



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ADICIONES VERDES A MATERIALES BASE CEMENTO PORTLAND, PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD EN OBRAS CIVILES

TESIS QUE PRESENTA: WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

DIRECTOR DE TESIS: DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA

CO-DIRECTOR DE TESIS: DR. CARLOS SANTIAGO LÓPEZ CAJÚN

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Doctorado en Ingeniería

“ADICIONES VERDES A MATERIALES BASE CEMENTO PORTLAND, PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD EN OBRAS CIVILES”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

DOCTOR EN INGENIERÍA

Presenta:

M. en A. ING. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Dirigida por:

DIRECTOR: DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA

CO-DIRECTOR: DR. CARLOS SANTIAGO LÓPEZ CAJÚN

SINODALES

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta
Presidente

Dr. Carlos Santiago López Cajún
Secretario

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Vocal

Dr. José Luis Reyes Araiza
Suplente

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita
Suplente

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Santiago de Querétaro, Qro.
Octubre del 2018
México

RESUMEN

Para aumentar la durabilidad de materiales de construcción y disminuir la corrosión, se propone estudiar el efecto de la incorporación a materiales base cemento Portland (CP) de dos biopolímeros: el Nopal, *Cactus Opuntia ficus-indica* (OFI) y, de manera marginal, Almidón de Maíz, *Zea mays* (MZ). La incorporación de OFI, se hace tanto en forma sólida, como fibra; así como en forma líquida, como mucílago, ya sea en adición o como sustitución parcial del CP, en concretos y en morteros. Combinado con OFI, se estudia también la incorporación de MZ en fécula (polvo), como un biopolímero que puede mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de morteros base CP. Se realizaron diversos ensayos de laboratorio a especímenes de mortero y concreto incorporándoles OFI a materiales base CP y a diferentes edades, contrastando resultados obtenidos con otros especímenes pero sin adición. La incorporación de fibra y mucílago de Nopal OFI a materiales base CP puede ser adecuada para la formación de biomateriales de Weddellita y Wewhellita, que son cristales de oxalato de calcio, pudiendo contribuir a la densificación de la matriz cementicia, a la disminución de penetración de iones despasivantes y al incremento de la durabilidad. Incorporando OFI y MZ a materiales base CP, se modificaron los tiempos de fraguado, incrementándolos. Se analizaron muestras en el microscopio electrónico de barrido (SEM en sus siglas en inglés) y por espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS en sus siglas en inglés). A varias de las mezclas estudiadas se les realizaron pruebas no destructivas: densidad, gravedad específica, absorción capilar, porosidad total, congelamiento/deshielo, carbonatación, penetración de cloruros, adherencia, solubilidad, velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, entre otras, y destructivas: compresión, tensión directa e indirecta, flexión, intemperismo acelerado por ataque de sulfato de sodio, permeabilidad de cloruros. Este tema es tan interesante, actual, sustentable, económico y los resultados han sido prometedores, por lo que seguramente seguirá vigente y se continuará investigándose con otras variables. El nuevo conocimiento generado sienta las bases de futuras investigaciones.

(**Palabras clave:** Concreto hidráulico, Mortero hidráulico, Corrosión, Durabilidad, Nopal, Almidón de Maíz, Vida útil, Pruebas destructivas y no destructivas)

Nomenclatura utilizada en este trabajo

Nombre	Nomenclatura
Cemento Portland	CP
Nopal, Cactus Opuntia ficus-indica	OFI
Almidón de Maíz, Zea mays	MZ
Resistencia a compresión simple	fc
Resistencia a tensión directa	ft
Resistencia a tensión indirecta	fti
Resistencia a flexión o módulo de ruptura	MR
Resistividad eléctrica húmeda	RE
Velocidad de pulso ultrasónico	VPU
Mortero con mucílago de Nopal	MN
Mortero con proporción 1:2, Nopal:Agua	MN 1:2
Mortero con proporción 1:3, Nopal: Agua	MN 1:3
Porosidad Total	PT
Densidad	D
Fraguado inicial	FI
Fraguado final	FF
Fibra de Nopal, Cactus Opuntia ficus-indica	CF o FN
Permeabilidad rápida de cloruros	PRC
Porosidad efectiva	PE
Absorción capilar	S
Masa volumétrica seca suelta	MVSS
Masa volumétrica seca varillada	MVSV

SUMMARY

To increase the durability of construction materials and reduce corrosion, it is proposed to study the effect of incorporating Portland cement (CP) based on two biopolymers: Nopal, *Cactus Opuntia ficus-indica* (OFI) and, marginally, Corn Starch, *Zea mays* (MZ). The incorporation of OFI is done in solid form as well as in fiber and in liquid form, such as mucilage, either in addition or as a partial substitution of the CP, in concretes and mortars. Combined with OFI, the incorporation of MZ in starch (powder) is also studied, as a biopolymer that can improve the mechanical properties and durability of CP base mortars. Several laboratory tests were performed on mortar and concrete specimens incorporating OFI to CP base materials, at different ages, contrasting results obtained with other specimens, but without addition. The incorporation of fiber and mucilage of Nopal OFI to CP base materials, may be suitable for the formation of biominerals of Weddellite y Wewhellite, which are crystals of calcium oxalate, contributing to the densification of the cement matrix, decreasing the penetration of despassing ions, increasing the durability. Incorporating OFI and MZ to CP base materials, the setting times were modified, increasing them. Samples were analyzed in the scanning electron microscope (SEM) and by X-ray dispersive energy spectroscopy (EDS). Several of the materials studied were non-destructive tests: density, specific gravity, capillary absorption, total porosity, freezing / thawing, carbonation, chloride penetration, adhesion, solubility, ultrasonic pulse speed, electrical resistivity, among others, and destructive: compression, direct and indirect tension, bending, weathering accelerated by sodium sulphate attack, chloride permeability. This topic is so interesting, current, sustainable, economic and the results have been promising, so it will surely continue in force and research will continue with other variables. The new knowledge generated, the basis for future research.

(Key words: Hydraulic concrete, Hydraulic mortar, Corrosion, Durability, Nopal, Corn starch, Shelf life, Destructive and non-destructive tests)

DEDICATORIAS

A Dios.

A la Virgen.

A mi amada esposa Elia Mercedes, mi compañera de vida, de lucha. Por su amor incondicional. Por ser la madre de mis hijos. Por ayudarme, impulsarme y alentarme siempre con gran entusiasmo, energía y optimismo. Eres un ejemplo a seguir. Eres mi roca, una luchadora incansable. Eres la persona que más admiro. Tú y yo somos uno mismo.

A mis amados hijos Wilfrido, Eduardo y Elia María, que han sido el motor para hacer lo que hemos logrado junto con Elia Mercedes, su mamá. Estoy muy orgulloso de Ustedes. Dios nos siga bendiciendo.

A mis papás, Gregorio (+) y María (+), por su gran sacrificio y ejemplo.

A Doña Elia Angélica (+) y a Don Servio (+), porque siempre me aceptaron. Gran ejemplo de personas.

A mis hermanos y sus familias: Rocío, Ricardo, Armando, Jorge y Cuauhtémoc (+). Con cariño y admiración.

A mis cuñadas y sus familias, Lorena y Geraldina. Gracias por haberme aceptado.

A Mayo, nuestra amiga, compañera y colaboradora de muchos años. Muchas gracias por su bondad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, por darme a mi esposa, hijos e hija. Por darme salud, amor, bienes y trabajo. Por permitirme llegar a este punto. Por permitirme sentirme pleno.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por ser una noble institución educativa de alta calidad, que me permitió ser estudiante, profesor y director de mi querida Facultad de Ingeniería Civil. Porque ahí estudió mi esposa y hermanos, y recibe con los brazos abiertos a todos los que desean superarse.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser una noble Institución educativa de alta calidad, que me permitió lograr uno de mis más añorados sueños.

Al Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, por aceptar ser mi director de Tesis, por ser ejemplo de capacidad, de constancia, por su gran ayuda y apoyo en la elaboración de este trabajo.

A la Dra. Angélica del Valle Moreno, por impulsarme, por apoyarme siempre, y por brindarme incondicionalmente sus amplios conocimientos para elaborar este documento.

A sínodo doctoral: Dr. Carlos Santiago López Cajún, Juan Carlos Jáuregui Correa, José Luis Reyes Araiza y Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, todos Investigadores de gran capacidad, por sus importantes aportaciones y acertadas observaciones, que lograron mejorar substancialmente este trabajo.

A todos mis alumnos que aportaron, cada uno, parte de sus investigaciones de tesis, para conformar y realizar este trabajo: Alfonso Díaz P., Arturo Zalapa D., Cipriano Bernabé R., Edwin Rojas G., Elizabeth Contreras M., Estaban Brito C., Fabián López R., Fidel Bautista L., José Alberto Guzmán T., Judith Alejandra Velázquez P., Marco Antonio Mondragón O., Marco Antonio Navarrete S., Marco Ariel Villanueva, Mauricio Arreola Sánchez, Noel Díaz González, Ramón A. Figueroa C., Rosalía Ruiz Ruiz, Sandra Del Carme Argüello Hernández, Sergio Medina Olvera, Sergio Jacobo Jacobo y Víctor Hugo Blancas Herrera.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA	II
RESUMEN	III
SUMMARY	V
DEDICATORIAS	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
INDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
OBJETIVOS	XXI
Objetivos generales.	XXI
Objetivos particulares.	XXI
HIPÓTESIS	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO 2. ESTADO-DEL-ARTE.....	6
2.1. Antecedentes históricos de los cementos.	6
2.2. El concreto hidráulico.	6
2.3. Cemento Portland.	10
2.3.1. Clasificación de los cementos.....	13
2.4. Agregados pétreos.....	16
2.5. Agua.....	17
2.6. Aditivos.	19
2.7. Adiciones.	19
2.8. El Nopal.	20
2.9. El Maíz.	23

2.10. Acero.....	26
2.11. Inicios del concreto armado.	27
2.12. Morteros.....	28
2.13. El problema de la corrosión en la construcción.....	30
2.14. Causas del deterioro de estructuras.	30
2.15. Costos debidos a la corrosión.....	31
2.16. Protección que otorga el concreto al acero de refuerzo.....	32
2.17. Propuestas de solución.....	32
CAPÍTULO 3. CORROSIÓN Y DURABILIDAD.....	35
3.1. Principios generales de la corrosión	35
3.1.1. Corrosión electroquímica.	37
3.2. Celda de corrosión.....	37
3.2.1. Ánodo.	37
3.2.1. Cátodo.	38
3.2.3. Conductor eléctrico.....	39
3.2.4. Electrolito.....	39
3.3.- Potencial electroquímico.....	39
3.3.1. Diagramas de Pourbaix o diagramas de estabilidad termodinámica. 39	
3.4.- Corrosión de estructuras de concreto	40
3.5.- Factores que afectan y desencadenan la corrosión.....	48
3.5.1.- Dosificación.	48
3.5.2.- Compacidad y homogeneidad.	48
3.5.2.- Espesor del recubrimiento del concreto.....	49
3.5.3.- Efecto del oxígeno.....	49

3.5.4.- Efecto del agua.....	50
3.5.5.- Iones despasivantes.....	50
3.5.6.- Cloruros.....	50
3.5.7.- Sulfatos.....	51
3.5.8.- Carbonatación.....	52
3.6.- Tipos de corrosión.....	53
3.6.1.- Corrosión uniforme o generalizada.....	53
3.6.2.- Corrosión galvánica.....	54
3.6.3.- Corrosión localizada.....	55
3.6.4.- Corrosión por picaduras.....	55
3.6.5.- Corrosión en espacios confinados.....	56
3.6.6.- Corrosión bajo tensión.....	57
3.7. Vida útil de las estructuras.....	57
3.8. Principales causas de problemas de durabilidad en estructuras.....	58
3.9. Agentes influyentes en la durabilidad de estructuras.....	59
CAPÍTULO 4. MATERIALES.....	60
4.1. Cemento utilizado.....	60
4.2. Arena utilizada.....	65
4.2.1. Arena de río.....	65
4.2.2. Arena volcánica.....	67
4.3. Grava utilizada.....	68
4.3.1. Grava Triturada.....	69
4.3.2. Grava de cantos redondeados.....	70
4.4. Agua utilizada.....	70

4.5. Nopal, Opuntia ficus-indica utilizado	71
4.5.1. Mucílago de Nopal	71
4.5.2. Fibras deshidratadas de Cactus Opuntia ficus-indica	76
4.6. Almidón de Maíz utilizado	77
4.6.1. Fécula de maíz utilizada en la investigación	77
4.7. Aditivo fluidificante utilizado.	78
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	80
5.1. Pruebas no destructivas.....	80
5.1.1 Densidad.....	80
5.1.2. Resistividad eléctrica	82
5.1.3. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	83
5.1.4. Módulo de elasticidad dinámico	85
5.2. Pruebas destructivas.....	85
5.2.1. Resistencia a la compresión simple.....	85
5.2.2. Resistencia a la flexión	86
5.2.3. Resistencia a la tensión directa	88
5.2.4. Resistencia a la tensión indirecta	89
Adherencia.....	91
5.3. Pruebas de durabilidad	92
5.3.1. Determinación de la sanidad por medio de sulfato de sodio.....	93
5.3.2. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros	96
5.3.3. Ciclos acelerados de hielo-deshielo en prismas de 6cm x 6cm x 24cm	
99	
5.4. Módulo de elasticidad dinámico	101

5.5. Carbonatación.....	102
5.6. Absorción capilar.....	104
5.7. Porosidad total	108
CAPÍTULO 6. EXPERIMENTACIÓN.....	109
6.1. Efecto de agregados con cantos redondeados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus Opuntia ficus-indica, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.	110
6.2. Efecto de agregados triturados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus Opuntia ficus-indica, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.	111
6.3. Efecto del mucílago de Nopal Opuntia ficus-indica en morteros de cemento Portland.....	112
6.4. Efecto de la fibra de Nopal y de la fécula de Almidón en el comportamiento físico-mecánico de morteros base CP.	115
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	118
7.1. Efecto de agregados con cantos redondeados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus Opuntia ficus-indica, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.	118
7.2. Efecto de agregados triturados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus Opuntia ficus-indica, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.	123
7.3. Efecto del mucílago de Nopal Opuntia ficus-indica en morteros de cemento Portland.....	130
Fotomicrografías del mucílago de Nopal Opuntia ficus-indica en morteros de cemento Portland a diferentes aumentos, tomadas con equipo	143
7.4. Efecto de la fibra de Nopal y de la fécula de Almidón en el comportamiento físico-mecánico de morteros base CP.	154
7.4.1.- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).	158

7.4.2.- Resistencia a la compresión simple.....	160
7.4.3.- Resistencia a la tensión por flexión en prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.	162
7.4.4.- Resistencia a la tensión directa en briquetas.	163
7.4.7.- Resistencia a la tensión por adherencia.	165
7.4.8.- Ataque por sulfatos.....	166
7.4.9.- Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros.....	170
7.4.10.- Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.	171
7.4.11.- Estimación de la profundidad de carbonatación.	173
7.4.12.- Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.	175
7.4.13.- Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos).	182
7.4.14.- Resumen de resultados anteriores.	183
7.4.15. Análisis de resultados a morteros con sustitución de FN.....	187
7.5. Discusión de resultados por fase experimental.....	192
7.6.- Discusión general de resultados.	199
7.7.- Consideraciones sobre las discusiones anteriores.	205
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	208
8.1. Efecto del Mucílago de Nopal OFI en materiales base CP para la construcción.....	208
8.2. Efecto de la Fibra de Nopal OFI en mezclas de concretos y morteros base CP.....	208

8.3. Efecto de la Fécula de Almidón de Maíz MZ más Fibra de Nopal OFI en mezclas de mortero base CP.....	209
Conclusiones	209
Bibliografía	214

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland.....	13
Tabla 2. Clasificación de los cementos según su uso.	14
Tabla 3. Clasificación de los cementos por su tipo.....	14
Tabla 4. Clasificación de los cementos por su resistencia.	15
Tabla 5. Clasificación por características especiales.	15
Tabla 6. Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero. ...	29
Tabla 7.-Tipos de Morteros, clasificación SCT.	30
Tabla 8.- Cantidad de energía requerida para obtener los metales en orden descendente de mayor a menor. Fuente: Genescá, Más allá de la herrumbre. ...	36
Tabla 9.- Composición química del cemento CPC. Fluorescencia de Rayos X. ...	63
Tabla 10.- Partes por millón (ppm) de elementos químicos presentes en el CPC 30R RS.....	64
Tabla 11.- Caracterización física de arena de río.....	65
Tabla 12.- Composición química de arena del río Huajúbaro.....	66
Tabla 13.- Determinación en ppm de elementos químicos presentes en la arena de Joyitas, por medio de Fluorescencia de Rayos X.....	68
Tabla 14.- Caracterización de la grava triturada.....	69
Tabla 15.- Determinación de elementos químicos y caracterización de grava triturada	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16.- Caracterización física del agregado grueso de cantos redondeados. ...	70
Tabla 17.- Caracterización química del agua utilizada para mezclas base cemento Pórtland.....	71
Tabla 18.- Parámetros de evaluación.....	83
Tabla 19.- Parámetros de evaluación en propagación de pulso ultrasónicos.....	84
Tabla 20.- Tipos de permeabilidad.	98
Tabla 21.- Fases de la Investigación.....	109
Tabla 22.- Resultados de ensayos a la arena del banco “Calderón” de Joyitas..	113
Tabla 23.- Ensayos realizados y número de especímenes.	116
Tabla 24.- Resumen de resultados de la caracterización de la arena “Joyitas”. .	117
Tabla 25.- Resultados prueba de fluidez para las distintas mezclas en estudio..	117
Tabla 26.- Correlación de resultados de resistencias mecánicas de los especímenes elaborados.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 27.- Resultados cualitativos de la resistencia a la tensión por adherencia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 28.- Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 180 días.....	170

Tabla 29.- Resultados de extrapolación para determinar el número de ciclos cuando RE=0.	195
Tabla 30.- Serie de datos, primer espécimen cúbico de la mezcla FN 0.5%.	198
Tabla 31.- Resultados de Porosidad Total en cubos a la edad de 90 y 180 días.	182
Tabla 32.- Resumen de resultados de pruebas realizadas al mortero fresco.	183
Tabla 33.- Resumen de resultado de pruebas no destructivas.	184
Tabla 34.- Resumen de resultados de pruebas destructivas.....	185
Tabla 35.- Resumen de resultados de pruebas por durabilidad.	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación en las proporciones de los materiales usados en el concreto sin aire incluido.....	7
Figura 2. Descripción de evolución en las estructuras de las pastas de cemento...8	
Figura 3. Almacenamiento de la materia prima para elaborar cemento Portland...11	
Figura 4. Prehomegenización materia prima, para elaborar cemento Portland.....11	
Figura 5. Depósitos de almacenamiento del material crudo prehomogenizado, antes de entrar al horno rotatorio.....12	
Figura 6. Horno rotatorio para obtención del Clínter de cemento.....12	
Figura 7. Horno rotatorio para calcinar y transformar químicamente la materia prima en Clínter de cemento.....13	
Figura 8. Efriador de Clínter de cemento.....12	
Figura 9. Molienda de Clínter y yeso.....13	
Figura 10. Laboratorio de control de calidad.....13	
Figura 11. Composición granulométrica de arenas y gravas, de acuerdo a Norma ASTM C33-03.....17	
Figura 12.- Nopal, <i>Opuntia ficus-indica</i>21	
Figura 13.- Datos estadísticos de la producción de Nopal en México durante el periodo 2000-2010.....23	
Figura 14.- Maíz, <i>Zea mays</i>24	
Figura 15.-Acero de refuerzo para concreto.....27	
Figura 16.- Métodos de protección de estructuras contra la corrosión.....34	
Figura 17.- Ciclo del acero, desde la extracción de minerales, producción hasta su regreso a su forma más estable.....35	
Figura 18.- Representación esquemática de la celda de corrosión.....37	
Figura 19.- Proceso de ionización de un metal que libera iones del mismo.....38	
Figura 20.- Diagrama de Pourbaix para el hierro en un sistema de H ₂ O.....40	
Figura 21.- Proceso electroquímico de corrosión de armaduras en el concreto....40	
Figura 22.- Principales causas que desencadenan la corrosión.....41	
Figura 23.- Sentido la corriente eléctrica del área anódica a catódica.....43	
Figura 24.- Flujo de corriente iónica y de electrones de área anódica a catódica .43	
Figura 25.- Proceso de reacciones anódica y catódica de manera esquemática...44	
Figura 26.- Descripción esquemática de la película de pasivación.....46	
Figura 27.- Espesores de recubrimientos en diferentes normas internacionales. .49	
Figura 28.- Equilibrios del ion cloruro en el concreto.....51	
Figura 29.- Carbonatación en el concreto.....53	
Figura 30.- Corrosión uniforme o generalizada.....54	
Figura 31.- Representación esquemática de la corrosión galvánica.....54	
Figura 32.- Representación esquemática de la corrosión localizada.....55	

Figura 33.- Descripción de la capa de pasivación atacada por iones de cloruro (Cl ⁻)	56
Figura 34.- Esquema de la evolución en el deterioro de acero de refuerzo recubierto con una película epóxica, así como del progreso de la corrosión	56
Figura 35.- Vida útil en la estructura en función de su resistencia y el tiempo.	58
Figura 36.- Causas que producen problemas de durabilidad.	59
Figura 37.- Tamaño de partícula del cemento CPC 30R RS.....	62
Figura 38.- Distribución de partículas del Cemento CPC 30R RS.....	62
Figura 39.- Difractograma del cemento CPC 30R RS.	63
Figura 40.- Forma de partículas del cemento CPC 30R RS.....	64
Figura 41.- Río Huajúmbaro, poblado El Cuervo, Mpio. Zinápecuaro, Michoacán.65	
Figura 42.- Forma de partículas de arena de Huajúmbaro.....	67
Figura 43.- Banco de materiales “Joyitas”, Mpio. de Morelia, Mich.	68
Figura 44.- Grava triturada del Banco de materiales “Supra”, Mpio. Tarímbaro, Michoacán	69
Figura 45.- Grava-arena del Río Huajúmbaro.	70
Figura 46.- Mucílago de Nopal. Fuente: https://asisucedec.com.mx/baba-nopal-sirve-purificar-agua/	73
Figura 47.- Representación esquemática para la gelificación de pectina de nopal en presencia de iones calcio.	75
Figura 48.- Forma de partícula de Nopal Opuntia ficus-indica.	76
Figura 49.- Fibra de nopal utilizada en la investigación, grado alimenticio.....	77
Figura 50.- Almidón o fécula de maíz utilizada en la investigación, grado alimenticio..	78
Figura 51.- Fluidificante CRISOTAN R-5 homogenizado en el agua para la elaboración de especímenes.....	79
Figura 52.- Determinación de la densidad.....	81
Figura 53.- Determinación de la resistividad eléctrica.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 54.- Equipo de velocidad de pulso ultrasónico.	84
Figura 55.- Compresión simple en morteros.	86
Figura 56.- Rotura de la probeta justo en la marca.	87
Figura 57.- Colocación de espécimen sobre la platina, lista para cargarla.	87
Figura 58.- . Ejecución de la prueba de tensión directa.	89
Figura 60.- Prueba de tensión indirecta	90
Figura 59.- Fallas de las probetas evitado que sea por impacto.	90
Figura 61.- Determinación de la resistencia al despegue con el quipo Pull-off	91
Figura 62.- Falla de la base donde el mortero está adherido.	92
Figura 63.- Posibles fallas de adherencia.	¡Error! Marcador no definido.

Figura 64.- Preparación de solución de sulfato de sodio.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 65 A.- .- Probetas de la mezcla MN 1:3, en el último ciclo, después de la prueba de compresión.....	95
Figura 66.- Probetas de la mezcla “Control” en el último ciclo, después de la prueba de compresión.....	95
Figura 67.- Esquema del programa PROOVE it, análisis de resultados.	98
Figura 69.- Evaluaciones de las probetas	100
Figura 70.- Probetas listas para ser introducidas al frigorífico durante 4 h.....	100
Figura 68.- Prueba de frecuencia de resonancia.....	100
Figura 71.- Probetas envueltas de hielo en el ciclo 6.	101
Figura 72.- Aplicación de fenolftaleína para verificar la carbonatación.	104
Figura 73.- Exposición de probetas a la intemperie.	104
Figura 74.- Sumergido de probetas para iniciar la prueba.	105
Figura 75.- Probetas en prueba de absorción capilar.....	105
Figura 76.- Toma lecturas de peso.....	106
Figura 77. Figura 64.- Fotomicrografía a 1000x, de mortero con CP sin adición.	115
Figura 78. Figura 65.- Fotomicrografía a 1000x, de mortero con CP adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3	115
Figura 79. Fotomicrografía a 2000x, de mortero con CP sin adición.....	115
Figura 80. A 10000x, sin adicionar	115
Figura 81. A 10000x, de mortero con CP adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3	115
Figura 82. A 1000x MA.....	115
Figura 83. Ma a 5000x	115
Figura 84.- Resistividad eléctrica húmeda para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros.....	126
Figura 85.- Velocidad de Pulso Ultrasónico para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros...	127
Figura 86.- . Resistencia a la flexión (MR) para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para vigas.	128
Figura 87.- Velocidad de pulso ultrasónico para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para vigas.	129
Figura 88.- Resistencia a la compresión para morteros con Mucílago de Cactus opuntia en dos concentraciones y su control, para cubos.	130
Figura 89.- Módulo de ruptura para morteros con Mucílago de Cactus opuntia en dos concentraciones y su control, para vigas.....	131
Figura 90.- Resistividad eléctrica húmeda para morteros con Mucílago Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cubos.....	132

Figura 91.- Resistividad eléctrica húmeda para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cilindros.	133
Figura 92.- Resistividad eléctrica húmeda para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para vigas.	134
Figura 93.- Resistividad eléctrica húmeda para los controles de morteros con Mucílago de Nopal OFI, en función del tiempo, para cubos, cilindros y vigas. Sin incorporar adiciones.	135
Figura 94.- VPU para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cubos.	136
Figura 95.- VPU para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cilindros.	137
Figura 96.- VPU para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para vigas.	138
Figura 97.- VPU para los controles de morteros con Mucílago de cactus opuntia, en función del tiempo, para cubos, cilindros y vigas.	139
Figura 98.- Resistencia a la Tensión Indirecta a las distintas edades, para morteros con Mucílago de Cactus opuntia en dos concentraciones y su control, para cilindros.	140
Figura 99.- Resistencia a la tensión directa a las distintas edades, para morteros con Mucílago de Nopal OFI y su control, para briquetas.	141
Figura 100.- Porosidad total a las diferentes edades para morteros con Mucílago de cactus opuntia y su control, para cubos.	142
Figura 103.- Fotomicrografía a 2000x, de mortero con CP, adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3	143
Figura 104.- Fotomicrografía a 2000x, de mortero con CP sin adición.	143
Figura 101.- Fotomicrografía a 1000x, de mortero con CP sin adición.	143
Figura 112.- Análisis de muestra MN 1:3, en MEB.	147
Figura 105.- Análisis Elemental por EDS de una muestra de Mortero MN 1:3.	148
Figura 113.- Resultados de resistencia a la tensión por adherencia a las edades de 120 y 180 días.	166
Figura 117.- Velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.	169

OBJETIVOS

Objetivos generales.

Determinar el efecto que tiene la incorporación, como adición y como sustitución parcial a Cemento Portland, CP, del Nopal OFI, en forma sólida (fibra) y líquida (mucílago), con diferentes porcentajes y para diversas edades, en materiales base CP, morteros y concretos, para mejorar las propiedades físicas y mecánicas y aumentar la durabilidad de los mismos. Marginalmente y con el mismo objetivo, estudiar la sustitución parcial del CP por Almidón de Maíz en fécula, MZ. Analizar el efecto de la combinación de ambos materiales.

Objetivos particulares.

1.- Determinar el efecto de la adición de fibra de Nopal OFI al 2% de la masa del cemento Portland en la durabilidad de concretos, a diferentes edades, con agregados gruesos de cantos redondeados, de río, comparando resultados de resistencia a compresión simple, tensión indirecta, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, y flexión en vigas, para comparar resultados contra controles sin adición.

2.- Encontrar el efecto de la adición de fibra de Nopal OFI al 2% de la masa del cemento Portland a diferentes edades, en la durabilidad de concretos, a diferentes edades, con agregados gruesos triturados y agregados finos volcánicos. Comparar contra controles sin adición. Se realizan pruebas de compresión, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica, a cilindros; las vigas se sometieron a pruebas de resistencia a flexión.

3.- Determinar el efecto del mucílago de Nopal OFI en morteros base cemento Portland. Realizar dos mezclas con proporciones en peso 1:2 y 1:3 de Nopal:Agua, así como mezcla Control. Realizar pruebas a diferentes edades: 7,14,28,45, 90,120,150 y 300 días. Elaborar diversos especímenes para los

ensayos correspondientes (cubos, cilindros, briquetas y vigas). Emplear arena volcánica negra y cemento Portland. Realizar pruebas destructivas de compresión a cubos, de tensión indirecta a cilindros, así como de tensión directa a briquetas y de flexión a vigas. Las pruebas no destructivas son: porosidad total, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico.

4.- Determinar el efecto de la sustitución de la masa de cemento Portland CP, a diversas edades, por 0.50%, 1.0% de fibra de Nopal OFI, y de 0.50% de fibra de Nopal OFI combinada con 2.0% de Almidón de Maíz MZ, en la durabilidad de morteros, por medio de especímenes como cubos, briquetas y vigas. Emplear cemento Portland. Utilizar arena volcánica natural. Realizar pruebas de densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y frecuencia de resonancia. Además de compresión, tensión directa, tensión indirecta, flexión y adherencia. Ataque por sulfatos, carbonatación, penetración de cloruros, congelamiento y deshielo, absorción capilar y porosidad total.

HIPÓTESIS

Se considera que el concreto hidráulico elaborado con cemento Portland, debe de tener una adecuada durabilidad, aparte de su resistencia mecánica. El concreto armado contiene poros vacíos o poros capilares que transportan líquidos y gases dentro de su masa, por los cuales pueden penetrar agentes agresivos como el ión cloruro y el gas dióxido de carbono o azufre, y los sulfatos provenientes del medio ambiente de exposición, que pueden detonar la corrosión en el refuerzo. Incorporando biomateriales como fibra o mucílago de Nopal y fécula de Maíz a las mezclas, se forman productos de reacción, los que densifican la matriz cementicia, al cristalizarse los biopolímeros en adición o sustitución parcial del cemento Portland; entre los productos que pueden formarse están los biominerales de Weddellite y Wewhellite, que cristalizan como oxalatos de calcio, aumentando así la durabilidad de las mezclas, ya que los vacíos son llenados por estos productos de reacción entre el cemento Portland y los biopolímeros incorporados.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad de estructuras de concreto reforzado es un tema que ha tomado gran importancia recientemente. Ahora los reglamentos de construcción en México están considerando, cada vez con mayor intensidad, el diseño por durabilidad, que garantice a los usuarios la seguridad que merecen y las inversiones económicas realizadas (ONNCCE-NMX-C 530, 2018). La corrosión es un fenómeno electroquímico que afecta, entre otros, a estructuras de concreto reforzado. Mundialmente los países erogaron cerca del 3.5 % de su producto interno bruto, para solucionar problemas de corrosión. Solo en los EE.UU. se gastan anualmente 300,000 millones de dólares por este concepto en costos directos. El cemento Portland (CP) para elaborar concreto hidráulico, es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, utilizándose en la construcción de infraestructura, edificación de obras civiles y militares, generando alta contaminación en su fabricación, emitiéndose altos índices de CO₂ a la atmósfera.

La corrosión es la causa general de la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales metálicos naturales o fabricados por el hombre. Si bien esta fuerza destructiva ha existido siempre, no se le ha prestado atención hasta los tiempos modernos, como efecto de los avances de la civilización en general y de la técnica en particular. Aproximadamente el 25 % de la producción mundial de acero es destruida por la corrosión, que constituye el mayor despilfarro en que incurre la civilización moderna (Genescá, 1999). Ante esta situación, especialistas, ingenieros y personas relacionadas con el tema, han realizado grandes esfuerzos por entender qué es la corrosión y cómo brindar mayor durabilidad a los materiales. En los últimos años se presenta la filosofía del diseño por durabilidad, una herramienta y concepto tecnológico que bien aplicado, puede conducir a la industria de la construcción a tener un mejor desempeño y optimización de materiales durante el siglo XXI, logrando con esto construir estructuras con una mayor vida útil y menores costos de mantenimiento, con la finalidad de que la industria de la construcción continúe

siendo el índice del desarrollo sustentable de nuestro país (Mendoza-Escobedo, 2006). Para el tema que nos ocupa, y que es aumentar la durabilidad de estructuras construidas con materiales base CP, sujetas a condiciones de agresividad atmosférica, los estudiosos han analizado y propuesto varias formas de enfrentar la situación: mejorar la “Tecnología del Concreto”, proponiendo más y mejores métodos de diseño de mezclas, que determinen las proporciones correctas entre los diversos materiales componentes, y recalculando la cantidad de agua que permita las más bajas relaciones agua/cemento, que permita realizar de manera práctica los colados en obra, contemplando desde utilizar agregados pétreos de óptima calidad, cementos Portland de características especiales, aditivos y adiciones al concreto hidráulico que modifiquen su comportamiento en estado fresco y endurecido. También se ha propuesto el realizar el colado del concreto, contemplando las condiciones físicas del entorno atmosférico; el tipo, dimensión, proporción y geometría del elemento por colar, así como de la densidad de armados, contemplando lineamientos y recomendaciones sobre la adecuada consistencia de las mezclas en estado fresco, los tiempos de fraguado, la vibración precisa que expulse el aire atrapado, pero que mantenga la buena consistencia del material. Igualmente se han precisado las mejores formas de realizar el acabado a las superficies del elemento ya colado, así como los procedimientos de curado más eficientes, que garanticen la menor retracción térmica del concreto colado; las formas de mantener a la estructura en condiciones de servicio han sido también estudiadas y propuestas, para optimizar los recursos invertidos y otorgar la seguridad que los usuarios de las estructuras merecen. En otras líneas de investigación se han propuesto la utilización de aceros llamados inoxidables, que son aleaciones del Hierro con elementos como el Cromo, Níquel y Molibdeno que incrementan notablemente la resistencia de dichas aleaciones a degradarse químicamente. También se ha propuesto aislar físicamente el metal del medio en que se encuentra expuesto, pudiendo ser con recubrimientos aislantes como pinturas anticorrosivas, epóxicas o metálicas (galvanizados). Debido a que los procesos de corrosión son en esencia electroquímicos, que son transformaciones

químicas que se llevan a cabo en presencia de diferencias de potencial eléctrico, se puede controlar la velocidad de corrosión de un metal al modificar las diferencias de potencial eléctrico existentes; las técnicas que intervienen son llamadas sistemas de protección catódica y anódica. De la misma manera se han propuesto los llamados inhibidores de corrosión, que son sustancias orgánicas e inorgánicas que se aplican a la superficie de los metales (Genescá J. y Ávila J, 1999).

Algunos investigadores han considerado el uso de los aminoácidos (alanina, glicina y leucina) como inhibidores de corrosión, para acero al carbono en ácido clorhídrico (Ashassi-Sorkhabi, 2004). Se han probado aminoácidos naturales, como inhibidores de corrosión en diferentes laboratorios de todo el mundo (Ashassi-Sorkhabi, 2004); (El-Etre, 2003). Los extractos de algunas plantas comunes y sus subproductos (hojas, semillas, cáscaras de frutas), contienen diferentes compuestos orgánicos como aminoácidos, alcaloides, taninos, etc. (Saleh R. M. Ismail, 1983). De éstos, los extraídos de plantas de cactus se encuentran entre los más prometedores (El-Etre, 2003); (Torres-Acosta A. M.-M., 2005); (Torres-Acosta A. , 2007) ; (Torres-Acosta A. M.-M.-G., 2012). Entre las propuestas se considera el Nopal OFI, una planta que crece en grandes matorrales en ambientes semiáridos y áridos. Se ha visto que el extracto de OFI aumenta la plasticidad de morteros, mejora la absorción de agua y la resistencia al congelamiento, siendo que el Hidróxido de Calcio producido por la hidratación del CP interactúa con los componentes del extracto de OFI, polisacáridos o proteínas y forma complejos compuestos (Chandra S, 1998). A pesar de que se han realizado aplicaciones exitosas de estas adiciones en materiales base cemento, no existe información completa sobre cuáles son las modificaciones que se producen en la microestructura o en los productos de hidratación del cemento (Hernández E.F. et al, 2017) También se ha propuesto al Almidón de Maíz, como biopolímero, para elaborar un novedoso mortero como material de construcción, siendo éste ligero y biodegradable (Y. Kulshreshtha, 2017).

En el presente trabajo se ha propuesto como línea de investigación, la incorporación dos biopolímeros: el Nopal OFI y el Almidón de Maíz MZ, así como una combinación de estos materiales verdes, para aumentar la durabilidad de materiales base CP, con la finalidad de atenuar la penetración de iones despasivantes. Se pretende incrementar las propiedades mecánicas, aumentar los tiempos de fraguado, disminuir la permeabilidad, densificando la matriz de morteros y concretos, incorporando a las mezclas Nopal OFI, como adición y sustitución parcial del CP, tanto en forma sólida, como fibra deshidratada, y en forma líquida, como mucílago, así como sustituyendo parcialmente el cemento Portland CP por fécula (polvo fino) de Almidón de Maíz MZ, elaborando especímenes diversos, sometidos a pruebas no destructivas y destructivas, comparando resultados contra especímenes sin adiciones a diversas edades. Se analizan muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) para determinar la acción de estas adiciones naturales en la microestructura de materiales base CP.

CAPÍTULO 2. ESTADO-DEL-ARTE.

2.1. Antecedentes históricos de los cementos.

Probablemente, los antiguos romanos fueron los primeros que utilizaron el concreto -palabra que proviene del latín- basados en cemento hidráulico, un material que endurece con el agua. Esta propiedad y otra relacionada con el hecho de no sufrir cambio químico por la acción del agua en su vida posterior, son las más importantes y las que contribuyeron a la difusión del empleo del concreto como material de construcción. El cemento romano cayó en desuso y no fue hasta 1824 cuando el cemento moderno, conocido como cemento Portland, fue patentado por Joseph Aspdin, un inglés constructor de Leeds. Se da el nombre de Portland a un cemento obtenido por la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales asociados con sílice, alúmina y óxido de hierro, que son calentados a temperaturas que provocan que se formen escorias, también llamado Clinker, para posteriormente moler el producto. Ningún otro material, aparte del yeso, agua y agentes pulverizantes pueden añadirse después del quemado (A.M. Neville, 1998).

2.2. El concreto hidráulico.

El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante, que normalmente es cemento Portland, un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Instituto del Concreto, 1997). El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua (Kosmatha y Panarese, 1992). De esta manera se concluye que el concreto es una roca artificial hecha por el hombre que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión y está elaborado con cemento,

agregados gruesos y finos, agua y en ocasiones aditivos. La palabra concreto viene básicamente del latín "Concretus" que significa compuesto. Consiste en una mezcla de agregados que generalmente se clasifican en dos tipos: finos y gruesos. Los agregados finos son las arenas que pueden ser naturales o producto de trituración cuyas partículas tienen menos de 1/4" de tamaño; los agregados gruesos son los que tienen más de 1/4". La pasta se compone de cemento, agua y a veces de aire incluido. Generalmente esta pasta constituye del 25% al 40% del volumen total del concreto.

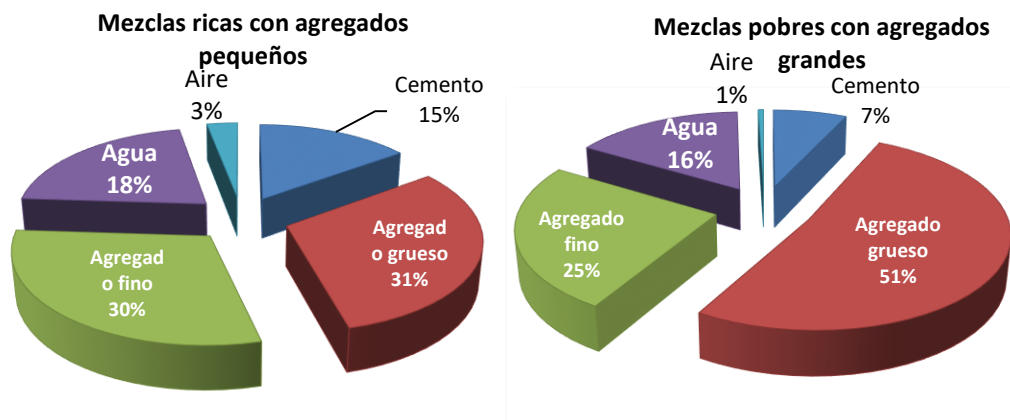


Figura 1. Variación en las proporciones de los materiales usados en el concreto sin aire incluido (Kosmatka et al, 2004), (Medina Olvera, S, 2009).

