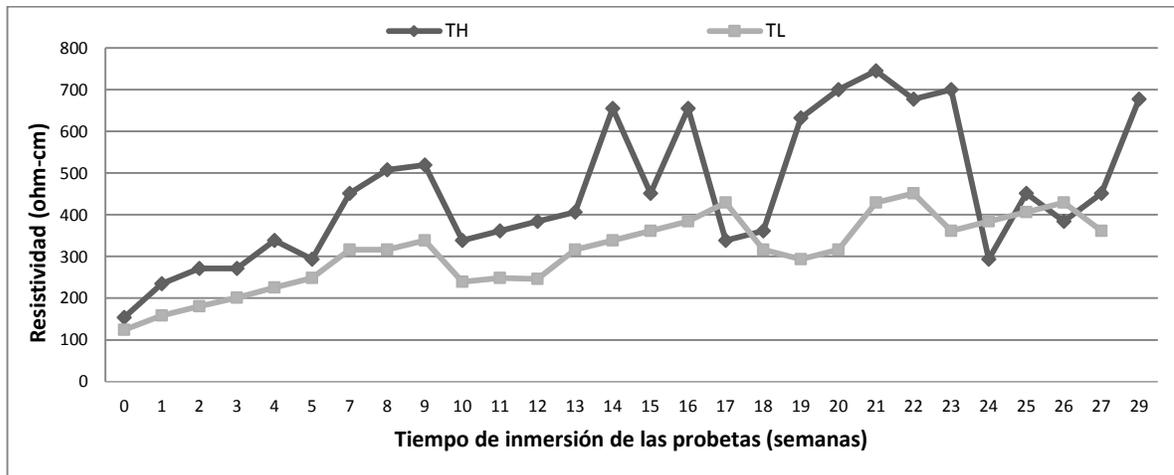


Ilustración 85 Resistividad en las probetas testigo con diferente agregado. TH, arena de Huajúbaro; TL, arena de río Lerma. Probetas con resultados más favorables del total de ensayos realizados.

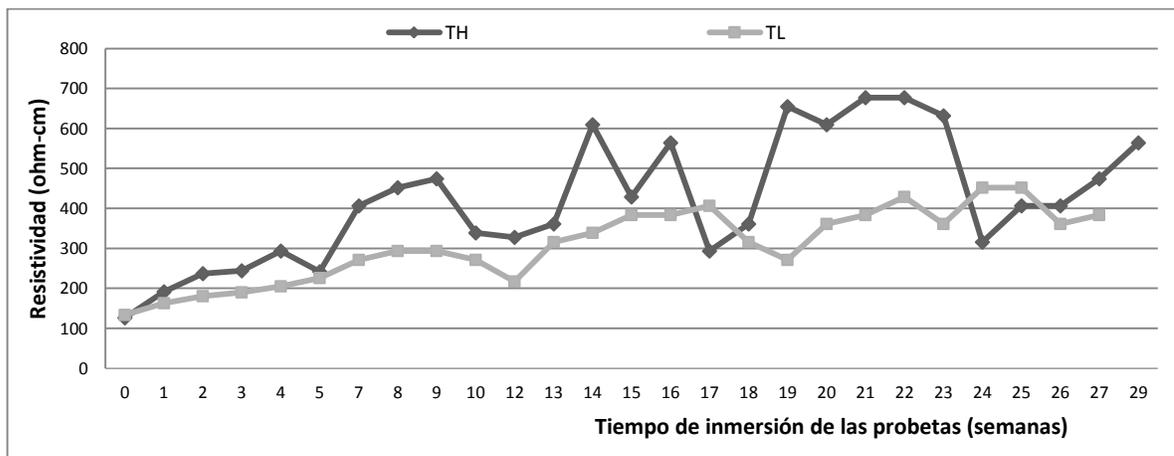


Ilustración 86 Resistividad en las probetas testigo con diferente agregado. TH, arena de Huajúbaro; TL, arena de río Lerma. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.

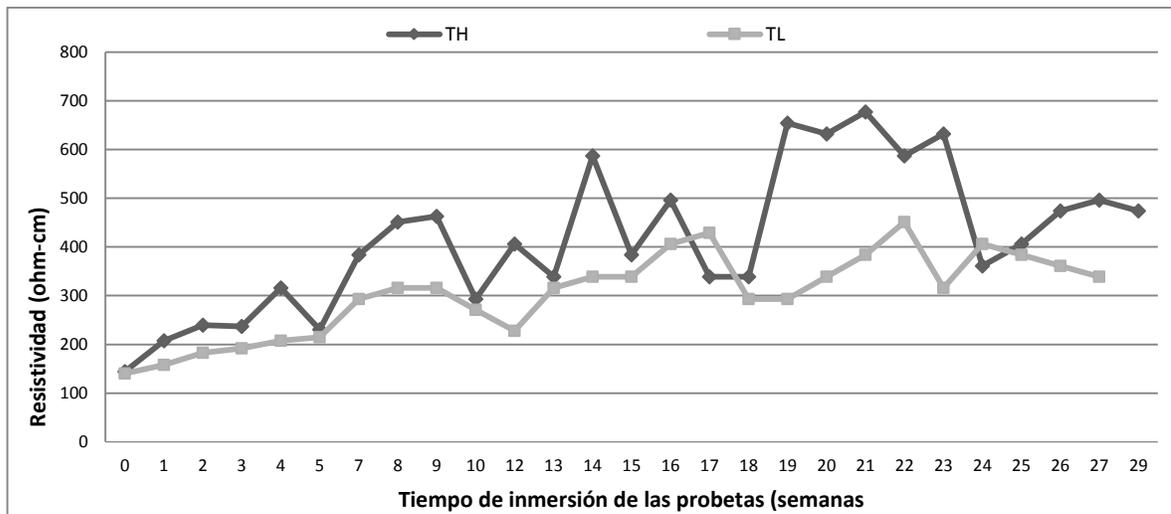


Ilustración 87 Resistividad en las probetas testigo con diferente agregado. TH, arena de Huajúmbaro; TL, arena de río Lerma. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

Las ilustraciones de 88 a 99 muestran los resultados de resistividad para las sustituciones con EAH. Los valores de resistividad obtenidos en las probetas utilizadas en las pruebas electroquímicas difieren con los obtenidos en los cubos de mortero. Esto se debe a que los dos tipos de probetas no recibieron el mismo tratamiento, y solo a los cubos se les sometió a curado continuo. Por el contrario, las probetas con las barras de acero embebido, no se curaron y se mantuvieron a la intemperie por 90 días, alterando el proceso de hidratación y por consecuencia la formación de los productos de reacción.

En las ilustraciones 88, 90 y 92, los valores de resistividad para 5 y 15% de sustitución de EAH presentan valores similares a los testigos (300-500 Ω -cm), pero muy superiores en comparación a las lecturas de resistividad obtenidas para los otros porcentajes, incluso de los otros materiales (CBC y MK), con valores que no superan los 100 Ω -cm. Esto se debe a que el colado de los especímenes de mortero sin sustitución y de los morteros de EAH con 5 y 15% de sustitución, se realizó posteriormente, colocándoles una cubierta plástica para evitar su contacto con el CO₂ de la atmósfera.



Si para estas probetas aplicáramos el criterio de la resistividad para definir un rango de susceptibilidad a la corrosión, mostrado en la tabla 25, la valorización no sería favorable, entrando en el rango de alto riesgo.

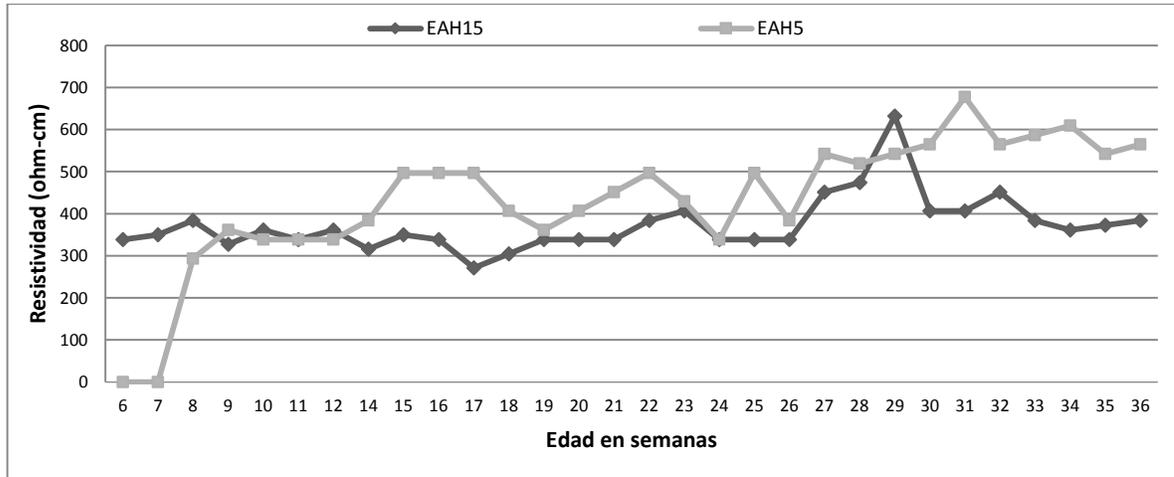


Ilustración 88 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 5% y 15% de EAH. Probetas con resultados más favorables del total de ensayos realizados.

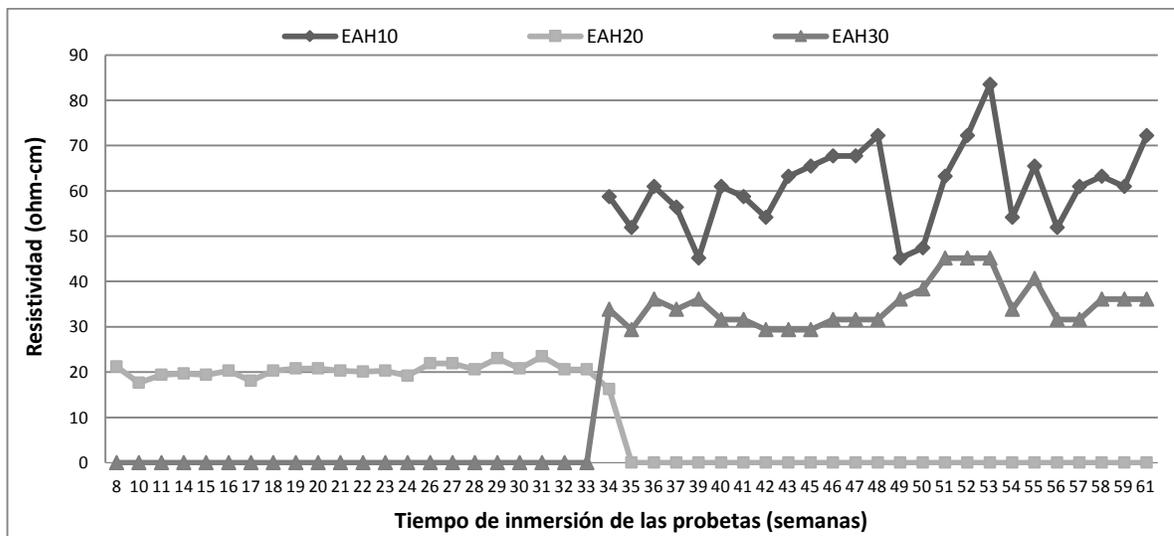


Ilustración 89 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 10%, 20% y 30% de EAH. Probetas con resultados más favorables del total de ensayos realizados.

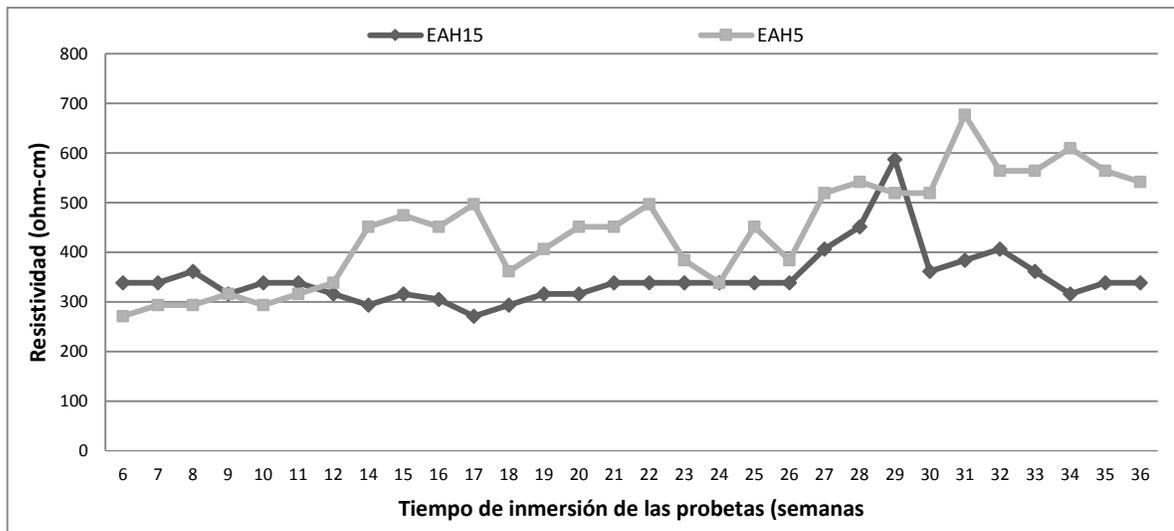


Ilustración 90 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 5% y 15% de EAH. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.

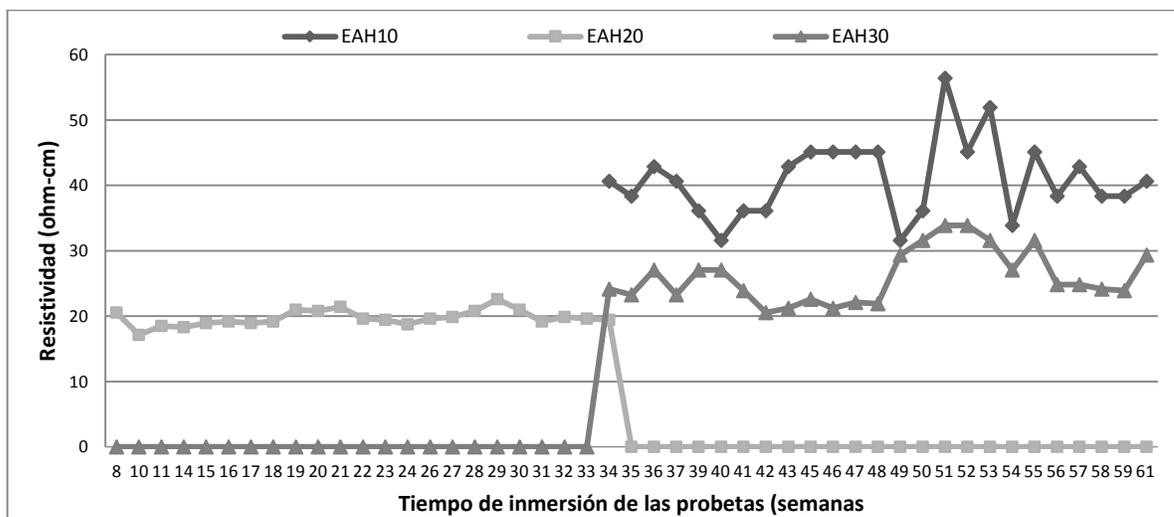


Ilustración 91 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 10%, 20% y 30% de EAH. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.

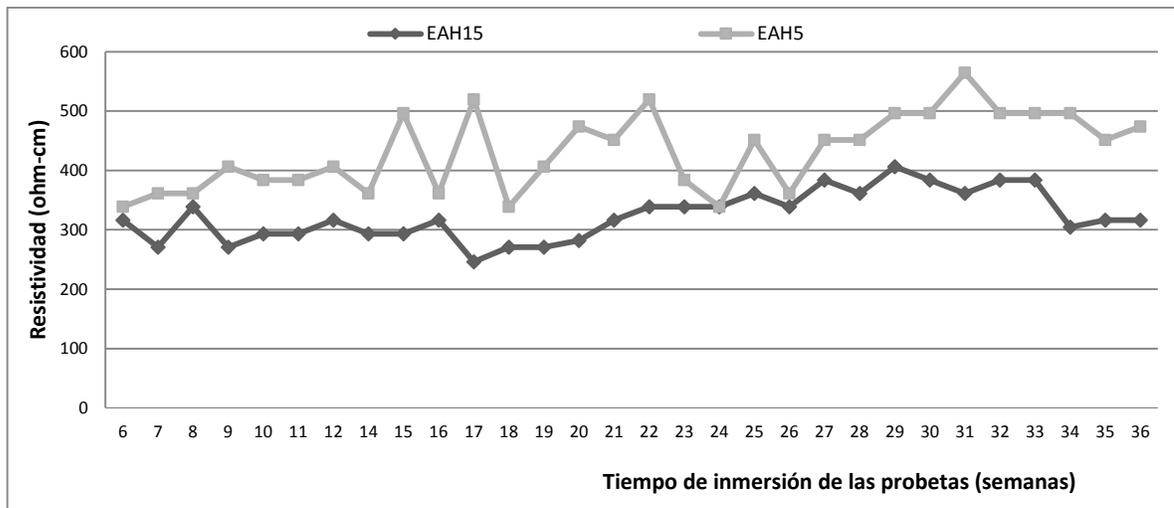


Ilustración 92 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 5% y 15% de EAH. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

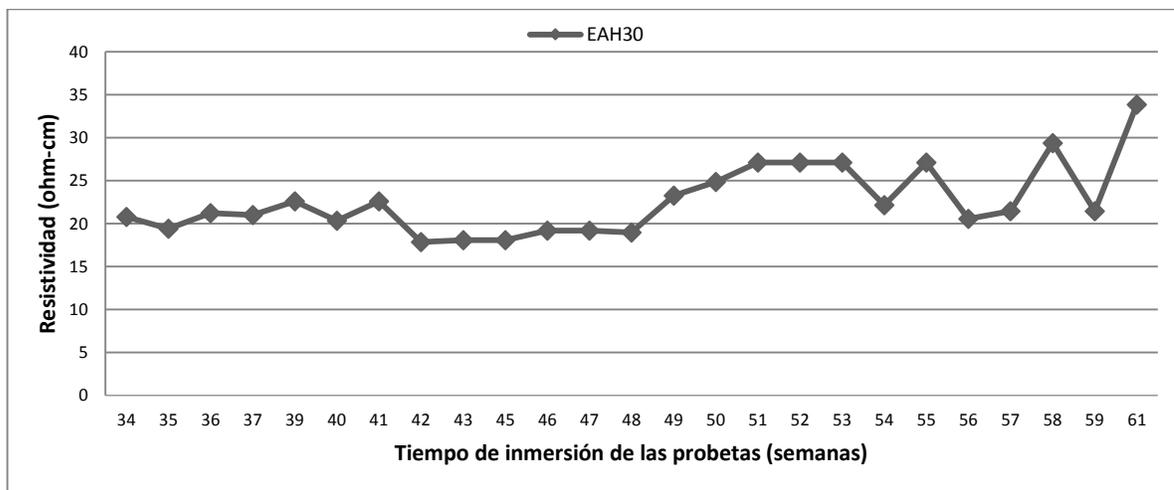


Ilustración 93 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de 30% de EAH. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

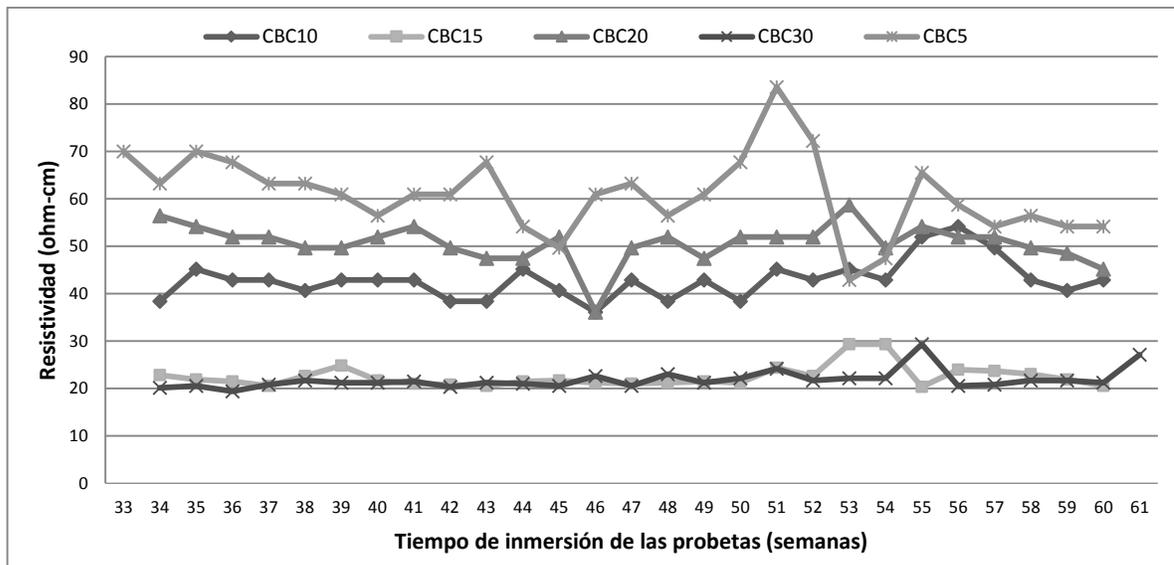


Ilustración 94 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de CBC. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

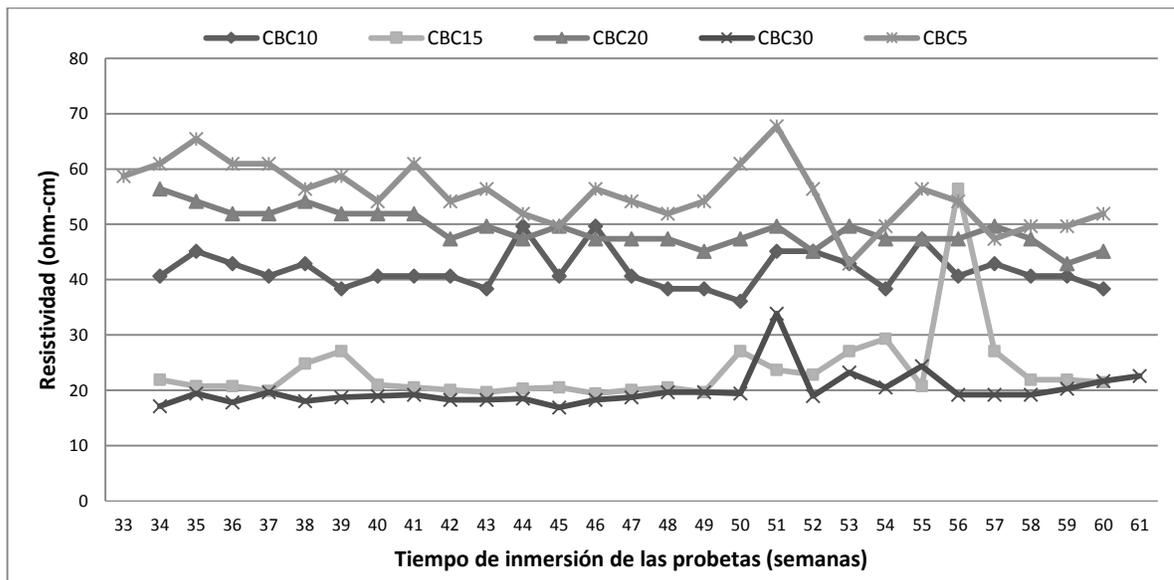


Ilustración 95 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de CBC. Probetas con resultados promedio del total de ensayos realizados.

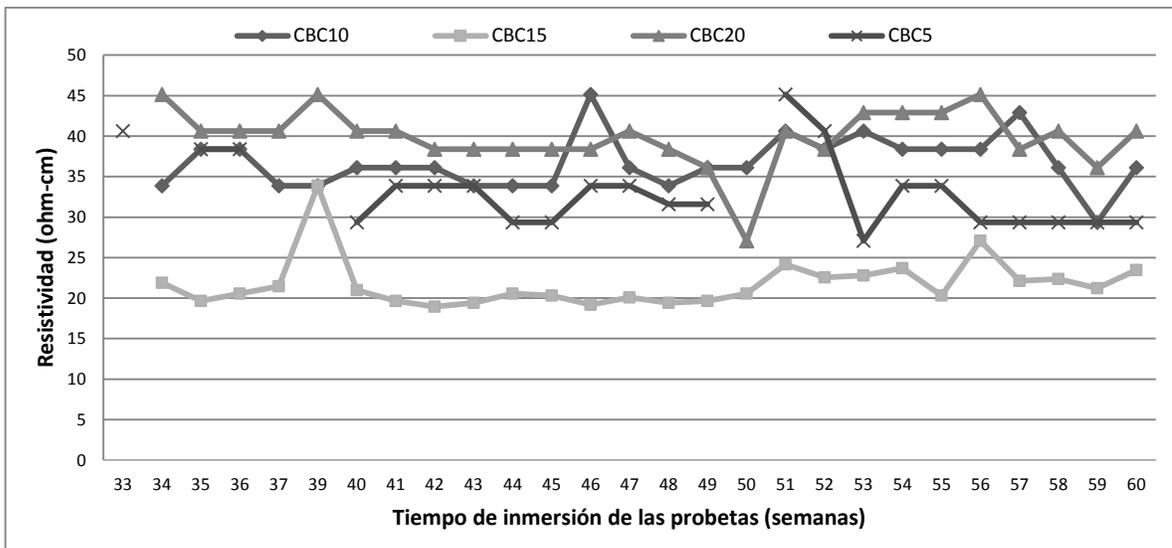


Ilustración 96 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de CBC en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20%. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