El concreto, es en un sentido general, un producto o masa conformada por un medio aglutinador. Generalmente es el producto de la reacción entre el cemento hidráulico y agua. Hoy en día existe una diversa variedad de concretos los cuales son elaborados con diferentes tipos de cementos: puzolanas, cenizas, escorias de alto horno, como ingredientes para mezcla, polímeros y fibras, entre otros (Neville A. M., 1998).

La estructura en la pasta de cemento se desarrolla como resultado de una reacción química generada por la mezcla entre el cemento Portland y el agua. El concreto entra en una etapa temprana de hidratación, después que los límites externos de la masa, son más o menos fijos (Bentur Arnor, 1997).

Como muchas reacciones químicas, la hidratación de los compuestos del cemento es una reacción química exotérmica (Neville A. M., 1998).

El volumen de los productos hidratados que se forman como resultado de las reacciones de hidratación, es considerablemente mayor que el volumen de los granos de cemento de los cuales se derivan. En consecuencia, la continuación de la hidratación tiende a ser como un efecto de relleno progresivo como se muestra en la Figura 2.

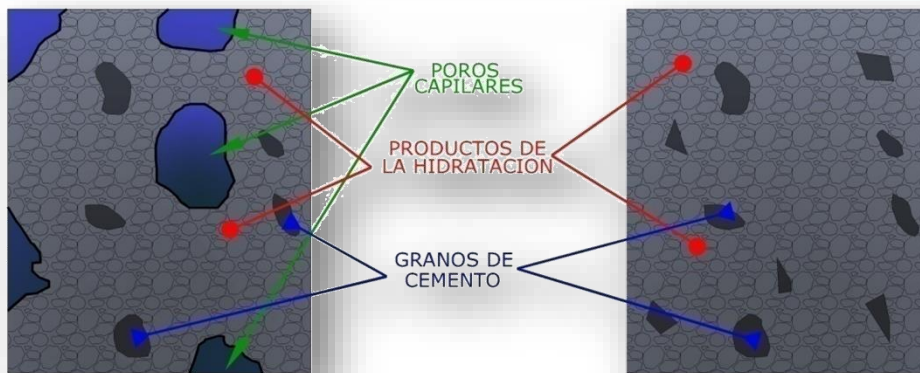


Figura 2. Descripción de la evolución en las estructuras de las pastas de cemento (Bentur Arnor, 1997), (Medina Olvera, S, 2009).

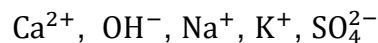
La porosidad de la pasta sigue disminuyendo como producto del proceso de hidratación. Sin embargo, es habitual ver dos tipos diferentes de poros: los poros más grandes que son llamados “poros capilares” y los poros que son mucho más finos los cuales son llamados “poros de gel”, estos se desarrollan dentro de las partículas que se crean como producto de la hidratación o más bien que se producen entre ellos (Bentur Arnor, 1997).

Aparte de los “poros capilares” y los “poros de gel” se puede encontrar un tercer tipo de poros los cuales se producen al momento de la elaboración del concreto son de un tamaño mayor y estos son asociados al contenido de aire atrapado y a una mala compactación durante la colocación del concreto fresco.

La importancia de la relación a/c radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua estará más compacta, por lo que tendrá menos cantidad de poros interconectados, es decir, el concreto será más impermeable a líquidos y gases. Esto impedirá la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión; lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por lo tanto tendrá mayor porosidad y será más permeable (Del Valle Moreno Angélica, 2001).

El concreto es un material poroso, por lo que se puede hablar de la existencia de dos fases: una fase sólida de minerales hidratados y una fase líquida contenida en el interior de los poros, también conocida como solución de poro.

El agua que no reaccionó tiene características alcalinas debido a que en ella se disuelven los iones productos de las reacciones del cemento como son:



La resistencia mecánica del concreto se debe a las reacciones de hidratación del cemento. Los componentes del cemento se cristalizan progresivamente para formar un gel o pasta la cual rodea los agregados uniéndolos para producir un conglomerado. Tanto la resistencia mecánica como la permeabilidad del concreto están regidos por la relación agua-cemento, así cuanto más baja sea esta relación, más alta es la resistencia y menos permeable es el concreto (Castro et al, 1998); la relación entre relación a/c y resistencia mecánica en el concreto es inversamente proporcional.

Los productos de la hidratación del CP consisten principalmente en dos tipos: cristales relativamente grandes de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH}_2)]$ y unas pequeñas partículas (coloidales) de una composición bastante indefinida de un silicato de calcio hidratado que a menudo se indica de forma abreviada como un gel C-S-H. La composición promedio del gel C-S-H en la mayoría de los concretos es (Bentur Arnor, 1997):



Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro

del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

Puede definirse también al tiempo de fraguado inicial de una mezcla determinada, como el lapso de tiempo necesario para que la mezcla pase de un estado fluido a un estado sólido (Navarro Sánchez L.M. et al, 2007).

El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero débil a la tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural. El concreto sin refuerzo es un cerámico que presenta falla frágil. Para resistir tensiones, se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las solicitaciones de servicio. El acero restringe el desarrollo de grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto, y le confiere ductilidad y elasticidad al concreto reforzado.

El uso del refuerzo no está restringido a la finalidad anterior. También se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir deformaciones debidas a cargas de larga duración y para proporcionar un confinamiento lateral al concreto que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión (González Cuevas, 1977).

2.3. Cemento Portland.

Se da el nombre de Portland a un cemento obtenido por la mezcla de materiales -calcáreos como piedra caliza -(CaCO_3) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)- y una base de sílice y alúmina, como arcilla o esquistos. El proceso de elaboración consiste básicamente en moler las materias primas hasta lograr un polvo muy fino, mezclarlas perfectamente en proporciones establecidas y quemarlas en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de entre 1400°C a 1500°C , este material se

incrusta y se funde parcialmente hasta convertirse en escorias también conocidas con Clinker. Una vez fría dicha escoria, se muele para convertirse en un polvo muy fino y se le agrega un poco de yeso. Así se obtiene un cemento Portland comercial el cual se utiliza por todo el mundo (Neville A. M., 1998). Figuras 3 a 10.

Globalmente se pueden distinguir cuatro etapas en la fabricación del cemento: (UPRM, 2009)

- Extracción y triturado de la materia prima.
- Mezclado y reducción de la materia prima hasta una finura similar a un polvo muy fino.
- Cocción del material fino y transformación en escoria o Clinker.
- Molienda del Clinker con yeso y aditivos.

En resumen, el cemento comercial es elaborado básicamente a partir de:

1. Sulfato de calcio bi-hidratado (yeso).
2. Óxido de calcio (cal libre).
3. Magnesia (periclasa).
4. Álcalis.
5. Clinker.

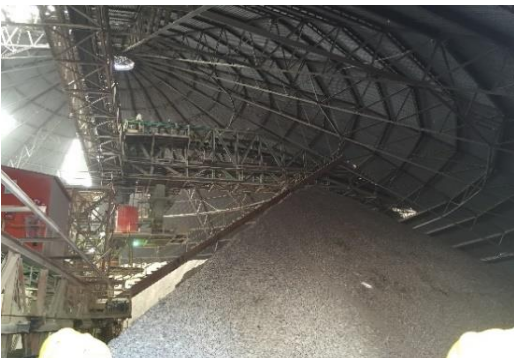


Figura 3. Almacenamiento de la materia prima para elaborar cemento Portland (Fuente propia).



Figura 4. Prehomegenización de la materia prima, para elaborar cemento Portland (Fuente propia).

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.



Figura 5. Depósitos de almacenamiento del material crudo prehomogenizado, antes de entrar al horno rotatorio (Fuente propia).



Figura 6. Horno rotatorio para obtención del Clínter de cemento (Fuente propia).



Figura 7. Horno rotatorio para calcinar y transformar químicamente la materia prima y Clínter de cemento (Fuente propia)



Figura 8. Efriador de Clínter de cemento (Fuente propia).



Figura 9. Molienda de Clínter y yeso para obtener cemento Portland (Fuente propia).



Figura 10. Laboratorio de control de calidad (Fuente propia).

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto (Del Valle Moreno Angélica, 2001).

Los componentes principales del cemento son cuatro y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland (Neville A. M., 1998).

Nombre del componente	Composición química	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Los silicatos, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (silicato tricálcico) y $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (silicato dicálcico), son los componentes más importantes y los causantes de la resistencia en la pasta hidratada de cemento.

Estos silicatos además contienen óxidos menores los cuales tienen efecto en los ordenamientos a nivel atómico, en la forma de los cristales y propiedades hidráulicas de los silicatos (Neville A. M., 1998).

La presencia de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcico), contribuye durante la etapa de elaboración del cemento, porque favorece la combinación de cal y sílice (Neville A. M., 1998).

2.3.1. Clasificación de los cementos.

En el mercado existe una variedad de cementos que se comercializan y estos se encuentran clasificados en las Tablas 2 a 5:

2.3.1.1. Según la Norma ASTM-C-150 (American Society for Testing and Materials).

Tabla 2. Clasificación de los cementos según su uso.

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 concretos con aguas negras domésticas concentradas.

2.3.1.2.- Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCEE-2017 la cual clasifica al cemento de acuerdo con tres aspectos:

- Tipo de cemento

Tabla 3. Clasificación de los cementos por su tipo.

CLASIFICACIÓN POR TIPO	
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	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.

- Clase resistente.

Resistencia normal.

Es la resistencia a la compresión a los 28 días, en Megapascales (N/mm²). La clase resistente de un cemento de acuerdo con la resistencia normal se indica por la designación del tipo de cemento, seguida por los valores 20, 30 ó 40.

Resistencia Rápida.

Es la resistencia a la compresión a los 3 días. Para especificar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia rápida se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia rápida para las clases 30 R y 40 R.

Tabla 4. Clasificación de los cementos por su resistencia.

CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN N/mm ²		
	3 DÍAS MÍNIMO	28 DÍAS	
		MÍNIMO	MÁXIMO
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

- Características especiales.

Tabla 5. Clasificación por características especiales.

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
RS	Resistente a los sulfatos.
BRA	Baja Reactividad Alcali-Agregado.
BCH	Bajo Calor de Hidratación.
B	Blanco.

2.4. Agregados pétreos.

Los agregados constituyen alrededor del 75% en volumen de una mezcla típica de concreto. El término agregado comprende las arenas, gravas naturales y la piedra triturada. Este término también se aplica para materiales especiales utilizados para producir concretos ligeros y pesados (S. Merrit, 1984).

Los agregados proporcionan al concreto mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad. Son de gran importancia en el concreto, ya que la calidad de estos se ve reflejada en la resistencia del concreto, además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto (Del Valle Moreno Angélica, 2001).

La limpieza, sanidad, resistencia y forma de las partículas son importantes en cualquier agregado. Los agregados se consideran limpios si están exentos de excesos de arcillas, limo, materia orgánica (S. Merrit, 1984).

El agregado no solo puede limitar la resistencia del concreto, sino que sus propiedades pueden afectar enormemente su durabilidad (Neville A. M., 1998).

Se han desarrollado varios procesos para mejorar la calidad de los agregados que no cumplen con las especificaciones deseadas, por ejemplo eliminar recubrimientos de las partículas o cambiar la graduación del agregado (S. Merrit, 1984).

Originalmente se consideraba que estos agregados eran inertes; que se utilizaban por razones económicas, sin embargo, ahora se piensa que no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en el desempeño del concreto (Del Valle Moreno Angélica, 2001).

Los agregados pétreos naturales, por su tamaño o granulometría, se clasifican generalmente en arenas (finos) y gravas (gruesos). Un agregado fino o arena es cualquier material que pasa el tamiz No. 4, es decir, un tamiz con cuatro aberturas por pulgada lineal. El material más grueso que éste, se clasifica como agregado grueso o grava. Cuando se desea una graduación óptima, los agregados se separan mediante tamizado, en dos o tres grupos para las arenas y en varios grupos de diferente tamaño para las gravas. Con posterioridad éstos pueden

combinarse de acuerdo a tablas de graduación que permiten un agregado densamente empaquetado. El tamaño máximo del agregado grueso para concreto reforzado está controlado por la facilidad con que éste debe entrar en los espacios entre barras de refuerzo. La norma ASTM C33 “Standard Specification for concrete aggregates” presenta los requisitos para agregados de buena calidad, Figura 11. Pueden venir de diferentes fuentes: naturales, artificiales. Los agregados artificiales son los producidos por el hombre: trozos de cerámicos, morteros y concretos triturados, ladrillos rotos, plásticos (expandidos, densos, ultradensos, aligerados, triturados, con morfología de fibras)

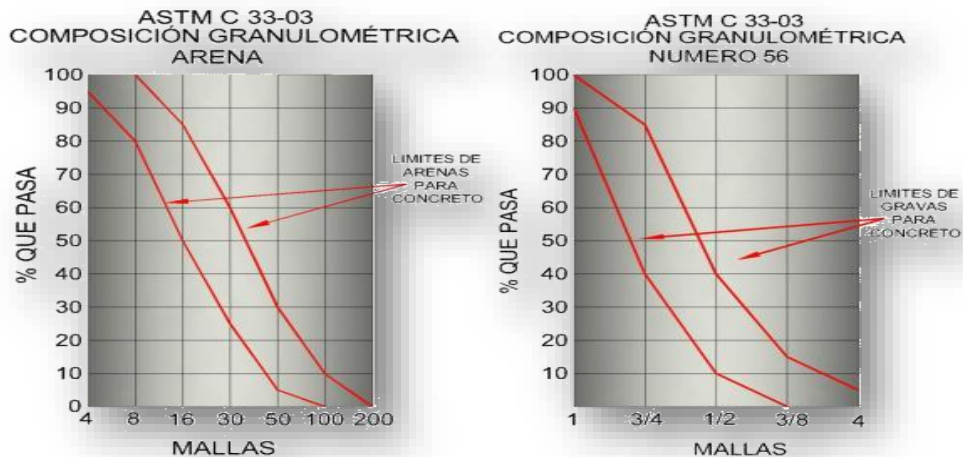


Figura 11. Composición granulométrica en arenas y gravas, ASTM C33-03. (Medina O.S., 2011)

2.5. Agua.

El agua es determinante en el concreto, desencadena la reacción química exotérmica, para formar gel, endurecer, proporcionar trabajabilidad, su relación con el cemento en peso es un valor índice para diseños de concreto por resistencia.

La calidad del agua que se utiliza para elaborar la mezcla representa un aspecto importante, ya que influye de manera significativa en el comportamiento y propiedades del concreto; el agua que se utiliza debe estar libre de impurezas, como: grasas, azúcares, aceites, ácidos y materia orgánica, ya que estos impiden o retardan la hidratación (López Celis R. P., 2006).

La estructura en la pasta de cemento se desarrolla como resultado de una reacción química generada por la mezcla entre el cemento Portland y el agua. El concreto entra en una etapa temprana de hidratación (Bentur Arnor, 1997).

La cantidad de agua necesaria para que se lleve a cabo completamente esta reacción química es alrededor de un 40% del peso del cemento. Un 23% de esta agua se combina químicamente para dar productos de hidratación y el resto se absorbe en la superficie del gel que se forma en los poros (Kosmatka et al, 2004).

La relación agua/cemento no es otra cosa que la cantidad de agua utilizada con respecto a la cantidad de cemento. Juega un papel muy importante en la preparación del concreto, ya que la mezcla debe ser lo suficientemente semifluida, para manejarla cómodamente.

La cantidad de agua añadida inicialmente a la mezcla de cemento y agregados para obtener un concreto fresco con trabajabilidad conveniente es siempre superior a la cantidad de agua necesaria para la hidratación completa. Este exceso de agua es el responsable del grado de porosidad y permeabilidad del concreto endurecido.

La importancia de la relación agua cemento radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua estará más compacta, por lo que tendrá menos cantidad de poros interconectados (que son permeables a líquidos y gases) en donde se aloje la humedad, esto impedirá la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión; lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por lo tanto mayor porosidad y mayor permeabilidad. Esto es de una importancia crítica para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto los elementos soporte (como el oxígeno) como los agentes iniciadores (ión cloruro) del ataque corrosivo, pueden difundir hacia el acero a través de la masa de concreto. La velocidad de difusión del oxígeno y de los iones cloruro en el concreto es menor cuando se reduce la relación agua/cemento y por lo tanto la porosidad (Del Valle Moreno Angélica, 2001).

La hidratación del cemento es la reacción entre las partículas del cemento y el agua, incluyendo procesos químicos y físicos. Las propiedades del concreto

fresco, como fraguado y endurecimiento son resultado directo de la hidratación [Li Zongjin, 2011].

2.6. Aditivos.

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante en mezclado, su función es modificar las propiedades de las mezclas de concreto tanto en estado fresco como endurecido. Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones (Steven H. Kostmatka, 2017). Debe tenerse cuidado al usar aditivos, especialmente aquéllos cuya composición se desconozca, aunque el fabricante atribuya cualidades superiores a su producto; es mejor utilizar solamente materiales de valor comprobado (Parker, 1983).

La norma ASTM C 494-11 describe materiales para ser utilizados como aditivos químicos a ser agregados a mezclas para el concreto de cemento hidráulico en obra para un propósito o propósitos particulares. Clasificándolos en ocho tipos:

TIPO A. Aditivos reductores de agua.

TIPO B. Aditivos retardantes.

TIPO C. Aditivos acelerantes.

TIPO D. Aditivos reductores de agua y retardantes.

TIPO E: Aditivos reductores de agua y acelerantes.

TIPO F. Aditivos reductores de agua de alto rango.

TIPO G. Aditivos reductores de agua de alto y retardantes.

TIPO S. Aditivos de comportamiento específico.

2.7. Adiciones.

Las adiciones al concreto son materiales de naturaleza inorgánica y/o orgánica que se destacan por sus características puzolánicas; finamente molidas pueden ser incorporadas al concreto para mejorar o modificar sus propiedades o dotarlo de características especiales. Son comunes las adiciones de Humo de sílice, Ceniza volante, Escoria de alto horno, que pueden incorporarse en distintos

porcentajes. A diferencia de los aditivos, que permiten obtener las propiedades deseadas, las Adiciones son productos, en el caso de ser de origen mineral, finamente divididos cuya incorporación a la mezcla tiene la finalidad de reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del CP, para formar tobermorita adicional, disminuyendo o eliminando los poros capilares e incrementando las resistencias mecánicas de la pasta y durabilidad de la misma, cumpliéndose la teoría de Feret sobre la relación inversa entre la porosidad y la resistencia del concreto (Cervantes, 2006). En el caso de Nopal OFI, ya sea como fibra deshidratada o como mucílago (coloide) y del Almidón de Maíz MZ, pueden considerarse como adiciones verdes, por su origen orgánico y la finalidad de que cumplan un papel ecológico.

2.8. El Nopal.

El Nopal pertenece al género *Opuntia*, al grupo Cacti que abarca cerca de 300 variedades (algunos con espinas otros sin ellas), un tipo común del cactus espinoso también conocido como higo indio, (*Opuntia Ficus-indica*, OFI), crece en grandes matorrales. Originario de México, ahora se cultiva en regiones del mediterráneo, en el sur y oeste de los EE.UU. y a lo largo de América Latina. Variedades de nopal se comercializan hoy en México, Chile, Argentina, Marruecos, Italia, parte de California, Texas, y Florida (Sáenz, 2004). El OFI se ha utilizado con éxito por siglos de varias maneras en todo el mundo. Los aztecas ya cultivaban la planta en México antes de que los españoles llegaran en el siglo dieciséis. Varias especies de Nopal se han empleado como fuente de aditivos a la producción de acabados base cal y en trabajos de conservación arquitectónica en América latina (Sáenz, 2004); (Bishop M.H., 1998); (Torres-Montes, 2005); (Cárdenas, 1998). Por ejemplo, una de las prácticas actualmente extensas de conservación es utilizar el residuo de agua hervida con cactus de Nopal OFI, comúnmente disponible en la producción de masilla de cal que se utiliza como una capa para proteger o reparar las iglesias o misiones de adobe en México y suroeste de América del sur (Bishop M.H., 1998); (Torres-Montes, 2005). Los análisis químicos e industriales del líquido

de Nopal llamado Mucílago, indican que contiene una gran cantidad de pectina y varios azúcares (Goycoolea, 2003). Varios mecanismos para observar las mejoras que resultaban de la adición de aditivos orgánicos naturales se han propuesto en la conservación y construcción con materiales base yeso, según lo presentado en la literatura (Bishop M.H., 1998); (Torres-Montes, 2005); (Cárdenas, 1998). Figura 12.



Figura 12.- Nopal, Opuntia ficus-indica

Fuente: <https://mejorconsalud.com/propiedades-curativas-del-nopal/>

El comportamiento del mucílago del nopal en materiales base cemento es poco conocido. Pocas son las investigaciones que estudian ambos elementos juntos, y la pregunta por contestar sobre el papel de las adiciones del nopal en pastas de cemento, mortero y concreto todavía existe. Se ha sugerido que el mucílago mejora las características físicas de las pastas de cemento y morteros (Chandra S, 1998); (Hernández-Zaragoza, 2003); (Torres-Acosta A. M.-M., 2005); (Martínez R. , 2005); (Celis-Mendoza, 2007) [6-10]. Por ejemplo en pastas de cemento disminuye la permeabilidad (Chandra S, 1998) [6] y aumenta la resistencia a la compresión (Hernández-Zaragoza, 2003); (Torres-Acosta A. M.-M., 2005); (Martínez R. , 2005).

Tal como se presenta en otros lugares, el Nopal contiene varios aminoácidos y azúcares (Sáenz, 2004); (Goycoolea, 2003); (Rodríguez-González, 2011) (Sáenz et al., 2004; Goycoolea y Cárdenas, 2003; Rodríguez et al., 2007). También contiene algunos minerales como calcio, potasio y sodio (Sáenz, 2004); (Goycoolea,

2003); (Rodríguez-González, 2011) (Sáenz et al., 2004; Goycoolea y Cárdenas, 2003; Rodríguez et al., 2007). La presencia de los minerales mencionados, indica que este producto botánico podría ser estable y no presentar una degradación típica a largo plazo, posiblemente debido a la presencia de elementos alcalinos. Asimismo, el nopal se ha convertido en un factor detonante de desarrollo en zonas rurales donde es explotada de forma inadecuada, dejándose perder gran parte de su potencial productivo y económico (Saravia Tasayco, 2010). El nopal se reproduce en climas donde exista buena insolación, cierta disponibilidad de agua y que el suelo no sea muy salino ni arenoso, su crecimiento óptimo se da en zonas áridas y semiáridas. En una hectárea se puede albergar entre 15 000 a 22 000 pencas. La producción de nopal ha permitido que grupos marginados obtengan empleo, se arraiguen en el campo, produzcan alimentos y generen ingresos para sus familias. En la actualidad, el nopal ocupa en México un área de más de 3 millones de ha, mayoritariamente silvestre, del cual se extraen un conjunto numeroso de productos con una amplia gama de aplicaciones (SINAREFI, 2016).

México es el país líder en la producción de nopal, por tener la mayor superficie bajo cultivo (10,400 ha.), el único país competidor es E.U.A. con una superficie mucho menor de 100 ha. México es el principal exportador mundial, exporta alrededor de 1,500 toneladas en fresco y unas 3,500 toneladas procesadas a E.U.A. y cantidades menores a otros países. En la producción de nopal mexicano participan 18 estados, con 10,400 ha en total, el Distrito Federal aporta el 72% de la superficie y casi el 80% de la producción. Milpa Alta, en el Distrito Federal, es la mayor y más antigua zona productora. El nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de México. Se producen 874.000 toneladas al año, con un rendimiento promedio de 67 ton/ha (Ramírez Arellanes, Cano Barrita, Julián Caballero, & Gómez Yáñez, 2012).



Figura 13.- Datos estadísticos de la producción de Nopal en México durante el periodo 2000-2010, SINAREFI (SIAP, 2012), (Arreola S.M., 2013).

La superficie sembrada y cosechada se ha mantenido en un ligero aumento durante el periodo 2000-2010 (Figura 13). En cuanto a la producción, ha tenido un aumento considerable en el mismo periodo, pasando de 404,459 toneladas en el año 2000, a 723,815 toneladas en año 2010, lo que representó un incremento en la tasa de crecimiento media anual (TCMA) del 5.43%, con un rendimiento promedio por hectárea de 57.45 toneladas.

2.9. El Maíz.

El Maíz, *Zea mays*, es otro producto emblemático de México, los mexicanos, al parecer en específico nuestros ancestros mayas, calentaban rocas sedimentarias (carbonato de calcio) en hogueras y las colocaban en bateas de madera donde estaba la comida para ingerirse, así se descubrió la nixtamalización del maíz; para evitar la pelagra. El maíz maduro (sazón) tiene almidón en el interior de sus granos. El almidón al contacto con agua caliente, se gelifica, el gel sirve para espesar líquidos, como ejemplo los atoles. El gel de maíz, conserva agua en sus azúcares que servirá para el curado interno del concreto o para liberar agua de forma gradual. Figura 14.



Figura 14.- Maíz, Zea mays. Fuente: <https://www.aarc.com.mx/2016/01/19/defienden-utofinanciamiento-del-maiz/>

2.9.1. Tipos y usos del almidón dentro de la construcción.

Los almidones comerciales se obtienen de las semillas de cereales, particularmente del maíz, el trigo, del arroz y de algunas raíces y tubérculos como de la papa o mandioca, clasificándose de la siguiente manera:

- Almidón de maíz
- Almidón de papa
- Almidón de trigo

Uno de los almidones más conocidos es la fécula de maíz, ésta proviene de los cereales, granos y harinas; rico en carbohidratos, se presenta en forma de pequeños gránulos, los cuales son relativamente densos e insolubles y sólo se hidratan de manera adecuada en agua muy fría. Es conocida como harina fina de maíz, almidón de maíz o maicena.

Conforme a lo que respecta el uso del almidón dentro de la construcción, se han realizado trabajos de investigación previos enfocados hacia el efecto de almidones y sus derivados en materiales con base cemento, ya que aquellos pueden actuar como aditivos modificadores de la reología. Estos aditivos han actuado como

espesantes y como reductores de agua. El uso de almidones como reductores de agua podría ser de especial interés, dado que son biodegradables y pueden ser incorporados en las mezclas en lugar de condensados de formaldehído-sulfonato de naftaleno (FDN) o plastificantes tipo policarboxilato (PC). La adición de almidones contribuiría, por lo tanto, a reducir los problemas medioambientales.

El peso molecular de un almidón concreto o de alguno de sus derivados parece ser determinante para su comportamiento: polímeros de alto peso molecular tienden a aglomerarse y a producir un efecto espesante en los morteros, mientras que derivados de bajo peso molecular pueden ser fácilmente adsorbidos sobre la superficie de las partículas de conglomerante, dando lugar a repulsiones estéricas (esto es, un efecto dispersante) que conduce a viscosidades más bajas. Teniendo como base la similitud entre almidones y derivados celulósicos se han dilucidado y ensayado diversos efectos de los almidones, tales como:

a).- Comportamiento espesante, que permite la utilización de almidones como aditivos mejoradores de la viscosidad.

b).- Estrechamente relacionado con ello, un efecto retenedor de agua, debido a que estos aditivos —con grupos funcionales hidrofílicos— son capaces de fijar agua en su estructura, reduciendo la cantidad de agua libre en la mezcla y produciendo un incremento en la viscosidad. Además, las cadenas laterales de estas moléculas pueden interactuar entre sí, contribuyendo a ulteriores aumentos de la viscosidad.

c).- Capacidad retardadora del fraguado, si bien el mecanismo de acción de este proceso hasta el momento no se ha aclarado completamente.

d).- Un efecto dispersante sobre las partículas de cemento, y comportamiento como plastificante. En ese sentido, se han señalado muchas ventajas relativas al uso de éteres de almidón como reductores de agua (en lugar de FDN o plastificantes tipo policarboxilato): reducción de problemas medioambientales, acción reductora de agua más intensa ya que el principal mecanismo de dispersión es una fuerte

repulsión estérica, y mejores propiedades reológicas de las pastas de cemento (Jacobo Jacobo S. , 2014).

2.10. Acero.

El uso de los metales por el hombre se hace de forma cotidiana; desde el momento en que se utiliza la regadera, los cubiertos, los medios de transporte como son carros, autobuses, hasta el lugar donde se vive. Por lo general, éste está formado de un esqueleto de concreto que se encuentra reforzado por varillas de acero. Por todo esto se puede decir que el hombre vive en una civilización basada en el uso de los metales (Genescá J. y Ávila J, 1999).

El acero al carbono, constituye el principal producto de los aceros que se producen, estimando que un 90% de la producción total producida mundialmente corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados. Estos aceros son también conocidos como aceros de construcción, La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro y el carbono que generalmente no supera el 1%, hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso, y hay otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente como son: azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno (IMCYC, 2006). Figura 15.

El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción o tensión, y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

El uso del acero de refuerzo ordinario es común en elementos de concreto. Este acero es muy útil para:

- Aumentar ductilidad.
- Aumentar resistencia.
- Resistir esfuerzos de tensión, compresión, momentos y cortante.
- Restringir agrietamientos.
- Reducir deformaciones.
- Confinar el concreto.



Figura 15.-Acero de refuerzo para concreto. Fuente: <http://spanish.structural-steelbuilding.com>

En los elementos de construcción elaborados a base de concreto reforzado es necesario que exista adherencia entre el concreto y las varillas de refuerzo, de manera que ambos materiales estén íntimamente ligados.

La adherencia o resistencia al deslizamiento del refuerzo tiene su origen en los fenómenos siguientes (González Cuevas, 1977):

1. Adhesión de naturaleza química entre el acero y el concreto.
2. Fricción entre la varilla y el concreto que se desarrolla al tender a deslizarse la primera, aumentar el área superficial de las barras y su rugosidad con las corrugaciones transversales y longitudinales.
3. Apoyo directo de las corrugaciones de las varillas contra el concreto que las rodea.

En el caso de las varillas lisas solo existen las dos primeras contribuciones.

La combinación de concreto simple con acero de refuerzo constituye lo que se llama concreto reforzado.

2.11. Inicios del concreto armado.

El inicio del concreto armado ocurrió en la segunda mitad del siglo XIX con la introducción del acero como material de refuerzo al concreto hecha por William B. Wilkinson, como respuesta a los incendios en edificios, por lo que en 1854 solicitó una patente que incluía armaduras de hierro embebidas en concreto (Valenzuela, 2015). Actualmente el concreto hidráulico es el material de construcción más

utilizado a nivel mundial. Debido a su consistencia rígida, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras con problemas, ante sus condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza; estos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras con investigaciones, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y de campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que intervienen. El Estado-Del-Arte actual del tema es bastante amplio; no obstante, el espíritu científico continúa alimentándose de preguntas y nuevos retos (Mendoza-Escobedo, 2006). El concreto reforzado es sin duda el material más importante en la industria de la construcción, ya que ha hecho posible construir la infraestructura de todos los países. Por él se han expresado los ingenieros y arquitectos más talentosos en el siglo XX y lo que va del siglo XXI, contribuyendo también al desarrollo de tecnologías de construcción más sofisticadas (Castro B. P. et al, 1998). La vida útil es un factor determinante para estas estructuras, por lo que es necesario un buen diseño resistente. En las últimas décadas se ha considerado que el diseño de estructuras también necesita ser durable, habiéndose incorporado a reglamentos de construcción normativa, en especial sobre la corrosión (NTCCM, 2017) (ONNCCE-NMX-C 530, 2018).

2.12. Morteros

Los morteros base CP, son mezclas que contienen CP, arena y agua; son considerados como morteros hidráulicos, ya que el cementante reacciona con el agua para otorgarle las propiedades de resistencia mecánica, manejabilidad y adherencia que se buscan en estas mezclas. Sirven para unir piezas de mampostería en la construcción, para recubrir muros y elementos constructivos en donde sea necesario protegerlos contra el agua o agentes ambientales. Son utilizados para realizar reparaciones y rehabilitaciones en todo tipo de estructuras, así como en monumentos históricos.

Los más comunes son los de cemento y están compuestos de:

MORTERO = AGLUTINANTE + MATERIAL INERTE + LÍQUIDO DE AMASADO

(Cemento) + (Arena) + (agua)

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 CP sin aire incluido, y de 0.460 para CP con inclusores de aire (ASTM C 109M, 2002). Para otras relaciones agua-cemento se deberá de cumplir con la fluidez de 110% \pm 5 según ASTM-C109. La 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 6.

Tabla 6. Propiedades requeridas 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 7 (SCT, 2002):

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

Tabla 7.-Tipos de Morteros, clasificación SCT.

2.13. El problema de la corrosión en la construcción.

Uno de los mayores problemas en estructuras de concreto armado es la corrosión del refuerzo metálico embebido, convirtiéndose en un tema que requiere la atención de ingenieros y constructores para el mantenimiento de las estructuras (Kessler R.J., 1997); como lo son en edificaciones, puentes, puertos y demás construcciones. El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado, como la adherencia entre el acero de refuerzo y la matriz de concreto, la pérdida de las propiedades mecánicas del acero, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural. Para disminuir los riesgos que conllevan estas condiciones, es necesario conocer adecuadamente los materiales utilizados y su respuesta a los diferentes ambientes a los que estarán expuestos (Castro B. P. et al, 1998).

2.14. Causas del deterioro de estructuras.

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado es causado principalmente por un medio ambiente agresivo, por especificar materiales no

apropiados, agregados reactivos (ASTM C88-13), y por prácticas constructivas deficientes, como concretos con alta porosidad, regularmente. De esta manera dicho deterioro de las estructuras de las obras civiles es un tema de gran relevancia para los gobiernos y en la industria de la construcción, en México y en todo el mundo.

2.15. Costos debidos a la corrosión.

Para el 2013, en los EE. UU., se estimó un costo de un millón de millones de dólares por fallas debidas a la corrosión, incluyendo costos directos e indirectos (NACE I. , G2MT Laboratories, 2016), de los cuales se estimaron pérdidas por 45 mil millones de dólares en el sector de la construcción. Se considera que, en general, es posible evitar pérdidas por una tercera parte del monto de los costos, tomando medidas de protección contra la corrosión. También NACE International, en el 2016, publicó el estudio: “Medidas internacionales de prevención, aplicación y economía de la tecnología de la corrosión (IMPACT)”, en el que estima que el costo global de la corrosión será de 2.5 billones de dólares estadounidenses, equivalentes a aproximadamente el 3.4 % del Producto Interno Bruto Mundial (PIB). El estudio global de dos años examinó el impacto económico de la corrosión y el establecimiento de las mejores prácticas para disminuirla, concluyendo que su prevención podría generar ahorros globales entre el 15 y 35 % del costo del daño, o entre 375 y 875 mil millones de dólares USD. El estudio también identificó la necesidad de formar más profesionales de la gestión contra la corrosión (NACE, Inspectioneering, 2016). En México no se han hecho muchos estudios específicos sobre el impacto de la corrosión (Ricardo Orozco Cruz, 2007). Sin embargo, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) inició en forma conjunta con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en el año 2001, la evaluación de más de 7 mil puentes de las carreteras federales. Se pudo determinar de este proyecto nacional que únicamente el 7% de los puentes de la red federal de carreteras libres presentaban daños por corrosión, por lo que se ha continuado con la tarea de la rehabilitación de estos puentes desde el año 2003 (Torres Acosta A. M., 2005).

Anualmente, de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{3}$ de la producción mundial de acero se dedica a reponer las estructuras dañadas por corrosión. Más allá de la frialdad de los números y de los porcentajes del PIB, los problemas derivados de la corrosión se dejan sentir en tres vertientes: la económica -pérdidas directas e indirectas-, la de conservación de recursos -agotamiento de reservas naturales- y la social; seguridad humana -fallas fatales- (Genescá J. y Ávila J, 1999).

2.16. Protección que otorga el concreto al acero de refuerzo.

El concreto provee al acero de refuerzo una protección tanto química como física contra la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero que impide que el acero continúe corroyéndose.

A este fenómeno se le denomina pasividad, ya que esta capa de óxido evita la propagación de la corrosión en el acero. Esta alcalinidad del concreto se debe principalmente al hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento Portland y los álcalis que pueden encontrarse incorporados en el Clinker.

Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 13.5, es decir, en el extremo más alcalino del pH. El concreto también funciona como una capa o barrera física protectora contra los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono, compuestos de azufre, etc.), y estos pueden despasivar al acero e iniciar el proceso de corrosión (Steven H. Kostmatka, 2017).

2.17. Propuestas de solución.

Ante esta situación, tanto del problema de la corrosión del refuerzo metálico en el concreto hidráulico, de la durabilidad de las materias base CP, como de la contaminación por la emisión de CO₂ por la industria cementera, surge la necesidad de proponer opciones para, aprovechando materiales amigables con el medio

ambiente, disminuir el impacto que tienen ambientes agresivos en la durabilidad de los materiales.

Las opciones de solución al problema descrito presentadas, son con base a proponer la incorporación de adiciones verdes, biopolímeros, principalmente el Nopal OFI, y también Almidón de Maíz MZ, en morteros y concretos a base de cemento Portland, para aumentar la durabilidad, disminuyendo el efecto de la corrosión en las estructuras.

Para proteger el acero de la corrosión se requiere saber el mecanismo de corrosión y el medio ambiente en el que se encuentra la estructura, para poder así eliminar alguno de los cuatro elementos que forman una celda de corrosión, que son el ánodo y cátodo, conductor iónico y conductor electrónico, y con ello detener la corrosión.

Los métodos de protección de las varillas de acero son variados, empezando por la calidad del concreto, lo que controla las propiedades fisicoquímicas y con ello la resistencia a ciertos agresivos corrosivos.

Indirectamente también se puede disminuir la corrosión mediante recubrimientos tales como pinturas, epóxicos, los cuales pueden ser aplicados sobre el acero o sobre el concreto.

La protección catódica, la adición de inhibidores, la remoción de cloruros y la realcalinización del concreto son métodos empleados para paliar la corrosión, no para detenerla.

La Figura 16 muestra las aplicaciones, ventajas y desventajas de los diferentes métodos de protección de las varillas.

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.

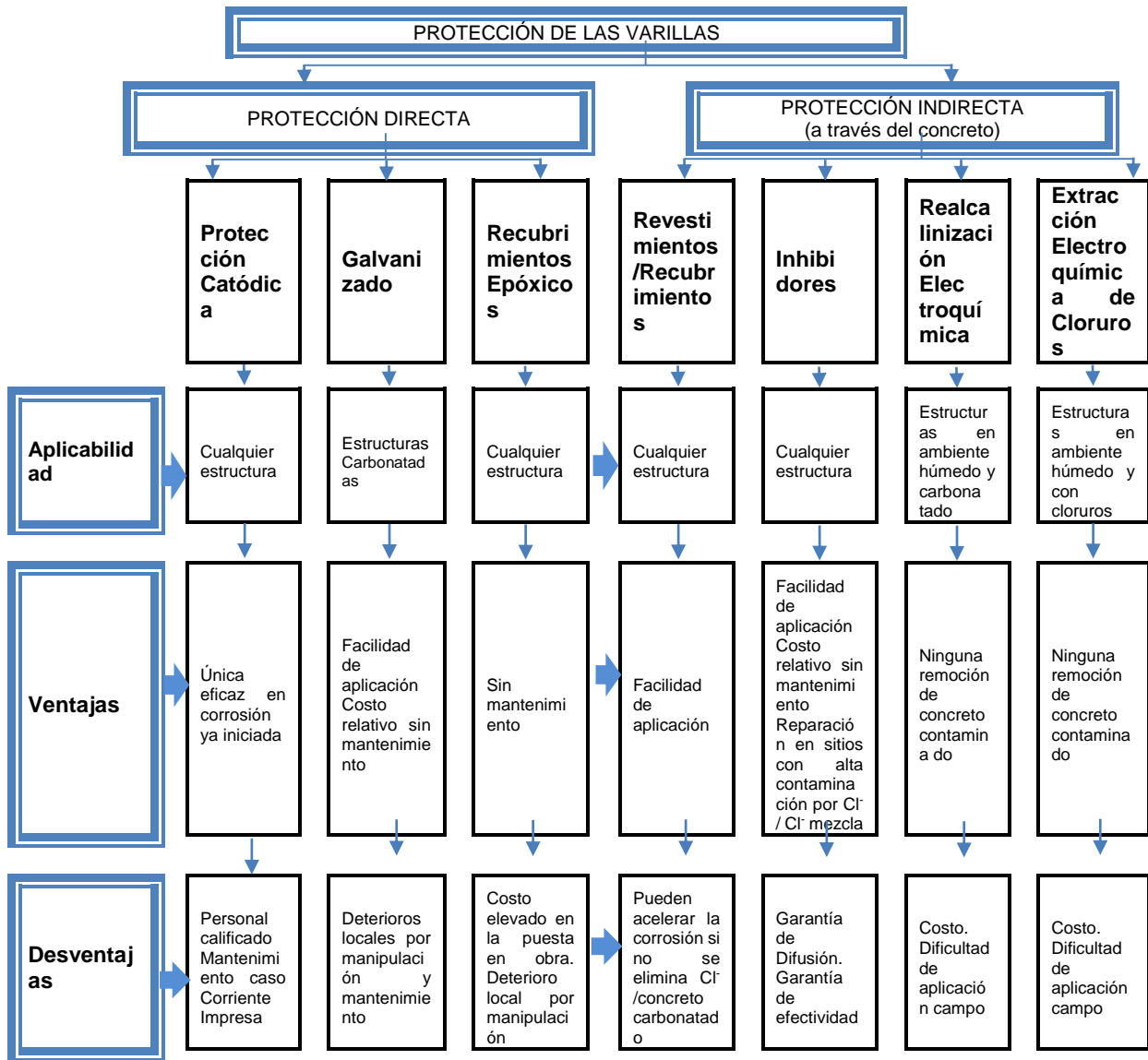


Figura 5.- Métodos de protección de estructuras contra la corrosión. Fuente: Red DURAR.