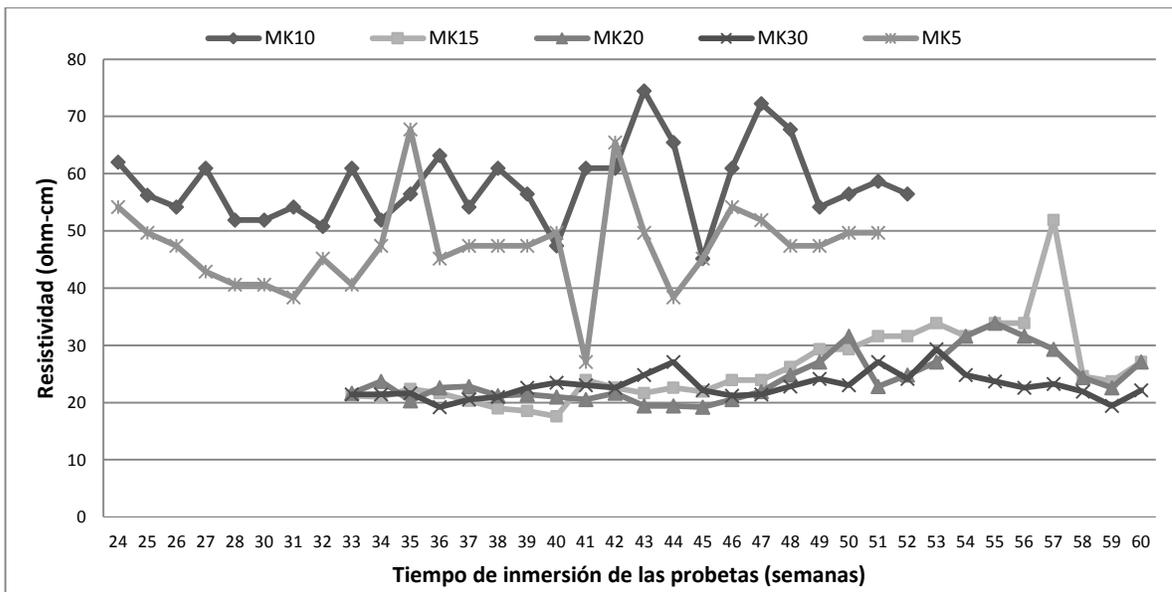


Ilustración 97 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de MK. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

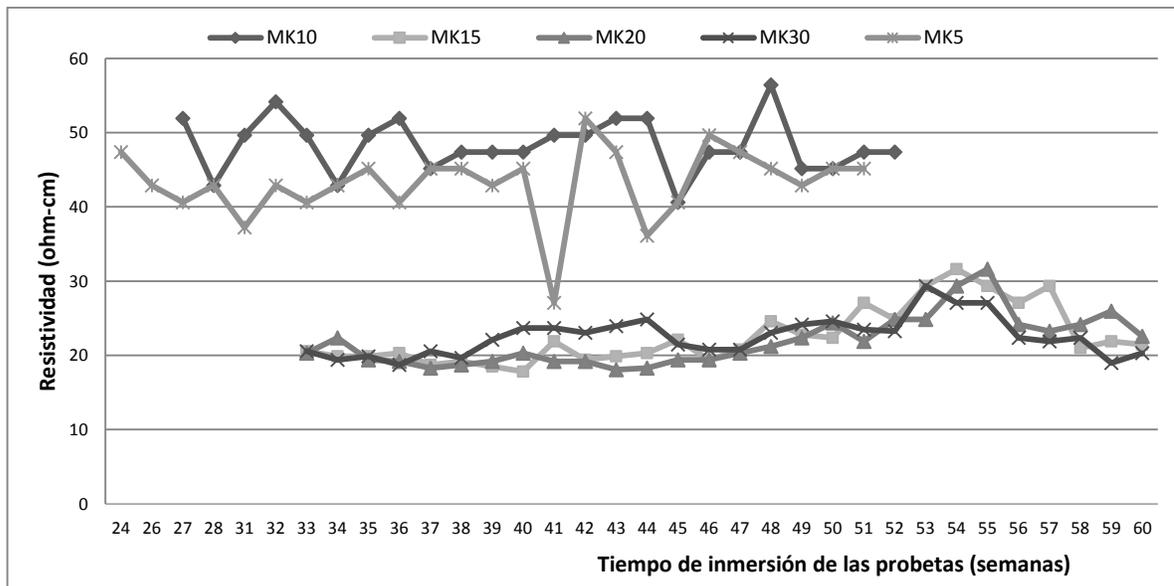


Ilustración 98 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de MK. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

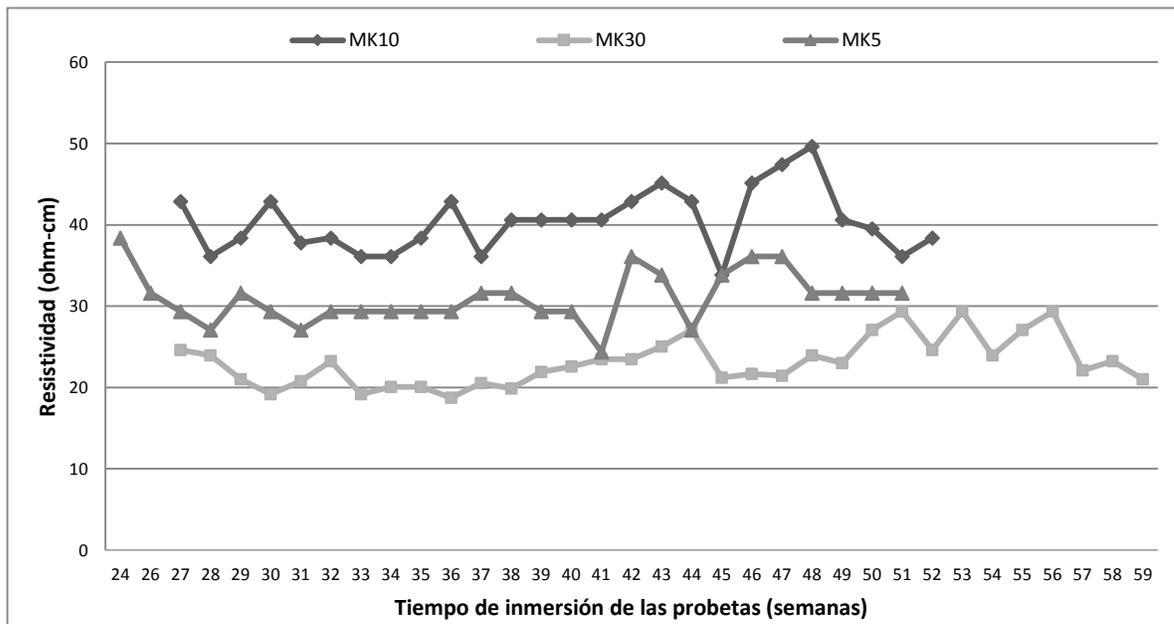


Ilustración 99 Resistividad en las probetas de mortero con sustitución de MK en porcentajes de 5%, 10% y 30%. Probetas con resultados menos favorables del total de ensayos realizados.



8.7 Ensayos electroquímicos

Los resultados de los ensayos electroquímicos a que se refiere este subcapítulo son: el potencial de corrosión (E_{corr}) y velocidad de corrosión. En el capítulo 13 se incluye un anexo fotográfico de los especímenes sobre los cuales se obtuvieron dichos resultados.

8.7.1 Potencial de Corrosión (E_{corr})

Conforme a la norma ASTM C876, si los potenciales sobre un área son más positivos que -0.20 V hay una probabilidad del 90% de que no esté ocurriendo la corrosión en el acero en el momento que se está llevando a cabo la experimentación, si están en el intervalo de -0.20 a -0.35 V es probable que esté ocurriendo el fenómeno de corrosión y para potenciales que son más negativos que -0.35 V hay más del 90% de probabilidad de que esté ocurriendo la corrosión del acero en el momento que se está realizando la prueba (ASTM-C876).

En la Tabla 22 se presentan los criterios de calificación del riesgo por corrosión del acero de refuerzo mediante la medición de los potenciales de corrosión, (E_{corr}), de acuerdo con el Manual de la Red DURAR (CYTED-DURAR, 1998).

Tabla 26 Criterio de valoración de Potenciales del Acero en hormigón vs Cu/CuSO4

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



	(+0.200 a -0.150)	Carbonatado O ₂ , seco (HR-)	Bajo
	(-0.400 a -0.600)	Cl ⁻ Elevado, H ₂ O o Carbonatado H ₂ O, (HR+)	Alto
Corrosión Uniforme	(<-0.600)	↑Cl ⁻ , ↑H ₂ O (sin O ₂)	Despreciable

Las ilustraciones 100 a 108 muestran los valores de potencial de corrosión, (E_{corr}), obtenidos en el monitoreo de los prismas con las varillas de acero embebidas. Se puede observar que estas varillas siempre estuvieron en un intervalo de valores entre -600 y -700 mV (vs ESC), lo cual indica que estuvo activo el acero en todo momento. Siendo poco menos negativos los potenciales desarrollados por las barras inmersas en el mortero sin sustitución.

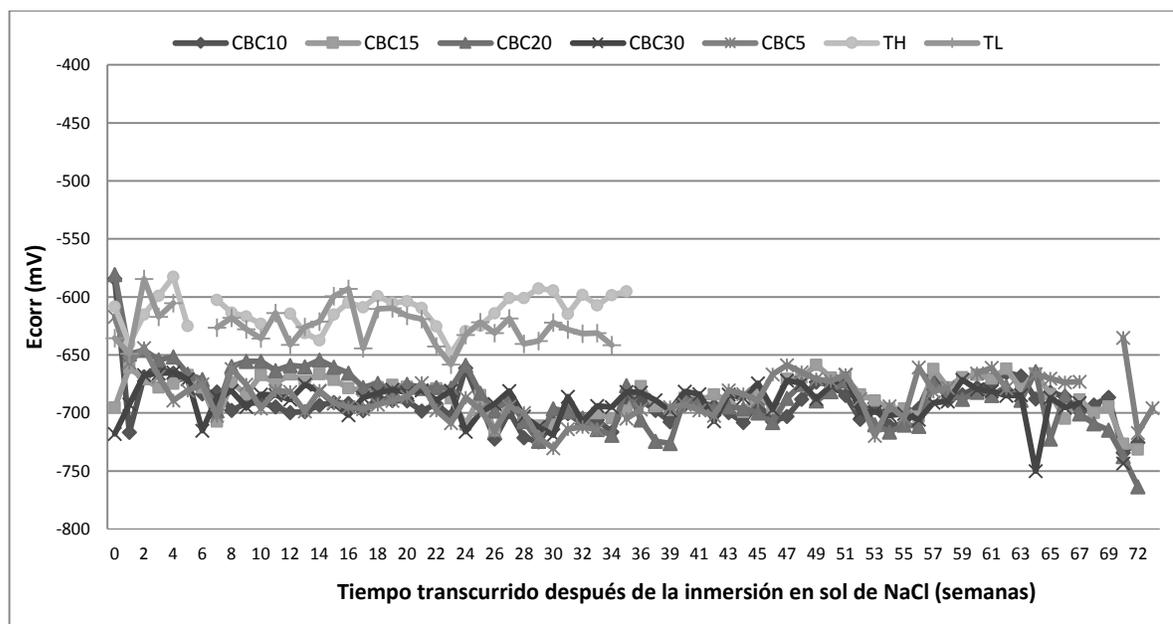


Ilustración 100 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.

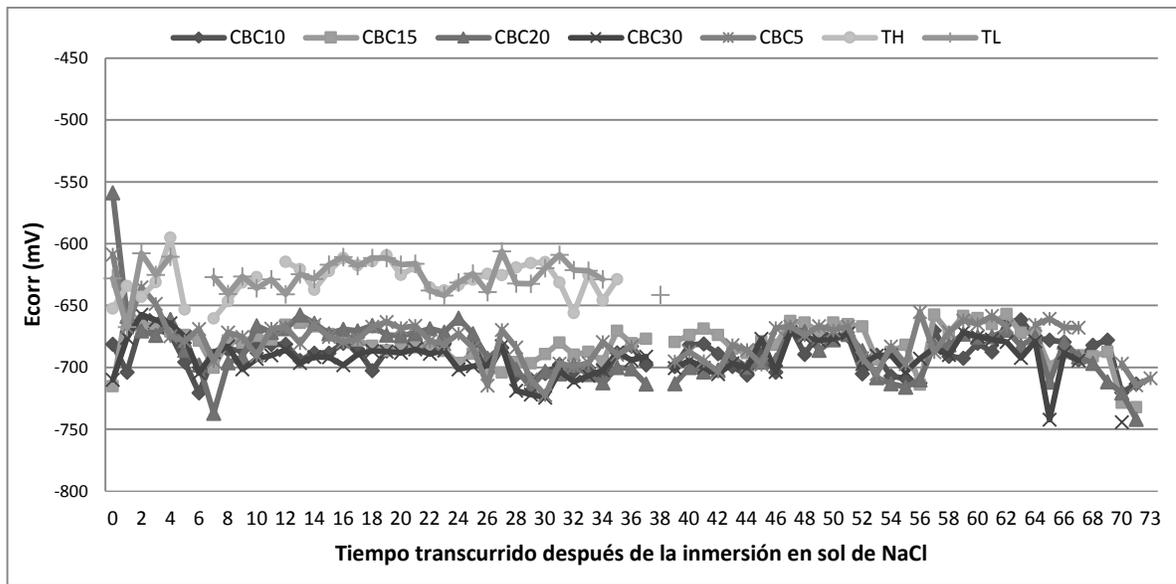


Ilustración 101 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados promedio del total de ensayos realizados.