CAPÍTULO 3. CORROSIÓN Y DURABILIDAD.

3.1. Principios generales de la corrosión

La mayoría de los materiales experimentan algún tipo de interacción con gran número de ambientes. Con frecuencia estas interacciones reducen la utilidad de un material como consecuencia del deterioro de sus propiedades mecánicas, de otras propiedades físicas o de su apariencia (Callister W.D., 2002). La mayoría de los metales no se encuentran en estado puro en la naturaleza, sino que están combinados con otros elementos formando diferentes compuestos llamados menas. El hombre invierte mucha energía para extraer el metal de los yacimientos encontrados en la tierra. El estado de existencia más estable para un metal es su forma combinada, o su estado de más bajo de energía, es decir, en forma de óxidos, sulfuros, cloruros, sulfatos o carbonatos. Muchas de las formas combinadas de los metales han permanecido tal y como los encontramos ahora, por miles de millones de años. El paso de un metal a su forma combinada se logra a lo largo de millones de años. En el transcurso de este tiempo va pasando de un estado inestable a su forma más estable que es su forma combinada. Figura 17 (Genescá J. y Ávila J, 1999).

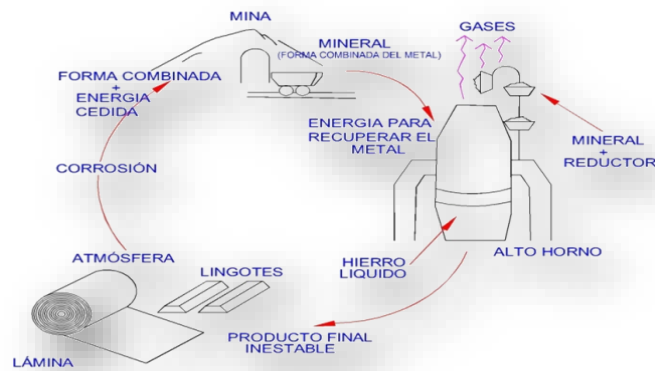


Figura 6.- Ciclo del acero, desde la extracción de minerales, producción hasta su regreso a su forma más estable. Fuente: Genescá, Más allá de la herrumbre, 1999, (Medina Olvera. S, 2009)

En la Tabla 8 se presentan algunos metales ordenados de mayor a menor con base a la cantidad de energía requerida para convertirlos desde su estado mineral en metales (Castro B. P. et al, 1998).

Tabla 8.- Cantidad de energía requerida para obtener los metales en orden descendente de mayor a menor. Fuente: Genescá, Más allá de la herumbre.

Potasio	Mayor requerimiento de energía.
Magnesio	
Berilio	
Aluminio	
Cinc	
Cromo	
Hierro	
Níquel	Menor requerimiento de energía.
Estaño	
Cobre	
Plata	
Platino	
Oro	

Cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia de volver a combinarse para estabilizarse. La cantidad de energía requerida y almacenada varía de un metal a otro.

Un pedazo de metal puede permanecer estable por un periodo indefinido, si a este se le mantiene en el vacío, es decir, en donde el metal no entre en contacto con ningún medio o sustancia, incluyendo el aire (Genescá J. y Ávila J, 1999).

La corrosión puede definirse como el deterioro de un material o de sus propiedades, debido a la acción del medio ambiente que lo rodea. No obstante que otros materiales, además de los metales (madera, plásticos, etc.) pueden corroerse, el término se emplea especialmente al deterioro de metales. Algunas propiedades de los materiales pueden alterarse debido a la corrosión, lo cual suele ocasionar fallas inesperadas. Estos cambios pueden pasar inadvertidos en exámenes visuales y/o cambios de peso (Torres Acosta Andrés Antonio, 2006). De acuerdo con el tipo

de ambiente donde ocurre la corrosión de los metales se pueden distinguir dos formas de corrosión:

Corrosión química. Ocurre debido al ataque de sistemas no electrolíticos, un ejemplo son los gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación o por líquidos no conductores de la corriente eléctrica (Castro et al, 1998).

Corrosión electroquímica. En los materiales metálicos la corrosión es una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra (Callister W.D., 2002)

3.2. Celda de corrosión.

Para que pueda ocurrir la corrosión electroquímica se necesita de la formación de una **pila voltaica** o **pila galvánica**. Figura 18.

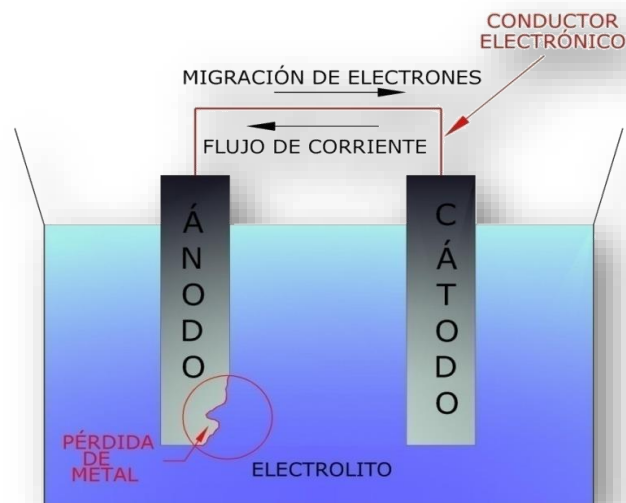


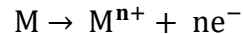
Figura 7.- Representación esquemática de la celda de corrosión. Fuente: Torres et al, 2006, (Medina Olvera. S, 2009).

Como se puede observar la pila galvánica está formada por:

3.2.1. Ánodo.

Una característica de los átomos metálicos es la pérdida o ganancia de electrones en una reacción denominada **oxidación**. Un metal **M** que tiene una

valencia n (o n electrones de valencia) puede experimentar corrosión según la siguiente reacción.



M se convierte en un ion con $n+$ cargas positivas al perder sus n electrones de valencia, e^{-} se utiliza para simbolizar un electrón. Figura 19 (Raymond, 2007).

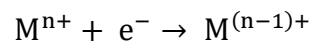


Figura 8.- Representa el proceso de ionización de un metal que libera iones del mismo.
Fuente: (Raymond, 2007), (Medina Olvera. S, 2009).

Una reacción de corrosión puede expresarse parcialmente por la ionización de un metal, es decir, el proceso por el cual un átomo metálico pierde electrones y queda cargado con un exceso de cargas positivas (iguales a las cargas negativas de los electrones que se perdieron).

3.2.1. Cátodo.

Los electrones generados en cada átomo metálico que se oxida se transfieren a otra especie química en un proceso que se denomina reacción de **reducción**.



La reacción electroquímica total consiste en la suma de las semirreacciones de oxidación y de reducción (Callister W.D., 2002).

3.2.3. Conductor eléctrico.

Es un cable externo, conductor eléctrico (conduce los electrones) que se encuentra uniendo al ánodo y al cátodo. Tal como se muestra en la Figura 18 anterior.

3.2.4. Electrolito.

Electrolito es cualquier sustancia que contiene iones libres, que se comporta como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten en iones en solución, los electrólitos son conocidos como soluciones iónicas.

3.3.- Potencial electroquímico.

Para que se lleven a cabo las reacciones anódica y catódica es necesario el movimiento de electrones por un hilo conductor. Este desplazamiento es debido a la diferencia de potencial que existe entre ambos metales.

La diferencia de potencial entre los dos electrodos de una celda galvánica proporciona la fuerza motriz que empuja los electrones a través del circuito externo. A esto se le conoce como fuerza electromotriz.

3.3.1. Diagramas de Pourbaix o diagramas de estabilidad termodinámica.

Se les llama así por su creador Marcel Pourbaix quien los desarrolló para mostrar las condiciones del pH del electrolito y el potencial electroquímico que son favorables para la corrosión de un metal. El estado de energía de un metal en una disolución electrolítica está influenciado por el pH. Figura 20.

Los principales usos de estos diagramas son:

- a). Predecir si puede o no ocurrir la corrosión.
- b). Estimar la composición de los productos de corrosión formados
- c). Predecir cambios ambientales que prevengan la corrosión.

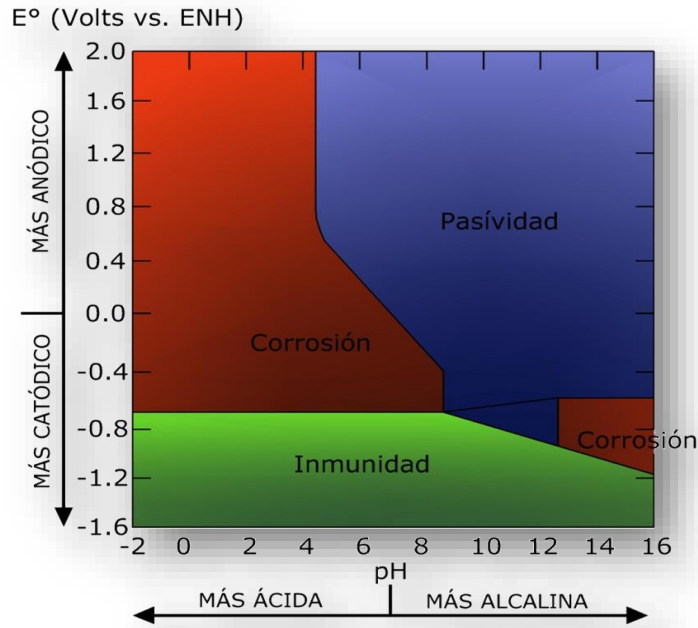


Figura 9.- Se muestra el diagrama de Pourbaix para el hierro en un sistema de H₂O (Castro et al, 1998), (Medina Olvera. S, 2009).

3.4.- Corrosión de estructuras de concreto

La corrosión de la armadura en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que la rodea, así la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica la cual está formada por cuatro elementos principales. Figura 21 (Bentur Arnor, 1997).

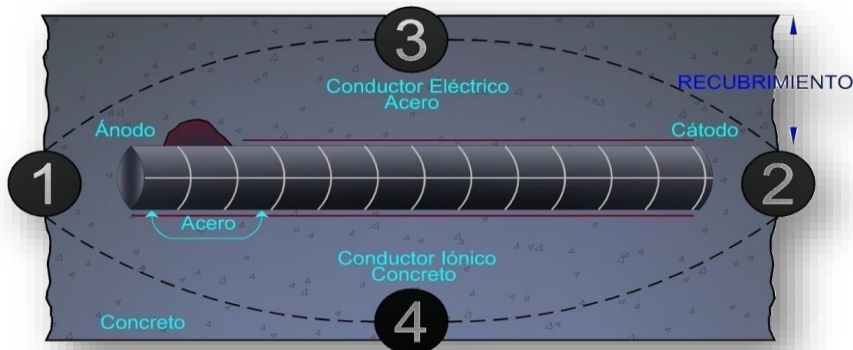


Figura 10.- Representación esquemática del proceso electroquímico de corrosión de las armaduras en el concreto (RED DURAR, 2000), (Medina Olvera. S, 2009).

Las condiciones necesarias para que exista o no corrosión del acero en el concreto se muestran en la Figura 22.

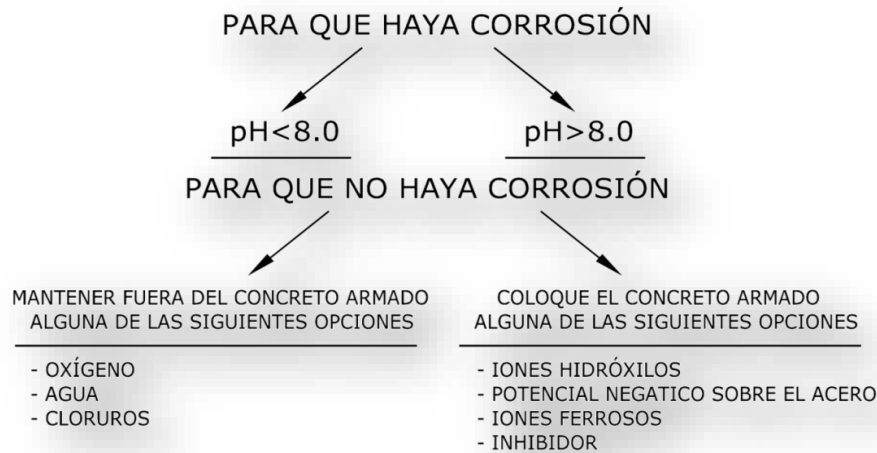


Figura 11.- Principales causas que desencadenan la corrosión (RED DURAR, 2000), (Medina Olvera. S, 2009).

Para que se lleve a cabo el proceso de corrosión debe existir un circuito cerrado que involucre a los elementos que forman la celda de corrosión, como ya se dijo, que resumiendo involucra a:

Ánodo. - Es el lugar en donde ocurre la oxidación, y que para el caso sería la varilla de refuerzo en su zona menos activa.

Cátodo. - Es el lugar donde se lleva a cabo la reducción, de igual manera sería la varilla de refuerzo, su zona más activa.

Conductor eléctrico. - El conductor eléctrico sería la varilla de refuerzo que se encuentra embebida en el concreto y donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.

Electrolito. - Es la solución de poro que se queda dentro del concreto.

El concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza: física y química; por un lado, la barrera física que la separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del concreto, este es un electrolito que puede formar un óxido protector y a este fenómeno se le conoce como pasivación (RED DURAR, 2000).

La función primaria del recubrimiento de concreto con respecto a la corrosión es servir como una capa protectora. Su eficiencia está en función de su composición química y su estructura física. Aspectos importantes de su estructura física incluyen: porosidad, distribución de sus poros y grado al cual estén interconectados los poros más gruesos (Bentur Arnor, 1997).

La corrosión electroquímica del concreto reforzado resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos), así como también de las heterogeneidades en el medio químico o físico que rodea al acero.

La corrosión normalmente se previene por la formación de una película de óxido de hierro conocida como capa o película de pasivación, pero cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce un rompimiento de esta película y la corrosión de las armaduras se desencadena con una triple consecuencia (RED DURAR, 2000):

- 1.- Disminución de la sección de acero o incluso el refuerzo se convierte completamente en óxido.
- 2.- El concreto puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.
- 3.- La adherencia acero-concreto disminuye o desaparece.

El proceso de corrosión involucra dos reacciones químicas que ocurren de manera simultánea en dos áreas distintas de una misma superficie de acero.

En el tema de corrosión, las dos reacciones electroquímicas son conocidas como “anódica” y “catódica”, respectivamente, y las áreas en las cuales ocurren estas reacciones son conocidas como más “activas” (zona anódica) y menos activas (zona catódica) las dos reacciones son descritas en las Figuras 23 y 24 (Bentur Arnor, 1997).

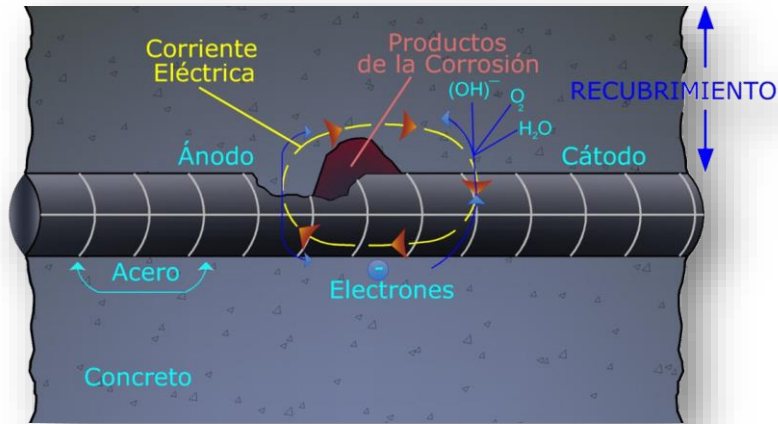


Figura 12.- Representación del sentido la corriente eléctrica del área anódica a catódica (Bentur Arnor, 1997), (Medina Olvera. S, 2009).

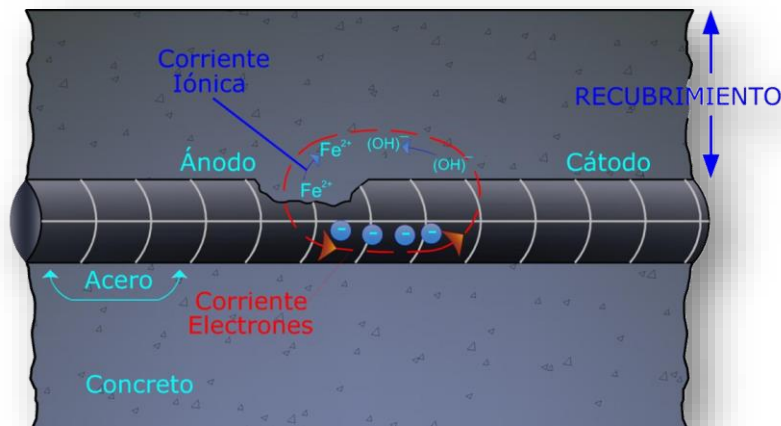
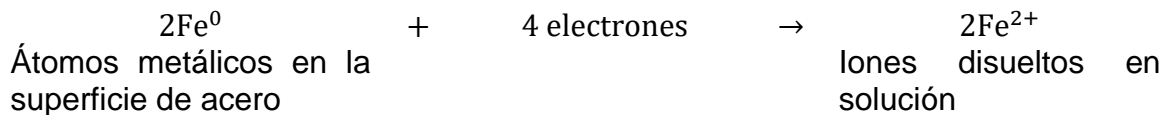
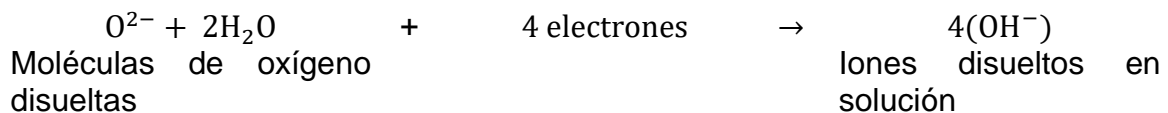


Figura 13.- Representación del flujo de corriente iónica y de electrones del área anódica a la catódica (Bentur Arnor, 1997), (Medina Olvera. S, 2009).

La reacción anódica:



La reacción catódica:



El flujo de electrones del área anódica se dirige a las áreas catódicas y este flujo contrario de corriente iónica en la solución de los poros externos del concreto constituye la corriente de corrosión.

La pérdida del metal que se presenta en el proceso de corrosión ocurre en los sitios donde se realiza la reacción anódica.

Los átomos metálicos se convierten en iones de hierro (Fe^{2+}), y estos quedan disueltos en una solución acuosa alrededor del acero. Los electrones liberados son depositados en la superficie del acero y aumentan su potencial eléctrico. Estos fluyen a través del acero a los sitios de bajo potencial o hacia las áreas catódicas y aquí es donde la reacción se lleva a cabo, los electrones se combinan con las moléculas de oxígeno disuelto y el agua en forma de iones de hidróxido (OH^-). Para que el proceso de corrosión pueda seguir, el número de electrones aceptados en el sitio catódico necesita ser igual al número de electrones donados del sitio anódico. Así, para cada molécula de oxígeno disuelta que reacciona en el sitio catódico, dos átomos de hierro deben ser ionizados y disueltos en el sitio anódico. Figura 25.

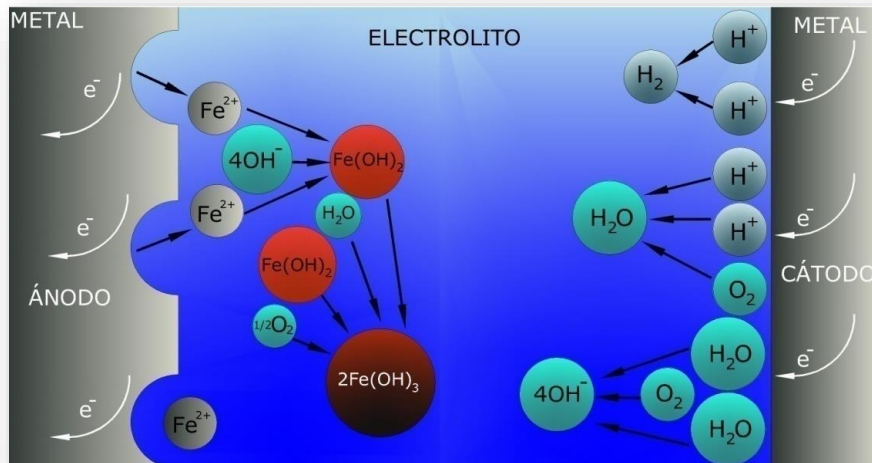


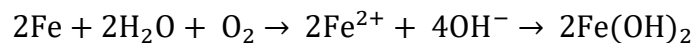
Figura 14.- Se muestra el proceso de las reacciones anódica y catódica de manera esquemática (Castro Borges Pedro, 1998), (Medina O.S., 2011).

Una corriente externa fluye por la solución a través de los poros del concreto rodeando el acero, llevado por el movimiento de iones cargados. Esta corriente

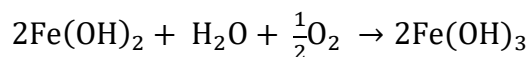
externa consiste en iones hidróxido (negativamente cargados) movidos del cátodo al ánodo, y también iones ferrosos (positivamente cargados) movidos del ánodo al cátodo. "El agua" en los poros del concreto es en realidad una solución diluida de hidróxidos de calcio y álcalis; por lo que este fluido sirve como un vehículo para el flujo iónico. Si los poros son secados o si la estructura de concreto es muy densa de tal forma que los poros no estén bien interconectados, el flujo de iones a través de los poros se comienza a dificultar. Bajo estas circunstancias la corriente fluirá con dificultad, y el proceso de la corrosión se ve disminuido (Bentur Arnor, 1997).

Para que ocurra el movimiento de los electrones del ánodo al cátodo es necesario que exista una diferencia de potencial entre estas zonas.

Si la resistencia eléctrica en el concreto (es decir, la resistencia al flujo de iones) a través de la cual la corriente iónica debe pasar es alta, el flujo de la corriente transportada por los iones es baja, y las reacciones anódica y catódica proceden lentamente, por lo tanto, la velocidad de corrosión es baja. Cuando el movimiento de los iones de hierro (Fe^{2+}) y los iones de hidróxido fluyen uno hacia el otro, se encuentran y reaccionan para formar hidróxido ferroso, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (Castro B. P. et al, 1998).



Este compuesto reaccionará más adelante con iones de hidróxido adicionales, y algunas veces con el oxígeno, para formar un producto insoluble, conocido como herrumbre o productos derivados de la corrosión.



Hay dos tipos primarios de herrumbre, la herrumbre roja que es Fe_2O_3 , y la herrumbre negra Fe_2O_4 . La herrumbre es sólo una sustancia química producto del proceso de corrosión, y esta a menudo se acumula en sitios distintos a donde se lleva a cabo la corrosión del metal. El proceso de corrosión es realmente, el proceso de convertir átomos metálicos a iones ferrosos disueltos en la solución acuosa circundante.

Otro tipo de proceso que limita a menudo el índice de corrosión es el de algunos metales, incluyendo al acero, que pueden reaccionar con oxígeno formando capas finas de óxido de metal insolubles sobre su superficie (< 10 nm de grosor). Si esta película se mantiene estable en contacto con la solución acuosa, el metal se puede volver electroquímicamente pasivo (Bentur Arnor, 1997).

Esta película aísla el metal de la solución acuosa, y disminuye la velocidad de la disociación aniónica a valores muy bajos. De hecho, mientras una película de pasivación siga siendo eficaz, el índice de corrosión puede ser tan bajo que, para efectos prácticos, el metal puede ser considerado como si no tuviera corrosión. Esta situación se muestra en la Figura 26.

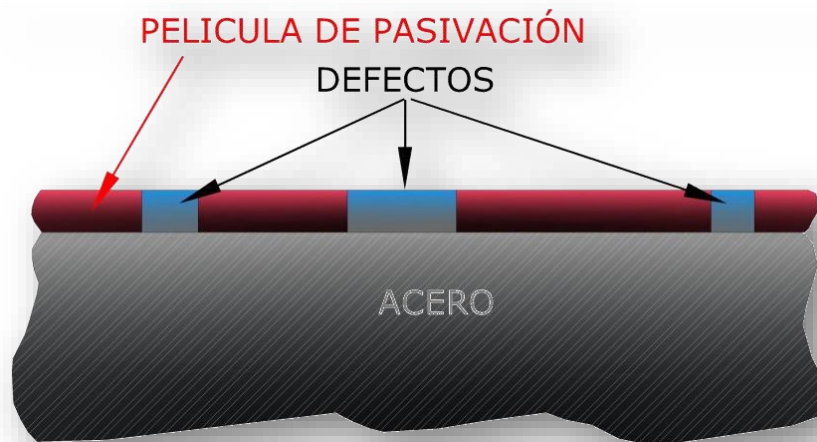


Figura 15.- Descripción esquemática de la película de pasivación (Bentur Arnor, 1997), (Medina Olvera. S, 2009).

Las películas de óxido que se desarrollan sobre el acero normalmente son ferrosas (Fe^{2+}) o férricas (Fe^{3+}) en la naturaleza. Ambos son químicamente estables en el concreto con la ausencia de carbonatación o cloruro. Sin embargo, el óxido férrico es el más estable.

Ni las películas de óxido ferroso ni el óxido férrico son protectoras cuando la concentración de los iones de (OH^-) son bajas (un pH menor de 11.5). Con niveles bajos en el contenido de iones (OH^-) los óxidos se forman, pero no se adhieren a

la superficie del acero y por lo tanto estos funcionan como una película protectora. Esto puede ocurrir cuando el concreto alrededor del acero comienza a carbonatarse, resultando en una reducción de la concentración de los iones de (OH^-) en la solución de los poros (Bentur Arnor, 1997).

La alta concentración de iones (OH^-) es necesaria para garantizar, la estabilidad en la película de óxido férrico. Además, el oxígeno disuelto favorece la ruta normal de pasivación, promoviendo la conversión de óxido ferroso a óxido férrico.

La concentración de iones (OH^-) es alta de manera ordinaria, estando usualmente entre 0.5 y 1.0 molar, cuando los poros del concreto están cubiertos con la solución, por ejemplo, "saturados". Si el concreto se encuentra parcialmente seco, las concentraciones pueden ser altas. Los valores de pH que corresponden a altas concentraciones de hidróxidos son aproximadamente 13.

Desde que el acero de refuerzo embebido en el concreto está en contacto con esta solución de poro de alta alcalinidad, una fuerte y estable película de pasivación es formada y el acero es protegido contra la corrosión de manera indefinida. Cuando esta condición existe, el metal es usualmente conocido como "pasivado", y es llamada "película de pasivación".

La formación de una película de pasivación generalmente es la responsable de la resistencia a la corrosión presentada por acero inoxidable. El hierro en este tipo de acero está aleado con cromo, níquel, y otros elementos que refuerzan la formación y estabilidad de la película de pasivación. La pasivación de un metal se puede definir como la pérdida de reactividad química bajo ciertas condiciones ambientales.

El nivel de la concentración de ion de hidróxido requerido para mantener estable la pasivación no es un valor constante, pero varía con la presencia de otros iones, especialmente iones de cloruro. La concentración de los iones (OH^-) en la solución de agua que se encuentra en los poros del concreto que está en contacto con el acero es por general lo suficientemente alta para mantener esta película de pasivación (Bentur Arnor, 1997).

3.5.- Factores que afectan y desencadenan la corrosión.

Son un conjunto de situaciones o circunstancias que pueden llegar a alterar el estado pasivo de una estructura de concreto reforzado, afectándola y desencadenando así la corrosión en el refuerzo de esta.

Para que pueda llevarse a cabo el proceso de corrosión es necesario que existan factores que provoquen la neutralización o disminución del medio alcalino, es decir, valores de pH menores de 8.

A continuación, se describen dichas circunstancias o situaciones con el fin de entender mejor lo que es el proceso de corrosión en las estructuras de concreto reforzado.

3.5.1.- Dosificación.

El concreto debe ser sólido, homogéneo, resistente y poco poroso, para ello será necesario dosificarlo con una baja relación agua/cemento (a/c) para evitar la formación excesiva de poros o vacíos en su interior

El concreto que se encuentra alrededor de las varillas de acero debe cumplir con la función de barrera física obstruyendo la penetración de agentes agresivos externos. Así como crear un ambiente altamente alcalino para producir la pasivación del metal.

3.5.2.- Compacidad y homogeneidad.

Es una propiedad importante del concreto ya que tiene efecto en la resistencia que se opone a la penetración de agentes agresivos externos. Se puede decir que la compacidad es inversamente proporcional a la porosidad.

La compacidad es la cantidad de materia sólida contenida en un volumen, un metro cúbico. Para el caso del concreto una buena compacidad está ligada con una relación a/c por debajo de 0.4, en peso.

En el caso de la homogeneidad no es más que una adecuada distribución de los diferentes materiales que componen al concreto, dando como resultado un concreto que tenga las mismas características en dos lugares distintos dentro de un mismo elemento (RED DURAR, 2000).

3.5.2.- Espesor del recubrimiento del concreto.

El espesor del recubrimiento del concreto es otro factor importante en la corrosión, ya que su espesor sirve para garantizar la protección de la estructura dependiendo de la agresividad ambiental. Figura 27.

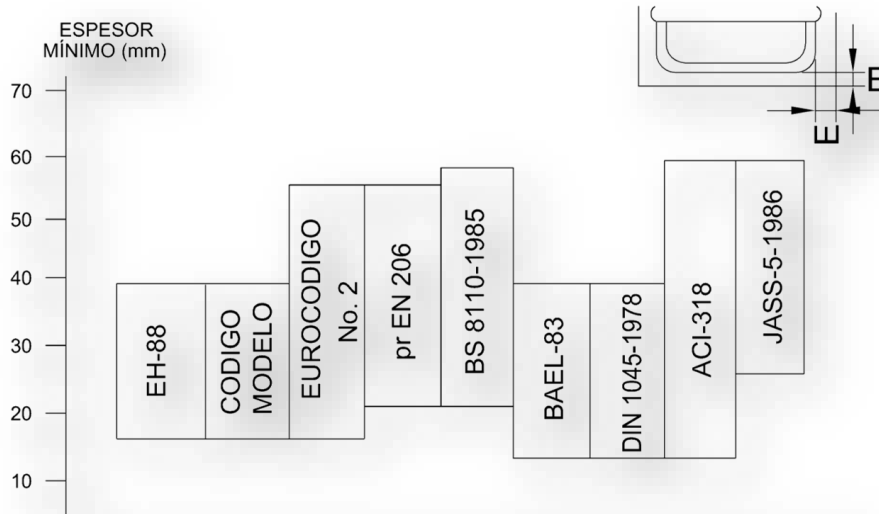


Figura 16.- Espesores de recubrimientos en diferentes normas internacionales (RED DURAR, 2000), (Medina O.S., 2011).

Se recomienda en ambientes agresivos un alto contenido de cemento, una baja relación agua cemento y espesores de 50 a 75 mm (2 a 3 pulgadas) que permitan una alta durabilidad en la estructura (RED DURAR, 2000).

3.5.3.- Efecto del oxígeno.

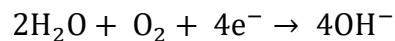
Un factor importante que controla la velocidad de corrosión es la disponibilidad de oxígeno disuelto. El oxígeno es consumido en la reacción catódica y, si su suministro en la solución alrededor de las áreas de catódicas del metal no es constante, las reacciones de corrosión pueden disminuir (Bentur Arnor, 1997).

Si el flujo de la carga y transporte de especies iónicas es lento, las reacciones de la corrosión se llevan a cabo a un ritmo lento. Esto ocurre cuando la resistencia eléctrica del concreto que rodea el acero incrustado entre el ánodo y el cátodo es alta. Por lo tanto, la medición de la resistencia eléctrica del concreto que rodea el

acero embebido en algunas ocasiones puede servir como un indicador de la rapidez con que se producen las reacciones de corrosión (Bentur Arnor, 1997).

3.5.4.- Efecto del agua.

La presencia del agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos pues interviene en el proceso catódico de reducción de oxígeno (RED DURAR, 2000).



El “agua” en los poros nunca es pura, contiene iones disueltos derivados del cemento. Usualmente se habla acerca de “una solución de poro”, después de varios días de hidratación. La solución de poro en la mayoría de los concretos contiene iones alcalinos e hidróxidos en una alta concentración relativa, junto con pequeñas concentraciones de iones de calcio y sulfato. Los iones alcalinos son potasio (K^+) y sodio (Na^+); principalmente en la mayoría de los cementos modernos (Castro B. P. et al, 1998).

El contenido del agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la humedad relativa (HR) del ambiente (RED DURAR, 2000).

3.5.5.- Iones despasivantes.

Los iones despasivantes provocan una corrosión localizada (generalmente la corrosión por picaduras), mientras que la reducción de alcalinidad del concreto permite una corrosión generalizada (Castro B. P. et al, 1998).

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio produciéndose así su corrosión (RED DURAR, 2000).

3.5.6.- Cloruros.

La corrosión inducida por cloruros, en México, se presenta en estructuras expuestas al medio marino. Los iones de cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también los desplace el viento de la brisa marina a la zona costera y los deposite en estructuras de concreto cercanas a la línea del mar.

Los iones de cloruro pueden estar presentes en tres formas: enlazados, absorbidos y disueltos en el agua que se conserva dentro de los poros (Del Valle Moreno Angélica, 2001). Figura 28.

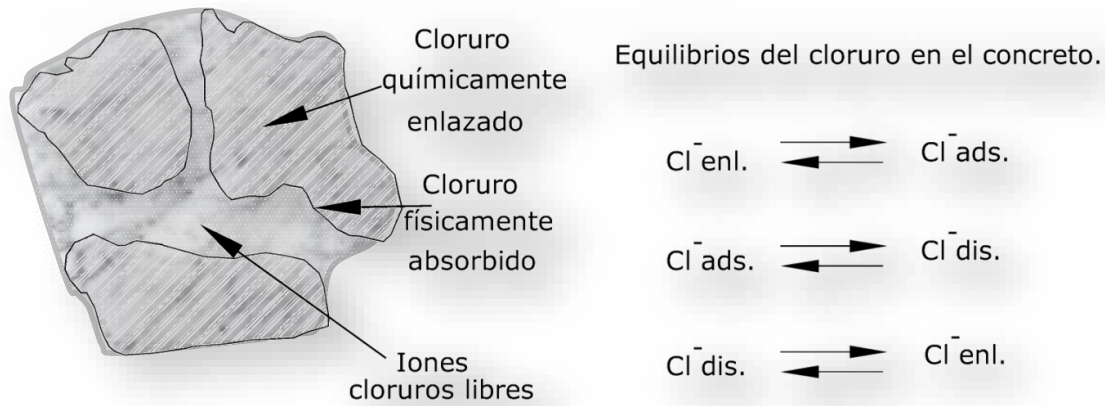


Figura 17.- Equilibrios del ion cloruro en el concreto (Del Valle Moreno Angélica, 2001)

3.5.7.- Sulfatos.

El ion sulfato (SO_4^{2-}) puede estar presente en las aguas industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en las aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma de ión, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos (RED DURAR, 2000).

El concreto expuesto a sulfatos, usualmente en el suelo o en aguas freáticas, puede desintegrarse en solo unos cuantos años debido a una reacción física o química, o a ambas. El concreto sometido a suelos secos que contiene sulfatos no será atacado. Pero puede ocurrir una desintegración severa si el concreto inadecuadamente proporcionado (dosificado) es expuesto a agua conteniendo sulfatos disueltos, o si se encuentra sometido a una alternancia frecuente de mojado y secado por las aguas con sulfatos.

Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los suelos arcillosos o en sus capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: amoniacos, cálcicas, magnésicas, y sódicas. Mientras que los

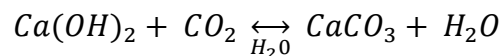
menos peligrosos son: sulfatos potásicos, cúpricos y alumínicos (RED DURAR, 2000).

3.5.8.- Carbonatación.

La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el dióxido de carbono atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto, desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo. La corrosión uniforme, inducida por carbonatación, acelera la formación de grietas si las condiciones adecuadas de temperatura y humedad están presentes. En lugares con clima tropical, las condiciones atmosféricas pueden fomentar la agresividad del dióxido de carbono

Actualmente se conoce que la carbonatación depende de varios factores como son el tipo y cantidad del cemento, la porosidad del material, tipo y cantidad de adiciones de puzolanas, etc. (Moreno, 2004).

La concentración típica de CO₂ en la atmosfera es de 0.03% y debido a sus características ácidas, el CO₂ reacciona con el concreto húmedo, gracias a la naturaleza alcalina de este último, dándose así la carbonatación (Castro B. P. et al, 1998).



Las moléculas de bióxido de carbono que penetran el concreto reaccionan con el hidróxido de calcio sólido, con el gel C-S-H, y con los iones de sodio, potasio y calcio en la solución de poro. La consecuencia de estas reacciones es drástica, disminuye la alcalinidad de la solución de poro y en consecuencia los niveles de pH (Bentur Arnor, 1997).

Provocando así un cambio en el pH de la estructura que en estado de pasivación está entre 13 y 12 a un nuevo pH de aproximadamente 8 ó 9. Figura 29.

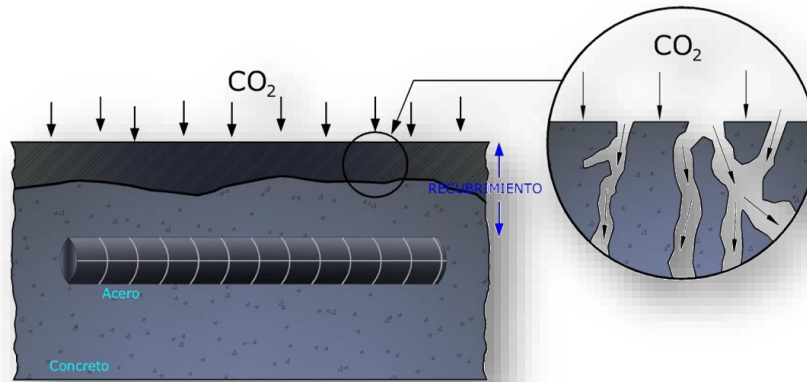


Figura 18.- Carbonatación en el concreto (Castro Borges Pedro, 1998), (Medina O.S., 2011)..

3.6.- Tipos de corrosión.

En el concreto armado se han clasificado los diferentes tipos y formas de la corrosión de acuerdo con la apariencia física del ataque (RED DURAR, 2000).

3.6.1.- Corrosión uniforme o generalizada.

Este tipo de corrosión se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual por toda la superficie (Castro B. P. et al, 1998).

En procesos de esta naturaleza la corrosión generalmente ocurrirá más o menos uniforme sobre la superficie metálica. Así, esta clase de corrosión a menudo es llamada la corrosión "general" (Bentur Arnor, 1997).

La corrosión uniforme es el resultado de la pérdida generalizada de la película de pasivación, resultante de la carbonatación del concreto y/o debido a la presencia excesiva de iones de cloruros (RED DURAR, 2000). Figura 30.