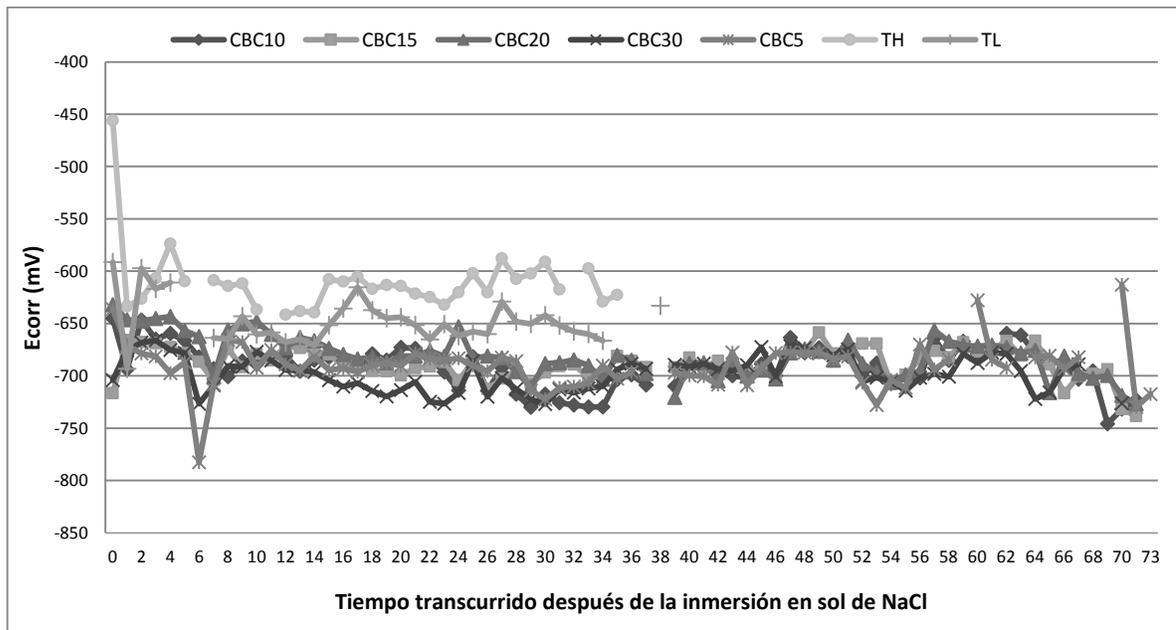


Ilustración 102 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

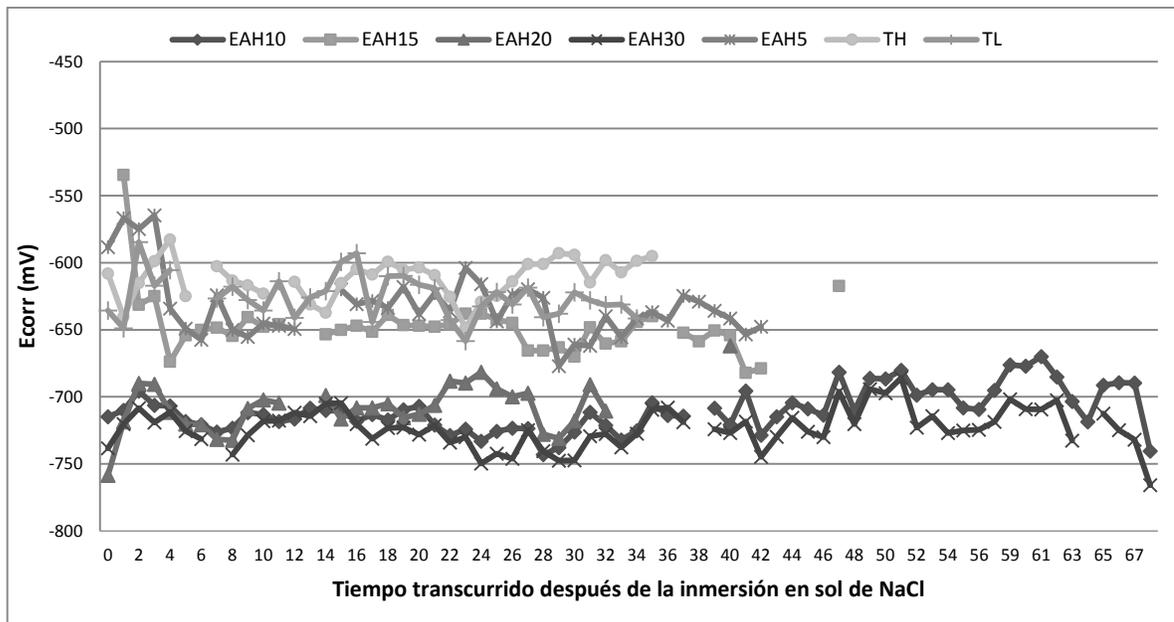


Ilustración 103 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de EAH y morteros testigo. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.

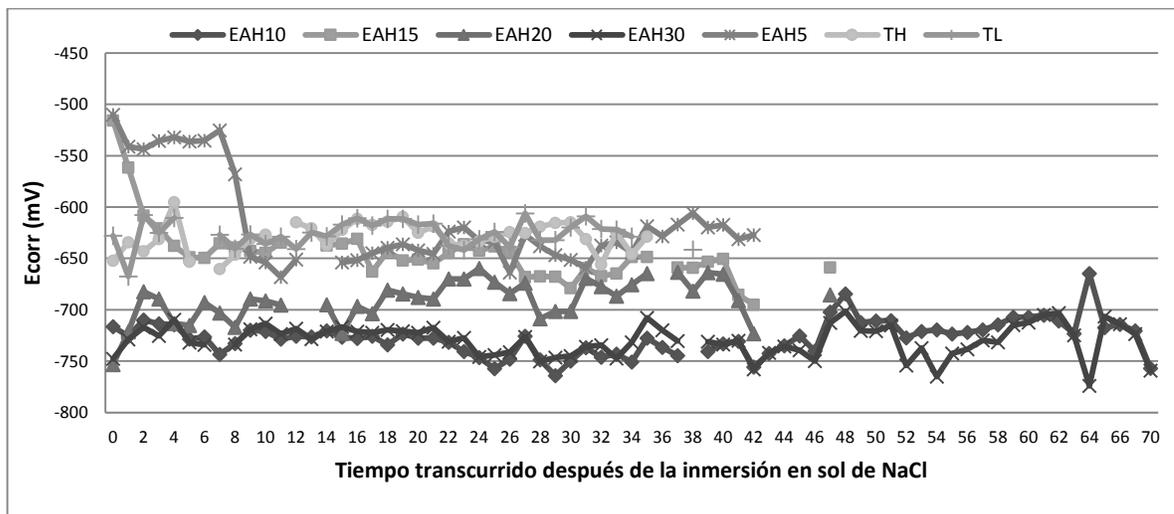


Ilustración 104 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de EAH y morteros testigo. Resultados promedio del total de ensayos realizados.

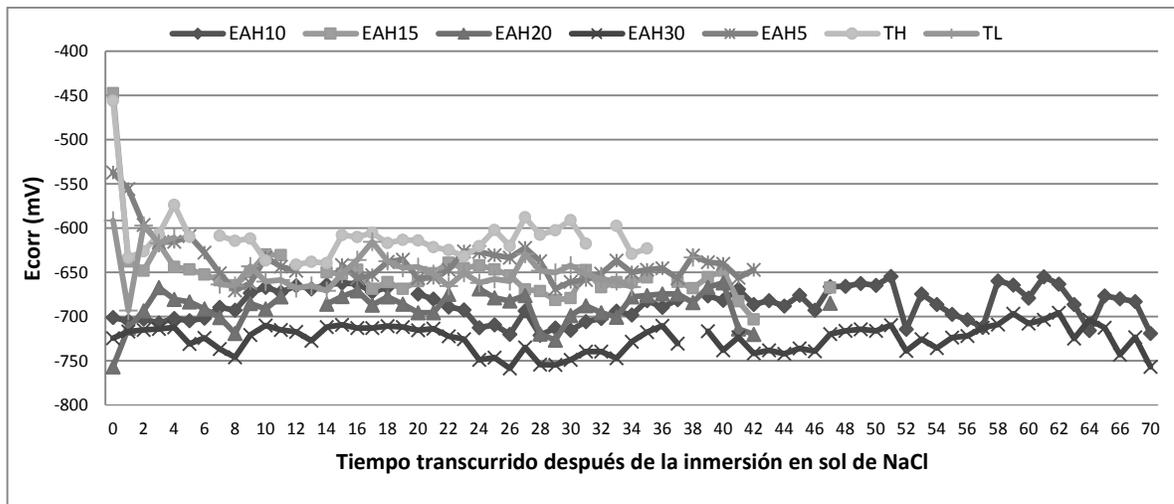


Ilustración 105 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de EAH y morteros testigo. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

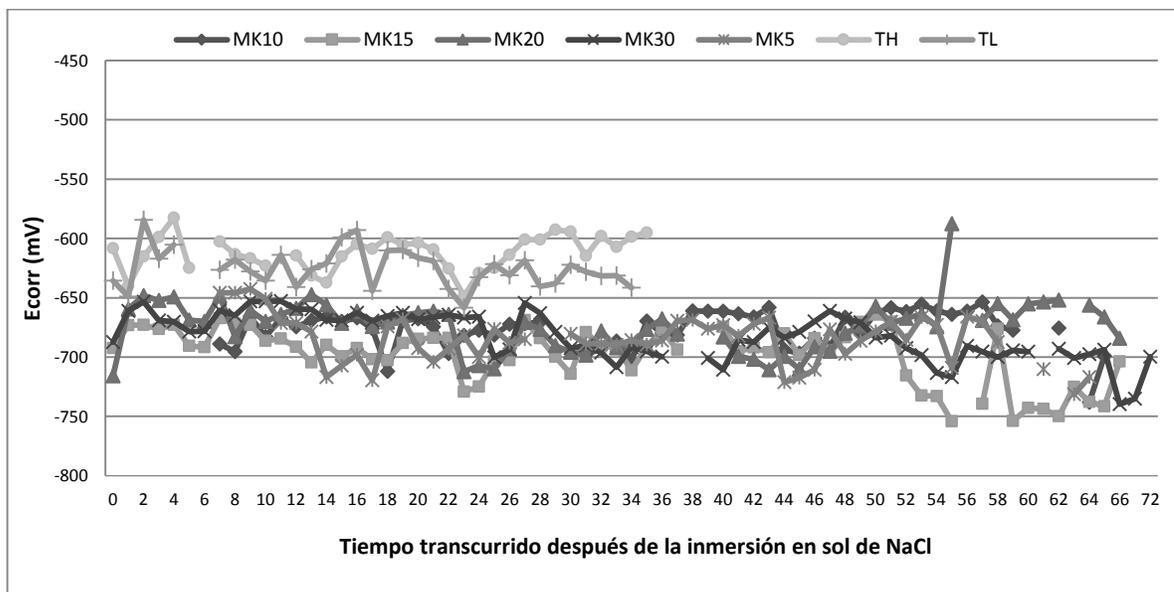


Ilustración 106 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de MK y morteros testigo. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.

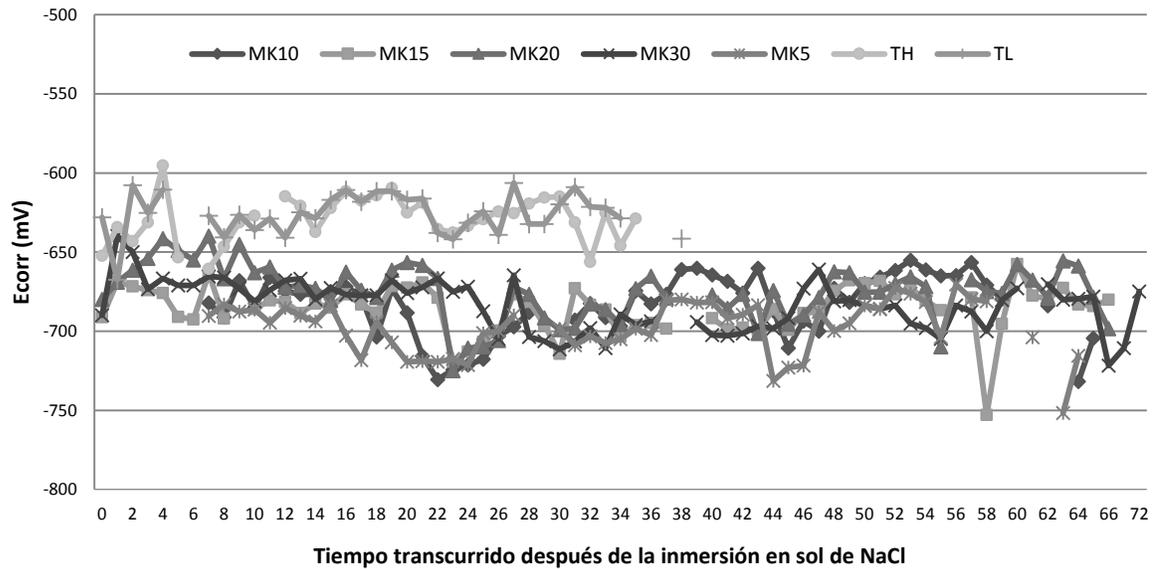


Ilustración 107 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de MK y morteros testigo. Resultados promedio del total de ensayos realizados.