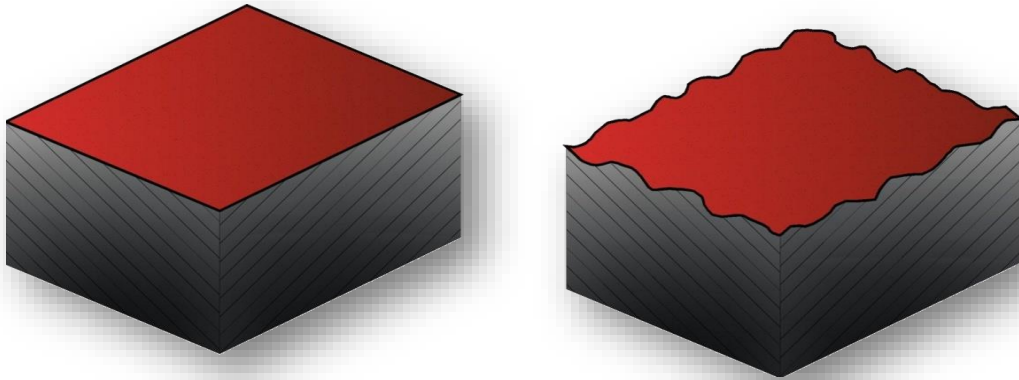


Figura 19.- Representación esquemática de la corrosión uniforme o generalizada (Castro Borges Pedro, 1998), (Medina Olvera. S, 2009).

3.6.2.- Corrosión galvánica.

Este tipo de corrosión puede ocurrir cuando existen dos metales diferentes en un medio electrolítico. También cuando están en contacto eléctrico dos metales distintos expuestos a soluciones corrosivas o atmosféricas (Castro B. P. et al, 1998).

Figura 31.

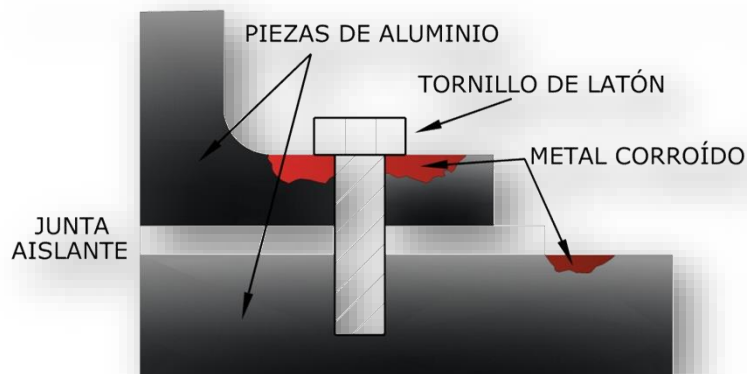


Figura 20.- Representación esquemática de la corrosión galvánica (Castro Borges Pedro, 1998), (Medina Olvera. S, 2009).

3.6.3.- Corrosión localizada.

Este ataque se presenta solamente en determinadas áreas de superficie. Tiende a profundizar mucho más rápido que la corrosión generalizada, pudiendo ser en extremo peligroso ya que puede conducir al fallo prematuro de una pieza (Castro B. P. et al, 1998). Figura 32.

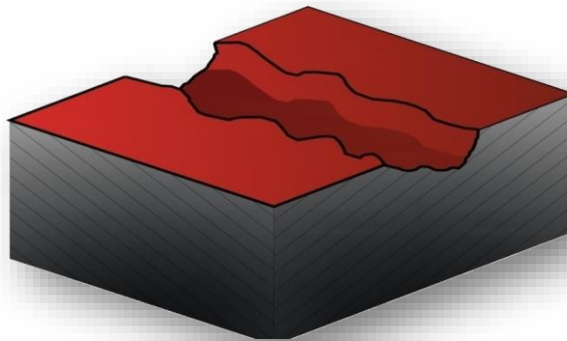
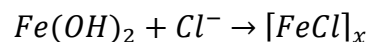


Figura 21.- Representación esquemática de la corrosión localizada (Castro Borges Pedro, 1998), (Medina Olvera. S, 2009).

3.6.4.- Corrosión por picaduras.

Se presenta por la disolución localizada de la capa de pasivación; resulta del ingreso de iones cloruro (Cl^-) al medio.

Los cloruros reaccionan con el óxido ferroso para formar una solución circundante que provee protección: [Bentur et al, 1997]



Por lo tanto, si los iones de cloruro están presentes en la solución de poro del concreto, estos producirán la corrosión si entran en contacto con la barra refuerzo que contiene óxido ferroso. Como se ha mostrado en la Figura 17.

El efecto es conocido como corrosión de picadura. Este proceso de corrosión local se lleva a cabo en la última etapa, en el proceso de pasivación, la conversión de la película de óxido de ferroso a óxido férrico, y seguirá cuando el contenido de cloruro sea más alto comparado con el contenido de iones de hidróxido (Bentur Arnor, 1997).

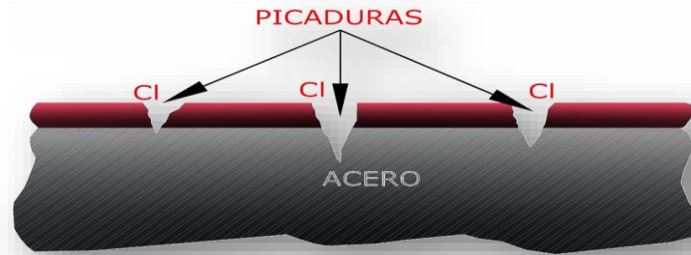


Figura 22.- Capa pasivación atacada por iones de cloruro (Cl^-) (Bentur Arnor, 1997), (Medina Olvera. S, 2009).

3.6.5.- Corrosión en espacios confinados.

Ocurre cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo de oxígeno a esa zona. Existen varias situaciones que pueden inducir a este tipo de daño como la inyección de grietas con material epóxico, donde el medio agresivo ha llegado al refuerzo, acelerando así la corrosión por la falta de oxígeno (RED DURAR, 2000). Figura 34.

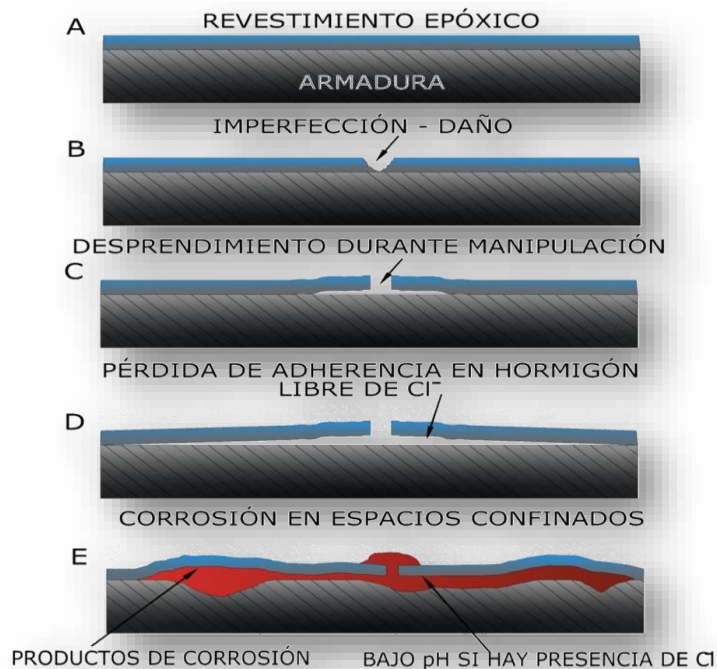


Figura 23.- Descripción esquemática relativa a la evolución en el deterioro de acero de refuerzo recubierto con una película epóxica, así como del progreso de la corrosión (RED DURAR, 2000), (Medina Olvera. S, 2009).

3.6.6.- Corrosión bajo tensión.

Este tipo de corrosión se produce cuando se presentan de manera simultánea dos fenómenos: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre generalmente en acero pre o pos-tensado, en donde se utiliza acero de alta resistencia debido a la presencia de hidrogeno atómico a través del metal.

La única manera de confirmar la corrosión bajo tensión es mediante la observación microscópica en las superficies de fractura (RED DURAR, 2000).

3.7. Vida útil de las estructuras.

Cuando el concreto reforzado es elaborado en condiciones que no favorecen una vida útil larga, los problemas en su durabilidad aumentan. Estos problemas pueden presentarse por un recubrimiento insuficiente de concreto para el refuerzo, una relación a/c alta, uso de agua y agregados contaminados con cloruros, sulfatos e iones agresivos, mala compactación del concreto, reacciones álcali-agregados y un curado inadecuado. Para disminuir los riesgos que conllevan estas condiciones es necesario conocer bien el material y la respuesta a los diferentes ambientes en que es expuesto.

La durabilidad del concreto se define como la resistencia a la acción del clima a los ataques químicos, a la abrasión o a cualquier otro proceso de deterioro.

El deterioro del concreto se debe principalmente a causas mecánicas, naturaleza del concreto y agentes externos del medio.

La vida útil se define como el periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad, y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.

La vida residual de una estructura se entiende como el tiempo a partir del cual la estructura alcanza el fin de su vida útil. Es en este periodo en el que la estructura necesita reparación, remodelación o una renovación completa para mantener su estado de servicio original (Torres Acosta A. A., 2001). Figura 35.

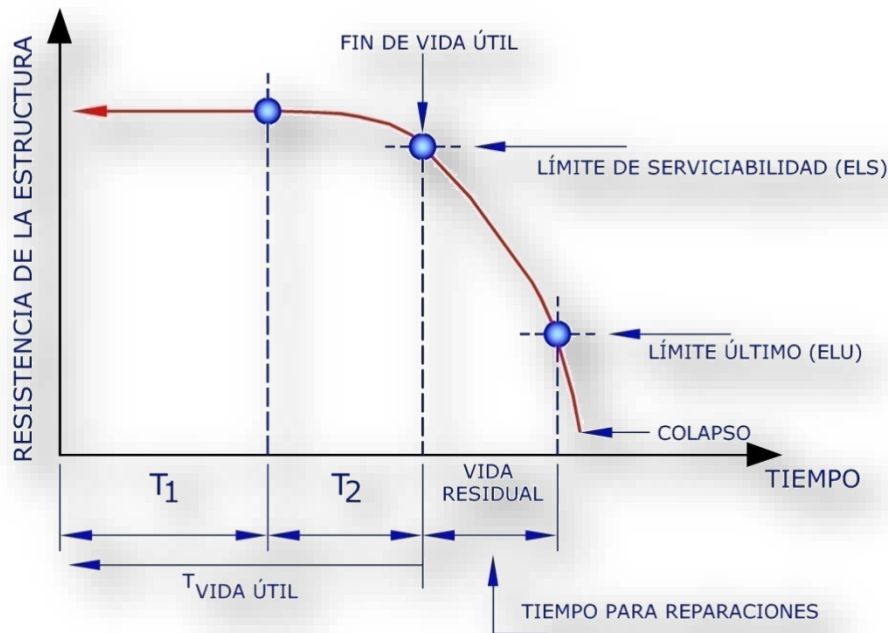


Figura 24.- Gráfica representativa de la vida útil en la estructura en función de su resistencia y el tiempo (Torres Acosta A. A., 2001), (Medina O.S., 2011).

3.8. Principales causas de problemas de durabilidad en estructuras.

Estadísticamente resulta difícil determinar las causas de problemas de durabilidad en estructuras de concreto. A principios de la década de los 80's se realizó en España un estudio al respecto, los resultados son interesantes e indican la importancia de cada etapa (Figura 36). Sanjuan y Castro estiman hasta en un 30% la falla debida a deficiencias en la selección de los materiales (Mendoza-Escobedo, 2006). Se ha detectado que, en México, más del 90% de las industrias presentan deterioros por corrosión (Genescá J. y Ávila J, 1999). Un estudio realizado en el sureste de México detectó que los costos por corrosión rebasan el 8% del PIB estatal en Yucatán (Orozco, 1998)

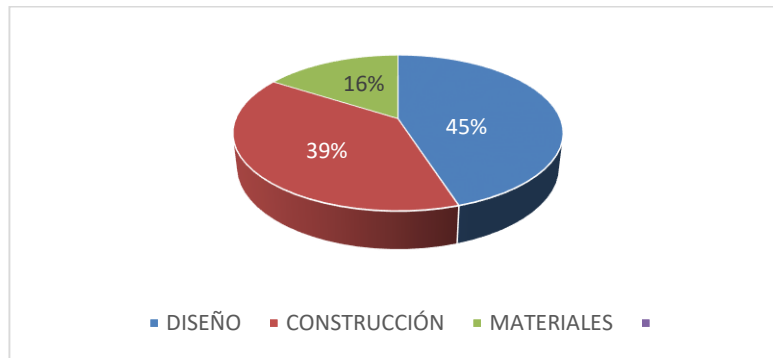


Figura 25.- Causas que producen problemas de durabilidad (Mendoza-Escobedo, 2006).

Dichos datos indican que para lograr un concreto durable se deben considerar todos los aspectos de calidad de materiales y proveedores, así como un conocimiento de las condiciones de servicio para un correcto diseño y proceso constructivo.

3.9. Agentes influyentes en la durabilidad de estructuras.

Los agentes que afectan la durabilidad del concreto son de diversa índole, son de dos categorías: los agentes externos, que son los que se encuentran en el medio ambiente o se deben a condiciones de servicio, entre ellos se encuentran los iones cloruro, el dióxido de carbono, sulfatos, bacterias, abrasión y ciclos de congelamiento y deshielo. Los agentes internos se hallan dentro del mismo concreto, como los iones cloruro incorporados en determinados aditivos (Mendoza-Escobedo, 2006). Las condiciones ambientales caracterizadas por variaciones diarias y estacionales de temperatura y humedad tienen influencia en los mecanismos de deterioro de las superestructuras. Estas variaciones, unidas al efecto del viento originan grietas térmicas y de contracción, irreparables, las cuales propician el ingreso de humedad, oxígeno, y los agentes externos nocivos. Los procesos de deterioro en las subestructuras están influenciados por las condiciones agresivas del suelo, del agua freática y del ambiente altamente contaminado con cloruros y sulfatos. El deterioro de las estructuras de concreto se manifiesta generalmente por la corrosión del acero de refuerzo y el ataque al concreto por sulfatos o carbonatación de la matriz de concreto (Mendoza-Escobedo, 2006).

CAPÍTULO 4. MATERIALES.

4.1. Cemento utilizado.

El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPO 30 R, cemento Portland Ordinario, de clase 30, con resistencia a compresión especificada a 3 días de 20 Mpa y CPC 30R RS, un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-0NNCCE, 2017).

El cemento Portland Ordinario se conoce como tipo I, según las normas ASTM C 150; el cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C_3A); la norma inglesa para este cemento, BS 4027:1980, estipula un contenido de C_3A , del 3.5%. La finura mínima es $250 \text{ m}^2 / \text{kg}$. En los Estados Unidos, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma ASTM C 150. Esta especificación limita el contenido de C_3A al 5% y también restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetrálcico (C_4AF), a más del doble del contenido de C_3A , al 20%. El contenido de óxido de magnesio está limitado al 6%.

Desde el punto de vista químico, se debe esperar que el C_4AF forme sulfoaluminato de calcio y sulfoferrita de calcio y, por lo tanto, que produzca expansión. Sin embargo la acción del sulfato de calcio en el cemento hidratado disminuye, al reducirse la relación $Al_2O_3: Fe_2O_3$.

La baja proporción de C_3A y el contenido comparativamente bajo de C_4AF del cemento resistente a los sulfatos significa que este tiene un alto contenido de silicatos que le proporciona una alta resistencia, pero como el silicato dicálcico (C_2S) representa una alta proporción de silicatos, la resistencia a edades tempranas y medias es baja.

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato. El cemento CPC 30R RS, genera moderado calor de hidratación ya que el C_3S y el C_3A , que son los que producen algo de hidratación, disminuyen notablemente.

El ataque de los sulfatos ocurre porque el Aluminato tricálcico (C_3A), reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cual, al ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla.

Es por ello que el cemento CPC 30R RS presenta una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para que cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, se evite que la sustancia que se forme cuando esté endurecido, produzca su destrucción (Instituto del Concreto, 1997)

El cemento CPC 30R RS se caracterizó por difracción de rayos X, para determinar cualitativamente las fases presentes y por Fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química.

Tamaño de partícula

El cemento CPC utilizado en la investigación presenta una gran variedad de tamaños. Figuras 37 y 38:

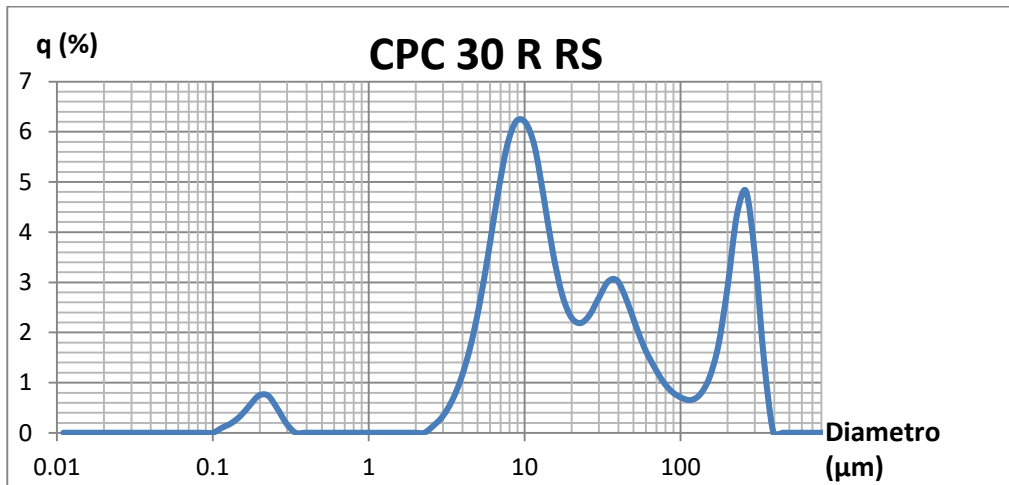


Figura 26.- Tamaño de partícula del cemento CPC 30R RS, (Arreola S. M., 2013).

También este CPC muestra una distribución uniforme desde los 3 hasta los 300 μm (gráfica siguiente).

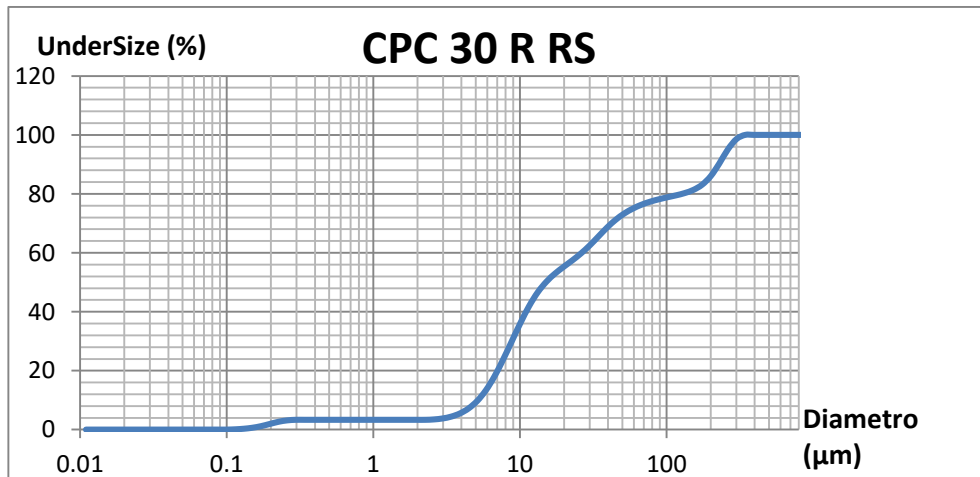


Figura 27.- Distribución de partículas del Cemento CPC 30R RS, (Arreola S. M., 2013).

Difracción de Rayos X

El cemento se caracterizó por difracción de rayos X, para determinar cualitativamente las fases presentes y por Fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química.

En el análisis por difracción de rayos X (Figura 39 y Tabla 9) se encontraron las fases típicas de los cementos Portland.

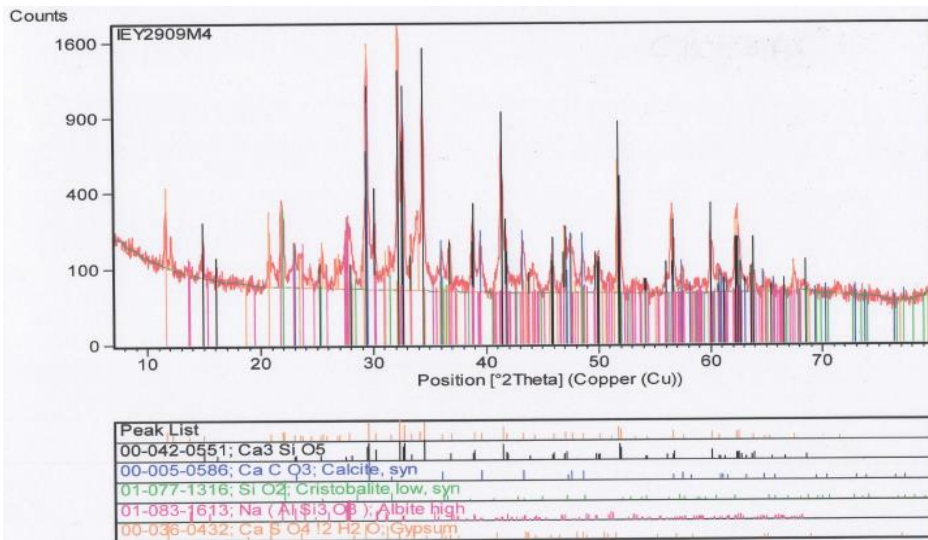


Figura 28.- Difractograma del cemento CPC 30R RS, (Arreola S. M., 2013).

Tabla 9.- Composición química del CPC. Fluorescencia de Rayos X, (Arreola S. M., 2013).

CPC 30R RS			
Componente	%	Componente	%
SiO ₂	23.88	SO ₃	3.791
Al ₂ O ₃	4.997	ZrO ₂	0
TiO ₂	0.217	Cl	0
Fe ₂ O ₃	2.972	Cr ₂ O ₃	0
MgO	0.88	SrO	0.061
MnO	0.096	ZnO	0.076
CaO	54.6	PXC/PPI	5.54
Na ₂ O	1.23	BaO	0
K ₂ O	1.666	P ₂ O ₅	0
Suma = 100.006			

Fluorescencia de Rayos X.

En la tabla anterior se presenta la composición química del CPC 30R RS, usado en la investigación.

Tabla 10.- Partes por millón (ppm) de elementos químicos presentes en el CPC 30R RS.

Elemento Químico	ppm	Elemento Químico	ppm
Rb	30	Cr	46
Sr	326	Co	4
Ba	81	Ni	19
Y	6	Cu	62
Zr	59	Zn	326
Nb	3	Th	<3
V	75	Pb	38

Forma de la partícula

Se observa en la Figura 40, que la forma de las partículas del cemento CPC es muy similar al de los materiales y cenizas muestreadas que tienen un origen mineral, solo que en el caso del CPC se observa una mayor variedad de tamaños.

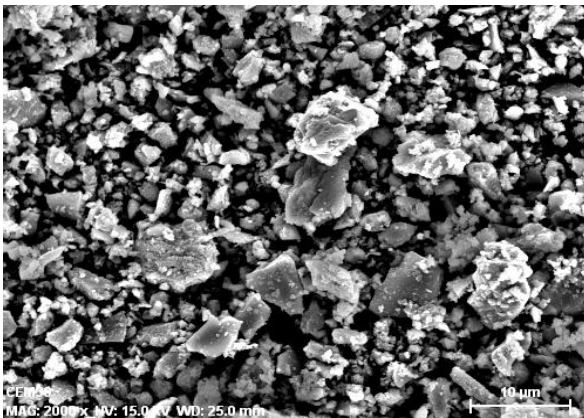


Figura 29.- Forma de partículas del cemento CPC 30R RS, (Arreola S. M., 2013).

4.2. Arena utilizada

Se utilizaron dos tipos de arena: del Río Huajúbaro, Mpio. de Zinapécuaro y arena volcánica, del Banco de Materiales de “Joyitas”, Mpio. de Morelia, Michoacán, México.

4.2.1. Arena de río.

La arena utilizada fue del Río Huajúbaro proveniente del banco llamado “Ojo del cuervo” en el poblado del “El Cuervo” ubicado en el municipio de Zinápecuaro, Michoacán. Figura 41.



Figura 30.- Arena del Río Huajúbaro, poblado El Cuervo, municipio de Zinápecuaro, Michoacán, (Argüello H.S, 2012)

Tabla 11.- Caracterización física de arena de río.

CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA DE RÍO						
MATERIAL	% H. ACTUAL	% H. ABSORCION	DENSIDAD (g/cm ³)	PVSS (kg/cm ³)	PVSV (kg/cm ³)	MF
Grava	1.17	3.22	2.25	1470.00	1540.00	3.22

Fluorescencia de Rayos X

Para la prueba de fluorescencia de rayos X se implementó la siguiente metodología de análisis:

Las muestras fueron analizadas por método Semicuantitativo en Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con dispersión de longitud de onda, para lo cual se utilizó un equipo Marca BRUKER Modelo S4 PIONNER, el cual está provisto de una fuente de excitación de 4kW, la interpretación de los datos se realizó utilizando el software SPECTRA plus. Se realizó un barrido al vacío de 71 elementos (Na-U), con un %RSD aproximado para concentraciones >1% de 5 a 10 y para concentraciones <1% de 10 a 20 bajo las siguientes condiciones:

- Tubo de RX con ánodo de Rh
- Voltaje de excitación de 25 a 60 kv.
- Colimador de 0.46dg
- Máscara de colimador de 34mm
- Cristales LIF200 (lithium fluoride) y PET (pentaerithrit)

Los compuestos aquí reportados se calcularon por Estequiometria basándose en los elementos determinados por FRX.

En la Tabla 12 se comprueba el alto contenido de cuarzo de la arena, ya que el contenido de sílice es superior al 78% y dado que es un material de origen volcánico se puede inferir que la sílice está presente en forma cristalina.

Tabla 12.- Composición química de arena del río Huajúbaro.

Arena del río Huajúbaro			
Componente	%	Componente	%
SiO ₂	78.185	CaO	1.015
Al ₂ O ₃	11.557	Na ₂ O	2.666
TiO ₂	0.203	K ₂ O	3.577
Fe ₂ O ₃	1.567	PXC/PPI	1.19
MgO	0.239	BaO	0
MnO	0.03	P ₂ O ₅	0.036
Suma = 100.29			

Forma de la partícula

Como se puede apreciar en la Figura 42, las partículas de la arena son fragmentos de roca redondeados por el arrastre del río.

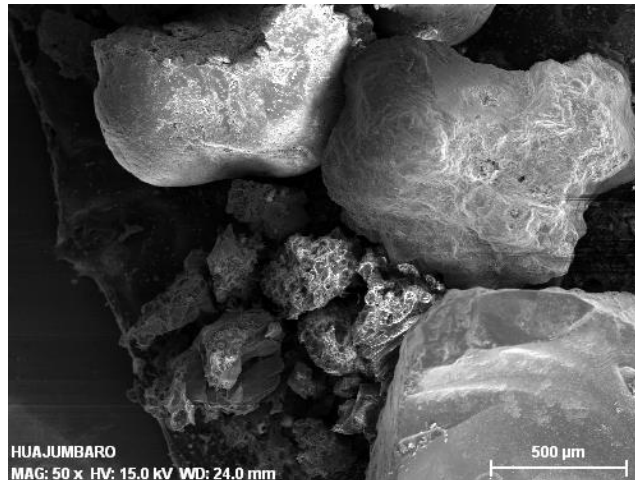


Figura 31.- Forma de partículas de arena de Huajúbaro, (Arreola S. M., 2013).

Equipo de caracterización utilizado para análisis de arena:

Para el caso de las pruebas de tamaño de partícula y distribución, las muestras fueron analizadas en el Cinvestav, Unidad Saltillo, México.

Para determinar la forma de partícula se utilizó la técnica de SEM en el instituto de investigaciones metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

4.2.2. Arena volcánica.

La otra arena utilizada en este trabajo es volcánica andesítica, roca ígnea extrusiva, del banco “Joyitas”, Mpio. de Morelia, Michoacán, México, el cual se localiza en el Km 8+500, sobre la carretera Morelia-Zacapu. Este banco de material funciona mediante cribado del agregado, encontrándose en él también otros agregados como grava, sello y filtro, siendo uno de los bancos de materiales más populares de la región de Morelia.



Figura 32.- Banco de materiales “Joyitas”, Mpio. de Morelia, Mich., México (Díaz G.N., 2013).

En la Tabla 13 se muestran el contenido de elementos químicos de la arena:

Tabla 13.- Determinación en ppm de elementos químicos presentes en la arena de Joyitas, por medio de Fluorescencia de Rayos X.

Arena de Joyitas.			
Elemento	ppm	Elemento	ppm
Rb	50	Cr	76
Sr	591	Co	75
Ba	567	Ni	64
Y	31	Cu	148
Zr	177	Zn	107
Nb	56	Th	<3
V	96	Pb	9

4.3. Grava utilizada

Se empleó grava triturada de origen volcánico, de rocas ígneas extrusivas, clasificadas como andesitas, del banco Supra (Triturados Supra), el cual se encuentra en al norte de la ciudad de Morelia, Mich. Se empleó material triturado de 3/4” como tamaño máximo del agregado. Figura 44.

4.3.1. Grava Triturada



Figura 33.- Grava triturada, Banco “Supra”, Mpio. Tarímbaro, Mich., México (Díaz G.N., 2013).

Tabla 14.- Caracterización física de la grava triturada.

CARACTERÍSTICAS DE LA GRAVA TRITURADA						
MATERIAL	% H. ACTUAL	% H. ABSORCION	DENSIDAD (g/cm ³)	PVSS (kg/cm ³)	PVSV (kg/cm ³)	TM
Grava	1.21	2.41	2.710	1381.60	1506.60	3/4"

La Tabla 15 muestra la determinación en ppm de elementos químicos, Grava del Banco de Materiales SUPRA, por medio de Fluorescencia de Rayos X.

AGC(G)			
Elemento	ppm	Elemento	ppm
Rb	52	Cr	117
Sr	782	Co	28
Ba	417	Ni	15
Y	21	Cu	82
Zr	164	Zn	73
Nb	10	Th	<3
V	173	Pb	10

4.3.2. Grava de cantos redondeados

La grava fue obtenida del río Huajúmbaro, al igual que la arena, por lo que los estudios de fluorescencia para determinar la composición química, se consideran iguales que los realizados para la arena y mostrados antes. Físicamente, en el lugar, la muestra fue recolectada como una grava-arena, pero ya en el laboratorio se dividió por la malla N° 4, ASTM.

Un canto rodado o guijarro es un fragmento de roca suelto, susceptible de ser transportado por medios naturales como las corrientes de agua, los corrimientos de tierra, etc. Aunque no se hace distinción de forma, en general, un canto rodado adquiere una morfología más o menos redondeada, subredondeada u oblonga, sin aristas y con la superficie lisa, debido al desgaste sufrido por los procesos erosivos, generalmente causados por la corrosión, las corrientes de agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica).



Figura 34.- Grava-arena del Río Huajúmbaro.

Tabla 15.- Caracterización física del agregado grueso de cantos redondeados.

CARACTERÍSTICAS DE LA GRAVA DE CANTOS REDONDEADOS						
MATERIAL	% H. ACTUAL	% H. ABSORCION	DENSIDAD (g/cm ³)	PVSS (kg/cm ³)	PVSV (kg/cm ³)	TM
Grava	1.92	4.72	2.38	1330.00	1460.00	3/4"

4.4. Agua utilizada

El agua de mezclado utilizada fue potable, de la red interna de Ciudad Universitaria, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El análisis

se realizó mediante un muestreo simple, siendo agua clara para la fabricación de mezclas base cemento Portland.

De los resultados se concluye que la muestra de agua analizada, cumple con los límites máximos establecidos para elaborar mezclas de concreto y de mortero hidráulico, que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 16.- Caracterización química del agua utilizada para mezclas base cemento Portland.

PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO	MÉTODO UTILIZADO
pH	7.37	> a 6	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura (°c)	18.5	-----	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad electrolítica	691	-----	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos solubles (mg/L)	388	1500	Electrométrico
Oxígeno disuelto (mg/L)	5.55		NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos (mg/L)	8		NMX-AA-074-1981
Cloruros (mg/L)	5.46		NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	104.28	-----	NMX-AA-072-SCFI-2001
Dureza cálcica (mg/L CaCO ₃)	89.72	-----	Volumétrico
Sales de magnesio (mg/L CaCO ₃)	14.56	150	Volumétrico
Demanda química de Oxígeno (mg/O ₂ /L)	1	10	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sólidos en suspensión (mg/L)	32	2000	NMX-AA-012-SCFI-2001

4.5. Nopal, Opuntia ficus-indica utilizado

4.5.1. Mucílago de Nopal

Las pencas de nopal excretan una sustancia “viscosa” llamada mucílago a la cual coloquialmente se le conoce como “baba de nopal” El mucílago del nopal es un

polisacárido fibroso, altamente ramificado, cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol. Contiene aproximadamente de 35 a 40 % de arabinosa, 20 a 25% de galactosa y xilosa cada una, y de 7 a 8% de ramnosa y ácido galacturónico cada uno. Durán (como se citó en Garti, 1999) menciona que el mucílago de nopal tiene la capacidad de formar redes moleculares, retener fuertemente grandes cantidades de agua y reduce la tensión superficial en soluciones acuosas; así como de modificar propiedades como viscosidad, elasticidad, textura, retención de agua, además de que es un buen gelificante, espesante, y emulsificante (Rodríguez González, et al, 2011).

4.5.1.1. Usos del mucílago de nopal en la industria de la construcción

Los usos tradicionales que tiene el nopal y sus derivados, además del valor que tiene como alimento en forma directa, se suma su aplicación en rubros de la construcción por sus propiedades aglutinantes en adobes y pinturas, o anticorrosivos, o como infiltradores de suelo entre otros.

En México hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal: aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua.

Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo; y también como una barrera al agua en el estuco (García Favela, 2013). A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante, la cual puede ser aplicada a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos (Torres Acosta A. A., Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).



Figura 35.- Mucílago de Nopal. Fuente: <https://asisucedo.com.mx/baba-nopal-sirve-purificar-agua/>

La sustancia viscosa albergada en el interior de la hoja de este cactus comestible, se utiliza en innumerables prospecciones para conservar restos arqueológicos.

Con el nopal se ha logrado una sustancia fácil de manipular, que no cambia el color de la superficie en la que se aplica.

En la región de Morelia, algunos de estos edificios restaurados con esta técnica son la Parroquia de San Juan Bautista en Tiripetío, Morelia Michoacán, el Templo de San Nicolás Tolentino en Chucándiro, Morelia Michoacán.

Este exitoso precedente ha extendido el uso del extracto de nopal a otros edificios históricos, como uno de los palacios ubicados en las pirámides arqueológicas de Teotihuacán, en las cercanías de la capital mexicana, o en el recinto religioso de Ixtapalapa, en el sur de esta metrópolis.

Para elaborar el compuesto con el que se restauran los edificios es necesario deshidratar, calentar y fermentar las hojas de la cactácea en un proceso que se prolonga más de un mes, “Las mejores hojas son las viejas, aquellas que tienen más de 10 años, pues son las que presentan un mejor mucílago” (Acha Palomares, 2009).

El mucílago de nopal también se ha utilizado en la elaboración de mortero y concreto hidráulico, encontrando que el mucílago de nopal incrementa los tiempos de fraguado, disminuye la absorción de agua y aumenta la resistencia a la compresión.

Asimismo, otras investigaciones han demostrado que el mucílago de nopal actúa como agente modificador de viscosidad de la pasta de cemento, con lo que se incrementa la resistencia a la segregación del concreto autoconsolidable, además de incrementar la resistencia a la compresión y reducir la absorción capilar de agua (Ramírez et al, 2012)

4.5.1.2. Aplicación de mucílago de nopal en morteros

En México, el mucílago de nopal ha sido utilizado históricamente como aditivo para morteros de cal debido a que previene el rápido secado del mortero, ayudando a la retención necesaria de la humedad que éste requiere para fraguar adecuadamente sin cuartearse (Pérez Castellanos, 2009).

La baba de nopal se ha empleado en el área de conservación principalmente en el centro y norte de la República. No obstante, en cada lugar se extrae, añade y usa de manera distinta.

Las proporciones de agua y penca de nopal varían en cada caso. Muchas veces depende de la experiencia del restaurador o de los trabajadores que han asesorado el procedimiento. A pesar de estas diferencias, todos coinciden en sus buenos resultados como aditivo y en el incremento de las propiedades de los morteros, ya que proporciona una mayor facilidad de manejo y minimiza las grietas en las intervenciones.

Se han estudiado ya los efectos que tiene la adición de diferentes cantidades de mucílago sobre el comportamiento mecánico de la pasta de cal, estos estudios han sido realizados solamente sobre las propiedades instantáneas de la pasta de cal, como son el esfuerzo máximo y la deformación. Se notó que el mucílago, inclusive a las concentraciones más bajas, interrumpía la red tridimensional formada por el hidróxido de calcio y ocasionaba una disminución en el desempeño de sus propiedades mecánicas en pruebas de esfuerzo-deformación con respecto a un control exento del mucílago (Pérez Castellanos, 2009).

Este efecto, que volvía a las pastas de hidróxido de calcio más quebradizas, se veía disminuido, sin embargo, a las concentraciones más altas del mucílago (1.65% en peso). Los autores atribuyen este comportamiento a que el mucílago puede formar, a esta concentración, una red tridimensional que se compenetra con la red de hidróxido de calcio mejorando así el comportamiento mecánico de la muestra (Figura 47).

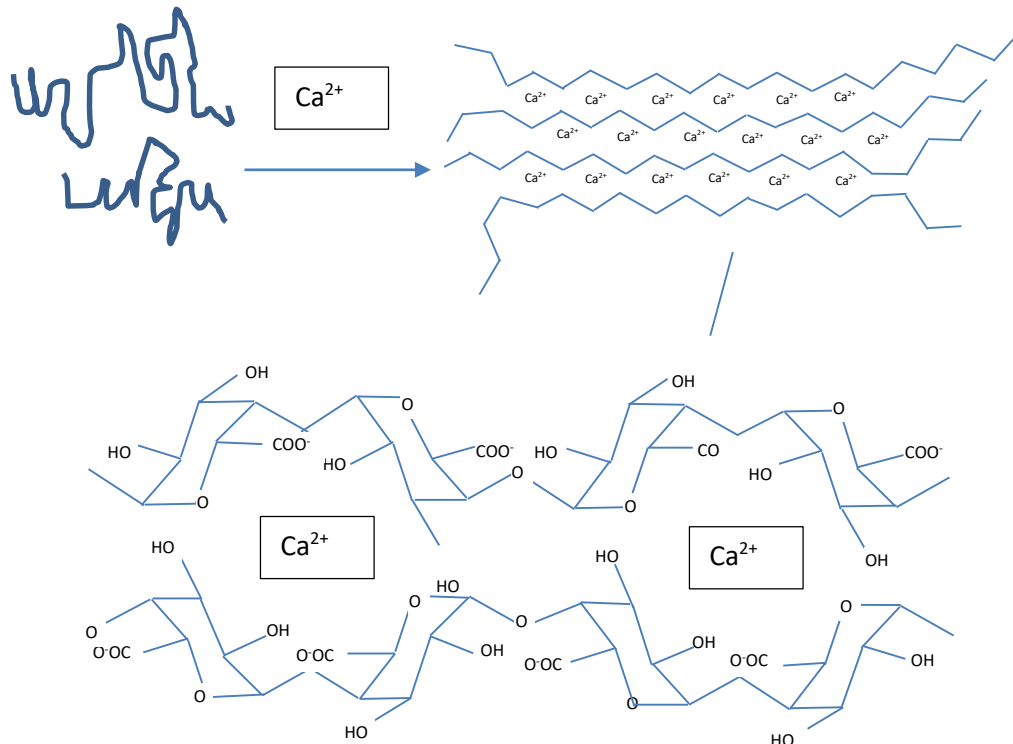


Figura 36.- Representación de la gelificación de pectina de nopal en presencia de iones calcio (Escuela Nacional de Conservación Restauración y Museografía, 2009).

Si aumenta la concentración de hidróxido de calcio las propiedades mecánicas aumentan también, debido a la formación de una red homogénea del mucílago dentro de la base de hidróxido, sin sufrir ningún tipo de deformación en su estructura el polisacárido.

En 2008 se realizó una investigación donde se estudió el comportamiento mecánico de morteros de cal apagada artesanalmente, adicionados con mucílago

de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales. Donde el mucílago fue un factor que permitió el incremento de la resistencia mecánica, pero también tuvo efecto sobre la trabajabilidad de la mezcla fresca de mortero, permitiendo mayor manejabilidad para el llenado de los especímenes (Martínez Molina, 2008)

4.5.2. Fibras deshidratadas de Cactus *Opuntia ficus-indica*

A este material no se le realizó ninguna prueba para determinar su tamaño o distribución de partículas, se empleó tal cual es proporcionado por el fabricante (Productos CU-CU). Dado que este material es completamente orgánico, no se realizó su caracterización de fases mineralógicas. No fue posible hacer el análisis de la composición química de la FN ya que las pérdidas por calcinación de la misma fueron del 88%. La forma de las partículas de la FN son fibras de formas alargadas. Figuras 48 y 49.