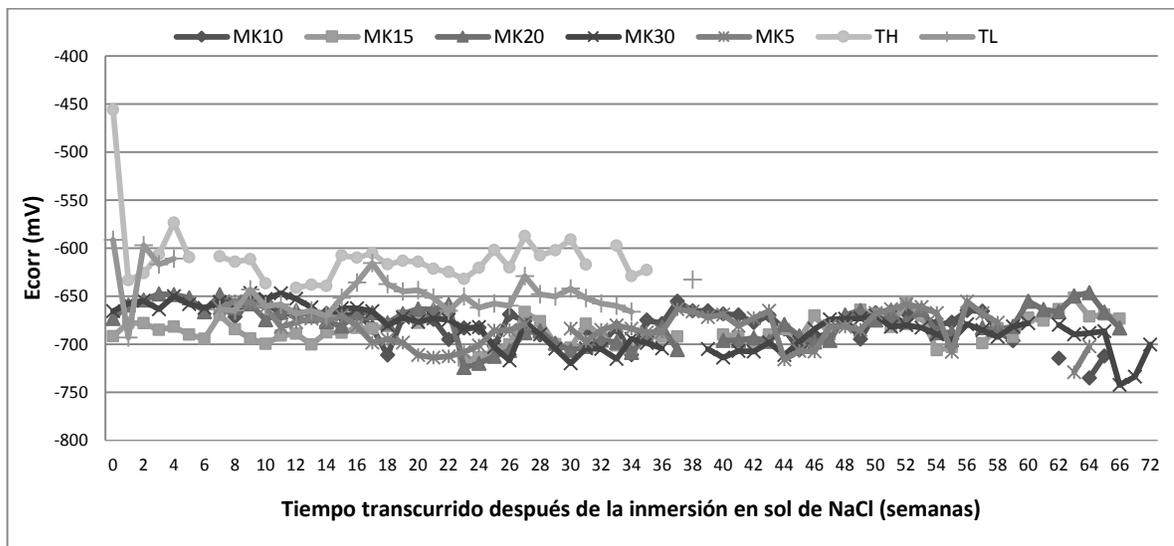


Ilustración 108 Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CBC y morteros testigo. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

El hecho de que el potencial estuviera tan activo en las mezclas no indica la presencia de una velocidad de corrosión elevada (Andrade & González, 1978).



No obstante, cuando se observa un potencial de corrosión constante se puede inferir que bajas resistencias permiten el paso de mayores cantidades de corriente y viceversa. Si relacionamos este hecho con la pérdida de especies metálicas, nos indica que bajas resistencias a la polarización (R_{pl}) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

8.7.2 Velocidad de corrosión

Una clasificación de los valores de i_{corr} o velocidad de corrosión en términos de vida útil es la siguiente, tabla 27 (CYTED-DURAR, 1998):

Tabla 27 Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil

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

Los valores de velocidad de corrosión obtenidos se muestran en las figuras 109 a 117, para los sistemas de sustitución con CBC, EAH y MK, los cuales ubican los resultados dentro de un nivel de corrosión muy elevado a edades posteriores a las dos semanas. Los valores máximos que se han detectado en ensayos de laboratorio son del orden de 100-200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (CYTED-DURAR, 1998).

Las velocidades de corrosión del acero inmerso en el mortero sustituido con CBC, comienzan con un valor elevado, llegando hasta 0.07 mm/año para la sustitución de 20%. A las dos semanas, los valores decrecen en todos los porcentajes, presentando los valores más altos la sustitución de 30%. Los valores más favorables corresponden a los testigos, aunque de manera general las curvas forman un espectro en el que las diferencias son poco notorias. La oscilación de los valores para todos los sistemas se supone a la condición húmedo-seca de las



probetas y a las condiciones no estables de la concentración de iones en el electrolito. Después de la semana 20 aproximadamente, se puede observar una pérdida de pendiente en la envolvente que sugiere la trayectoria de las curvas, ilustraciones 110, 111 y 112, lo cual indica una estabilización del sistema electroquímico. Esto indica que si las condiciones del sistema se mantienen, los resultados del sistema se mantendrán invariables.

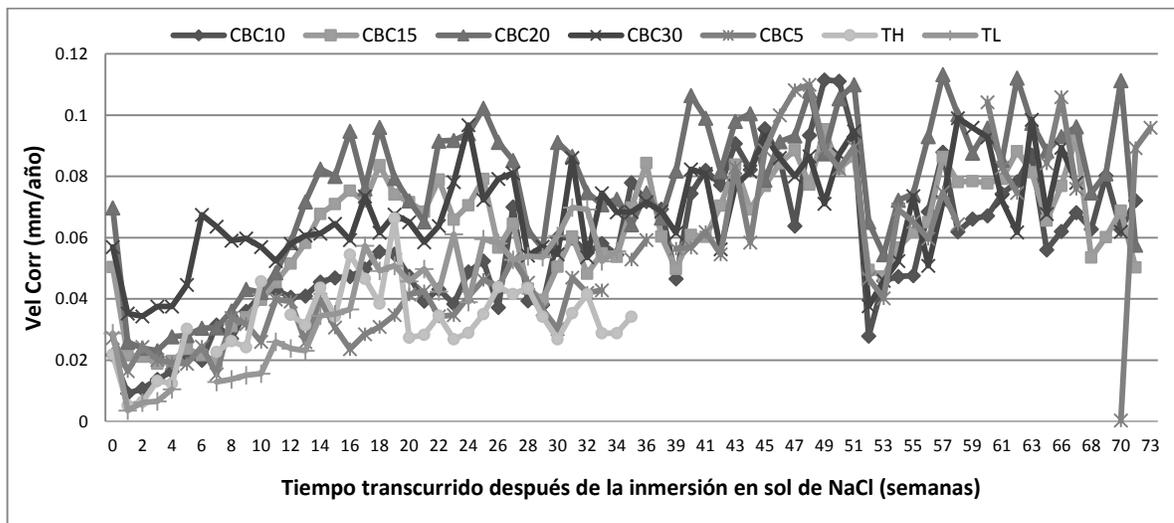


Ilustración 109 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con CBC y en mortero sin adición. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.

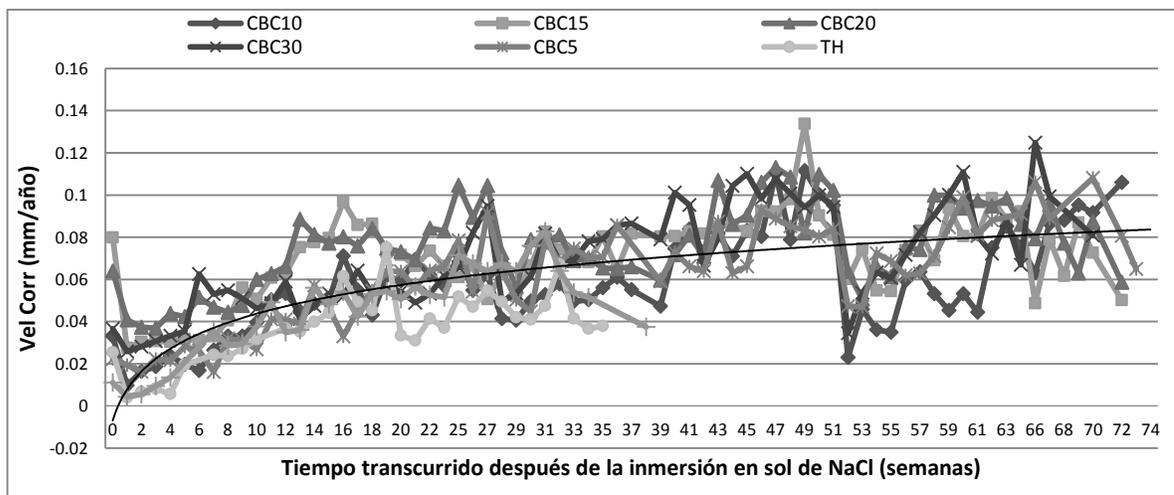


Ilustración 110 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con CBC y en mortero sin adición. Resultados promedio del total de ensayos realizados.

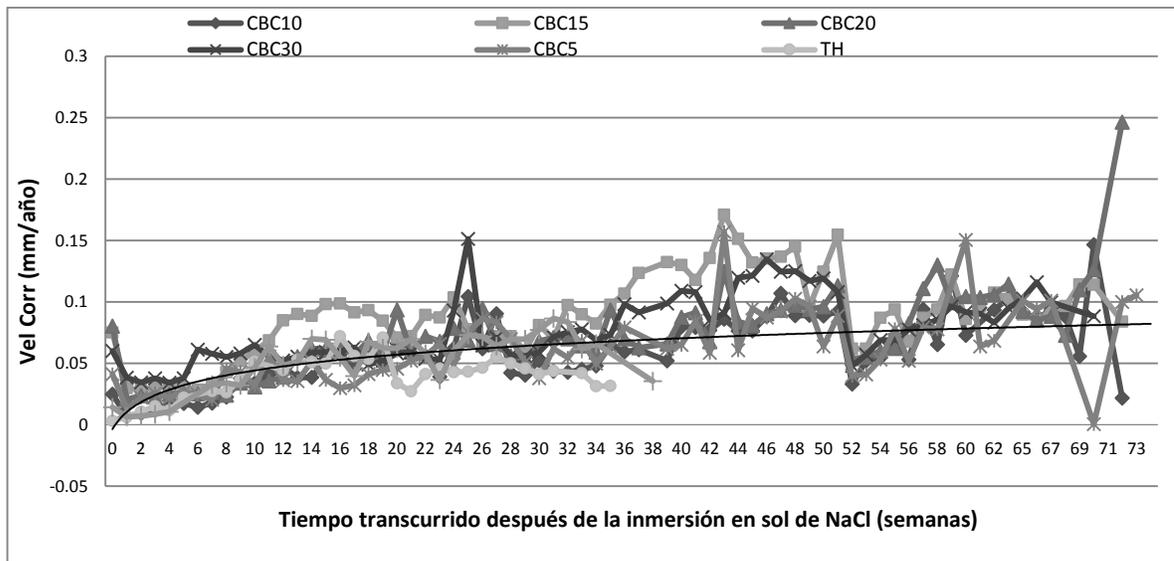


Ilustración 111 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con CBC y en mortero sin adición. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

Las velocidades de corrosión en el acero embebido en mortero con sustitución de EAH presentan el mismo comportamiento que en el sistema de CBC, con valores despreciables al inicio y con tendencia a estabilizarse. Los valores más favorables se presentan para los testigos y EAH 5%. La curva que presenta un comportamiento diferente es la correspondiente a la sustitución de 20%, que además presenta los valores menos favorables para la EAH, alcanzando los 0.2 mm/año, ilustración 112. Las ilustraciones 113 y 114 muestran los resultados intermedios y menos favorables de los ensayos realizados, haciendo notar que la diferencia entre la ilustración de resultados favorables e intermedios es poca.

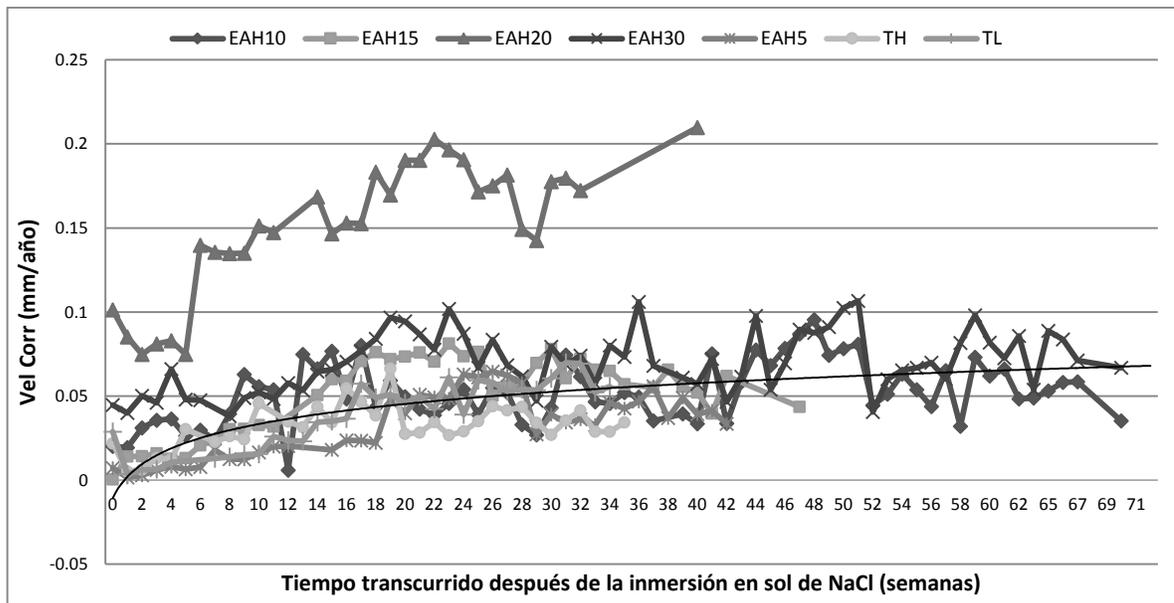


Ilustración 112 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con EAH y en mortero sin adición. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.

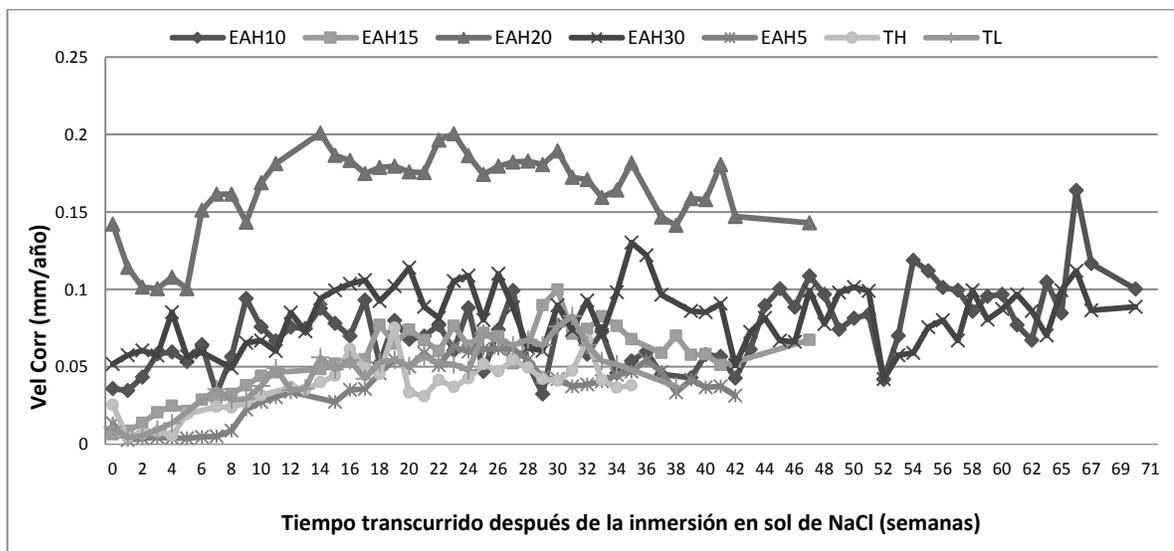


Ilustración 113 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con EAH y en mortero sin adición. Resultados promedio del total de ensayos realizados.

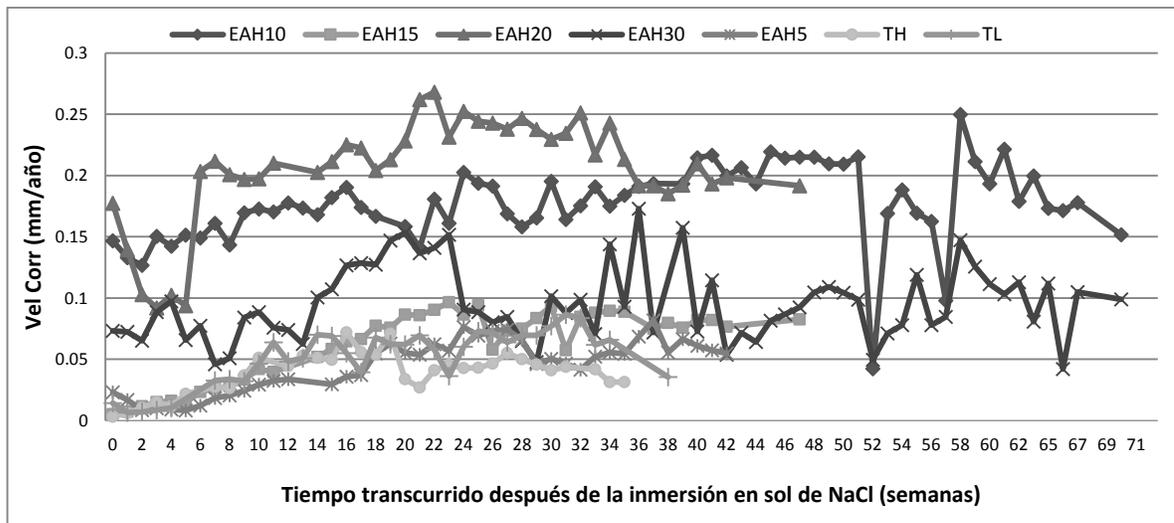


Ilustración 114 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con EAH y en mortero sin adición. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.

Las velocidades de corrosión en el acero embebido en mortero con sustitución de MK, son de 0.02 mm/año al inicio del experimento, incrementando con el tiempo y alcanzando valores máximos de 0.1 mm/año, ilustración 115. Los puntos no mantienen linealidad, si no que oscilan sobre una tendencia a estabilizarse, debido a los cambios en las condiciones del sistema electroquímico. Los valores inferiores corresponden a las barras inmersas en el mortero testigo. En la ilustración 117, de valores menos favorables, los valores máximos llegan a 0.15 mm/año.

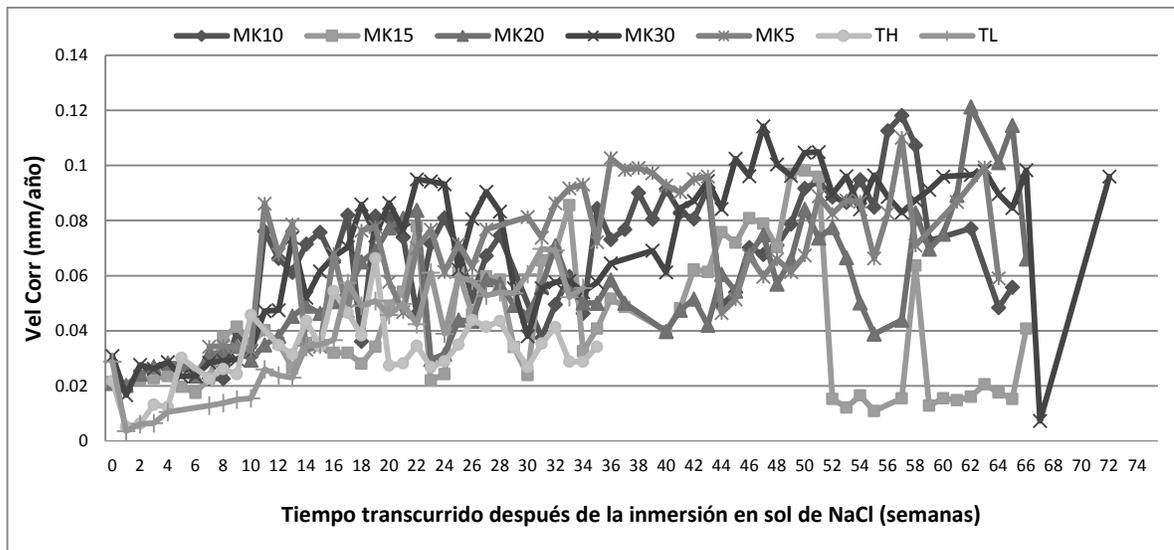


Ilustración 115 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con MK y en mortero sin adición. Resultados más favorables del total de ensayos realizados.

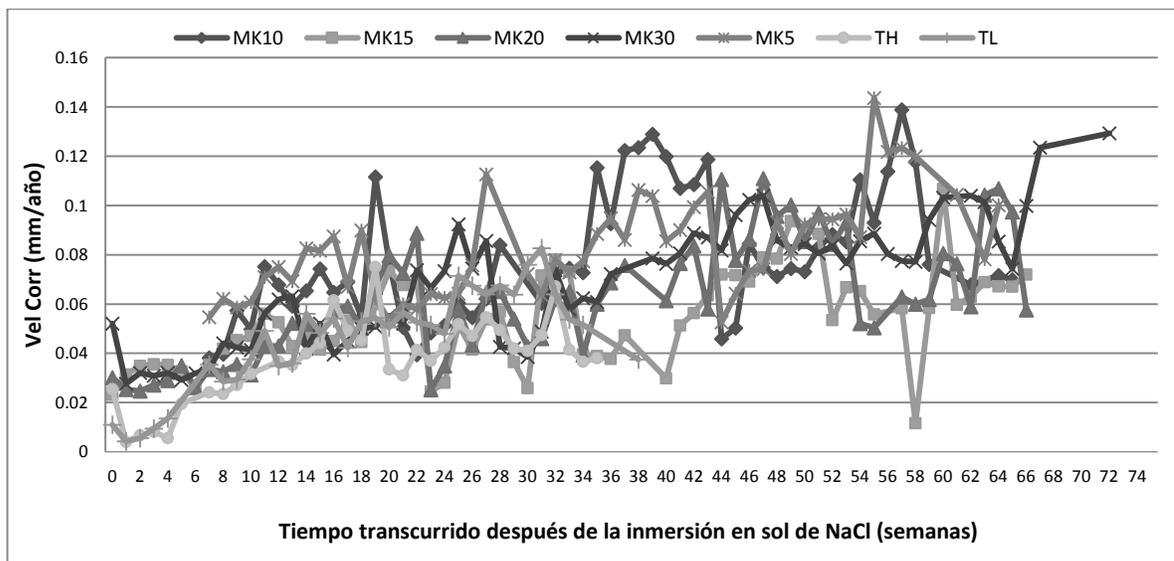


Ilustración 116 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con MK y en mortero sin adición. Resultados promedio del total de ensayos realizados.

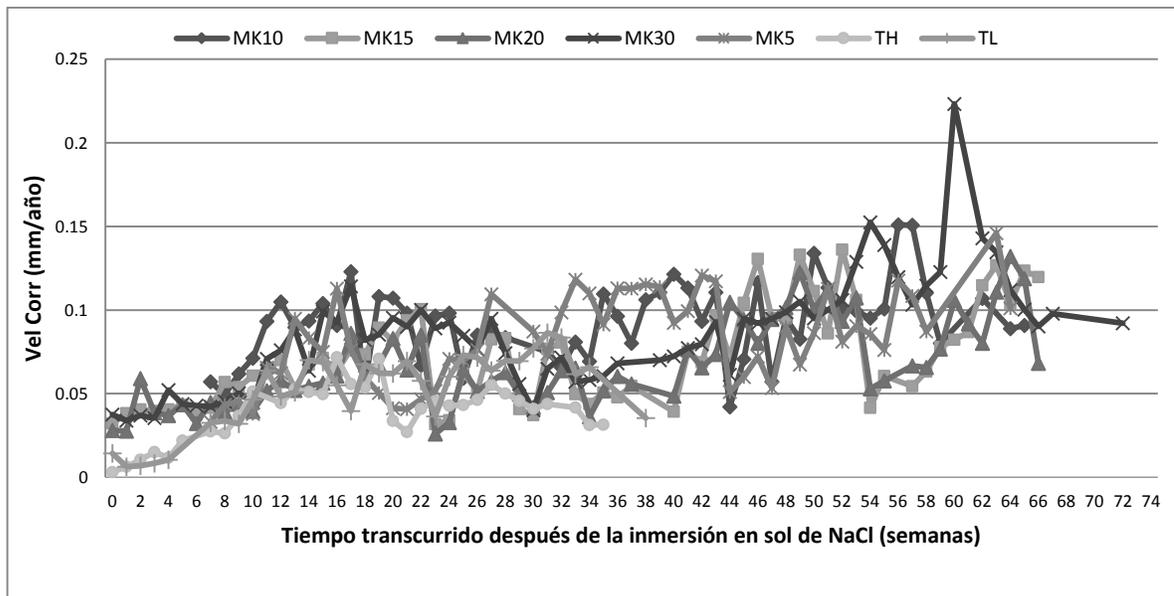


Ilustración 117 Velocidades de corrosión del acero inmerso en mortero sustituido con MK y en mortero sin adición. Resultados menos favorables del total de ensayos realizados.



9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La arena utilizada en el laboratorio para elaborar los morteros, ya sea arena estándar o especial, puede provocar resultados muy diferentes (ASTM-C270, 2014). Los resultados de caracterización de la arena arrojan una granulometría mediana para la arena de Huajúmbaro y fina para arena del río Lerma. Esto puede incidir en la resistencia, ya que las partículas pétreas son quienes absorben gran parte de esfuerzos, y al ser una arena de mayor finura hará necesario un mayor consumo de cemento, y por consecuencia mayor consumo de agua.

Los resultados de las pruebas a compresión axial, resistividad y tensión indican que las sustituciones más eficientes son las de MK en sustitución de 20%. Este porcentaje también es el óptimo para las sustituciones con CBC en las pruebas a compresión y resistividad, aunque en esta última prueba, con valores inferiores a los de MK 20%. Se piensa que este comportamiento se debe a la cantidad de fases activas presentes en el material, pues el MK posee una composición de 96.36% de la suma de SiO_2 y Al_2O_3 , la EAH un 79.41% y la CBC un 60.91%, y como sabemos estas fases son las que forman el silicato de calcio hidratado responsable de darle al mortero resistencia microestructural. Los morteros sustituidos con EAH podrían obtener mejores propiedades mecánicas, aplicando un proceso mecano-químico que permita las reacciones de hidratación de los granos.

Los mejores resultados de adherencia se presentaron para la CBC en sustituciones de 15 y 20%, por encima de los resultados de MK, quienes presentaron sus mejores resultados para las sustituciones de 10%. Para la EAH el mejor esfuerzo de adherencia se presentó en la sustitución de 20%, esto a 90 días.



Los valores de velocidad de pulso para los tres sistemas de sustitución, indican una calidad entre normal y alta, claro, esto tomando como referencia los parámetros de la red Durar. Siendo más favorables los valores obtenidos para las sustituciones de CBC en porcentajes de 10 y 20%.

Los valores de resistividad obtenidos de las probetas con las barras de acero inmersas, son muy inferiores a los obtenidos en las probetas cúbicas. Esto se debe a las condiciones de curado de cada tipo de probetas, a la solución de NaCl, la cual es un electrolito fuerte y a la forma del espécimen. La forma es importante, debido a que las corrientes eléctricas que se dirigen a los costados llegan primeramente a la solución no resistiva y por tanto se vuelve un medio de transferencia de cargas eficiente, evitando la resistencia que opone el material. Aunado a eso, al no haber pasado por un proceso de curado, se supone que hay una mayor cantidad de poros vacíos, los cuales al ser saturados con la solución de NaCl vuelven al material menos resistivo.