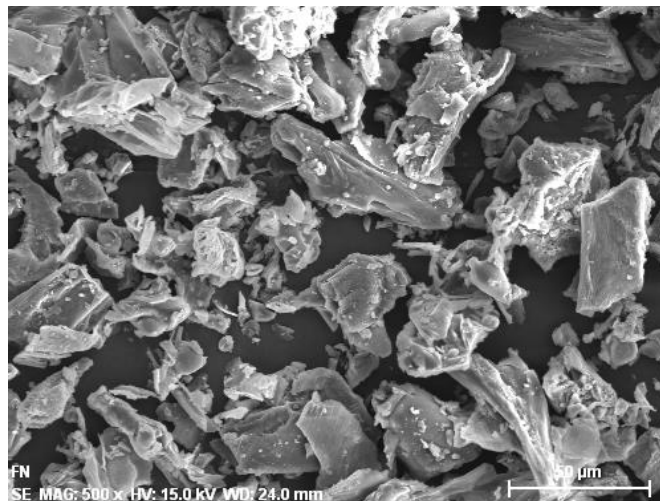


Figura 37.- Forma de partícula de Nopal *Opuntia ficus-indica*, (Arreola S. M., 2013).



Figura 38.- Fibra de nopal utilizada en la investigación, grado alimenticio. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4.6. Almidón de Maíz utilizado

El almidón es un biopolímero que ha sido utilizado en la industria de la construcción, sobre todo en la elaboración de morteros de cal, en procesos de restauración, también para enlucidos y revocos. Se ha estudiado el efecto de almidones y sus derivados en materiales con base cemento, ya que aquellos pueden actuar como aditivos modificadores de la reología, como espesantes y como reductores de agua. El uso de almidones como reductores de agua podría ser de especial interés, dado que son biodegradables y pueden ser incorporados en las mezclas en lugar de condensados de formaldehído-sulfonato de naftaleno (FDN) o plastificantes tipo policarboxilato (PC), los cuales son muy contaminantes. La adición de almidones contribuiría, por lo tanto, a reducir los problemas medioambientales.

4.6.1. Fécula de maíz utilizada en la investigación

El almidón o fécula de maíz que se utilizó en esta investigación tiene la característica de ser de grado alimenticio para humanos de nombre comercial Maizena® (Figura 50), empleando un porcentaje de sustitución del 2% incorporándole fibra de nopal en un porcentaje de 0.5% respecto al cementante.

S. Jacobo Jacobo en el 2014 realizó estudios con mezclas de concreto con un 2% de adición con respecto al cementante, en donde menciona que los resultados más

favorables comparados con una mezcla control de concreto, son en pruebas de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica. Figura 50.



Figura 39.- Almidón o fécula de maíz utilizada en la investigación, grado alimenticio. (V. H. Blancas).

4.7. Aditivo fluidificante utilizado.

Se utilizó un aditivo Fluidificante, de la Empresa Christianson, denominado CRISOTAN R-5, el cual es un agente dispersante que promueve la separación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras, causa que las mezclas de concreto fluyan con más facilidad que las mezclas convencionales.

Beneficios de CRISOTAN R-5:

- Permite reducir la relación agua –cemento
- Ayuda a tener una mejor y más rápida colocación del concreto.
- Permite disminuir el contenido de cemento, manteniendo la resistencia a la compresión.
- Mejora el acabado en concretos premoldeados.
- No afecta al calor de hidratación del concreto.
- No contribuye a la corrosión del acero.

El porcentaje de adición se hace con respecto al peso del cemento, al momento de elaborar las mezclas se adiciona al agua con que se elaborará el concreto para tener la mayor distribución entre toda la mezcla. (Figura 51).



Figura 40.- Fluidificante CRISOTAN R-5 homogenizado en el agua para la elaboración de especímenes, (Contreras M.E., 2016).

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.

La metodología empleada fue la experimental, empleando Normas Mexicanas e Internacionales para la realización de los ensayos, variando los porcentajes de adiciones de OFI y MZ, para comparar con los controles, y así conocer la incidencia de las adiciones sobre el fenómeno de la corrosión en el concreto hidráulico.

Las pruebas realizadas a las mezclas base CP en estado endurecido se pueden clasificar en no destructivas y destructivas. En esta investigación las no destructivas fueron: Densidad, Resistividad eléctrica, Medidas de propagación del pulso ultrasónico y las destructivas corresponden a Compresión simple, Flexión, Tensión directa y Tensión por compresión diametral. A continuación se describen los procedimientos de algunas de las pruebas realizadas durante esta investigación.

5.1. Pruebas no destructivas

Una definición general de prueba no destructiva es una revisión 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.

5.1.1 Densidad

La prueba de densidad se realizó en cinco especímenes cúbicos de cada mezcla, se siguió el procedimiento que marca libro de Análisis de Materiales, de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH (Navarro Sánchez, et al, 2011).

Equipo

- Picnómetro
- Probeta graduada
- Balanza con aproximación al décimo de gramo
- Agua

- Hilos

Procedimiento

1.- Los especímenes se sacan de los recipientes de curado y se enumeran, posteriormente se secan superficialmente con una franela, se pesa y se registra su masa como (M).

2.- Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana, se deja 10 min para la estabilización del agua, posteriormente se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una



Figura 41.- Determinación de la densidad (Villanueva Guzmán, 2016)

probeta graduada hasta que se escurra totalmente (Fig. 52); transcurridos 10 min de desalojo del agua, se anota el volumen de agua desalojado como el volumen (V) del espécimen.

Cálculos

$$D = \frac{M}{V}$$

Donde:

D = densidad en g/cm³

M = masa del espécimen en g

V = volumen del espécimen en cm³

5.1.2. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una prueba no destructiva que se realiza a los especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos. La resistividad eléctrica (también conocida como resistividad, resistencia eléctrica específica o resistividad de volumen) cuantifica la resistencia con la que se opone un material dado al flujo de corriente eléctrica. Una resistividad baja indica un material que permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica, es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad (Glosario Técnico, 2016).

Equipo

- Resistómetro, Flexómetro o Vernier, Esponjas

Procedimiento

1.- Se mide la muestra. A los cubos se les toman medidas de lado 1, lado 2 y espesor; en los prismas, se tomaron medidas de la base, espesor y longitud y en el caso de los cilindros se tomaron las medidas de su diámetro y su longitud.

2.- Se ajusta el amperímetro y el voltímetro y se monta la probeta en el resistómetro. Se utilizó uno Nillson Modelo 400. Los cubos se acomodan de acuerdo al lado que tenga menos imperfecciones, no por la cara de colado (Fig. 53). En los



Figura 53.- Determinación de la Resistividad Eléctrica.

prismas y los cilindros se colocan las placas a cada extremo de su longitud.

3.- Se verifica que haya contacto de los caimanes con las placas metálicas, y que las placas hagan buen contacto con la probeta a ensayar.

4.- Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente específica, (I).

5.- Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato.

Cálculos

La resistencia eléctrica, Re, se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = Re \frac{A}{L}$$

Donde:

ρ = resistividad eléctrica (ohm-cm)

Re = resistencia eléctrica (Volts)

A = área transversal del espécimen (cm²)

L = longitud del espécimen (cm)

Especificaciones

Tabla 17.- Parámetros de evaluación (Red DURAR, 2000).

Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	Riesgo de corrosión
< 10	Alto riesgo
10 – 200	Riesgo moderado
> 200	Bajo Riesgo

5.1.3. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Se realiza esta prueba para determinar la homogeneidad del mortero en este caso y determinar la presencia de vacíos (fallas internas). En primer término, se determinan las dimensiones y las masas de las probetas. La propagación de pulsos ultrasónicos, se consideran como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla (ASTM C597, 2009). Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es

detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).



Figura 42.- Equipo de velocidad de pulso ultrasónico (González Castro, 2016).

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; 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; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto. El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, que tienen que tener buen contacto con la superficie a probar; se empleó gel como medio conductor. Para la realización de la prueba, solo son necesarias 10 pulsaciones y el equipo realiza el promedio. Las probetas tienen que estar humedecidas para que no haya variación de los resultados. La velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

Tabla 18.- Parámetros de evaluación propagación de pulso ultrasónico (Red DURAR, 2000).

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del mortero
< 2000	Deficiente
2001 - 3000	Normal
3001 – 4000	Alta
> 4000	Durable

5.1.4. Módulo de elasticidad dinámico

Conocida la velocidad de pulso ultrasónico V , y adicionalmente determinando la densidad del material por un simple pesado de los especímenes en estudio, y por supuesto conociendo el volumen de la muestra, se puede evaluar el Módulo de Elasticidad Dinámico. Ahora bien, al realizar la evaluación faltaría conocer la magnitud del coeficiente de Poisson; en este caso dicho coeficiente, se podría estimar conociendo la calidad del material, que se podría calificar en función de la misma magnitud de la masa volumétrica medida (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2016).

$$Ed = V^2 Q \frac{(1 + U)(1 - 2U)}{1 - U}$$

Donde:

Ed = Módulo de Elasticidad Dinámico, en MN/m^2 .

V = Velocidad de pulso, en Km/s .

Q = Densidad del mortero, en Kg/m^3 (Masa saturada entre volumen del concreto)

U = proporción de Poisson (concreto de alta resistencia $U = 0.15$; concreto de baja resistencia $U = 0.30$).

5.2. Pruebas destructivas

Las pruebas destructivas en este caso, evalúan la resistencia del material ante esfuerzos, esa resistencia depende básicamente de los agregados, de la pasta de cemento hidratado, así como la integración que se genere entre ellos.

5.2.1. Resistencia a la compresión simple

El propósito es determinar la resistencia a la compresión en especímenes elaborados con cemento, arena y agua. Esta prueba se rige por las normas (NMX-061-C-ONNCCE, 2015) (ASTM C109, 2002) en cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada).

Procedimiento

Una vez que las muestras hayan cumplido la edad de prueba, se sacan del curado y se seca superficialmente, se obtienen las dimensiones de la cara que estará en contacto con la platina móvil de la máquina universal de pruebas (previo a realizar la prueba a compresión, se realizaron las pruebas no destructivas). Se llevan las muestras a la máquina y se aplica la carga en forma lenta hasta la falla de la muestra (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).



Figura 43.- Compresión simple en morteros (Bautista León, 2017).

Se aplicó carga a una velocidad constante en el rango de 50000 kg, con una aproximación de 0.5 kg, esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del espécimen, registrando esta carga para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109 M, I., 2002).

Cálculos

$$R = \frac{W}{A}$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión (kgf/cm²)

W = Carga de ruptura de la muestra (kgf)

A = Área de la muestra (cm²)

5.2.2. Resistencia a la flexión

Se realiza este ensayo para conocer el comportamiento del material base CP bajo esfuerzos de flexión (ASTM C348, 1997), en prismas (NMX-C-159-ONNCCE, 2004). La longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga

con una tolerancia de $\pm 2\%$. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, etcétera (NMX-C-191-ONNCCE, 2015).

Procedimiento

1.- Se marcó cada prisma a 2 cm de cada extremo y se aplicó la carga en el centro del claro (Fig. 60).

2.- Se colocaron los prismas sobre los soportes adecuados para esta prueba y se aplicó carga de manera gradual para evitar el impacto (ASTM C293, 2002) (ASTM C348, 1997), (Fig. 61).



Figura 44.- Colocación de espécimen sobre la platina, lista para cargarla (Bautista León, 2017).



Figura 45.- Rotura de la probeta justo en la marca (Bautista León, 2017).

Cálculos

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula con la ecuación:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

R = Módulo de ruptura (kPa) ó (kgf/cm²)

P = Carga máxima aplicada (N) ó (kgf)

L = Distancia entre apoyos (cm)

b = Ancho promedio del espécimen (cm)

d = Peralte promedio del espécimen (cm)

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio, el módulo de ruptura se calculará con la ecuación:

$$R = \frac{Pa}{bd^2}$$

Donde:

R = Módulo de ruptura (kgf/cm²)

P = Carga de ruptura (kgf)

a = Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano.

b = Ancho promedio (cm)

d = Peralte promedio (cm)

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5 % del claro, los resultados deben de descartarse.

5.2.3. Resistencia a la tensión directa

La resistencia a tensión directa es realizada en briquetas (morteros en forma de cacahuete), 5 especímenes por cada edad y por tipo de mezcla, en la máquina de prueba para tensión de mortero tipo Michaelis.

Procedimiento



Figura 46.- . Ejecución de la prueba de tensión directa.

1. Se toman medidas de la sección media de la briqueta.
2. Se nivela el equipo y se coloca la briqueta en las mordazas.
3. Se aplica la carga en velocidad constante, poniendo municiones y otros elementos para hacer la tensión hasta que la briqueta falle.
4. Después se retiran las municiones y se procede a tomar la lectura de masa, con una balanza o báscula que tenga una aproximación de 0.1 g, para conocer la carga que soportó la sección media de la briqueta.

Cálculos

$$R = \frac{Mm * 50}{Sm}$$

Donde:

R = resistencia a la tensión (kgf/cm²)

Mm = Masa de las municiones o carga de ruptura (kgf)

Sm = Sección media de la briqueta (cm²)

50 = Constante del equipo

5.2.4. Resistencia a la tensión indirecta

Esta prueba se realizó en los especímenes de forma cilíndrica. Se realiza esto después de las evaluaciones no destructivas.

Equipo

- Máquina de prueba (Tinius Olsen), Placa de acero (apoyo suplementario).
- Tiras de cuero (2 cm de ancho y la longitud igual al de la probeta).

Procedimiento

1. Se sacan las probetas de los recipientes de curado, en cada extremo de los especímenes se trazan líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure estén en el mismo plano axial.
2. Se toman las medidas de cada una de las probetas (longitud y diámetro).
3. Se coloca el cilindro de forma perimetral sobre la platina, en la parte inferior del cilindro se coloca una tira de cuero y también en la parte superior, encima va la placa de acero para que la carga se aplique de manera uniforme a toda la superficie del cilindro. Figura 60.
4. Se aplica una velocidad lenta y constante de carga para evitar que la falla sea por impacto (Fig. 59) y se toma la lectura de carga de falla.



Figura 47.- Prueba de tensión indirecta (López Regalado, 2015).



Figura 48.- Fallas de las probetas evitado que sea por impacto (Bautista León, 2015).

Cálculos

$$T = \frac{2P}{dL\pi}$$

Donde:

T = resistencia a tensión indirecta (kgf/cm^2)

P = carga aplicada máxima (kgf)

L = longitud (cm).

d = diámetro (cm).

Adherencia

De manera peculiar, la adherencia es una de las pruebas más importantes realizadas al mortero, pues se determina la resistencia que el mortero presenta al ser adherido a una superficie. Si la falla es del sustrato donde está adherido significa que es un mortero con componentes adecuados.



Figura 49.- Determinación de la resistencia al despegue con el equipo Pull-off (Bautista León, 2017).

Para llevar a cabo esta prueba se diseñó una losa de concreto de $1 \text{ m}^2 \times 7 \text{ cm}$, que sirvió como base para colocar las diferentes mezclas. Cuando llegó el momento de prueba se tenía que hacer perforaciones en las mezclas colocadas en la losa de concreto, se pudo realizar esto con ayuda de una cortadora en forma cilíndrica de 5 cm de diámetro. Después se usó un adhesivo epóxico (Sikadur 31-Hi Mod Gel®) para unir elementos de

acero llamados “Dólis”, estos elementos fueron usados para formar la unión entre el mortero y el equipo de prueba, equipo Pull-Off. Cabe mencionar que después de pegar los “Dolis”, se dejó secar 4 h, posteriormente a esto, se realizó la prueba de adherencia. Se llevaron a cabo 5 ensayos en cada mezcla.



Figura 50.- Falla de la base donde el mortero está adherido, (Bernabé C.)

El procedimiento es sencillo, se nivela el equipo, se acopla un tornillo con pequeña esfera en la parte superior al “Doli”, y se comienza a aplicar la carga haciendo girar una palanca acoplada al Pull-off; después de varios segundos puede apreciarse que el mortero o la base a la que está pegada ha fallado (Fig. 62). Existen cuatro tipos de fallas que puede obtenerse (ASTM C1583, 2004). Tienen que presentarse tres

fallas iguales para poder determinar la resistencia.

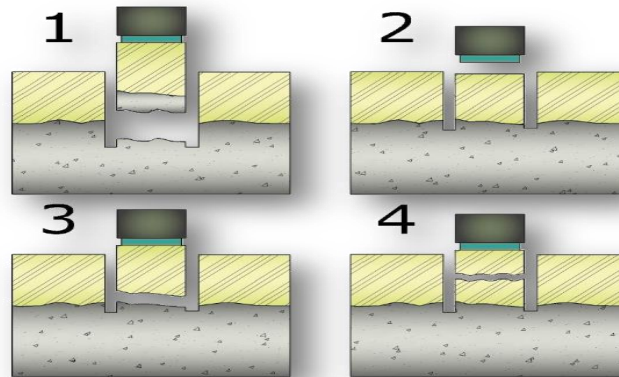


Figura 51.- Posibles fallas de adherencia (ASTM C1583, 2004), (Bernabé R.C., 2012)

5.3. Pruebas de durabilidad

La infraestructura construida de concreto reforzado, en el mundo, actualmente está sufriendo un deterioro acelerado, en muchos casos sin haber cumplido con la vida útil para la cual fue diseñada, y todo esto conlleva a un impacto económico negativo significativo (Ramirez Arellanes, et al, 2012). Es por ello que resulta necesario calcular tanto el tiempo en que pueden llegar a un riesgo de falla, así como decidir el momento óptimo para iniciar su rehabilitación. A la vez es importante

establecer el tipo de mantenimiento al que debe someterse la infraestructura, sujeta a ciertas condiciones ambientales, ya que el ambiente es un factor muy importante para su durabilidad (López Celis, y otros, 2006).

Las causas químicas: ataque por sulfatos, ácidos, mar, agua, y también por cloruros, que inducen corrosión electroquímica del refuerzo de acero, tiene lugar con la masa de concreto, el agente atacante debe ser capaz de penetrar en todo el concreto, que por lo tanto tiene que ser permeable.

La permeabilidad es, por lo tanto, de interés crítico. El ataque es ayudado por el transporte interno de agentes por difusión debido a gradientes internos de temperatura y por ósmosis (Neville A. , 2010).

5.3.1. Determinación de la sanidad por medio de sulfato de sodio

Algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto o mortero son los iones de sulfatos del suelo, del agua de mar o del agua freática (Guy , 1980). 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.

Equipo

- Botes de 19 L, Horno, mezclador eléctrico
- Sulfato de sodio (Na_2SO_4), Agua
- Cucharones, balanzas, Charolas, recipientes, especímenes



Figura 64.- Especímenes en horno, prueba de ataque acelerado por sulfato de sodio anhidro.

Procedimiento

1. Se secan las probetas cúbicas a $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ durante un periodo de 24 h.
2. Se prepara la solución de sulfato de sodio, mezclando 350 g de sulfato y 1 litro de agua. Se agita constantemente durante 1 h, y se deja enfriar por 24 h. Se preparan dos botes de 19 L de solución, para poder llevar a cabo 5 ciclos de inmersión.
3. En esta prueba se registra el peso inicial de los especímenes; en el caso de morteros en esta experimentación, a tres se les hicieron pruebas físico-mecánicas (Resistividad eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Gravedad específica, Densidad y compresión), estos fueron testigos, que no fueron sometidos al ataque de sulfatos.
4. En una charola se colocaron todos los cubos, incluyendo los probados, para que se secan a $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Después de 24 h, se llevó a cabo la inmersión de las 15 probetas restantes.
5. En un recipiente se puso una rejilla, sobre esta, se colocaron los 15 cubos, y se le añadió la solución de sulfato de sodio, dejando el nivel 2 cm arriba de los cubos, durante menos de 16 h y no más de 18 h (NMX-C-075-ONNCCE, 2006).
6. Transcurrido el tiempo de inmersión se sacaron los cubos y se dejaron escurrir 15 min, para posteriormente se hicieron las pruebas físico-mecánicas

nuevamente. Después de las pruebas se introducen al horno todos los especímenes, después de 24 h se obtuvo su peso, y se sometieron a inmersión.

7. Fueron 5 ciclos de inmersión y secado, sin contar los cubos testigos de la mezcla.
8. Al término de los ciclos las probetas sufrieron afectación en las orillas.

Los resultados representan una comparativa entre las evaluaciones físico-mecánicas de los cubos testigo y los cubos que se sometieron a inmersión en sulfato.



Figura 65 .- Probetas de la mezcla "Control" en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015).



Figura 66.- Probetas de la mezcla MN 1:3, en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015).

5.3.2. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros

La permeabilidad al ion cloruro corresponde a un ensayo de penetración rápida de cloruros (RCPT), esta es una medida eléctrica que consiste en el monitoreo de la corriente eléctrica que pasa a través de un espécimen cilíndrico de concreto, al aplicar 60 V durante 6 h; la integración de la gráfica corriente vs tiempo da origen a la medida de la carga transmitida en unidades de coulombs. Con base en los valores de carga transmitida, la permeabilidad de los concretos se clasifica en alta, moderada, baja, muy baja o despreciable (ASTM C1202, 2012). Esta clasificación no puede ser aplicada en el presente estudio debido a que el ensayo se ha realizado en morteros, sin embargo, el concepto, de mayor o menor resistencia al paso de los iones cloruros, continúa siendo válido (Valencia, Mejía de Gutierrez, Barrera, & Delvasto, 2012).

Debido a que el diseño de la RCPT indica el movimiento de todos los iones en la estructura y no solamente los de cloro, cuando se usan adicionantes minerales o aditivos como reductores de agua, superplastificantes o inhibidores de corrosión en exceso, pueden presentarse resultados erróneos, ya que existe una modificación de la composición química de la estructura porosa (Jacobó Jacobo S. , 2014)

La prueba fue realizada con el equipo automatizado "PROOVE'it", el cual proporciona el historial de lecturas de amperaje en intervalos de 5 minutos durante las 6 horas de prueba, arrojando el resultado en Coulombs y la clasificación de la mezcla.

Procedimiento

1. Se elaboraron cilindros de mortero de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, cumplida la edad de prueba (180 días), se cortaron en pastillas de 5 cm de espesor manteniendo el diámetro. Paralelo a esto, se hierve la cantidad de agua necesaria para la prueba, durante 15 min con el objetivo que esté libre de aire. Se procede a dejarla enfriar y colocarla a un lado del desecador.

2. Se proceden a colocar 3 pastillas dentro del desecador. Se limpia el sello o empaque del desecador y se procede a humedecerlo completamente con vaselina. Se coloca la tapa al desecador, en seguida se conecta una manguera con un extremo conectado a una bomba de vacío y el otro a una de las válvulas del desecador. Se extrae el vacío entre 10 a 15 min.
3. En seguida se cierra la válvula conectada a la bomba, y se deja la experimentación durante 3 h.
4. Se prepara solución con 1 l de agua destilada por 30 g de NaCl de grado técnico.
5. Se preparó solución con 1 l de agua destilada por 12 g de NaOH de 97% de pureza.
6. Se procede a introducir el agua libre de aire conectando una segunda manguera a la válvula opuesta del desecador y colocando el otro extremo de la manguera dentro del recipiente. Se procede a abrir la válvula, lo que generará que el agua fluya hacia el desecador (por el vacío generado dentro del desecador) hasta cubrir totalmente las muestras, dejando un tirante de agua por encima de ellas. Esto se hace sin permitir que entre aire al desecador.
7. Se revisa que estén cerradas ambas válvulas antes de prender la bomba, con el motivo de que no absorba agua la bomba de vacío. Se abre la válvula de la manguera que está conectada a la bomba para generar vacío por 1 h.
8. Se desconecta la bomba y se quitan las mangueras, para inmediatamente después abrir una de las válvulas lentamente para que entre aire al desecador. Dejando los especímenes dentro del desecador durante 18 h.
9. Transcurridas las 18 h se extraen las muestras del desecador para colocarlas en las celdas de cloruros, colocando los empaques en los bordos del espécimen recubiertos con vaselina, para que no haya desprendimiento de sustancias al momento de probarlas. Las celdas se sujetan con tornillos que están en las cuatro orillas para confinar el espécimen.

10. Con ayuda de un embudo, se llenan completamente las celdas. Se conectan las terminales (positivo y negativo) a la fuente de carga, además, de conectar un cable que servirá como medidor de temperatura, en donde está contenido el Hidróxido de Sodio (NaOH).
11. Se conecta la fuente de carga y se inicia el programa en la computadora para tomar las medidas de cada espécimen.
12. El proceso se lleva a cabo y será hasta transcurrido las 6 h cuando el programa mismo muestre los resultados en los diferentes íconos que contiene.

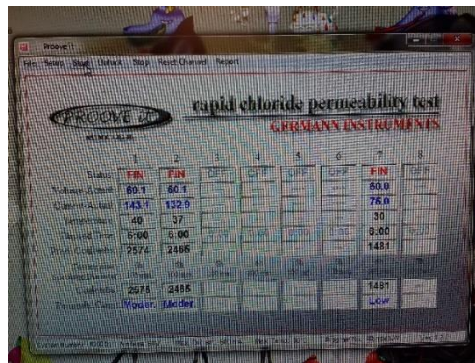


Figura 52.- Esquema del programa PROOVE it, análisis de resultados.

Tabla 19.- Tipos de permeabilidad (ASTM C1202).

Coulombs	Tipo de permeabilidad	Tipo de relaciones a/c
>4000	Alta	Relaciones a/c altas
4000 – 2000	Moderada	Relaciones a/c de 0.4 a 0.5
2000 – 1000	Baja	Relaciones a/c menores de 0.4
1000 – 100	Muy baja	Concreto modificado con látex
< 100	Despreciable	Concreto polimérico

5.3.3. Ciclos acelerados de hielo-deshielo en prismas de 6cm x 6cm x 24cm

Un ciclo hielo-deshielo es un fenómeno cíclico de congelamiento y descongelamiento del agua contenida en los poros del concreto endurecido en períodos de tiempo determinados. Constituye uno de los agentes agresores más destructivos del concreto, ya que involucra y afecta tanto la pasta y los agregados individualmente como en conjunto.

El deterioro del concreto por el ciclo hielo-deshielo se da cuando al congelarse la masa de agua contenida en los poros (macroporos y poros capilares) del mismo se expande hasta aproximadamente un 9% de su volumen en estado líquido, lo cual genera grandes esfuerzos de tracción en la masa de concreto (pasta y agregados), haciendo que se fracture por su baja resistencia a la tracción, y origine grietas o fisuras para liberar las tensiones producidas (Páez Moreno, Leal Moreno, & Restrepo Burgos, 2009).

El procedimiento descrito para la realización de esta prueba intenta determinar los efectos en la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo (ASTM C666, 2015).

Se deben tener controlados las temperaturas cuando se estén probando las muestras; deberán disminuir de 4°C a -18°C, y para el caso de deshielo deberán de incrementarse de -18°C a 4°C, en no menos de 5 h.

Los especímenes empleados para esta prueba deberán de ser de forma de prisma o cilindro, elaborados y curados conforme a lo que rige la norma (ASTM C192/C192M, 2016) y (ASTM C490, 2011). Los especímenes utilizados no deberán de ser menores a 75 mm ni mayor a 125 mm de ancho, espesor o diámetro, tampoco podrán de ser menores de 275 mm o ni mayores de 405 mm de longitud (ASTM C666, 2015).

Procedimiento



Figura 68.- Evaluaciones de las probetas (Bautista León, 2016).

1. Se elaboraron probetas prismáticas de 6 cm x 6 cm x 26 cm (sin especificación de norma), ya que fueron las del único tamaño que se pudo realizar en el laboratorio. Fueron tres prismas por mezcla y se mantuvieron curados durante 180 días (edad de prueba para esta investigación).
2. Desde 3 días antes se monitoreó el refrigerador industrial que se utilizó para que cumpliera a -18°C .
3. Cumplidos los 180 días, se inició con el ciclo cero, haciéndoles evaluaciones de: masa superficialmente seca, resistividad eléctrica, velocidad de pulso, frecuencia de resonancia, así también lecturas de ancho, espesor y longitud.

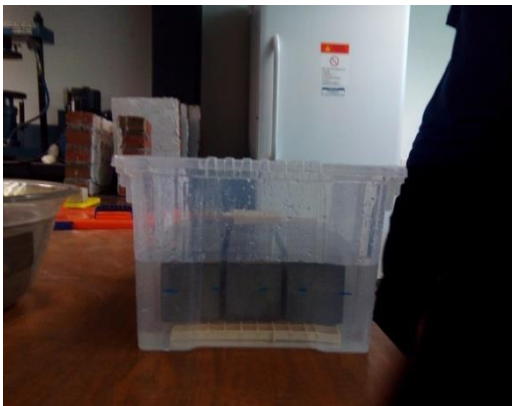


Figura 69.- Probetas listas para ser introducidos al frigorífico durante 4 h (Bautista León, 2016).

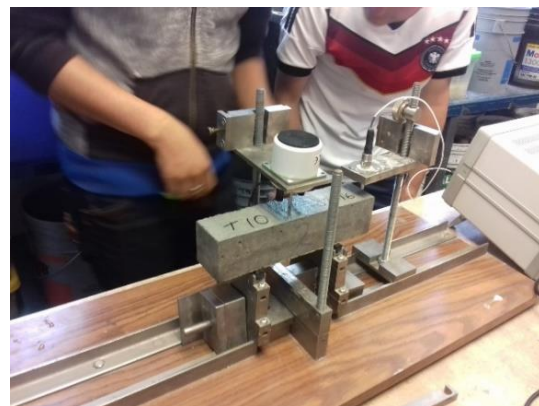


Figura 70.- Prueba de frecuencia de resonancia (Bautista León, 2016).

Se colocaron las probetas en un recipiente (tres de cada mezcla, tres recipientes) y se llenaron con agua hasta tener un tirante de 2 cm sobre los especímenes.

4. Se introdujeron los recipientes al refrigerador durante 4 h, transcurrido este tiempo se sacan los especímenes del refrigerador y se toma su temperatura, se toman de nuevo las medidas y las pruebas del ciclo cero.
5. Después se introdujeron al refrigerador por 4 h, enseguida se les hacen las mediciones y así sucesivamente, durante 15 ciclos (ciclo 0 al ciclo 14).

Entre el ciclo 5 y 8, surgía acumulación de hielo, se retiraba del recipiente y se sustituía por agua. Los resultados a analizar fueron la linealidad de la frecuencia de resonancia. Por otro lado, el dato obtenido de frecuencia de resonancia, se puede utilizar para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el módulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en prismas o cilindros de concreto, es decir, para la detección de cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámico de las muestras

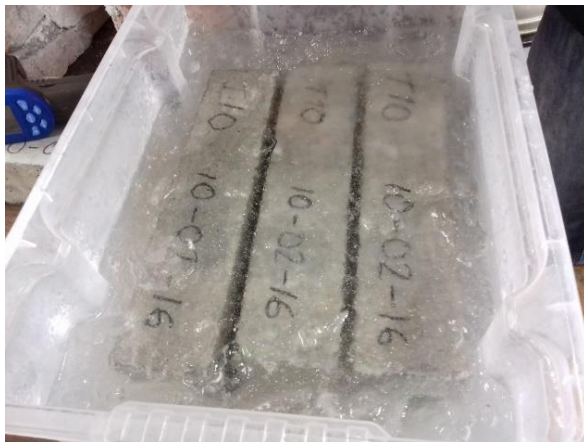


Figura 53.- Probetas envueltas de hielo en el ciclo 6 (Bautista León, 2016).

de laboratorio o campo que han sido expuestas a la intemperie o a otro tipo de influencias de deterioro (Alvarado Alcaraz, 2010).

5.4. Módulo de elasticidad dinámico

$$Ed = [(4n)^2 L^2 P] \times 10^{-12}$$

Donde:

Ed = módulo de elasticidad dinámico (MN/m²)

P = densidad del concreto (Kg/m³)

L = longitud del espécimen (m)

n = frecuencia fundamental longitudinal (Hz)

5.5. Carbonatación

El objetivo de esta prueba es cuantificar el daño que sufren por contaminantes ambientales, como el CO₂, las estructuras de concreto armado y/o con recubrimiento de mortero (Villanueva G., 2016). Desde el punto de vista químico, la carbonatación del concreto origina la disminución de pH que ocurre cuando el CO₂ del medio ambiente penetra por la red de poros capilares reaccionando con la humedad presente y convirtiendo el hidróxido de calcio (de pH elevado) a carbonatos, los cuales son neutros, reduciendo por consiguiente, la alcalinidad del concreto.

Un concreto permeable puede carbonatarse rápidamente, para esto, basta la pequeña concentración de CO₂ (0.03%) presente en la atmósfera. Cabe señalar que esta concentración puede incrementarse en lugares específicos, tales como estacionamientos con poca ventilación, túneles, cierto tipo de industrias, laboratorios, etc., lo que acentuará el fenómeno (Durán-Herrera, Fajardo-San Miguel, Valdez-Tamez, & Juarez-Alvarado, 2009).

La fenoftaleina (C₂₀H₁₄O₄) es un indicador de color (de rojo a incoloro) al pasar de pH alcalino a neutro. En caso concreto de los morteros, la aplicación de fenoftaleina produce color rojo vinoso intenso cuando el mortero está fresco y predomina como base mineral la portlandita (medio alcalino) e incoloro cuando la fase predominante es la calcita (medio neutro).

Así el proceso de carbonatación se manifiesta como una corona incolora que avanza hacia el núcleo desde la parte externa de la probeta. Esta técnica, se considera fiable según K. Kouzell, si en la muestra existe más de un 10 % de portlandita, y consistente en la aplicación de una solución de fenoftaleina sobre superficies de morteros recién cortadas con el fin de que exista la mínima exposición al CO₂, ya que el avance de la carbonatación se lleva a cabo a través del sistema poroso, por difusión desde el exterior hacia el interior de la probeta.

Procedimiento

Se realizó una solución de trabajo reactiva, la cual está constituida por 1 g de Fenolftaleína, 49 g de alcohol grado 96 y 60 g de agua destilada. Se parte el espécimen (prisma de 4x4x16 cm) con un mazo para obtener el resultado de una parte que no estuvo expuesta su cara de manera directa. Después se le rocía la solución sobre el espécimen y se deja reaccionar por 1 min. La parte que no se tiñe de color purpura es la que se encuentra “carbonatada”, indica que el valor de pH está por debajo de 9, por lo cual ya se podría generar a esa profundidad el fenómeno de corrosión. Se toman 4 lecturas de las profundidades de carbonatación para obtener un promedio del espécimen y se hace por triplicado esta prueba.

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

$$Carb = \frac{Prof_{Prom}}{\sqrt{T_{cte}}}$$

Donde:

Carb = proyección de carbonatación promedio, en mm/año.

Prof_{prom} = promedio de las lecturas de carbonatación tomadas, en mm.

T_{cte} = constante del tiempo (edad) de exposición a la que se realizó la prueba, en años.

Para obtener la constante de tiempo de exposición a la que se realizó la prueba, se utiliza la siguiente fórmula:

$$T_{cte} = \frac{T_{Prueba}}{T_{Año}}$$

Donde:

T_{cte} = constante del tiempo (edad) de exposición a la que se realizó la prueba, en años.

T_{Prueba} = edad a la que se realizó la prueba de carbonatación, en días

$T_{Año}$ = cantidad de días en un año, 365.25 días.

Para realizar la proyección a lo largo de los años se hace con la siguiente ecuación:

$$Carb_n = Carb * T_n$$

Donde:

$Carb_n$ = carbonatación proyectada al año "n", en mm

$Carb$ = proyección de carbonatación promedio, en mm/año

T_n = edad "n", en años



Figura 55.- Exposición de probetas a la intemperie (Bautista León, 2015).



Figura 54.- Aplicación de fenolftaleína para verificar la carbonatación (Bautista León, 2015).

5.6. Absorción capilar

La porosidad está reconocida en todo el mundo como uno de los parámetros en el concreto endurecido de mayor influencia en los mecanismos de transporte de

los agentes agresivos hacia el interior de su estructura. Más específicamente dentro del estado poroso-capilar del concreto es la porosidad efectiva, o sea la porosidad interconectada y conectada a su vez con el exterior, la que tiene una influencia decisiva en el intercambio de humedad con el entorno y por lo tanto en la materialización de dichos mecanismos de transporte. El porcentaje de porosidad efectiva de los concretos está considerado una medida del grado de durabilidad de las estructuras frente a los agentes agresivos. Además se ha comprobado que cuando el árido utilizado es poroso (lo que se caracteriza por su elevada absorción de agua), se incrementará con ello la porosidad y permeabilidad del concreto (Howland & Martín, 2013).

Esta prueba nos permite conocer el comportamiento de los vacíos que se encuentran dentro de la matriz del mortero, para ver qué tan intercomunicados se encuentran entre sí, y por ende, la absorción capilar que tiene el material (Villanueva G., 2016).

Procedimiento

1. Se emplearon probetas cúbicas (5 de cada mezcla) de 5x5x5 cm, primeramente se secaron hasta masa constante.



Figura 57.- Sumergido de probetas para iniciar la prueba (Bautista León, 2015).



Figura 56.- Probetas en prueba de absorción capilar.

2. Después de esto se cubrieron las caras laterales (cuatro caras) con parafina de un espesor aproximado de 3 mm, para evitar que absorbieran agua por estas caras y sólo fuera por la cara inferior, se pesaron los especímenes con parafina y esta se nombró como

masa seca inicial (W_0), para después sumergirlos en un recipiente sobre una esponja (Fig. 81), con un tirante aproximado de 2 a 3 mm, referenciado desde la parte inferior de las probetas.

3. Se tomaron las primeras lecturas de la masa a 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, después se tomaron las lecturas de la masa por el periodo de 24 h. Se deja de hacer esto hasta haber logrado masa constante.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida, en este caso fue morteros. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los ambientes agresivos (González Castro, 2016). El porcentaje de porosidad efectiva de los concretos está considerado una medida del grado de durabilidad de las estructuras frente a los agentes agresivos. Además se ha comprobado que cuando el árido utilizado es poroso (lo que se caracteriza por su elevada absorción de agua), se incrementará con ello la porosidad y permeabilidad del concreto (J.J. & A. R., 2013).



Figura 58.- Toma de lecturas de peso, procurando usar siempre el mismo equipo (Bautista León, 2015).

Se describe la cinética de la absorción capilar (S) de morteros y concretos a través de tres coeficientes: K (Coeficiente de absorción capilar), m (Resistencia a la penetración al agua), y ϵ_e (Porosidad efectiva).

Cálculos

$$K = \frac{\sum \frac{(w_t - w_0)}{A_0}}{\sum \sqrt{t}}$$

Donde:

W_t = masa del espécimen en el tiempo en donde cambia la pendiente, (kg)

W_0 = masa del espécimen seco, (kg)

A_0 = área de contacto del cubo, (m²)

K = coeficiente de permeabilidad, (kg/m² s^{1/2})

K es evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(W_t - W_0)/A$ como función respecto de la raíz del tiempo $t^{1/2}$.

$$m = \frac{t}{z^2}$$

Donde:

t = tiempo del cambio del comportamiento de la absorción, (s)

z = profundidad de penetración del agua en el tiempo "t", (m)

m = pendiente de los primeros valores de absorción capilar, (s/m²)

$$\varepsilon = \frac{K \times \sqrt{m}}{10}$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad, (kg/m² s^{1/2})

m = pendiente de los primeros valores de absorción capilar, (s/m²)

ε = porosidad efectiva, (%)

La absorción capilar, S , se calcula como: $S = \frac{1}{\sqrt{m}}$

5.7. Porosidad total

Se realiza para determinar el porcentaje de porosidad del mortero y que tan susceptible es el mortero ante agentes agresivos. Se realizó sobre tres probetas cúbicas (cada una de 5 cm de arista) a la edad de 180 días de cada mezcla.

Procedimiento

1. Concluida la edad de 180 días, se extrajeron los especímenes del curado de inmersión, se enumeraron, se midieron las longitudes reales y masas sumergidas.
2. Se metieron al horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que estuvieran en masa constante. Después del horno se registraron las masas secas.
3. Se pusieron las probetas en agua hirviendo durante 5 h. Se deja enfriar los especímenes hasta $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se registró la masa húmeda.

Cálculos

$$\varepsilon = \left(\frac{M_{\text{Húmedo}} - M_{\text{Seco}}}{M_{\text{Húmedo}} - M_{\text{Sumergido}}} \right) 100$$

Donde:

ε = Porosidad total (%)

CAPÍTULO 6. EXPERIMENTACIÓN.

En este Capítulo se exhiben cuatro diferentes fases de la investigación, las cuales se muestran en la Tabla 21.

Tabla 20.- Fases de la Investigación

Fase de la investigación/ Pruebas	6.1. Concreto con cantos rodados, arena de río, 2% adición fibra OFI. Edades: 7,14,28 y 40 días. CPC 30R RS	6.2. Concreto con grava triturada, 2% adición fibra de OFI. Edades: 7,14,28 y 40 días. CPO 30R RS BRA	6.3. Mortero con arena volcánica, adición de mucílago de OFI, proporciones MN1:2, MN 1:3 Edades: 7, 28, 45, 90,120,150, 180 y 300 días. CPC 30R RS	6.4. Mortero con arena volcánica, sustitución de fibra de OFI al 0.5%. 1.50% y 0.5%+2.00% de MZ. Edades: 120, 150, 180 y 300 días. CPC 30R RS
Compresión	En cilindros de 10cmhx20cmØ	En cilindros de 10cmhx20cmØ	En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm
Tensión Indirecta	En cilindros de 10cmhx20cmØ	En cilindros de 10cmhx20cmØ	En cilindros de 5cmhx10cmØ	En cilindros de 5cmhx10cmØ
Tensión Directa	N/A	N/A	En briquetas de 7cmx2.5cmx3cm	En briquetas de 7cmx2.5cmx3cm
Flexión	En vigas de 15cmx15cmx60cm	En vigas de 15cmx15cmx60cm	En vigas de 4cmx4cmx16cm	En vigas de 4cmx4cmx16cm
Porosidad Total			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm
Adherencia			En recubrimiento de mortero 2 cm espesor	En recubrimiento de mortero
Resistencia a los sulfatos			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm
Permeabilidad rápida de cloruros			En cilindros de 5cmhx10cmØ	En cilindros de 5cmhx10cmØ
Congelamiento/deshielo			Prismas de 6cmx6cmx26cm	Prismas de 6cmx6cmx26cm
Carbonatación				
Absorción Capilar			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm

Fase de la investigación/ Pruebas	6.1. Concreto con cantos rodados, arena de río, 2% adición fibra OFI. Edades: 7,14,28 y 40 días. CPC 30R RS	6.2. Concreto con grava triturada, 2% adición fibra de OFI. Edades: 7,14,28 y 40 días. CPO 30R RS BRA	6.3. Mortero con arena volcánica, adición de mucílago de OFI, proporciones MN1:2, MN 1:3 Edades: 7, 28, 45, 90,120,150, 180 y 300 días. CPC 30R RS	6.4. Mortero con arena volcánica, sustitución de fibra de OFI al 0.5%. 1.50% y 0.5%+2.00% de MZ. Edades: 120, 150, 180 y 300 días. CPC 30R RS
Resistividad Eléctrica			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm, cilindros de 5cmhx10cmØ, vigas de 4cmx4cmx16cm
VPU			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm, cilindros de 5cmhx10cmØ, vigas de 4cmx4cmx16cm
Gravedad Específica			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm
Densidad				En cubos de 5cmx5cmx5cm
Absorción Capilar			En cubos de 5cmx5cmx5cm	En cubos de 5cmx5cmx5cm

A continuación, se describe la metodología particular de cada fase de la investigación.

6.1. Efecto de agregados con cantos redondeados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus Opuntia ficus-indica, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.

En esta fase de la investigación se realizaron 95 cilindros de 10 cmØ x 20 cmh (10 cm de diámetro por 20 cm de altura), usando Cemento Portland CPC 30R RS, 35 cilindros sirvieron como control y 60 cilindros se hicieron con el mismo tipo de cemento, pero adicionados con 2% del peso del Cemento con fibra de Nopal Opuntia ficus-indica (OFI).

Se realizaron 18 vigas de 15 cm de espesor por 15 cm de ancho y 60 cm de longitud, 9 vigas sirvieron como control y 9 vigas se adicionaron con 2% de OFI. El diseño de la mezcla fue con el Método del American Concrete Institute, ACI, para un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, Revenimiento = 10 cm, TMN grava = $\frac{3}{4}$ de pulgada y concreto sin aire incluido.

El material pétreo grueso utilizado fue de cantos redondeados y arena de río, obtenidos del río Huajúbaro, Municipio de Cd. Hidalgo, Michoacán, México. Los cilindros y las vigas con y sin fibra de OFI fueron probados a 7, 14, 28 y 40 días de edad, con el fin de hacer la comparación del comportamiento del concreto adicionado con y sin fibra de OFI.

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica húmeda a los cilindros; a las vigas se les realizó adicionalmente, resistencia a la flexión. En promedio se probaron 5 cilindros a compresión, para cada edad de prueba, con y sin adición de fibra de OFI. Para tensión indirecta fueron tres cilindros igualmente, y para flexión fueron tres vigas, de la misma manera.

6.2. Efecto de agregados triturados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus *Opuntia ficus-indica*, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.

En esta fase de la investigación se realizaron 84 probetas cilíndricas de 10 cm \varnothing x 20 cmh (10 cm de diámetro por 20 cm de altura); 25 probetas fungieron como control (CC) y 59 se adicionaron con fibra de Nopal OFI (CF), al 2% de la masa del cemento utilizado.

Se fabricaron 16 vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm; 5 se usaron como control y 11 se adicionaron con 2% de OFI de la masa del cemento utilizado. Se empleó arena volcánica de los bancos de materiales denominado Joyitas y río Huajúbaro, Michoacán, grava triturada del banco de materiales SUPRA, cemento CPC 30R RS, agua potable y como adición fibra deshidratada de Nopal OFI.

La mezcla se diseñó con el método de ACI, para una resistencia $f'c = 250$ kg/cm² a 28 días y una relación $a/c = 0.54$, en masa.

Los cilindros y las vigas con y sin cactus fueron probados a 7, 14, 28 y 40 días, con el fin de hacer la comparación del comportamiento del concreto adicionado con fibra de OFI y sin adicionar la fibra.

A los cilindros se les realizaron ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica húmeda; a las vigas se les hizo resistencia a la flexión y velocidad de pulso ultrasónico.

6.3. Efecto del mucílago de Nopal *Opuntia ficus-indica* en morteros de cemento Portland.

En esta fase de la investigación, se evaluaron morteros hechos a base de cemento Portland (CP), arena y agua; también morteros de CP, arena, agua y mucílago de nopal como parte del líquido de amasado. El agregado fino volcánico empleado fue del banco de material denominado Calderón de la comunidad de Joyitas, Mpio. de Morelia, Michoacán, México. Para la obtención del mucílago, el nopal se picó en trozos de 1 a 1.5 cm de lado aproximadamente. Después se sometió a cocción durante 1h 45 min en el fuego; de este tiempo 30 min fue de hervido, manteniendo tapado el recipiente para evitar la evaporación. La primera proporción fue 1 kg de nopal por 2 litros de agua, ésta se empleó en la mezcla o mortero llamado MN 1:2, con 1 % de aditivo superplastificante; la otra fue 1 kg de nopal por 3 litros de agua y fue usada en el mortero MN 1:3, con 0.3 % de aditivo superfluidificante; por último, el mortero Control (MC), fue un mortero convencional, que no contuvo ni aditivo ni sustitución.

El cemento que se empleó fue CPC 30R RS y tuvo una densidad de 3.05 g/cm³. Los tiempos de fraguado inicial para las mezclas MC, MN 1:2 y MN 1:3 respectivamente fueron: 150, 570 y 315 min. Los tiempos de fraguado final para las mismas tres mezclas en el mismo orden fueron: 390, 900 y 840 min. Todos los

tiempos de fraguado se cumplieron de acuerdo a la norma NMX-C-177- ONNCCE. La Tabla 22 muestra los resultados de los ensayos a la arena.

Tabla 21.- Resultados de ensayos a la arena del banco “Calderón” de Joyitas. (Bautista León, 2015).

Prueba	Valor	Norma
Absorción	2.54 %	NMX-C-165-ONNCCE-2014, ASTM C128-2004
MVSS	1.46 g/cm ³	NMX-C-073-ONNCCE-2004, ASTM C29-1997
MVSV	1.54 g/cm ³	NMX-C-073-ONNCCE-2004, ASTM C29-1997
Colorimetría	3	ASTM C40-2004
Sedimentación	Aceptable	Análisis de materiales (Manual de prácticas)
Pasa Malla No. 200	7.02 %	NMX-C-111-ONNCCE-2014, ASTM C33-2003
Terrones de arcilla	0.83 %	ASTM C142-1997
Densidad	2.47 kg/m ³	NMX-C-165-ONNCCE, ASTM C128-2004
Equivalente de arena	92.02 %	NMX-C-480-ONNCCE-2014

Se evaluaron los morteros por resistencia mecánica y evaluaciones por durabilidad a diferentes edades, 7, 28, 45, 90, 120, 150, 180 y 300 días; Las probetas de la mezcla control fueron desmoldados después de 24 h y todos los especímenes con mucílago de nopal se dejaron cimbrados durante una semana, ya que el mucílago de nopal OFI actuó como retardante de fraguado.

El aditivo utilizado para esta experimentación fue un superplastificante CRISOTAN R 15, que se dejó reaccionar durante 30 minutos en el agua, después de esto se realizó el mezclado (Christianson S.A. de C.V., 2015).

El curado que se le dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (NMX-C-148-ONNCCE, 2010).

Se probaron cinco especímenes cúbicos de 5 cm de arista para determinar la densidad del material. Para Resistencia a la compresión se probaron 5 especímenes cúbicos de cada mezcla (Control MC, MN 1:2, MN 1:3) a las edades

de 7, 28, 45 y 90 días. Las edades tardías (120, 150, 180 y 300 días) se probaron en una prensa hidráulica con capacidad de carga de 50 toneladas.

Para resistencia a la flexión se ensayaron 5 especímenes de cada mezcla en vigas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

La resistencia a tensión directa fue realizada en briquetas, 5 especímenes por cada edad y por tipo de mezcla. La Resistencia a la tensión indirecta se realizó a los especímenes cilíndricos de 5 cm \varnothing x 10 cmh. Fueron 5 probetas por cada edad y mezcla, se realizó esto después de las evaluaciones no destructivas.

Las pruebas de Porosidad total se hicieron a tres probetas cúbicas, de 5 cm de arista, a la edad de 180 días para cada mezcla.

Se llevaron a cabo 5 ensayos en cada mezcla para los ensayos de adherencia.

Las pruebas de resistencia a los sulfatos se hicieron en 18 cubos, a tres se les hizo pruebas físico-mecánicas (Resistividad eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Gravedad específica, Densidad y compresión), y se utilizaron como controles de la mezcla, ya que no fueron sometidos a los ensayos de sulfato, se hicieron 5 ciclos de inmersión y secado.

Para la prueba de Permeabilidad rápida de cloruros se emplearon 3 muestras cilíndricas de 5 cmh X 10 cm \varnothing .

Para los ensayos de congelado-deshielo se elaboraron 3 probetas prismáticas de 6 cm x 6 cm x 26 cm (sin especificación de norma) por mezcla y se mantuvieron curándose por 180 días. Se colocaron las probetas en un recipiente (tres de cada mezcla, tres recipientes) y se llenaron con agua hasta tener un tirante de 2 cm por encima de los especímenes. Se introdujeron los recipientes al refrigerador a -18 °C durante 4 h, transcurrido este tiempo se sacaron los especímenes del refrigerador considerándose este como el ciclo cero. Después se introdujeron al refrigerador por 4 h y así sucesivamente, durante 15 ciclos (ciclo 0 al ciclo 14). Entre el ciclo 5 y 8, surgió acumulación de hielo, se retiró del recipiente y se sustituyó por agua. El parámetro a analizar fue la linealidad de la frecuencia de resonancia.

Para las pruebas de carbonatación, se emplearon 3 prismas de 4 cm x 4 cm x16 cm. Para los ensayos de Absorción capilar se usaron probetas cúbicas (5 de cada mezcla) de 5 cm de lado.

6.4. Efecto de la fibra de Nopal y de la fécula de Almidón en el comportamiento físico-mecánico de morteros base CP.

En esta fase de la investigación se evaluaron morteros base cemento Portland CPC 30R RS, sustituyendo parcialmente este material por fibra de Nopal FN en 0.50% y 1.50%, así como una combinación de 0.50% de OFI más 2.00% de almidón de Maíz en fécula MZ. Estos dos biopolímeros son productos comerciales de las marcas Cucú y Maizena, respectivamente. Los morteros fueron elaborados en cuatro formas: cubos de 5cm x5cm x5 cm, prismas o barras de 4cm x4cm x16 cm, cilindros de 5 cmØx10 cmh (diámetro por altura) y briquetas de 7cm x2.5cm x3 cm. La arena es de tipo volcánico del Banco de Materiales “Joyitas”.

Se diseñaron 3 mezclas de mortero, de acuerdo a la norma ASTM-C-109/2002, con una relación agua/cemento = 0.68, incorporando un aditivo superplastificante para alcanzar de manera óptima la trabajabilidad de la mezcla; siendo un mortero control (cemento-arena-agua), dos mezclas con sustitución parcial de cemento Portland por fibra de nopal (FN): 0.5 y 1.5% respectivamente y una mezcla de 2% de almidón con 0.5% de fibra de nopal (MZ 2% - FN 0.5%). Los especímenes fueron ensayados a edades de 120, 150, 180 y 300 días; y sometidos a pruebas no destructivas: densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y frecuencia de resonancia; pruebas destructivas: compresión simple, tensión directa, flexión, tensión indirecta y tensión por adherencia; así como pruebas por durabilidad: ataque por sulfatos, carbonatación, penetración de cloruros, congelamiento y deshielo, absorción capilar y porosidad total. Los resultados por durabilidad fueron obtenidos a la edad de 90 y 180 días.

Se presenta un resumen de los tipos de especímenes, las edades de las pruebas físico-mecánicas realizadas (compresión, flexión, tensión directa, tensión indirecta, adherencia) y de las pruebas de durabilidad. Tabla 23.

Tabla 22.- Ensayos realizados y número de especímenes. (Blancas V.H., 2017).

TIPO DE ESPÉCIMEN	PRUEBAS FÍSICO-MECÁNICAS				PRUEBAS POR DURABILIDAD			CANTIDAD TOTAL DE ESPÉCIMENES
					FAGERLUND	POROSIDAD TOTAL	ATAQUE POR SULFATOS	
	EDAD (DÍAS)				EDAD (DÍAS)			
	120	150	180	300	90 y 180			
CUBOS	5	5	5	5	10	6	36	72
BRIQUETAS	5	5	5	5	-	-	-	20
PRISMAS 4cm x 4cm x 16 cm	5	5	5	5	-	-	-	20
CILINDROS 5cmØ x 10 cmh	5	5	5	5	-	-	-	20

Los especímenes fueron curados en agua potable.

Las pruebas no destructivas fueron densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica (RE), con Resistómetro Nilsson, Modelo 400 y velocidad de pulso ultrasónico (VPU), con equipo NDT-JAMES INSTRUMENTS, modelo V-Meter MK IV™.

Las pruebas no destructivas se realizaron a los mismos especímenes requeridos por el ensayo correspondiente; éstos se encontraban en el agua de curado hasta la aplicación del ensayo.

Los morteros fueron realizados en proporción 1:2.75 relación cemento:arena, en peso, según (ASTM C 109 M, I., 2002) y (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

Para la resistencia mecánica fue utilizada una Máquina Universal de Pruebas, Forney, exceptuando la tensión directa ft, que se realizó con una Máquina Michaelis.

La adherencia fue según Pull Off, con equipo de la marca Controls, colocando capas de mortero de 2 cm de espesor sobre una losa de concreto armado.

Tabla 23.- Resumen de resultados de la caracterización de la arena "Joyitas". (Blancas V.H., 2017).

Pruebas de caracterización de la arena "Joyitas"	Resultado de prueba	Especificación de normativa
Masa volumétrica seca y suelta (MVSS) (NMX-C-073-ONNCCE-2004)	1.46 g/cm ³	No establece
Masa volumétrica seca y varillada (MVSV) (NMX-C-073-ONNCCE-2004)	1.54 g/cm ³	No establece
Humedad de absorción (NMX-C-166-ONNCCE-2006)	2.65%	2 % - 4 % media
Densidad de la arena (NMX-C-165-ONNCCE-2014)	2.47 g/cm ³	> 2.15 g/cm ³ aceptable
Módulo de finura (NMX-C-111-ONNCCE-2004)	2.54	2.30 – 3.20 aceptable
Material que pasa la malla No. 200 (%) (NMX-C-111-ONNCCE-2004)	7.02%	3% máx.
Terrones de arcilla (%) (NMX-C-111-ONNCCE-2004)	0.65%	0.5-1% máx. aceptable
Equivalente de arena (%) (Reglamento de construcción del Estado de Michoacán)	92.09%	85% mín. aceptable
Colorimetría (NMX-C-111-ONNCCE-2004)	No. 2	No. 3 máx. aceptable

Tabla 24.- Resultados de la prueba de fluidez para las distintas mezclas en estudio. (Blancas V.H., 2017).

% Fluidez en las distintas mezclas								
Mezcla	Cantidades de material para la mezcla					Relación a/c	Aditivo (%)	Fluidez (%)
	Cemento (g)	FN (g)	MZ (g)	Arena (g)	Agua (ml)			
Control (T10)	163.64	-	-	450	111.27	0.68	-	99
FN 0.5%	162.82	0.82	-	450	111.27	0.68	0.3	115
FN 1.5%	161.18	2.45	-	450	111.27	0.68	0.55	104
MZ 2% FN 0.5%	159.55	0.82	3.27	450	111.27	0.68	0.56	112

El peso específico o densidad de un mortero de cemento convencional de buena calidad es de 2.1 g/cm³ aproximadamente.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este Capítulo se discutirán los resultados de cada una de las cuatro fases de la investigación realizada en el presente trabajo en particular y posteriormente en conjunto. Gran parte del trabajo presentado corresponde a cuatro trabajos de tesis, realizadas en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se reconocen y realizan los créditos correspondientes

7.1. Efecto de agregados con cantos redondeados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus *Opuntia ficus-indica*, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.

La densidad del CP fue de 3.1 g/cm^3 . El análisis de la grava arrojó que el % de absorción de humedad fue de 4.72, se tuvo 1.92% humedad actual, la densidad de 2.37 g/cm^3 , peso volumétrico seco suelto en gravas (P.V.S.S.) 1.33 g/cm^3 , peso volumétrico seco y varillado en gravas (P.V.S.V.) 1.46 g/cm^3 , tamaño máximo del agregado $\frac{3}{4}$ ".

El análisis de arena arrojó que el % de absorción de humedad fue de 3.22, 1.17% humedad actual, densidad de 2.25 g/cm^3 , peso volumétrico seco suelto en arena (P.V.S.S.) 1.47 g/cm^3 , peso volumétrico seco y varillado en arena (P.V.S.V.) 1.54 g/cm^3 , el módulo de finura (MF) fue de 3.22, color del líquido de arena de 3 para detectar presencia de materias orgánica, el material que pasa por la malla 200 fue 5.79%.

El CP sin adición de fibra de OFI tuvo un fraguado inicial a 3 horas y 44 min y un fraguado final a 8 horas y 2 min.

El CP adicionado con la fibra OFI tuvo un fraguado inicial a 4 horas y 32 min y un fraguado final a 9 horas y 12 min.

La Figura 77 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a las distintas edades, con y sin la adición de fibra de OFI, para cilindros de concreto elaborados con cantos redondeados. Las líneas punteadas corresponden a los promedios de cada serie.

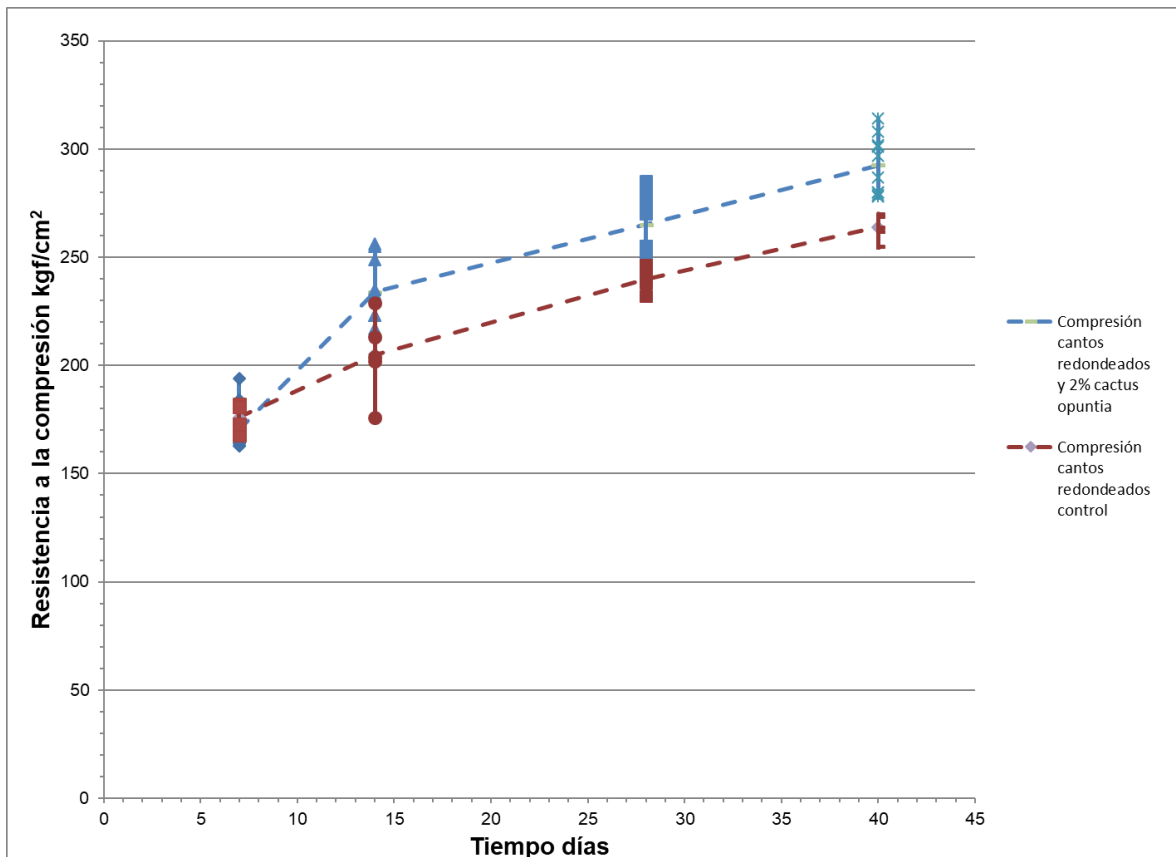


Figura 77.- Resistencia a la compresión en función del tiempo, para cilindros con y sin adiciones de fibra de Nopal Cactus Opuntia ficus-indica (OFI). (Guzmán J.A., 2013).

La Figura 77 muestra los resultados a compresión en cilindros a edades tempranas de 7,14,28 y 40 días de edad. A los 7 días el Concreto con Fibra de OFI (CF) tiene una resistencia ligeramente menor con el Concreto Control (CC). Sin embargo, a partir de esa edad y hasta los 40 días el CF se mantiene por encima en compresión de CC, apreciándose una diferencia casi constante de resistencias, estando CF 10% sobre CC, desde los 14 días.

La Figura 78 muestra los resultados de las pruebas a flexión con y sin fibra de Nopal Cactus *Opuntia ficus-indica* (OFI) para vigas de concreto elaboradas con cantos redondeados, a diferentes edades.

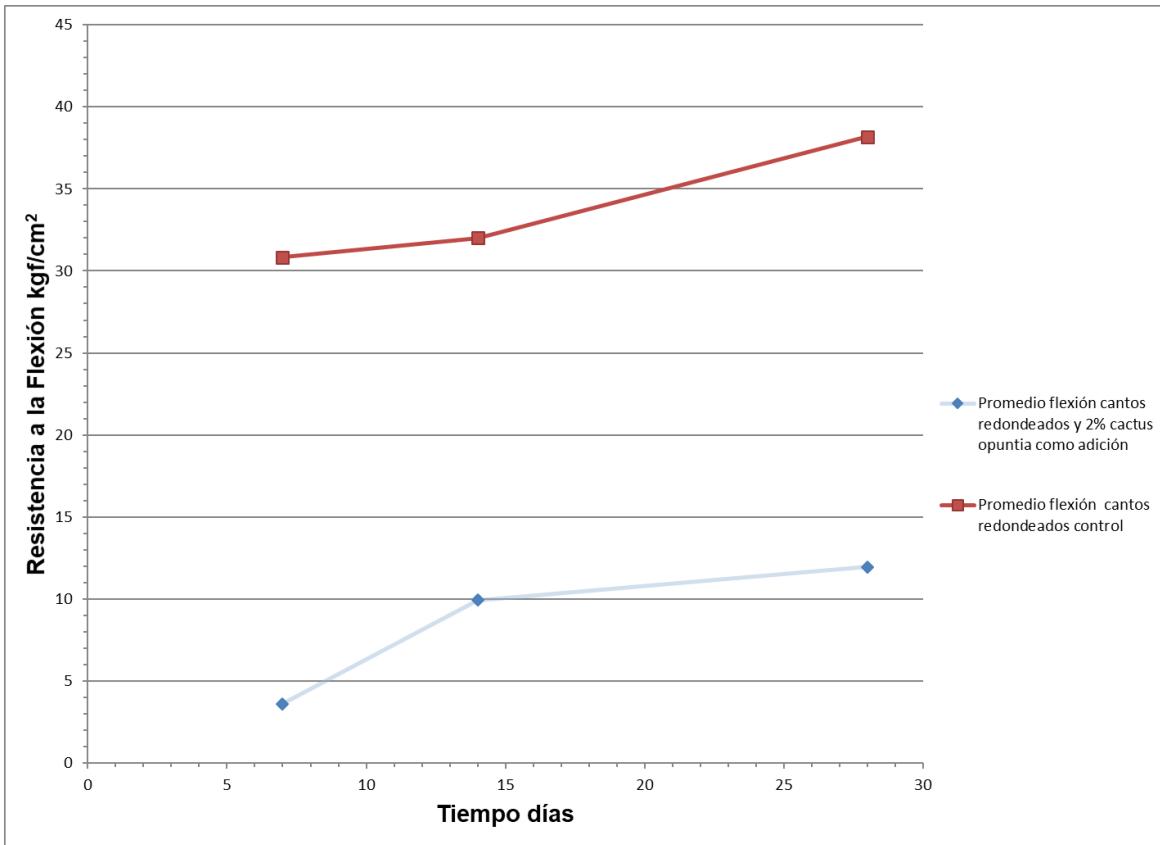


Figura 78.- Resistencia a la flexión para vigas con y sin adición de 2% de fibra de Nopal *Opuntia ficus-indica*. (Guzmán J.A., 2013)

La Figura 78 se refiere a la prueba de flexión para determinar el Módulo de Ruptura (MR) en vigas de concreto. Desde los 7 días de edad y hasta los 28 días, las vigas control CC tuvieron una mayor resistencia en el valor del MR de vigas CF, alcanzando éstas solo el 32% del MR de las vigas control CC.

La Figura 79 muestra los resultados de resistividad eléctrica húmeda para los cilindros de concreto elaborados con cantos redondeados a diferentes edades, con y sin adición de fibra de Nopal *Opuntia ficus-indica*. Las líneas punteadas muestran los promedios para cada serie.

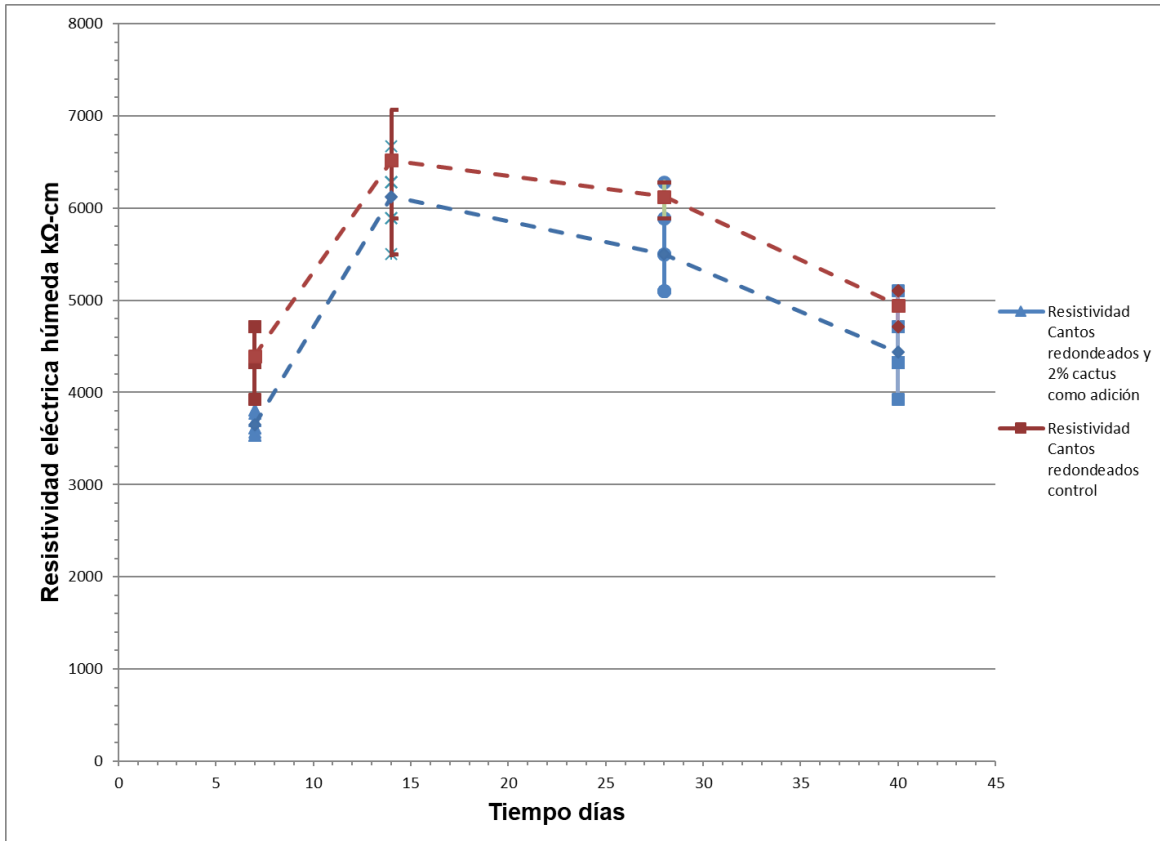


Figura79.- Resistividad eléctrica húmeda en función del tiempo para cilindros con y sin adición de 2% de fibra de Nopal *Opuntia Ficus-indica*. (Guzmán J.A., 2013)

La Figura 79 representa el comportamiento en cilindros de concreto, respecto a la Resistividad Eléctrica (RE). Se observa que a los 7 días la RE de los cilindros control CC, está por encima de la RE de los cilindros CF en 15%. A 14 días ambas mezclas de concreto aumentan su RE, estando CC 5% por encima de CF. Pero a partir de esta edad ambos concretos disminuyen su RE casi de manera constante y hasta los 40 días de edad, en donde CC se mantiene 10% por encima de CF, en la RE.

La Figura 80 muestra los resultados de las pruebas de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) para cilindros de concreto elaborados con cantos redondeados a diferentes edades, con y sin la adición de fibra de Nopal Opuntia Ficus-indica. Las líneas punteadas muestran los promedios para cada serie.

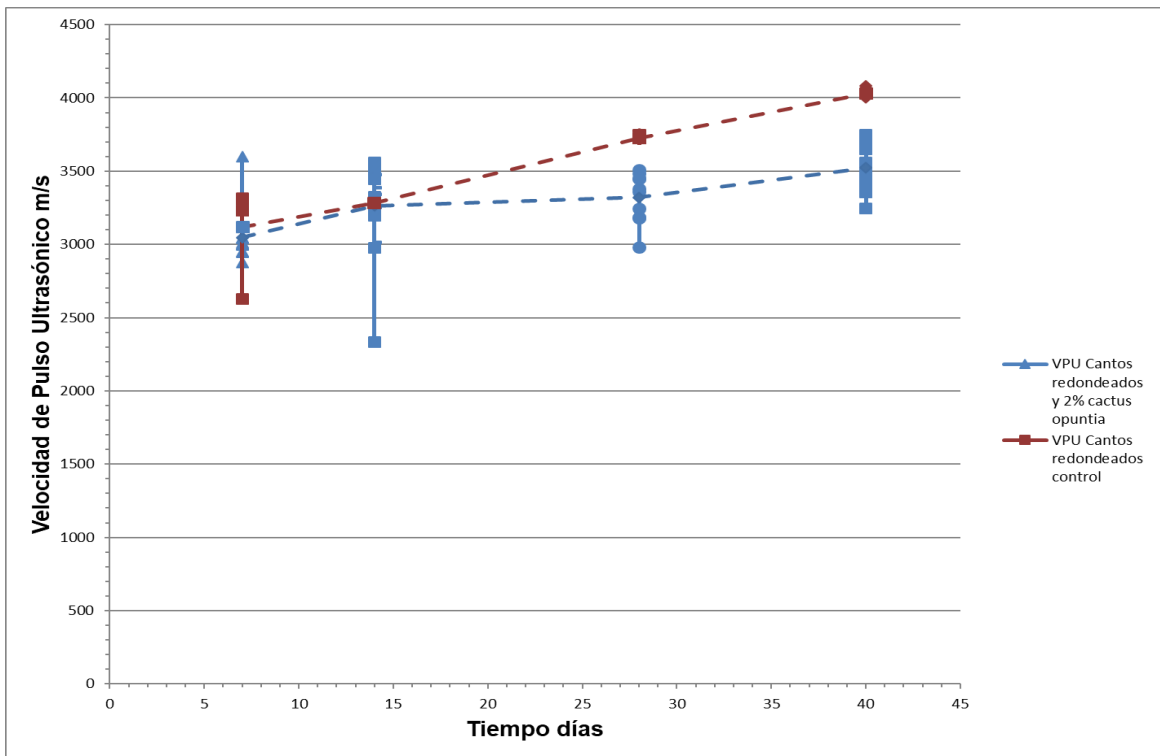


Figura 80.- Velocidad de Pulso Ultrasónico para cilindros con y sin adición de 2% de fibra de Nopal Opuntia Ficus-indica. (Guzmán J.A., 2013)

La Figura 80 muestra los resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU). A 7 días de edad, CC está ligeramente por encima de CF, en la VPU, catalogándose ambas mezclas de calidad “Alta” según la Red DURAR. A 14 días ambas mezclas prácticamente coinciden. A partir de esta edad CC tiene un incremento constante de VPU; CF también se incrementa, aunque a menor escala, para finalmente, a 40 días mantener una diferencia del 12%, quedando CC como concreto de calidad “Durable”, por encima de los 4,000 m/s y CF como de calidad “Alta”, por encima de los 3,000 m/s.

7.2. Efecto de agregados triturados y adición de 2% de fibra de Nopal Cactus *Opuntia ficus-indica*, en la durabilidad del concreto, a edades tempranas.

La Figura 81 muestra resultados de ensayos de resistencia a la compresión a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para cilindros de concreto.

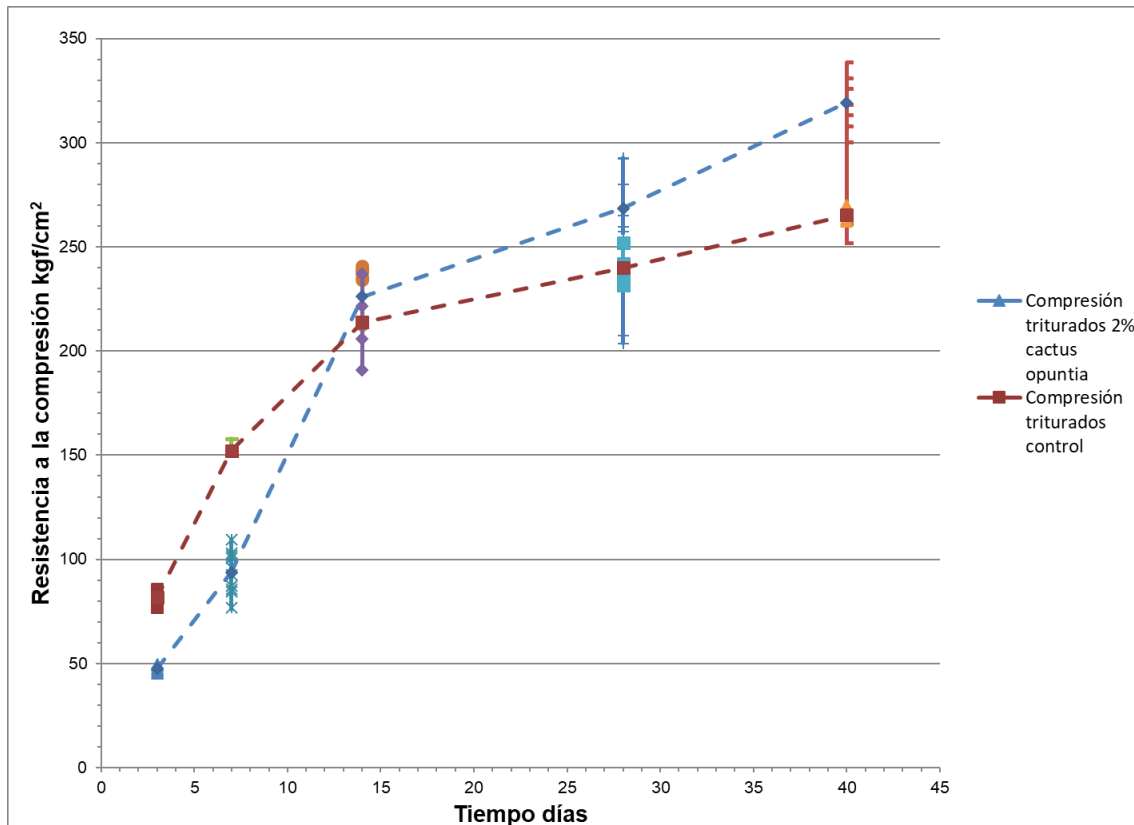


Figura 81.- Resistencia a la compresión para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 81 representa los resultados de la resistencia a la compresión (RC) de cilindros de concreto con agregados gruesos triturados, con y sin adición de fibra de Nopal, CF y CC respectivamente. A la edad de 3 días la RC de CC es mayor que la de CF. A los 7 días se incrementan la RC de ambas mezclas, manteniéndose CC por encima de CF. A los 14 días hay un cambio, ya que CF supera en 7% de RC a CC. A partir de esta edad la R de CF es cada vez mayor que la de CC. A los 40 días existe una diferencia del 20%, estando la RC de CF sobre CC.

La Figura 82 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para cilindros de concreto con agregados triturados, comparadas con las resistencias que debieran alcanzar de acuerdo a la norma NMX C- 083.

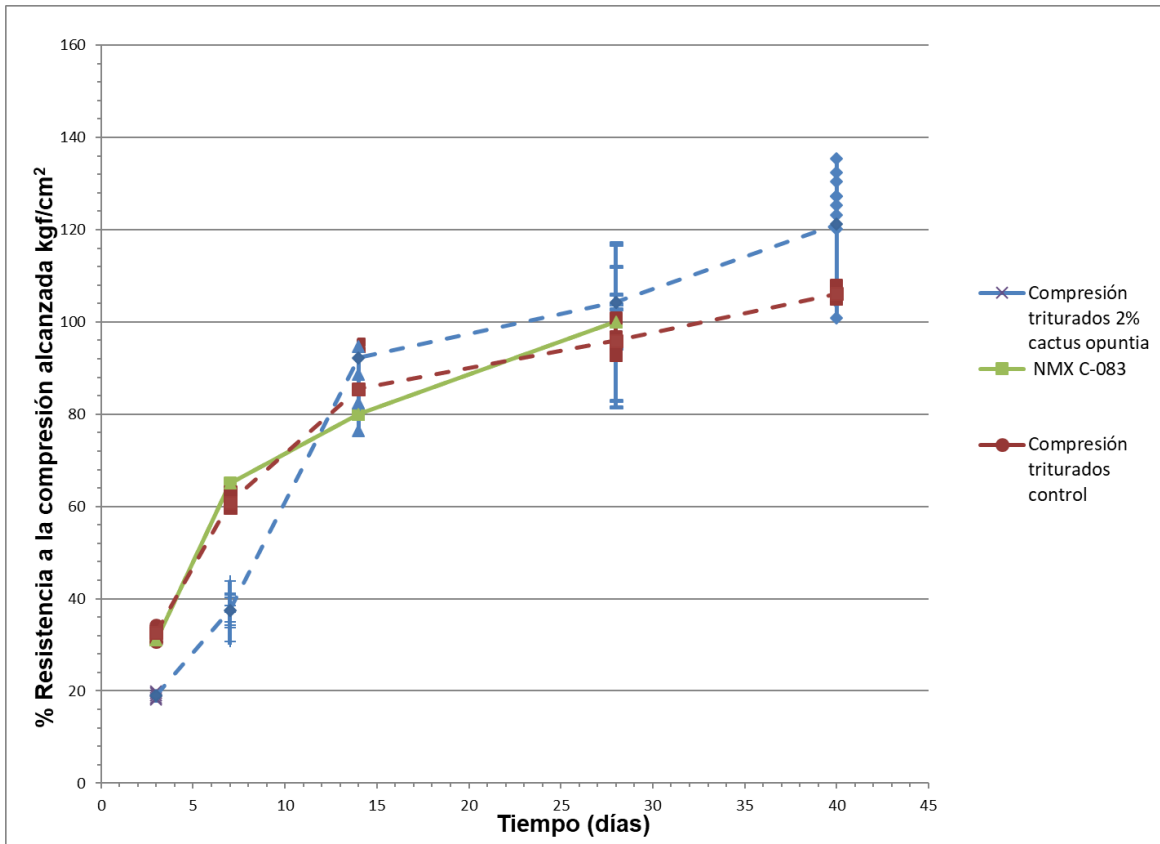


Figura 82.- Resistencia a la compresión para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros, comparadas con las resistencias que debieran alcanzar de acuerdo a la norma NMX-ONNCCE-C-083. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 82, presenta los resultados de la resistencia a compresión de los cilindros de concreto, pero los compara en porcentaje con la resistencia esperada (CN) según la Norma NMX-C-083-ONNCCE. Se observa que hasta los 14 días la RC de CC y de CN son casi iguales, estado CF inicialmente por debajo, pero superándolas a esa edad, para a partir de ahí mantenerse por encima, hasta los 28 días, en donde supera en 8% a CN y en 10% a CC.