Los potenciales de corrosión siempre estuvieron entre -600 y -700 mV, lo cual como ya se mencionó, indica el estado activo de las barras de acero desde un principio.

Las velocidades de corrosión mostradas en las ilustraciones 109 a 117, que engloban todas las cenizas y porcentajes de sustitución, presentan un nivel de corrosión despreciable en los primeros días, y a partir de la segunda semana los valores indican un nivel de corrosión elevado. Al momento de elaborar los especímenes, se le dio un tratamiento de limpieza a cada barra metálica, lo cual representa cero corrosión como una condición inicial de la barra. A partir de la inmersión de las probetas en la solución de NaCl se comenzaron a formar las especies de corrosión, lo cual induce un incremento en la densidad de corriente y por lo tanto una alta velocidad de corrosión.



10 CONCLUSIONES

Las sustituciones de cemento por cenizas reactivas, en la elaboración de morteros realizados para este estudio, comprueban su efectividad al ser un reemplazo que disminuye la cantidad de cemento en las mezclas y proporciona propiedades mecánicas muy superiores que los morteros convencionales a base de CPC, hablando en caso específico del MK y CBC en los porcentajes de 15 y 20%. La EAH utilizada, que fue tomada de los patios de almacenamiento y posteriormente triturada y cribada, no presenta valores presumiblemente favorables, sin embargo sus propiedades le confieren características muy superiores a las mostradas en este trabajo. Esto como se ha mencionado, se debe a las características de grano que impiden las reacciones de hidratación.

A la fecha de reporte ninguna de las probetas ensayadas presenta agrietamiento causado por expansión del acero, lo cual indica pocas o nulas fuerzas de tensión en el interior de la probeta. Algunas de las probetas se agrietaron en la parte lateral debido a la fuerza con que se sujetaron al momento de darles mantenimiento, lo que permitió un acceso de la solución de NaCl a la barra de acero, observándose productos de corrosión (Ejemplo B-4-1 Anexo Fotográfico). Sin embargo, el fenómeno común fue el desgaste de las aristas, lo cual es un indicativo de la poca cohesión, que puede deberse a la incompleta reacción del cementante por falta de curado.

Algunos especímenes presentaron productos de corrosión de color rojizo en zonas puntuales sobre la superficie del mortero, por encima de la barra de acero embebida. Dado que todas las barras recibieron el mismo pre tratamiento, se atribuye la corrosión puntual a la deficiencia del mortero en zonas donde los cloruros tuvieron fácil acceso. Esta deficiencia puede deberse a un exceso de vacíos, lo que refleja un inadecuado procedimiento de llenado y compactado de los especímenes. Algunos ejemplos se pueden observar en los anexos fotográficos B-3-1, C-1-1, D-4-1 y D-5-3.



Los resultados de velocidad de corrosión alcanzan valores que determinan, según la tabla 27, un estado de corrosión elevado para ensayos realizados después de los 3 meses y velocidades pequeñas en las primeras edades cuando el acero se encuentra pasivo.

Con los resultados obtenidos en la prueba de índice de actividad puzolánica, se infiere a las sustituciones con EAH, MK y CBC efectividad en el incremento de propiedades mecánicas del mortero. La mayor efectividad se logró con la sustitución de MK (43% con referencia a T), seguida de la CBC (32.28%) y por último la EAH que no superó a la probeta testigo, pero que se encuentra dentro del límite permitido (ASTM-C-311, 2002). Este bajo valor de resistencia a edad de 28 días para la EAH, se adjudica a la velocidad de reacción, la cual es muy lenta debido a una capa ácida de SiO_2 alrededor de los granos de la escoria, que actúa como barrera impidiendo la penetración del agua hacia el interior de la estructura (Espinoza Pérez & Escalante García, 2011), y lo cual coincide con los resultados obtenidos en el trabajo realizado por Espinoza y Escalante en el 2008 (Espinoza & Escalante, 2008).

La CBC estudiada en el presente trabajo no cumple con los requisitos para ser catalogada como puzolana, ya que no cumple con el contenido mínimo de fases activas ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 70\%$ mín.) teniendo solo 66.4% y presenta pérdidas por ignición (PPI) superiores a las estipuladas en la normativa (10% máx.), presentando PPI iguales a 26.65% (ASTM-C618, 2003).

Los resultados de velocidad de corrosión obtenidos para edades superiores a 20 semanas en la mayoría de los sistemas, se mantienen con poca variación, lo que indica una estabilidad del proceso corrosivo de la varilla. Dado que la solución de NaCl se reponía conforme se evaporaba, a edades tardías una medición inferior de la velocidad de corrosión, se puede relacionar con la disminución del oxígeno, provocada por una concentración no estable de los iones cloruro (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).



Una desventaja de utilizar la EAH como cementante es el elevado consumo de energía en el procesado, ya que debe molerse muy finamente (400-500 m²/kg) (UNESID & IECA, 2011).

11 RECOMENDACIONES

Con la finalidad de aprovechar al máximo los elementos cementantes dentro de las mezclas, ya sea cemento ordinario o adicionado, es recomendable realizar un curado adecuado para permitir la formación de los productos de reacción, o bien, un curado controlado según las necesidades y objeto del estudio. En el caso de estudio de corrosión será necesaria para evaluar de una manera objetiva el desarrollo de la corrosión del acero embebido, evitando las especulaciones e incertidumbres en los resultados. Tratándose de concreto, un tiempo de 28 días de curado antes de realizar las pruebas electroquímicas sería adecuado (Corral H., Arredondo R., Almaral S., & Gómez S., 2013); en morteros se puede seguir el mismo criterio, pero dependerá para ambos casos si se requiere el análisis desde el principio del curado. En el estudio de la Dra. Carmen Andrade con morteros, en el que se basó el diseño de las probetas del presente trabajo, solo se realizó curado por 24 horas en agua corriente y humedad relativa (HR) de 90%, sin embargo, se mantuvieron con un tirante de agua de 2cm para evitar perturbaciones en las lecturas electroquímicas.

Es recomendable hacer un monitoreo constante de la concentración de los iones cloruro en la solución de saturación, con la finalidad de que los elementos del experimento se mantengan constantes y los resultados no dependan de variables no controladas, para evitar inferencias erróneas.

Se recomienda hacer otras pruebas como resistencia a la penetración del ión cloruro conforme lo marca la norma ASTM C1202, con la finalidad de



determinar la función del mortero como barrera al ion cloruro en las armaduras de concreto armado. Será necesaria la construcción de secciones de estructuras de concreto reforzadas, con espesores reales y recubrimientos de mortero de cemento con sustituciones.

Cabe destacar que la EAH se utilizó previo tratamiento mecánico de molido, por lo cual es recomendable, dado las propiedades químicas de la escoria, darle un tratamiento mecano-químico. Este tratamiento consiste en moler la escoria hasta finuras de 400 ó 500 m^2/kg y activarla con álcalis como silicato de sodio Na_2SiO_3 , $Ca(OH)_2$, Na_2SO_4 o combinaciones, para disolver la estructura amorfa con la finalidad de facilitar la reacción y mejorar las propiedades físico-mecánicas, tal como se ha reportado en algunos estudios (Espinoza Pérez & Escalante García, 2011; Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

Un aspecto importante a considerar sobre el cemento es que una vez almacenado en sacos, deberá almacenarse sobre parrillas de madera o piso de tablas; no se apilará en hileras superpuestas de más de 10 sacos de altura para almacenamiento de más de 40 días. Para evitar que el cemento envejezca indebidamente, después de llegar al área de las obras, se deberá utilizar en la misma secuencia cronológica de su llegada. No se utilizará bolsa alguna de cemento que tenga más de dos meses de almacenamiento, salvo que nuevos ensayos demuestren que está en condiciones satisfactorias (HOLCIM, 2004; CEMEX, 2011).



12 BIBLIOGRAFÍA

- Cámara Nacional del Cemento*. (Julio de 2014). Recuperado el 07 de Julio de 2014, de http://www.canacem.org.mx/procesos_de_produccion.htm
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de Construcción*, 63(309), 7-38.
- Alvarez Galindo, J. I., Martín Pérez, A., & García Casado, P. (1995). Historia de los Morteros. En F. d. Departamento de Química y Edafología, *Materiales y Técnicas* (págs. 52-59). Universidad de Navarra.
- Andrade, C., & González, J. (1978). Determinación electroquímica cuantitativa de la velocidad de corrosión de un acero de construcción. Evaluación de la susceptibilidad al ataque por picaduras. Parte II: ensayos en morteros. (C. S. Científicas, Ed.) *Materiales de Construcción*, 28(169).
- ASTM C 109M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Estados Unidos de America.
- ASTM C 109M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*¹. Estados Unidos.
- ASTM C 1583. (2004). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. Estados unidos.
- ASTM C 293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. Estados Unidos.
- ASTM C 511. (2003). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. estados unidos.
- ASTM-C150. (2005). *Standard Specification for Portland Cement*.
- ASTM-C-230. (2003). *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. West Conshohocken, Estados Unidos: ASTM International.
- ASTM-C270. (2014). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. *ASTM International*, 9-10.



- ASTM-C-305. (2013). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM International.
- ASTM-C-311. (2002). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. United States: ASTM International.
- ASTM-C-597. (2009). Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.
- ASTM-C618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM-C876. (s.f.). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, USA.
- ASTM-E-2465. (s.f.). Método de Prueba para el Análisis de Aleaciones de Ni por Espectrometría de Fluorescencia por Rayos X.
- ASTM-G102. (1999). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements¹. *ASTM International*.
- ASTM-G106. (2004). Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements.
- ASTM-G3. (2004). Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.
- ASTM-G5. (2004). Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- ASTM-G57. (2012). Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method.
- ASTM-G59. (2003). Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.
- Badogiannis, E. e. (2005). *Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. Cem. and Conc. Comp.,.*
- Barbero Encinas, J., & Sepulcre Aguilar , A. (1998). Influencia de las Cargas Inorgánicas en el Comportamiento de los Morteros de Inyección para Pinturas Murales. *Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales*, 663-669.
- Barreto Santos , M., De Brito, J., & Santos Silva, A. (2009). Evaluation methods of alkali-silica reaction in concrete with recycled aggregates. *Ingeniería de Construcción*, XXIV(2), 141-152.



- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.,
- Bonavetti, V. (2004). Hormigón con elevado contenido de adiciones (Green Concrete). En *Hormigones Especiales* (págs. 97-142). Buenos Aires, Argentina: Editado por la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- Cadena Franco, J., Veloz Rodríguez, M., Reyes Cruz, V., Coreño Alonso, O., & Vázquez García, R. (2010). ELECTROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF CHIRAL IMINIC COMPOUNDS WITH POSSIBLE APPLICATIONS TO CORROSION INHIBITION. *NACE INTERNATIONAL MEXICAN SECTION*.
- CALDARONE, A. G. (1994). *High-Reactivity Metakaolin: A New J. ACI Mat., 37-41*.
- Caldarone, A., Gruber, A., & Burg, G. (1994). *Conc. Int.*
- Carrasco, M., Bonavetti G., V., & Menéndez E., F. (2005). Tailor-Made Cements with Calcareous Caterial and Blast Furnace Slag. Argentina.
- Carrasco, M., Menéndez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. (2005). Strength Optimization of Tailor Made Cement with Limestone Filler and Blast Furnace Slag. En *Cement and Concrete Research* (págs. 1324-1331). Oxford, England: Elsevier.
- Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2013). CEMENTOS MEZCLAS: INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE ESCORIA. En *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo* (Vol. IV, págs. 2-14).
- CEMBUREAU. (2013). Activity Report 2012. The Cement Sector: a Strategic Contributor to Europe's Future. The European Cement Association (CEMBUREAU).
- CEMEX. (2011). *Cemento Portland Puzolánico*. Recuperado el 02 de Agosto de 2014, de <https://www.cemexmexico.com/ce/ficha30.html>
- Charles, J. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- CMOCTEZ. (2010). *Reporte Anual que se presenta de acuerdo con las disposiciones de carácter general aplicables a*. México: CMOCTEZ.
- Corral H., L., Arredondo R., S., Almaral S., J., & Gómez S., J. (2013). Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios. *Ingeniería de la Construcción RIC, XXVIII(1)*, 21-35.
- CruzAzul. (2008). *Cemento Cruz Azul Tipo II con Puzolana*. Recuperado el 10 de Agosto de 2014, de <http://www.cruzazul.com.mx/2008/producto/tiposCemento.aspx#3>



- CYTED-DURAR. (1998). En *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (SEGUNDA ed., pág. 128).
- De Silva, P. S., & Glasser, F. P. (1993). "Phase relations in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration".
- Del Valle Moreno, A., Pérez López, T., & Martínez Madrid, M. (2001). *El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado*. Querétaro: IMT-SCT.
- Deuteronomio-5-27. (s.f.). *La Biblia*.
- EN206-1. (2000). Hormigón-Parte 1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad. CEN.
- Escalante, I., Navarro, A., & Gomez, L. Y. (2011). Caracterización de morteros de cemento portland sustituido por metacaolín de baja pureza. *Revista ALCONPAT*, 156-169.
- Espinoza Pérez, L., & Escalante García, J. (2011). Morteros a base de vidrio de desecho/Escoria de alto horno; activación mecanoquímica del vidrio en soluciones alcalinas. *Nexo: Revista Científica*, 24(02), 92-103.
- Espinoza, L., & Escalante, I. (2008). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Portland ordinario. *Nexo: Revista Científica*, XXI(01), 11-18.
- Feliu, S., Gonzalez, J., Miranda, J., & Feliu, V. (2005). Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. En *Corrosion Science* (págs. 237-238).
- FICEM. (2013). Federación Interamericana del Cemento: Informe Estadístico 2013. Bogotá, Colombia: FICEM.
- García Rivero, J. L. (2004). *Manual técnico de Construcción Holcim Apasco*. Fernando Porrua.
- González Fernández, J., & Miranda Vidales, J. (2007). *Corrosión en las Estructuras de Hormigón Armado: Fundamentos, Medidas, Diagnóstico y Prevención*. España: Gráficas Varona.
- Guy, A. (1980). Deterioro de los Materiales. En *Fundamentos de Ciencia de los Materiales* (pág. 421). México: Mc Graw Hill.
- HOLCIM. (2004). *Cemento para construcción de mayor durabilidad*. Recuperado el 23 de Julio de 2014, de http://www.holcimnews.cr/docs/Ficha_Cemento_MP.pdf
- IMCYC. (2005). *Construyendo: CEMEX 100 años*. México: IMCYC.