La Figura 83 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la tensión a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para cilindros de concreto con agregados triturados.

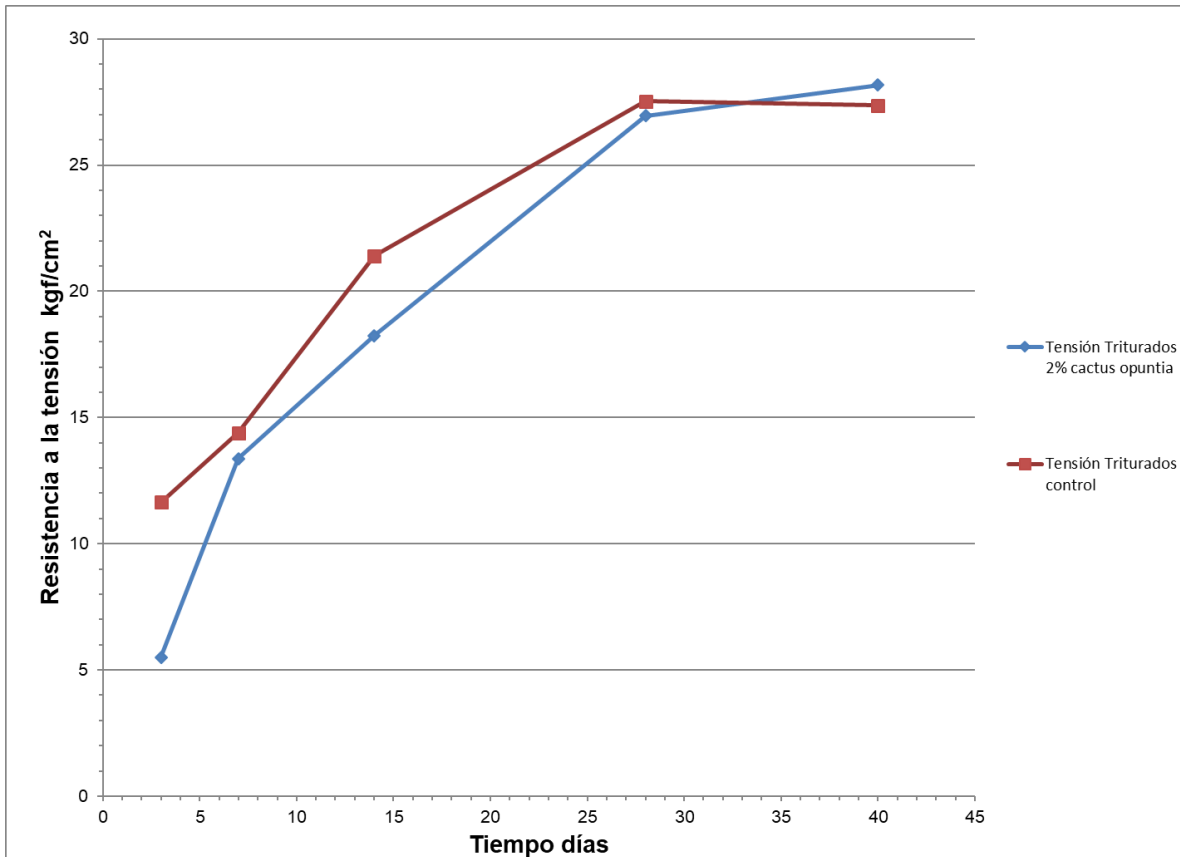


Figura 83.- Resistencia a la tensión para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 83 presenta los resultados de la Resistencia a la Tensión (RT) de los dos tipos de concreto control (CC) y adicionado con fibra de Nopal OFI (CF). A los 3 días la RT de CF está muy por debajo de la de CC; a los 7 días la RT de CC solo está ligeramente sobre la de CF. Desde los 7 a los 28 días CC se mantiene por encima de CF. A los 40 días la RT de CF logra superar a la de CC en un 5%.

La Figura 84 muestra los resultados de los ensayos de resistividad eléctrica húmeda a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para cilindros de concreto con agregados triturados.

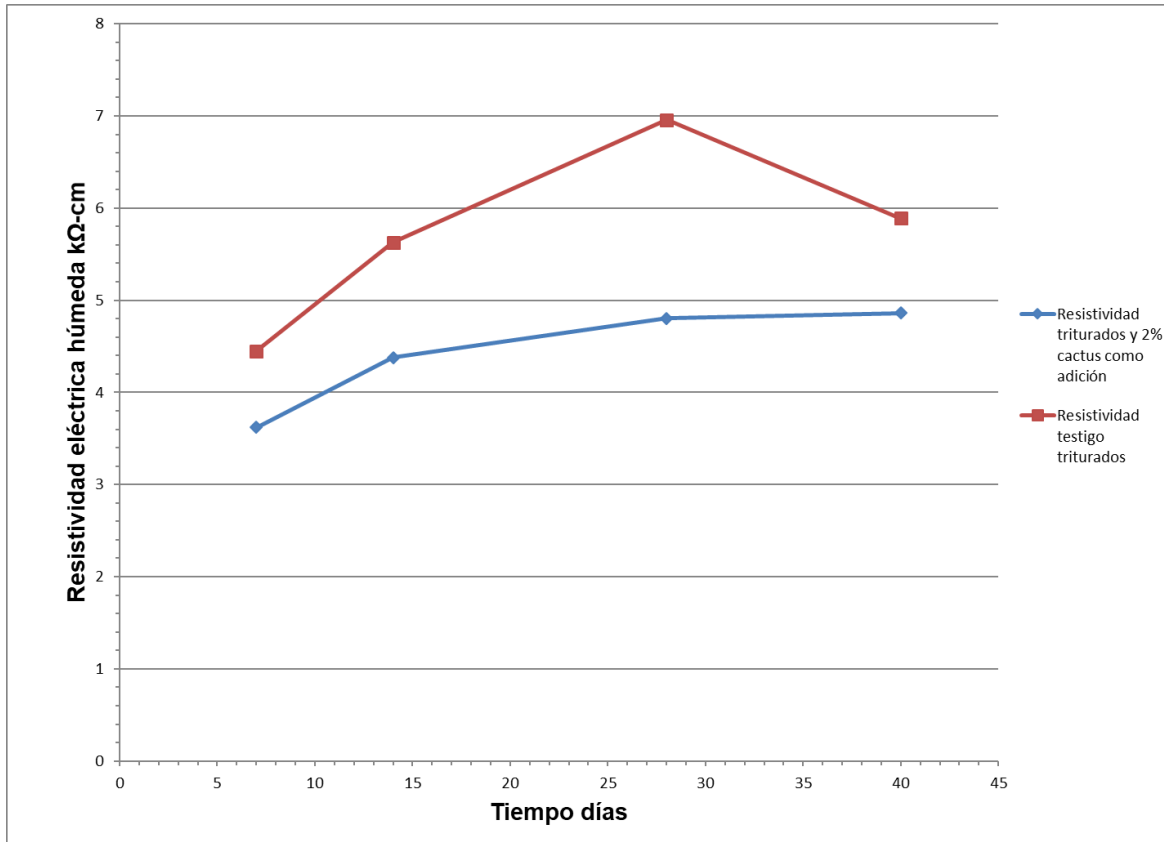


Figura 66.- Resistividad eléctrica húmeda para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 84 presenta los resultados de la Resistividad Eléctrica (RE) de las dos mezclas de concreto, con adición de fibra de Nopal OFI (CF) y sin adición o control (CC). Desde los 7 días la RE de CC se mantiene por encima de la de CF. Esta RE se va incrementando hasta los 28 días, pero más en CC. A los 40 días la RE de CC se decrementa, y la RE de CF aumenta ligeramente, teniéndose una diferencia del 17% estando la RE de CC por encima de la de CF.

La Figura 85 muestra los resultados de los ensayos de Velocidad de Pulso Ultrasónico a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para cilindros de concreto con agregados triturados.

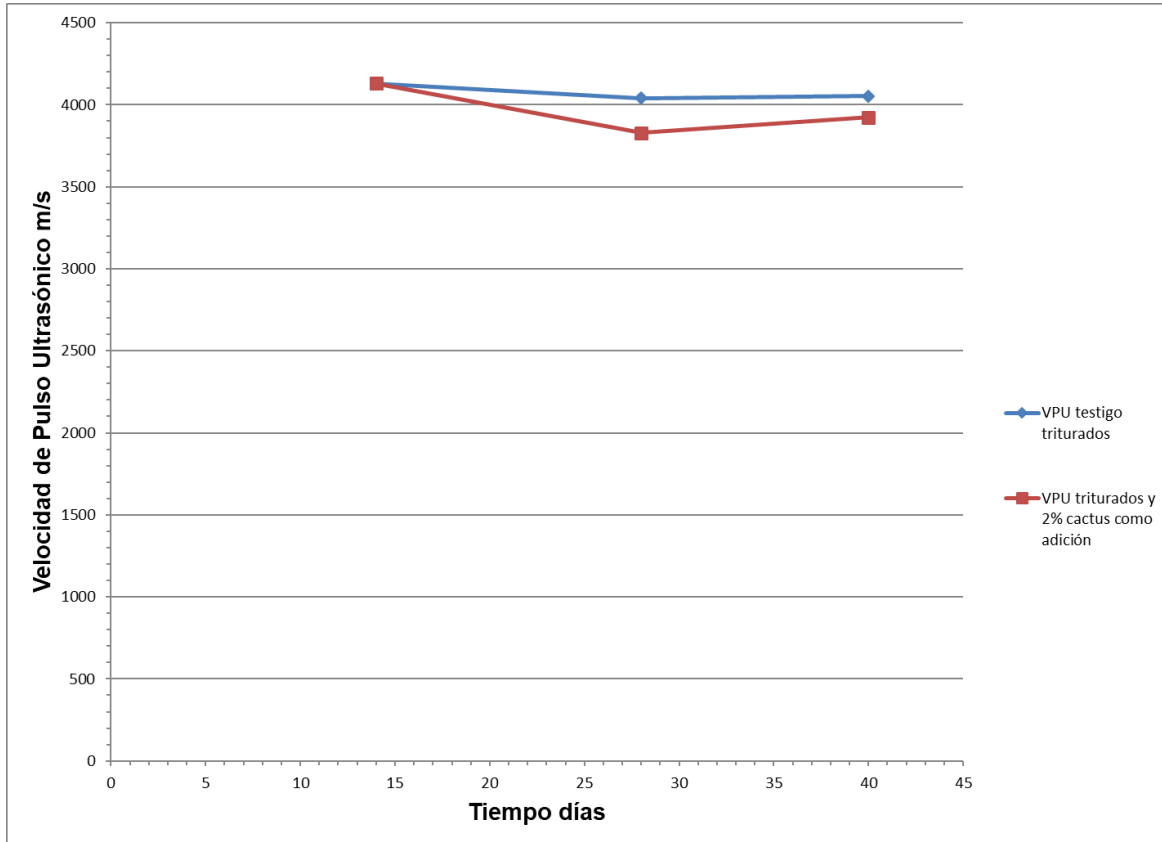


Figura 67.- Velocidad de Pulso Ultrasónico para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para cilindros. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 85 representa la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), en cilindros, de las dos mezclas de concreto CC sin adición y CF, con adición de fibra de Nopal OFI. A los 14 días ambas VPU son prácticamente iguales, estando sobre los 4,000 m/s, catalogándose como “Durable”. Sin embargo, la VPU de CC tiene un decremento a los 28 días y a los 40 días, aunque aumenta ligeramente no logra catalogarse como “Durable”. La VPU de la mezcla CF también tiene un ligero decremento a los 28 días, manteniéndose hasta los 40 días la VPU, para finalmente quedar catalogada como concreto “Durable”, por encima de la mezcla CC.

La Figura 86 muestra los resultados de los ensayos de Resistencia a la flexión a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para vigas de concreto con agregados triturados.

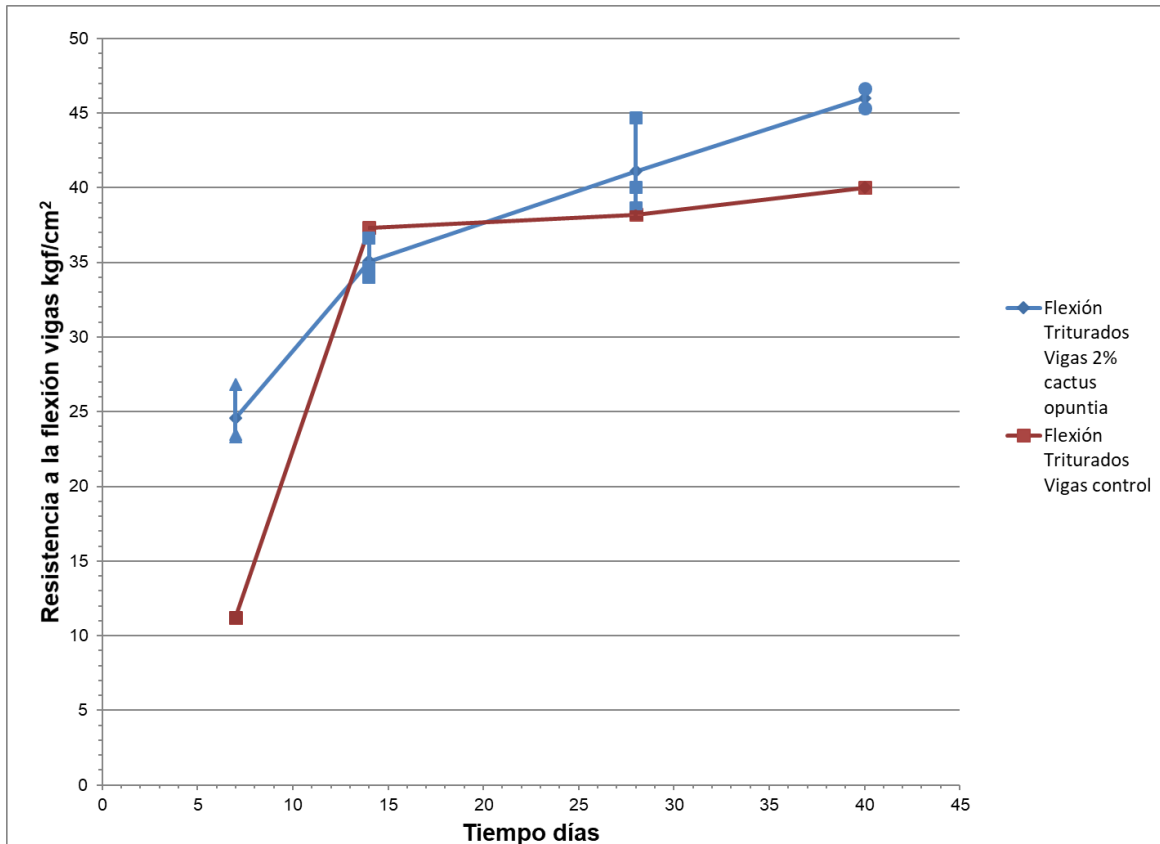


Figura 68.- . Resistencia a la flexión (MR) para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para vigas. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 86 representa la Resistencia a la Flexión, para determinar el MR del concreto. A los 7 días la mezcla CF supera en MR a CC; sin embargo, a los 14 días de edad el MR de CC es mayor que el MR de CF, en donde ambos han tenido un gran incremento. Sin embargo, a los 28 días el MR de CF es ya mayor que el de CC, ventaja que se incrementa a los 40 días, en donde el MR de CF supera al de CC en un 15%.

La Figura 87 muestra los resultados de los ensayos de Velocidad de pulso ultrasónico a las distintas edades, con y sin la adición de cactus, para vigas de concreto con agregados triturados.

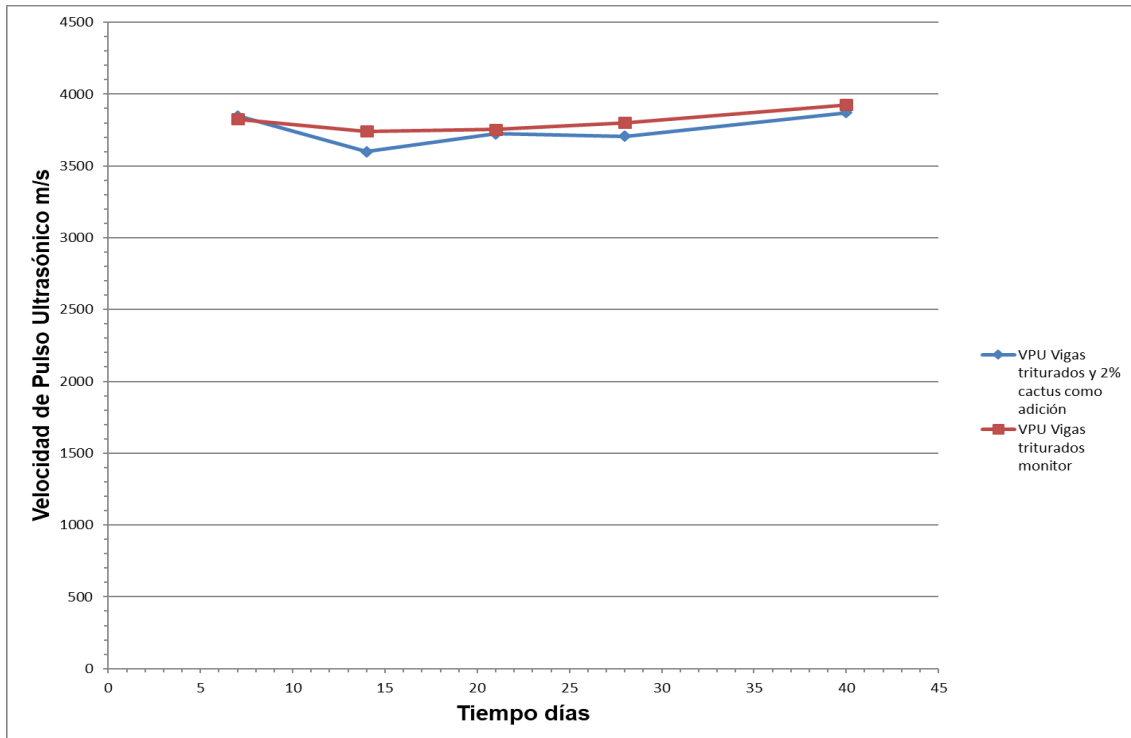


Figura 69.- Velocidad de pulso ultrasónico para concretos con agregados triturados en función del tiempo, con y sin la adición de cactus, para vigas. (Díaz G.N., 2012).

La Figura 87 representa la VPU, en vigas, de dos mezclas de concreto: CC y CF, que son las mezclas control y las adicionadas con fibra de nopal OFI respectivamente. A los 7 días de edad prácticamente coinciden los valores de VPU, por debajo de los 4,000 m/s, catalogándose como mezclas de calidad “Alta”. Ambas mezclas tienen un ligero decremento de VPU a los 14 días. A partir de esta edad ambas mezclas se mantienen con un ligero incremento de VPU hasta los 40 días, en donde nuevamente coinciden sus VPU, pero no logran ser catalogadas como concretos de calidad “Durable”, al no superar la velocidad ya comentada de 4,000 m/s.

7.3. Efecto del mucílago de Nopal *Opuntia ficus-indica* en morteros de cemento Portland.

La Figura 88 muestra los resultados de la prueba de Resistencia a la compresión simple a las distintas edades, para morteros con mucílago de Nopal OFI en dos concentraciones y su control, para cubos.

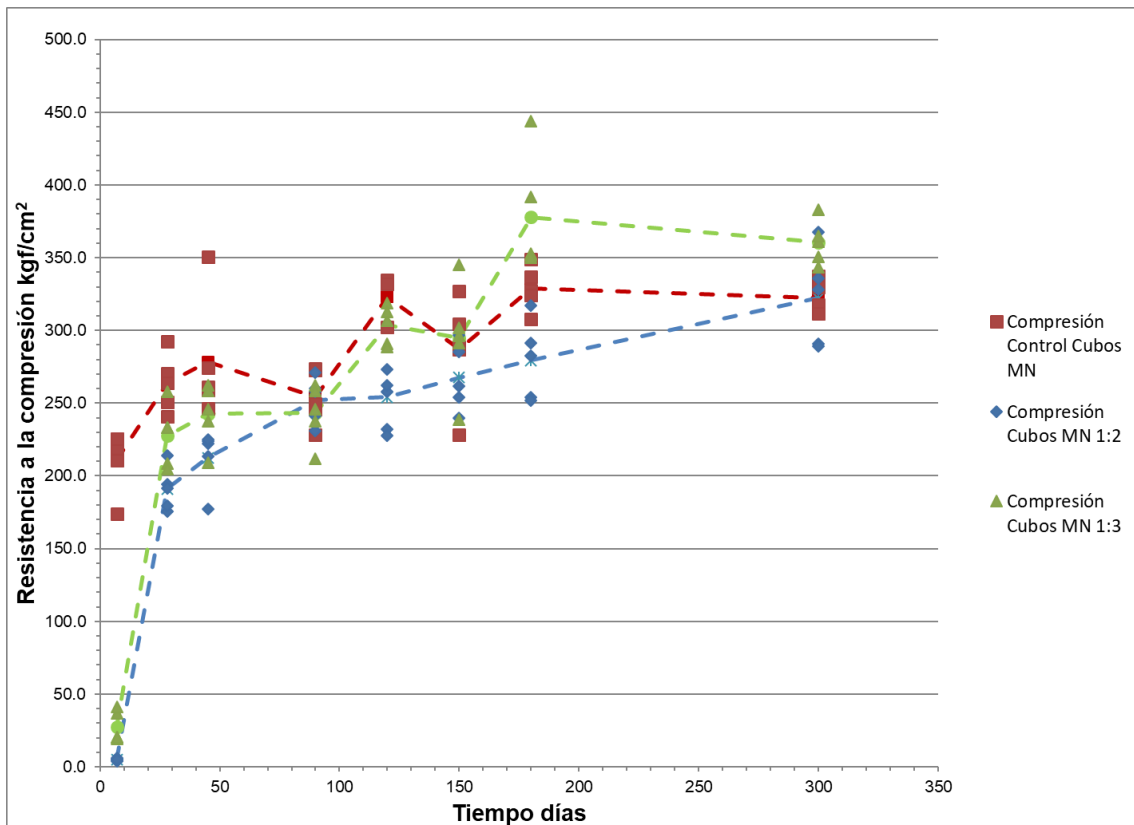


Figura 70.- Resistencia a la compresión para morteros con Mucílago de Cactus opuntia en dos concentraciones y su control, para cubos. Las líneas punteadas corresponden a los promedios de cada serie.

Respecto a la resistencia a la compresión, Figura 88, en los primeros 7 días MN 1:2 y MN 1:3 presentan, en ese orden, muy baja resistencia a esta sollicitación mecánica en comparación con el control MC. Este comportamiento de tener una incipiente resistencia mecánica para las mezclas con incorporación de mucílago de OFI fue general, a esta edad de siete días, también para los tipos de esfuerzo

estudiados: flexión, tensión directa, tensión indirecta. A los 28 días de edad la resistencia a compresión en MC estuvo por encima de MN 1:3 y MN 1:2 respectivamente, con incremento de resistencia para las tres mezclas; corresponde al periodo de tiempo en el cual el incremento de resistencia fue mayor para las mezclas con OFI en todo el estudio. A los 45 días se mantiene el incremento para las tres mezclas. A los 90 días prácticamente coinciden las tres mezclas, ya que C tiene decremento en resistencia. A los 120 días todas las mezclas tienen incremento en compresión, quedando C por encima de MN 1:3 en 5% y en 15% sobre MN 1:2. En 150 días C y MN 1:3 tienen decremento en resistencia y en MN 1:2 se incrementa. En 180 días Mn 1:3 presenta la mayor resistencia compresión en todo el experimento, por encima de C en 15% y de MN 1:2 en 30%; todos los resultados se incrementaron. A los 300 días MN 1:3 se encuentra 13% por encima de C y de MN 1:2, los cuales prácticamente coinciden.

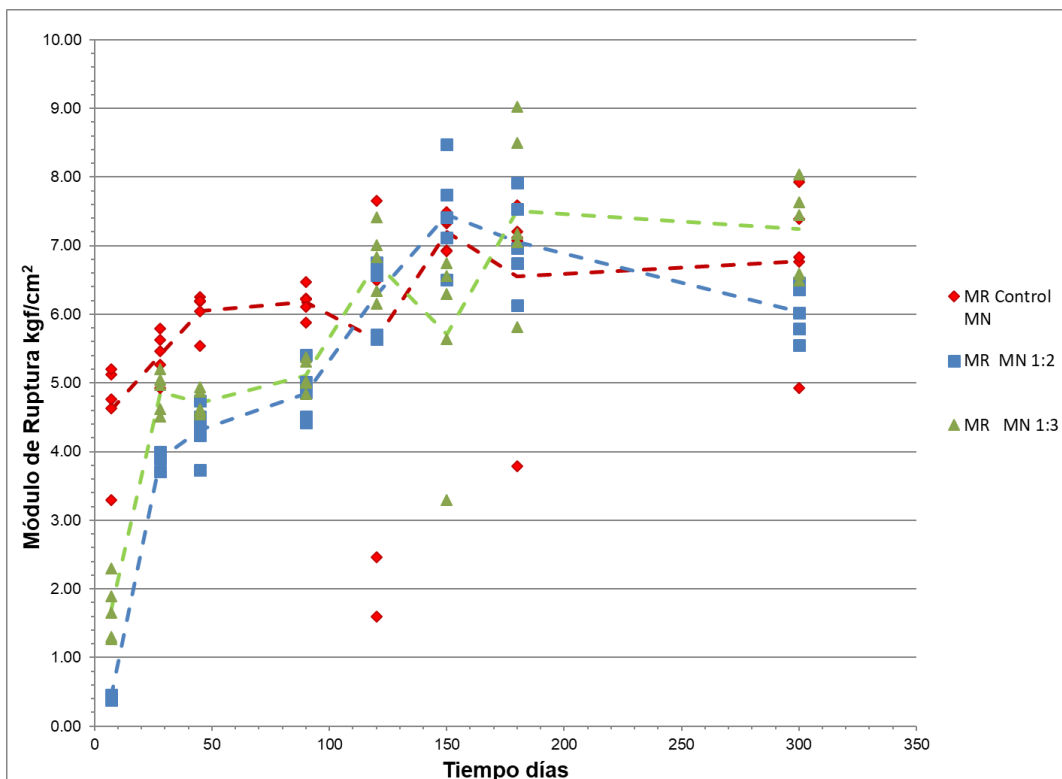


Figura 71.- Módulo de ruptura para morteros con Mucílago de Cactus opuntia en dos concentraciones y su control, para vigas.

En relación a la flexión en vigas o Módulo de ruptura, Figura 89, en los primeros 7 días MN 1:2 y MN 1:3 presentan, en ese orden, muy baja resistencia a esta sollicitación mecánica en comparación con el control MC. A los 28 días de edad la flexión MR en MC estuvo por encima de MN 1:3 y MN 1:2 respectivamente, con incremento de resistencia para las tres mezclas. Este comportamiento se mantuvo a los 45 y 90 días. A los 120 días, por primera vez en la gráfica, se observa que MN 1:3 está por encima de MN 1:2 y éste a su vez por encima de MC, que tuvo decremento en la resistencia a flexión. A los 150 días MN 1:3 presenta un decremento en MR, mientras que MN 1:2 tiene su máxima resistencia en la prueba, ligeramente por encima de MC. A 180 días ya MN 1:3 se encuentra con una mayor resistencia que MC y que MN 1:2, respectivamente. En 300 días MN 1:3 tiene una resistencia a flexión mayor que MC en 6% y que MN 1:2 en 17%.

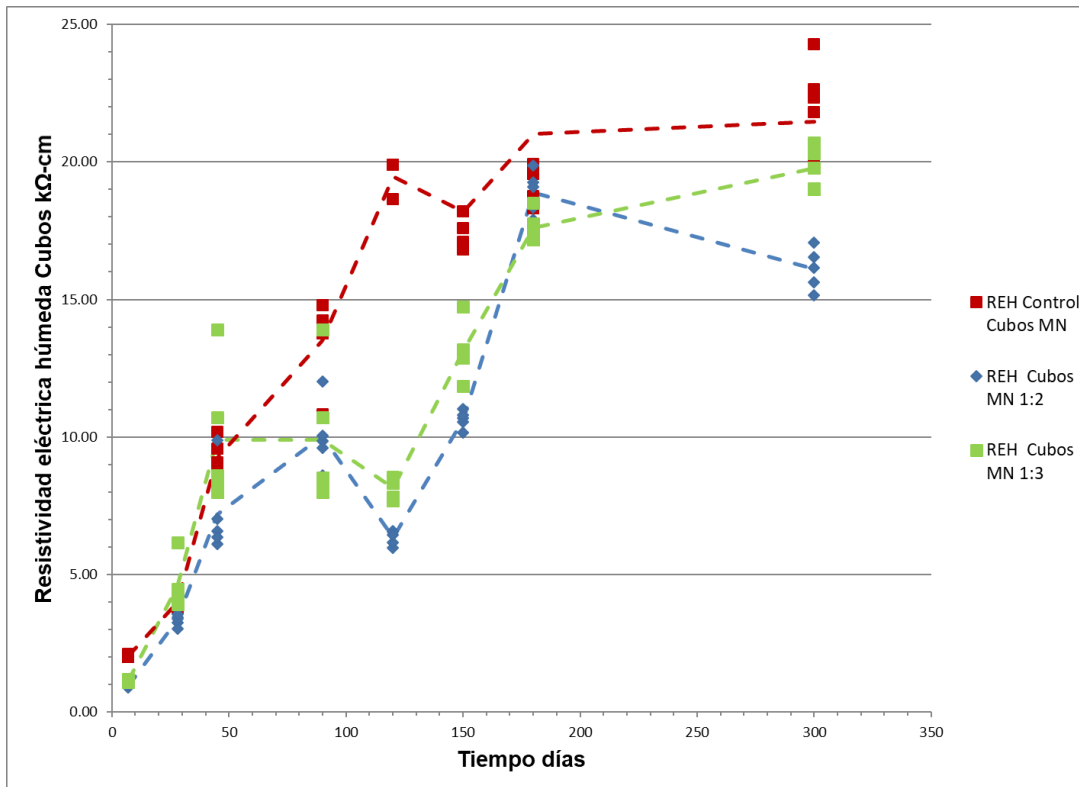


Figura 72.- Resistividad eléctrica húmeda para morteros con Mucílago Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cubos.

La resistividad eléctrica húmeda en cubos, Figura 90, aumentó en todas las mezclas conforme aumentó la edad de las muestras, sin embargo, todas las mezclas se encuentran en la zona de riesgo moderado en el pronóstico de corrosión ($> 10 < 200$ kOhm-cm (DURAR, 2000)). Adicionalmente, las dos mezclas con Mucílago de Nopal OFI se tardaron 150 días para alcanzar valores de resistividad tal que superan el umbral de alto riesgo de corrosión (10 kOhm-cm), lo que dejaría a estas mezclas con un alto riesgo en ese lapso de tiempo, mientras que el control C alcanzó este umbral desde los 45 días de edad. En general, para cubos, la resistividad eléctrica en MC fue mayor que las mezclas MN 1:3 y MN 1:2; a los 300 días las superó en 10% y 23% respectivamente.

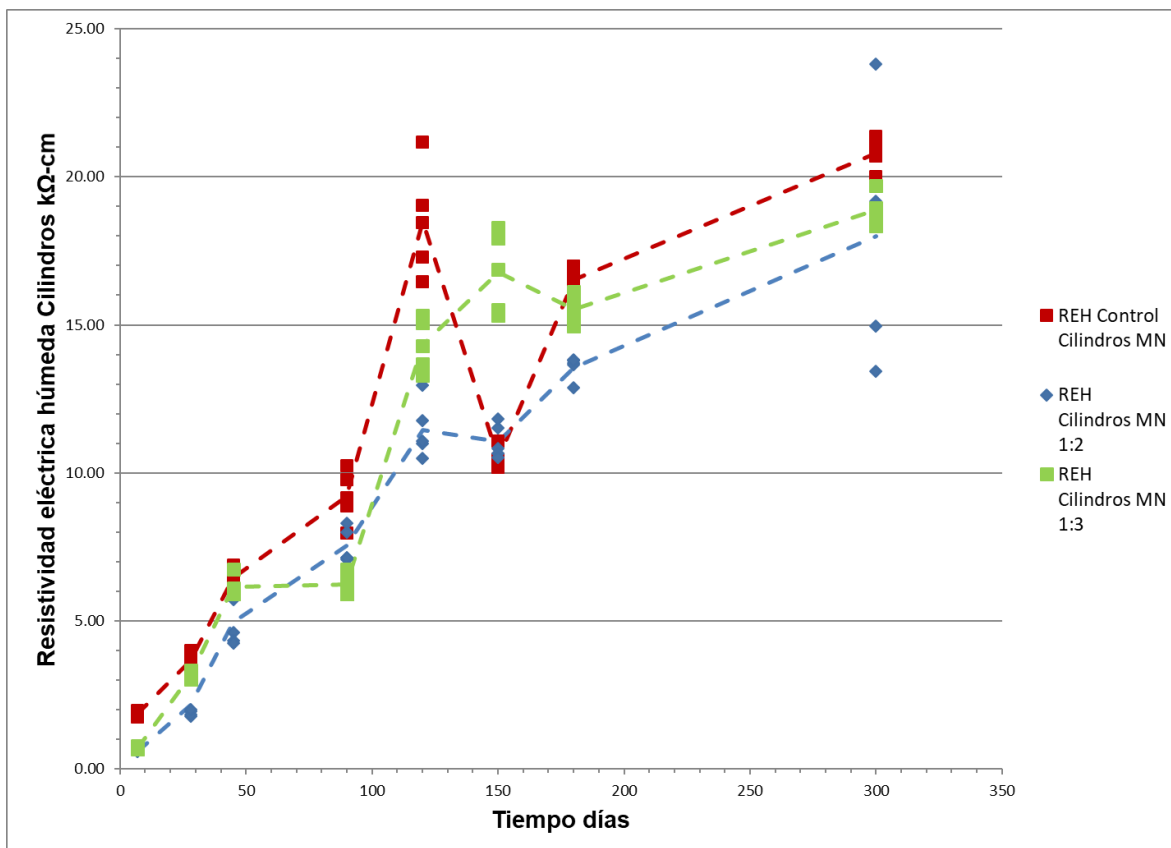


Figura 73.- Resistividad eléctrica húmeda para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cilindros.

La resistividad eléctrica en cilindros, Figura 91, tuvo un comportamiento similar a los cubos, sin embargo, para esta geometría las resistividades superaron el umbral de riesgo para la corrosión de alto a moderado a 120 días y el control siempre se mantuvo en valores por arriba de las otras dos mezclas adicionadas con Mucílago de Nopal OFI.

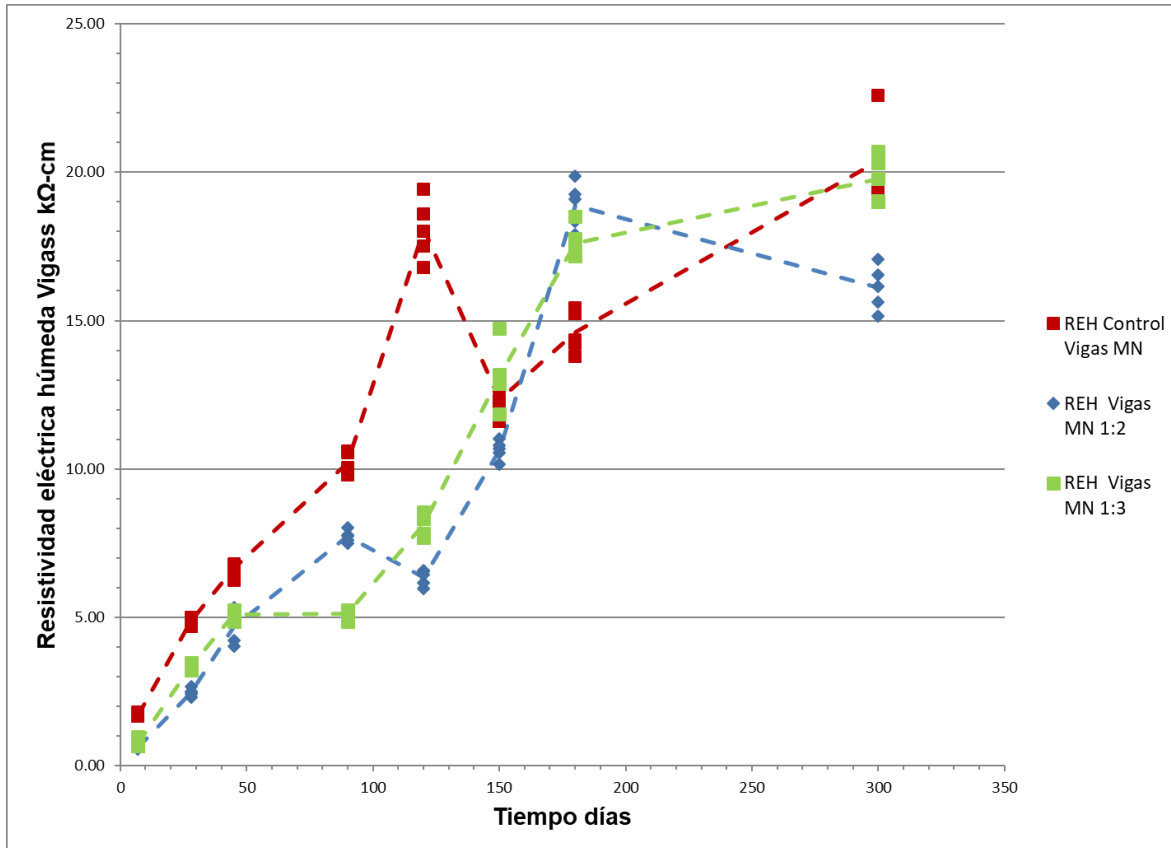


Figura 74.- Resistividad eléctrica húmeda para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para vigas.

La resistividad eléctrica en vigas, Figura 92, tuvo un comportamiento similar a la de los cubos y cilindros, en embargo, para las vigas el valor umbral de 10 kOhm-cm no fue alcanzado por el control hasta después de los 90 días y hasta después de 150 días para las mezclas MN 1:2 y MN 1:3. En este caso todas las mezclas tuvieron pendientes negativas, decrementos, en la resistividad; finalmente MC tuvo valores mayores que MN 1:3 y MN 1:2 en 9% y 23% respectivamente.