- IMT-PT-327. (2010). Plan Nacional de Evaluación de Puentes Federales, Libres de Peaje Dañados por Corrosión (2000-2005). Una Cuantificación de Resultados, Proyectos y Colaboraciones. (SCT, Ed.) *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.
- IMT-pt-380. (2011). *P.T. No. 380: Evaluación Electroquímica de Cables de Preesfuerzo para Aplicación Estructural en el Sector Transporte 2a Etapa*. Sanfandila, Querétaro 2011: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- Instituto del Concreto. (1997). "*Manual Tecnología y Propiedades*" (Tercera reimpresión ed.). (A. c. ASOCRETO, Ed.) Colombia.
- Jamil, H., Montemor, F., Boulif, R., & Shriri, A. (2003). An electrochemical and analytical approach to the inhibition mechanism of an amino-alcohol-based corrosion inhibitor for reinforced concrete. En *Electrochimica Acta* (págs. 3509-3518).
- KAKALI, G. e. (2001). *Thermal Treatment of*.
- Ki-Yong, A., & Ha-Won, S. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. En *Corrosionscience* (págs. 4113-4133).
- Kondratova, I., Montes, P., & Bremner, T. (2003). Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs. En *Cement & Concrete Composites* (págs. 483-490).
- Lanza, V., Bermúdez, M., & Alaejos, P. (2006). *ESTUDIO COMPARATIVO DE ENSAYOS QUÍMICOS PARA LA MEDIDA DE CLORUROS SOLUBLES EN EL HORMIGÓN*. Madrid: CEDEX. Ministerio de Fomento.
- Lee, S., Moon, H., & Swam, Y. (2005). Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. En *Cement & Concrete Composites* (págs. 65-76).
- López Celis, R., Pérez Quiroz, J., & et al. (2006). *PT-292 Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos en México*. Querétaro: SCT-IMT.
- M. Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. California: Thomson Learning.
- Malholtra, V., & Mehta, P. (1996). *Puzzolanic and Cementitious Materials*. *Gordon & Breach Publishers*.
- Malhotra, V., & Hemmings, R. (1995). Blended cements in North America-A review. En *Cement and Concrete Composites* (págs. 23-35). Oxford, England: Elsevier.



- Martínez Molina, W., Navarro Sánchez, L. M., & Espinoza Mandujano, A. (2011). Tiempos de Fraguado utiizando las agujas de Gillmore. En *Análisis de Materiales*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil.
- Martirena Hernández, J. F., & Betancourt Rodríguez, S. (2000). Pozzolanic properties of residues of sugar. En *Materiales de Construcción* (Vol. 50). España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Martirena, J. (1994). The Development of Pozzolanic Cement in Cuba. En *Journal of Appropriate Technology* (Vol. 21). U.K.: Intermediate Technology Publications.
- MASSAZZA, F. (1993). *Pozzolanic cements. Cement and Concrete composites*.
- Medina Custodio, O. (2006). *Tesis: Análisis del deterioro por corrosión microbológica en un acero al bajo carbono*. México: UNAM.
- Mehrotra, & Masood. (1992). Pozzolanic Behaviour of Bagasse. En *Building Research and Information* (Vol. 20, págs. 299-304).
- MEHTA, P. K. (1989). Pozzolanic and Cementitious by-product. *Proceedings 3rd International Conference*. Trondheim.
- Mehta, P., & Monteiro, J. (2006). *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. New York : McGraw Hill.
- Mejía , R., & Rodríguez , P. (1999). Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. *CYTED*.
- Mendoza F., J., Durán R., R., & Genescá LL., J. (2002). *Notas: Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en Corrosión*. México: Instituto Mexicano del Petroleo-UNAM.
- Menéndez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. (2007). Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte. En *Materiales de Construcción* (págs. 31-43). Madrid, España.
- Moya, J. S. (1998). *Últimos avances sobre el Tratamiento Térmico del Caolín: Formación o no de Puzolanas Artificiales"*.
- Niu, Q., Feng, N., Yang, J., & Xheng, X. (2002). Effect of superfine slag powder on cement properties. En *Cement and Concrete Research* (págs. 615-621). Oxford, England: Elsevier.
- NMX-C003. (2010). Industria de la Construcción-Cal Hidratada- Especificaciones y Métodos de Ensayo. ONNCCE.
- NMX-C-057. (2010). Industria de la construcción-cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal. México: ONNCCE.



- NMX-C-059. (2010). Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Determinación del Tiempo de Fraguado de Cementantes Hidráulicos (Método Vicat). México: ONNCCE.
- NMX-C-061. (2010). *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos*. MEXICO: ONNCCE.
- NMX-C-071-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS PARA CONCRETO- PARTICULAS MAS FINAS DE LA CRIBA 0,075 mm (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO . México: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino. México: ONNCCE.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción- Agua para Concreto- especificaciones. México.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-199. (2010). Terminología y Clasificación en Concreto y Mortero. En I. p.-A. concreto.
- NMX-C-303-ONNCCE. (2010). DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN EL CENTRO DEL CLARO. México: DOF.
- NMX-C414. (2010). *ONNCCE Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba*. México.
- NMX-C-O21-ONNCCE. (2004). Industria de la construcción- Cemento para albañilería (Mortero)- Especificaciones y Métodos de ensayo. México.
- Orozco Cruz, R. (2007). Revista de divulgación Científica Veracruzana. En *Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico* (Vol. XX).
- Otieno, M., Alexander, M., & Beushausen, H. (2010). Transport mechanisms in concrete. Corrosion of steel in concrete (initiation, propagation & factors affecting. *University of Cape Town*.



- Pacífica, R. m. (2008). Evolución reciente de la industria de cemento. *PORTES*, 165-202.
- Pedraza Pérez, A. C. (2014). Tesis: Comportamiento físico-mecánico de morteros de abañilería para la construcción. Morelia, Michoacán, México.
- Pérez, A. (2012). *Morteros, pastas y lechadas*. Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de FICAL: Foro Ibérico de la Cal:
http://www.fical.org/index.php?option=com_content&view=article&id=57:morteros-pastas-y-lechadas&catid=42:clasificacion&Itemid=145
- Pérez, T. (2002). *Aplicación de la Técnica Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Poupard, O., L'hostis, V., Catunaud, & Petrelazar, I. (2006). Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. En *Cement and Concrete Research* (págs. 504-520).
- Ramachandran, V. S., & Beudain, J. J. (2001). Handbook of Analytical Techniques in Concrete. En *Principles, Techniques and Applications* (pág. 15). Williams Anderw publishing.
- Rivera Flores, E. (s.f.). Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja. Facultad de Ingeniería Civil.
- Rodríguez Gómez, F. (2000). Resistencia a la Polarización. En D. I. Metalúrgica. UNAM.
- Rodríguez Gómez, F. (2002). *Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión*. México: Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Química UNAM.
- Rojas Sandoval, J. (2011). Pioneros de la Industria del Cemento en el Estado de Nuevo León, México. Cementos Mexicanos, S. A. México, Nuevo León.
- Ruchansky, A. (2013). Posibilidades del uso de la ceniza de bagazo de caña como adición mineral al cemento Portland.
- Salazar, A. (1968). *Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos*. Cali: Corporacion Construir.
- Santarelli, L. (1960). *Elementi di chimica del cemento*. Milano.
- Santos Silva, A. (2006). Degradação do betão por reacções álcalis-sílica - Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção. (L. N. Civil, Ed.) *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade do Minho*.



- Sata, V., Juturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2007). Influence of puzzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials No 24*, 1589-1598.
- SCT. (2002). Materiales para mamposterías-Morteros. En SCT, *Características de los Materiales* (pág. 5). México.
- Sepulcre Aguilar, A. (2005). *INFLUENCIA DE LAS ADICIONES PUZOLANICAS EN MORTEROS DE RESTAURACION*. MADRID.
- Sepulcre Aguilar, A. (2005b). Análisis comparativo de determinados aspectos sobre la hidraulicidad de los morteros de cal. *Seminario de Restauración de Pinturas Murales*.
- Song, G., & Shayan, A. (1998). Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction state-of-the-art Review. *ARRB Transport Research Ltd Australia*, 1-77.
- Stanton, T., Porter, O., Meder, L., & Nicol, A. (1942). California experience with the expansion of concrete trough reaction between cement and aggregate. U.S.A.: Proc. Am. Concrete Instituto.
- Talero, R., Pedrajas, C., Delgado, A., & Rahhal, V. (Diciembre de 2009). Re-use of incinerated agro-industrial waste as pozzolanic addition. Comparison with spanish silica fume. *Materiales de Construcción*, 59(296), 53-89.
- Torres Agredo, J., & Mejía de Gutierrez, R. (2007). INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS CAOLINES SOBRE EL DESEMPEÑO DE MORTEROS ADICIONADOS CON MK. *Universidad del Valle*.
- Tórres Gómez, R., Aperador, W., Vera, E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS. *Dyna*(164), 52-59.
- Tres G., & E. Saborio. (2004). Corrosion Rate Evaluation of de Copper Cable Used in Grounding Systems at the ICE- Costa Rica. En *Portugaliae Electrochimica Acta* (págs. 345-360).
- UNESID, & IECA. (2011). *Ficha Técnica: Escorias de Alto Horno*. Madrid.
- Valdez, P., Fajardo, G., Hermosillo, R., & Flores, I. (Septiembre de 2008). Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la reacción álcali-agregado. *Ciencia UANL*, XI(3), 256-263.
- Valdez Tamez, P. L., Das Roy, T. K., & Rivera Villareal, R. (2004). Evaluación de la velocidad de Hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. En *Ciencia UANL* (Vol. VII, págs. 190-195).



- Veronelli, D. (1978). Durabilidad de los hormigones: Reacción árido-álcalis. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Villabona Ortiz, A., Tejada Tovar, C., & Villabona Durán, Y. (2013). Determinación electroquímica de la corrosión en el hormigón armado en solución salina. *Ingenium*, 35-39.
- Villabona Ortiz, Á., Tejada Tovar, C., & Villabona Durán, Y. P. (2013). Evaluation of corrosion in reinforced concrete cylindrical specimens. En *Ingenium* (págs. 35-39).
- Wang, P., Trettin, R., & Rudert, V. (2005). Effect of fineness and particle size distribution of granulated blastfurnace slag on the hydraulic reactivity in cement systems. En *Advances in Cement Research* (págs. 161-166). Oxford, England: Elsevier.
- Wild, S., Khatib, J. M., & Jones, A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research.*, (págs. 1537-1544).



13 ANEXO FOTOGRÁFICO

El siguiente anexo fotográfico comprende las imágenes de probetas prismáticas de mortero, con dimensiones de 1.5cmx5cmx8cm, con barras de acero corrugado inmersas, en las cuales se desarrollaron las pruebas electroquímicas. El acero embebido en ellas es de grado 60 y 7/32" de diámetro. Los morteros se identificarán por material (CBC, EAH, MK y Testigos) y por el porcentaje de sustitución (5, 10, 15, 20 y 30%).

A - Probetas de mortero de cemento sin sustitución: Testigo (TH=arena Huajúmbaro y TL=arena río Lerma.)

A-1 Morteros Testigo elaborados con arena del río Huajúmbaro.





A-2 Morteros Testigo elaborados con arena del río Lerma.



B - Probetas de morteros de cemento con sustitución de CBC

B-1 Morteros de cemento sustituidos con 5% de CBC





B-2 Morteros de cemento sustituidos con 10% de CBC





B-3 Morteros de cemento sustituidos con 15% de CBC



B-4 Morteros de cemento sustituidos con 20% de CBC





B-5 Morteros de cemento sustituidos con 30% de CBC



C - Probetas de mortero de cemento con sustitución de EAH

C-1 Morteros de cemento sustituidos con 5% de EAH.





C-2 Morteros de cemento sustituidos con 10% de EAH.



C-3 Morteros de cemento sustituidos con 15% de EAH.





C-4 Morteros de cemento sustituidos con 20% de EAH.





C-5 Morteros de cemento sustituidos con 30% de EAH.



D - Probetas de mortero de cemento con sustitución de MK

D-1 Morteros de cemento sustituidos con 5% de MK.





D-2 Morteros de cemento sustituidos con 10% de MK.





D-3 Morteros de cemento sustituidos con 15% de MK.



D-4 Morteros de cemento sustituidos con 20% de MK.





D-5 Morteros de cemento sustituidos con 30% de MK.