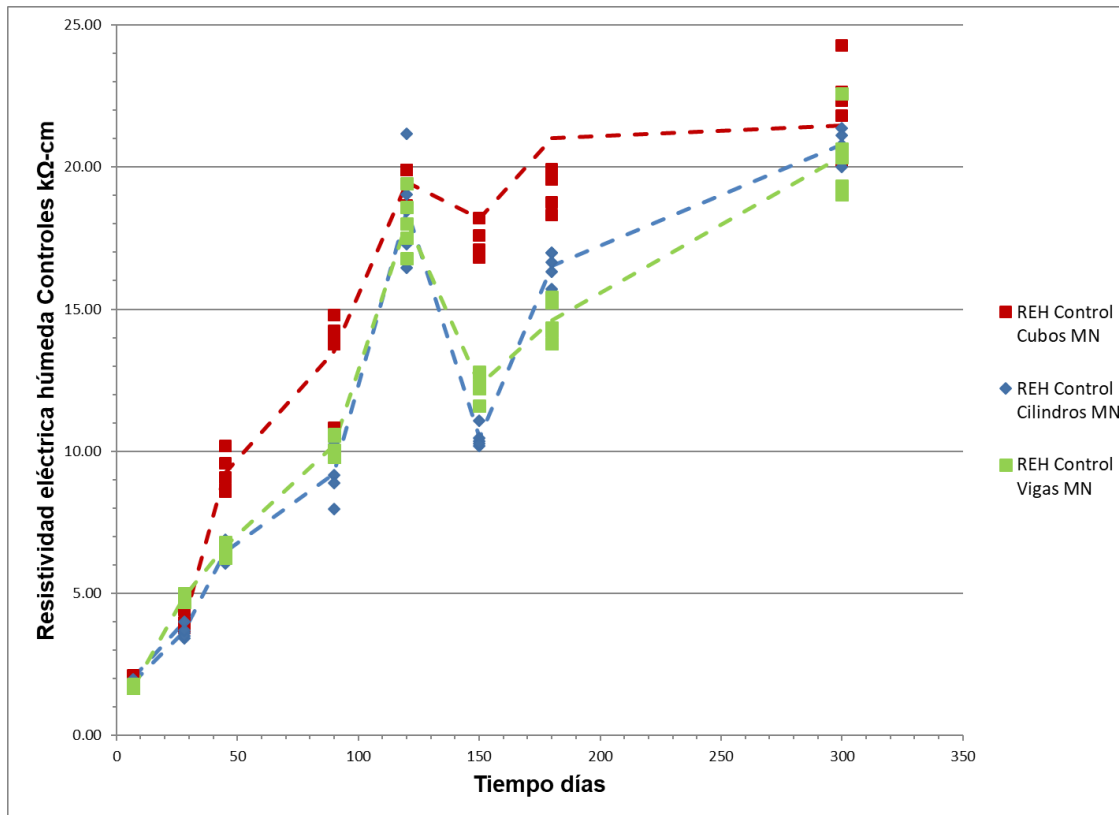


Figura 75.- Resistividad eléctrica húmeda para los controles de morteros con Mucílago de Nopal OFI, en función del tiempo, para cubos, cilindros y vigas. Sin incorporar adiciones.

La resistividad eléctrica en los controles MC, fue mayor en los cubos a todas las edades y adicionalmente éstos alcanzaron el valor umbral (10 kOhm-cm) de riesgo alto a moderado en tan sólo 45 días, comparado con los 90 días que requirieron los controles de las mezclas de cilindros y vigas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros que controla la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, por lo que no podrá considerarse como el único criterio para definir o prever un posible daño sobre las estructuras (DURAR, 2000).

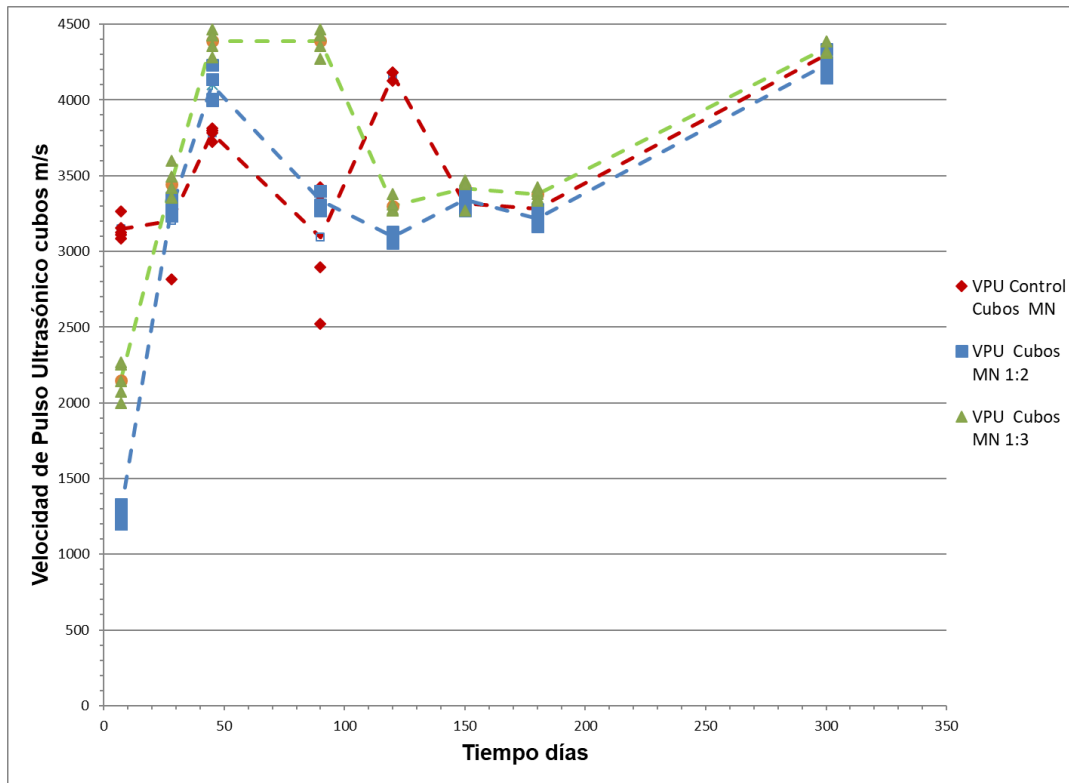


Figura 76.- VPU para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cubos.

Respecto a la VPU en cubos, Figura 94, a medida que tienen mayor edad, todas las muestras tienden a aumentarla, con algunos altibajos entre los 45 y los 120 días. Similar a lo ocurrido con las pruebas de compresión y flexión, a los 7 días MC está muy por encima de los valores de VPU de MN 1:3 y MN 1:2, respectivamente en un 32% y 60% respectivamente, ubicando a MC como mezcla de calidad “Alta” y a las mezclas adicionadas con OFI como de calidad “Normal” y “Deficiente” respectivamente, según Red DURAR. A partir de esa edad y hasta los 45 días, las mezclas adicionadas con mucílago de OFI tienen un importante incremento en la VPU, alcanzando ambos valores por encima de los 4,000 m/s, que ubican a las mezclas de calidad “Durable”, lo que no sucede con el control. A partir de los 45 días de edad y hasta los 180 días, todas las mezclas presentan altibajos en su VPU, decrementando sus valores solo por encima de los 3,000 m/s, que las ubica solo de calidad “Alta” según la Red DURAR. A los 300 días, nuevamente todas incrementan sus valores de VPU, casi coincidiendo, pero estando por encima MN

1:3 de C y de MN 1:2, en 1% y 3% respectivamente, estando nuevamente clasificadas como mezclas de calidad “Durable”. Por lo anterior, hasta esta edad, no parece tener influencia la adición del mucílago de OFI en la VPU de un mortero base cemento Portland.

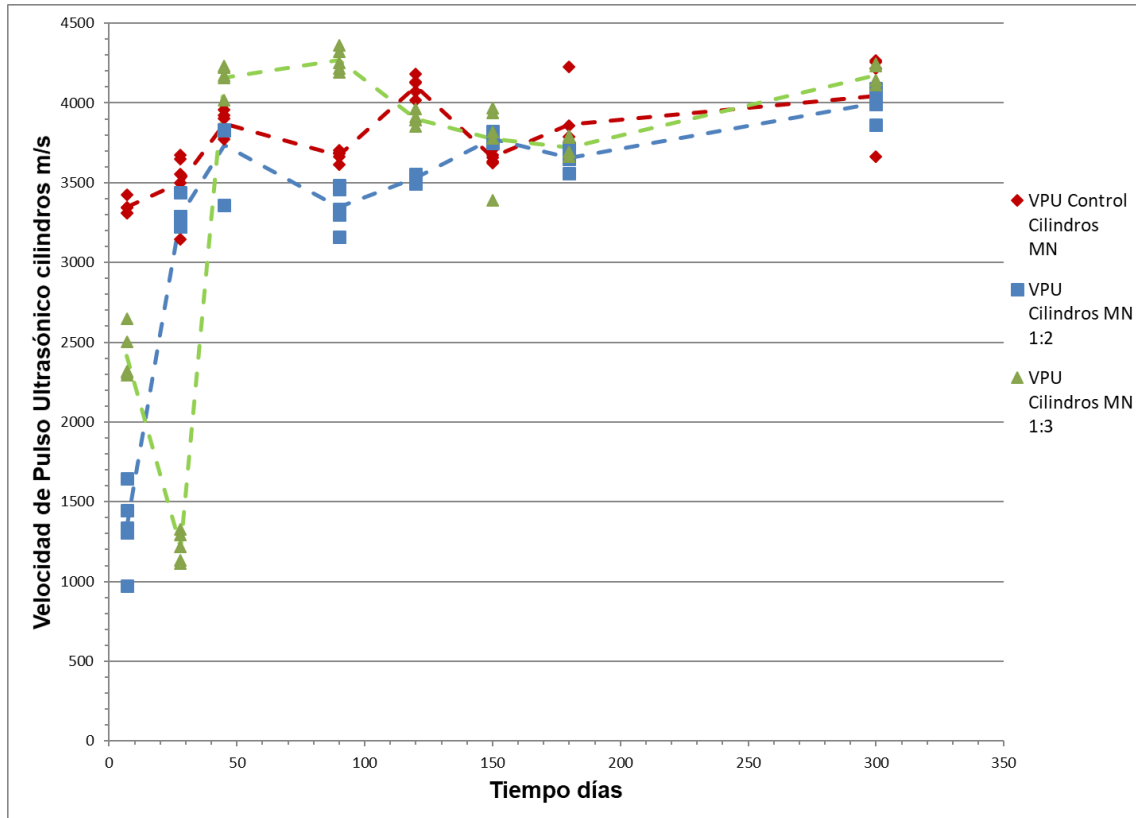


Figura 77.- VPU para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para cilindros.

Para los ensayos de VPU en cilindros, Figura 95, se tiene a los 7 días un comportamiento que ubica a C en calidad de mezcla “Alta”, arriba de los 3,000 m/s; a MN 1:3 la ubica con calidad “Aceptable”, arriba de los 2,000 m/s y a MN 1:2 la ubica en calidad “Deficiente”, por debajo de los 2,000 m/s. A partir de los 7 días y hasta los 180 días de edad, todas las mezclas presentan un comportamiento con altibajos, siendo hasta los 180 días en que se regula el comportamiento, y a partir de esa edad y hasta los 300 días se incrementan los valores de la VPU para las tres mezclas, quedando por encima MN 1:3, después C en 4% abajo y al final MN 1:2

con 5%. El incremento de VPU es marginal de MN 1:3 respecto a las otras dos mezclas C y MN 1:2, quedando las tres solo un poco arriba de los 4,000 m/s, de calidad “Durable”, según el Manual de la Red DURAR.

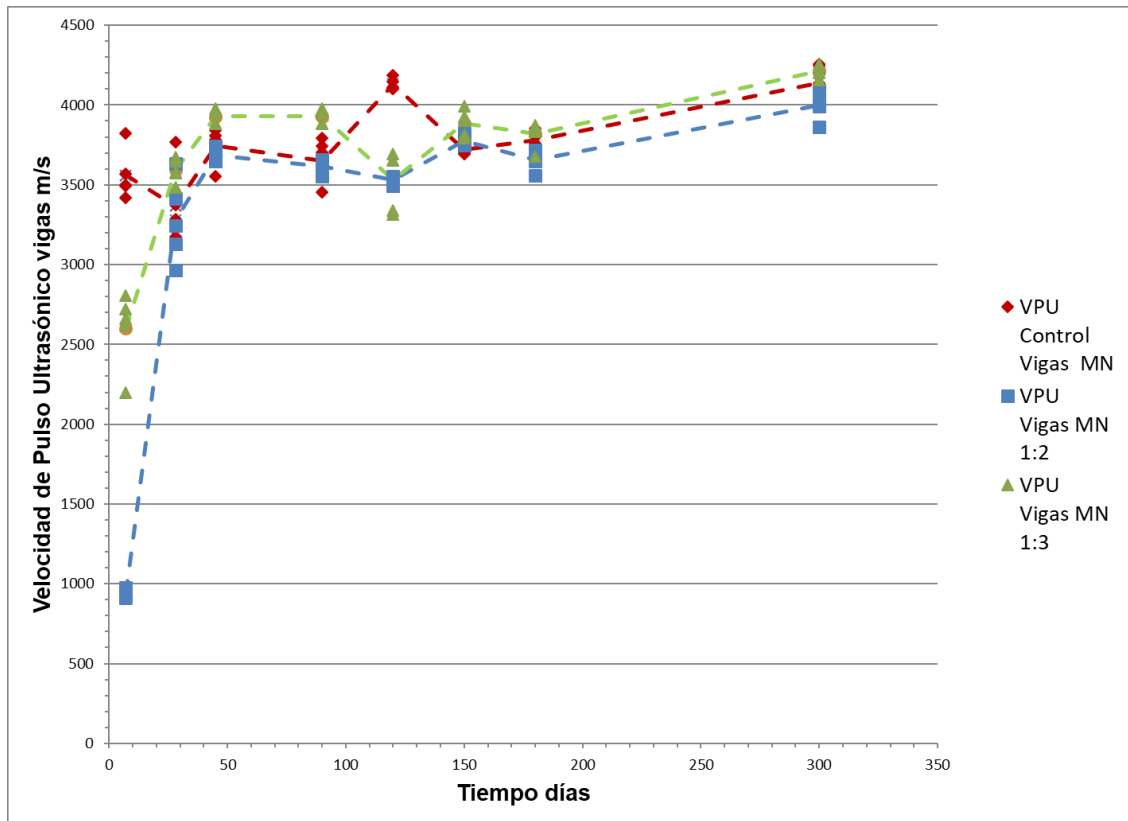


Figura 78.- VPU para morteros con Mucílago de Nopal OFI, en dos concentraciones, en función del tiempo y su control, para vigas.

En la Figura 96, que se refiere a determinar la VPU en vigas, consistente con lo ocurrido en cubos y en cilindros, C se clasifica de calidad “Alta”, MN 1:3 como de calidad “Normal” y MN 1:2 de calidad Deficiente”. A partir de esa fecha y hasta los 180 días existen altibajos en todas las VPU de las tres mezclas, pero tendiendo a subir de valor. A los 300 días la VPU en MN 1:3 está ligeramente arriba de C en 2% y de MN 1:2 en 6%, quedando las tres mezclas de mortero clasificadas como de calidad “Durable”, ligeramente por encima de los 4,000 m/s.

Las pruebas de VPU para vigas señalaron el mismo comportamiento inicial bajo que para los cubos y los cilindros, sin embargo, a partir de la edad de 28 días ya todas las mezclas habían alcanzado una calidad de mezcla entre alta y durable.

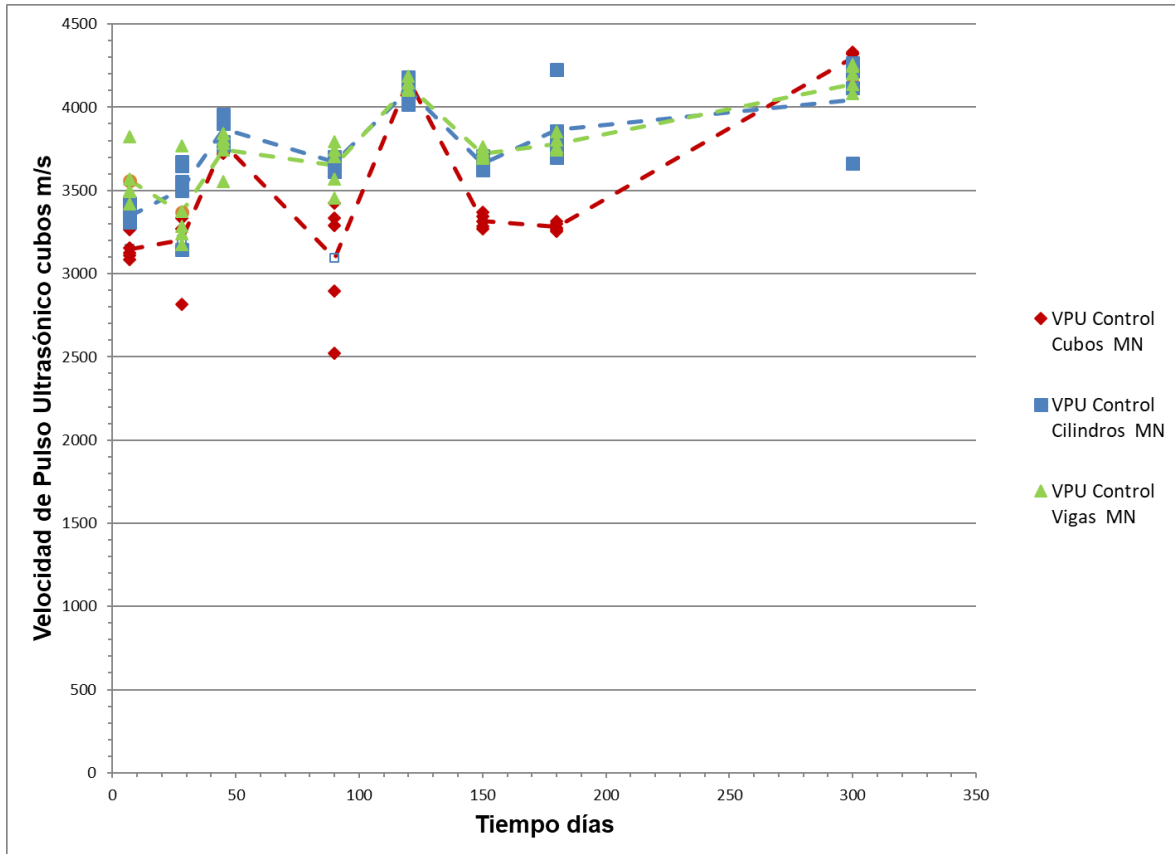


Figura 79.- VPU para los controles de morteros con Mucílago de cactus opuntia, en función del tiempo, para cubos, cilindros y vigas.

En las pruebas de VPU, Figura 97, las muestras control para todas las geometrías, se ubicaron desde la edad de 7 días en calidad alta a durable. Se tuvieron altibajos, pero tendiendo a incrementarse la VPU. Es destacable que los cilindros y las vigas tuvieron prácticamente los mismos valores, mientras que los cubos, siguiendo el mismo comportamiento de los cilindros y las vigas, se ubicaron en valores más bajos, aunque a los 300 días tuvieron la mayor velocidad.

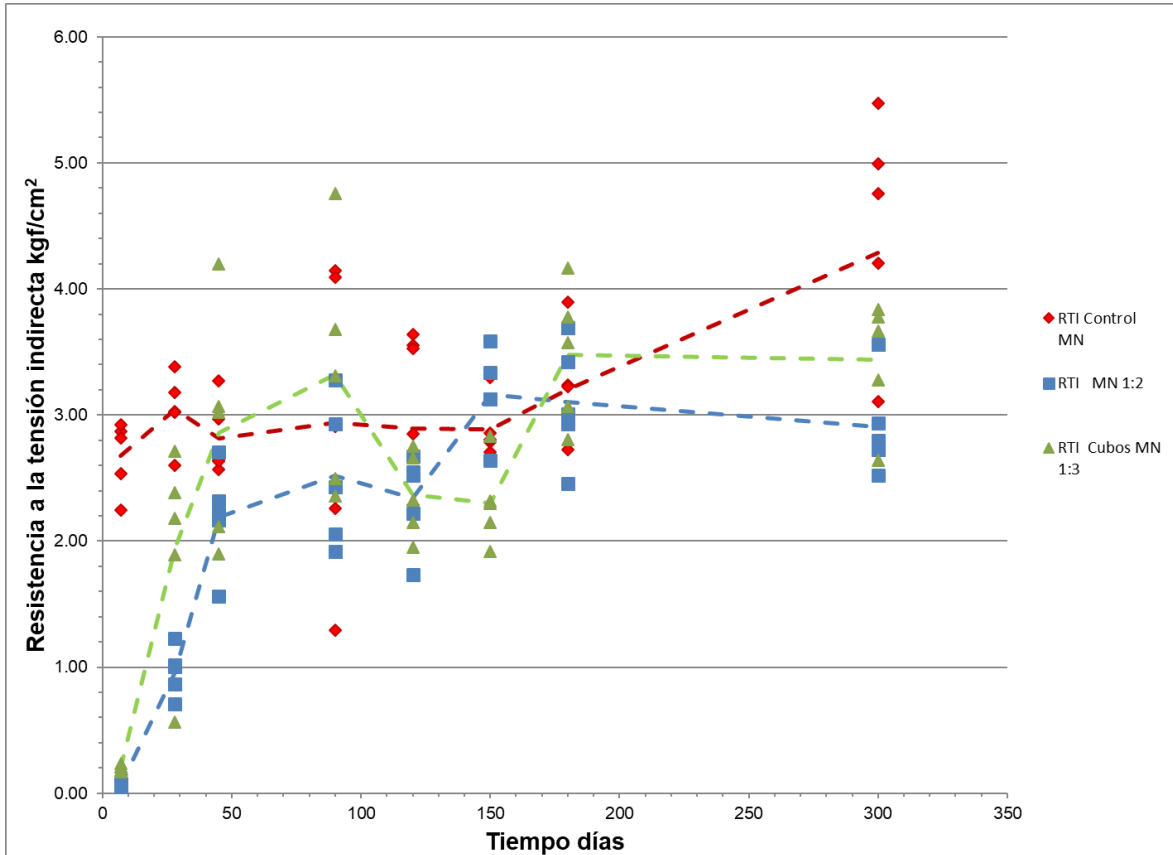


Figura 80.- Resistencia a la Tensión Indirecta a las distintas edades, para morteros con Mucílago de Cactus opuntia en dos concentraciones y su control, para cilindros.

La Figura 98 muestra los resultados de la determinación de Tensión Indirecta en cilindros. MC presenta 2.7 kgf/cm², muy por encima de MN 1:3 y MN 1:2, que no tienen prácticamente resistencia a la Tensión Indirecta. A los 28 días, C tiene valores promedio aproximados de 3 kgf/cm², MN 1:3 de 2kgf/cm² y MN 1:2 de 1kgf/cm², lo que representa estar 33% y 66% por encima, respectivamente. A partir de los 28 días y hasta los 300, todas las mezclas presentan un comportamiento con altibajos, tendiendo a subir sus valores. A los 300 días MC está por encima de MN 1:3 y de MN 1:2, en un 19% y 33% respectivamente.

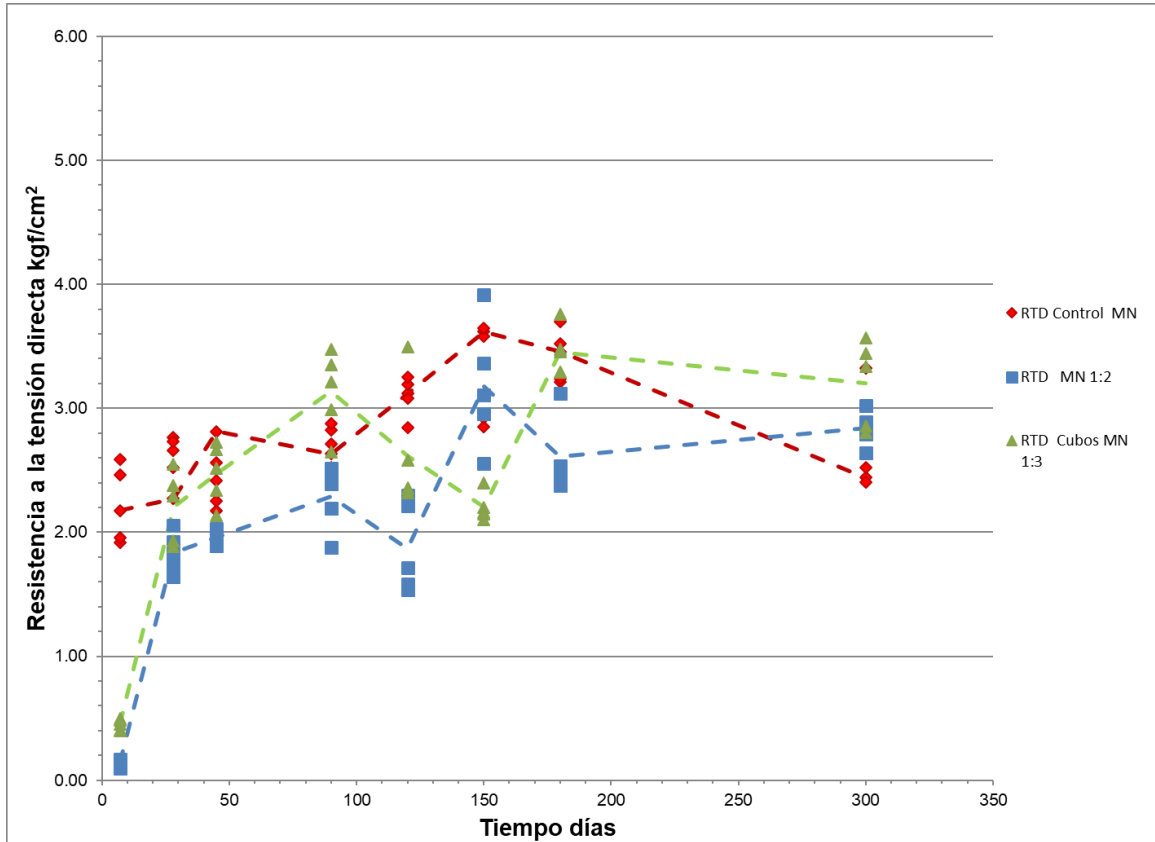


Figura 81.- Resistencia a la tensión directa a las distintas edades, para morteros con Mucílago de Nopal OFI y su control, para briquetas.

La Figura 99 exhibe los resultados de la resistencia de briquetas a tensión directa. A los 7 días y consecuentemente con la prueba de Tensión Indirecta, MC está muy por encima de MN 1:3 y MN 1:2. De los 7 a los 28 días estas dos últimas mezclas presentan un gran incremento, lo que se puede observar en la gráfica por la pendiente de la curva. A partir de los 28 días y hasta los 300, todas las mezclas presentan altibajos, con tendencia a incrementar sus valores. A los 300 días MN 1:3 se ubica con valores por encima de MN 1:2 y de C, en un 16% y 33 % respectivamente. De los 180 a los 300 días C y MN 1:3 bajaron en sus valores y solo MN 1:2 se incrementó.

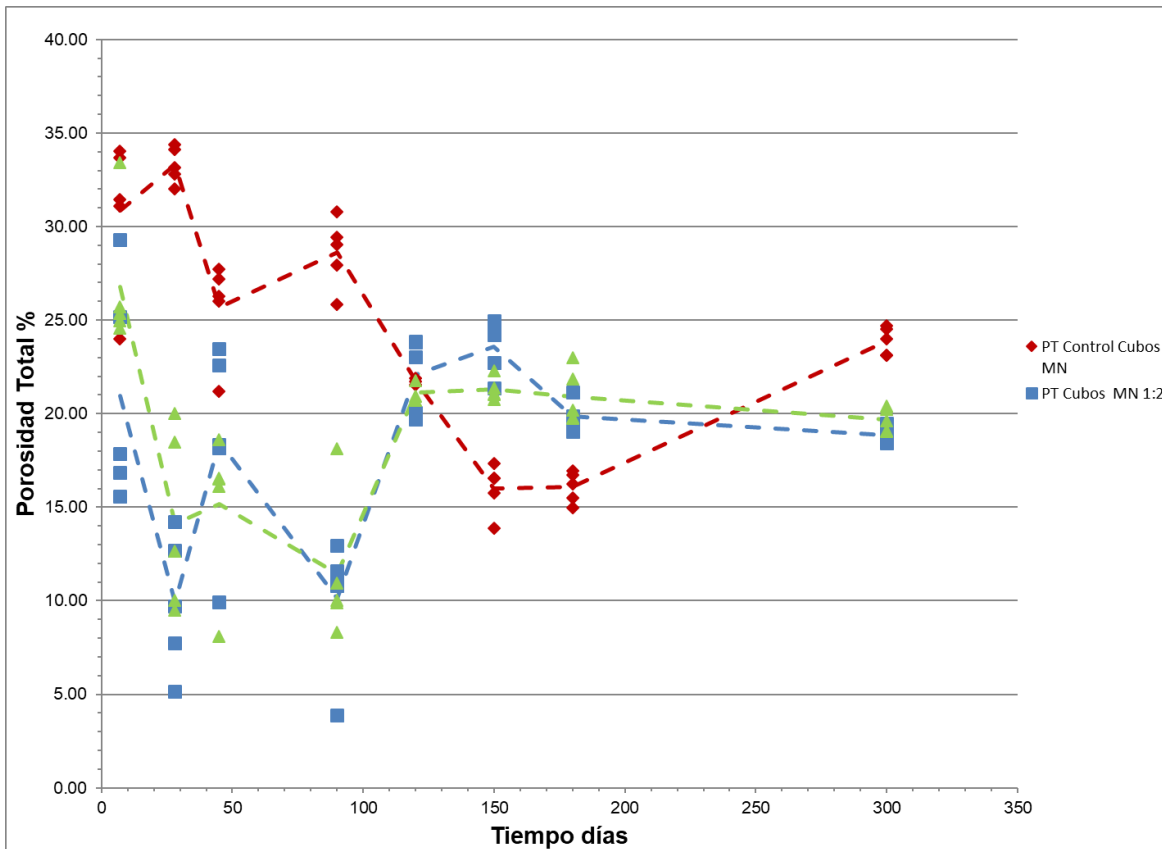


Figura 82.- Porosidad total a las diferentes edades para morteros con Mucílago de cactus opuntia y su control, para cubos.

La Figura 100 muestra los valores de la Porosidad Total (PT) a diferentes edades. A los 7 días de edad MC presenta una PT del 31%, MN 1:3 del 25% y MN 1:2 del 21%. De los 7 a los 28 días de edad C incrementó su PT y las dos mezclas adicionales la redujeron. De los 28 a los 45 días sucedió lo contrario, y de los 45 a los 90 días volvió a invertirse el comportamiento, para de los 90 a los 150 días volver MC a decrementar y las dos mezclas adicionales a incrementar su PT. De ahí y hasta los 300 días C incrementó su PT, en tanto que las mezclas adicionales la decrementaron ligeramente, para quedar MN 1:3 y MN 1:2 por debajo de C en 19% y 25% por debajo, respectivamente.

Fotomicrografías del mucílago de Nopal *Opuntia ficus-indica* en morteros de cemento Portland a diferentes aumentos.

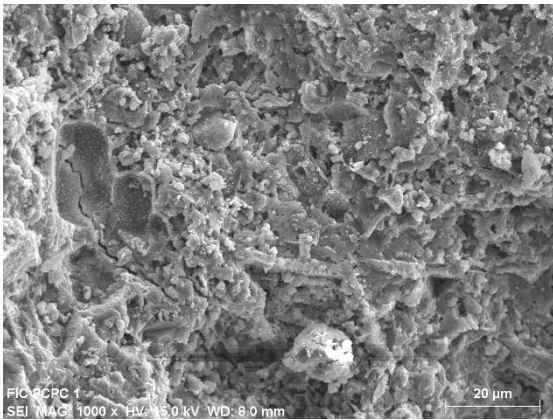


Figura 83.- Fotomicrografía a 1000x, de mortero con CP sin adición.

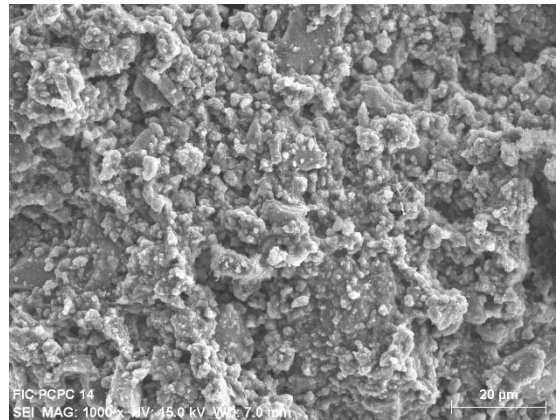


Figura 102.- Fotomicrografía a 1000x, de mortero con CP adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3

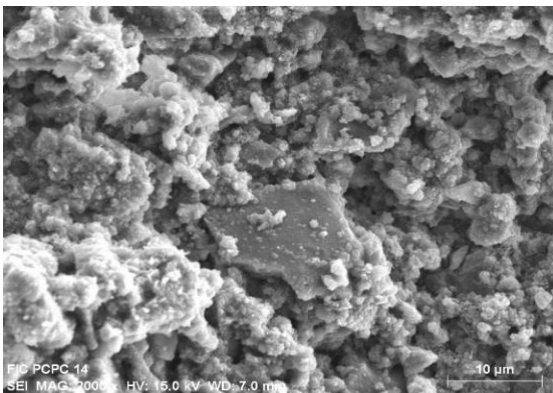


Figura 84.- Fotomicrografía a 2000x, de mortero con CP, adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3

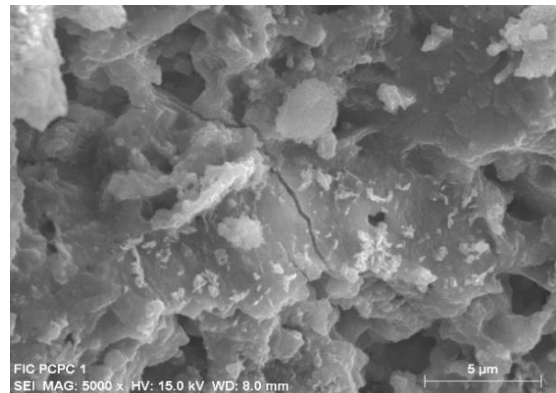


Figura 85.- Fotomicrografía a 2000x, de mortero con CP sin adición.

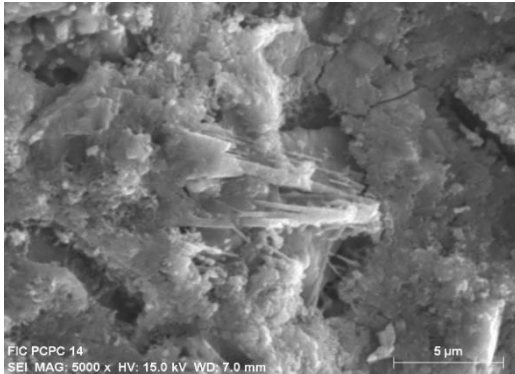


Figura 105. Fotomicrografía a 5000x, de mortero con CP adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3.

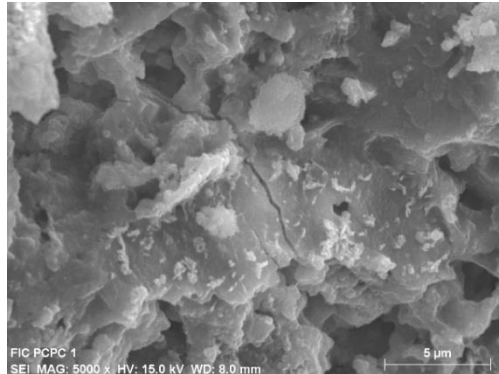


Figura 106.- Fotomicrografía a 5000x, de mortero sin adición.

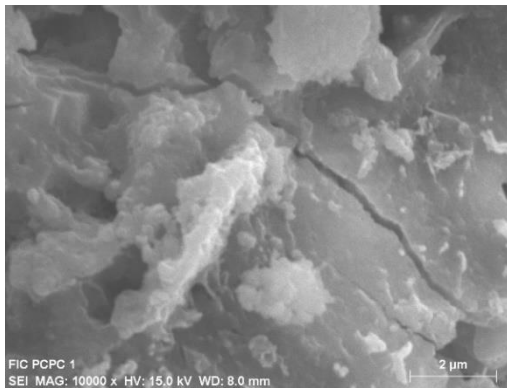


Figura 107.- Fotomicrografía a 10000 x, de mortero de CP sin adición.

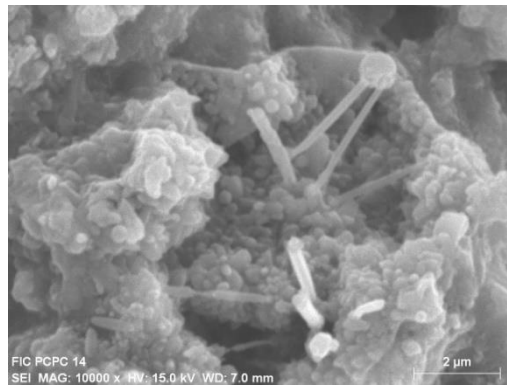


Figura 108.- Fotomicrografía a 10000x, de mortero de CP adicionado con mucílago de OFI, MN 1:3.

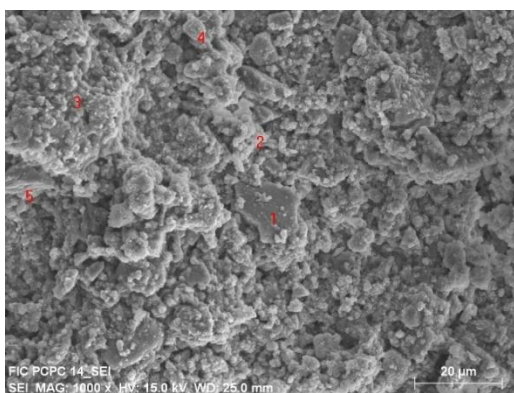


Figura 109.- Fotomicrografía a 1000x, de mortero de CP.

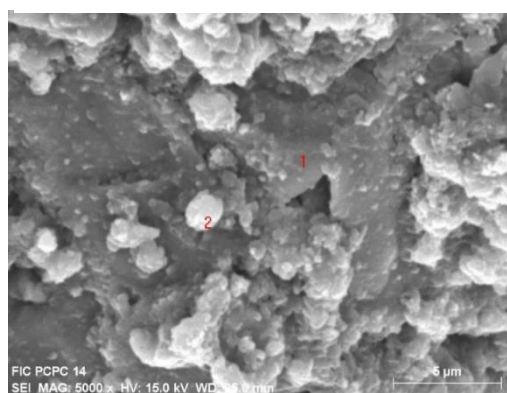


Figura 110.- Fotomicrografía a 5000x, de mortero de CP adicionado con mucílago de CP, MN 1:3.

La Figura 101 en una microfotografía tomada a 1000x, de un mortero sin adiciones, un mortero control MC. En la morfología se observan una fisura, algunas porosidades de diferentes tamaños, así como la matriz cementicia. También es evidente el desprendimiento de pétreos de esta matriz.

En la Figura 102 se presenta una microfotografía también a 1000x, de MN 1:3. Comparativamente ésta no presenta fisura. La matriz cementicia es similar, así como la abundancia de poros. Se observa la presencia marginal de fibras de OFI. La figura 103, a 2000x, es de mortero MN 1:3; se observan los líticos parcialmente cubiertos por la matriz de cemento. Hay poros y escasas fibras de OFI. En la Figura 107, a 5,000x se aprecia una fisura de un espesor del orden de 100 nm, poros de varios diámetros, de 500 nanómetros a 4 micrómetros.

En la Figura 104, de mortero testigo, que se tomó a 2000x, se observan líticos, poros y lo que parecen ser los productos de hidratación, la matriz cementicia que cubre a los granos inertes. En la Figura 105, a 5,000x, de MN 1:3, se observan fibras de OFI, fisuras en la matriz del orden de 50 nm, así como poros desde 50 nanómetros.

En la Figura 107, a 10,000x, se presenta una fisura del orden de 100 nm de ancho y otra más pequeña de 10 nm. Una matriz densa con poros desde 50 nm de diámetro.

La figura 108 es una microfotografía a 10,000x, con MN 1:3, que exhibe a la matriz, poros del orden de 1 micrómetro y fibras de OFI de 100 nm a 200 nm de diámetro, aproximadamente.

1.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra Testigo, CU 1 FIC PCPC1 1000X, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	[wt.%]	norm. wt.%	norm. at.%	Error in %
Oxygen	48.13672	57.31468	76.32487	6.102876
Aluminium	0.690693	0.822383	0.649399	0.063263
Silicon	4.558117	5.427188	4.117149	0.220937
Potassium	1.007704	1.199838	0.653836	0.063681
Calcium	26.99852	32.14618	17.08942	0.838424
Molybdenum	0.579926	0.690497	0.153344	0.054315
Magnesium	0.163969	0.195232	0.171143	0.038827
Iron	1.851069	2.204002	0.840845	0.107767
Sum:	83.98672	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.

C[norm. Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.

C atom [at.%].- El % del peso del elemento

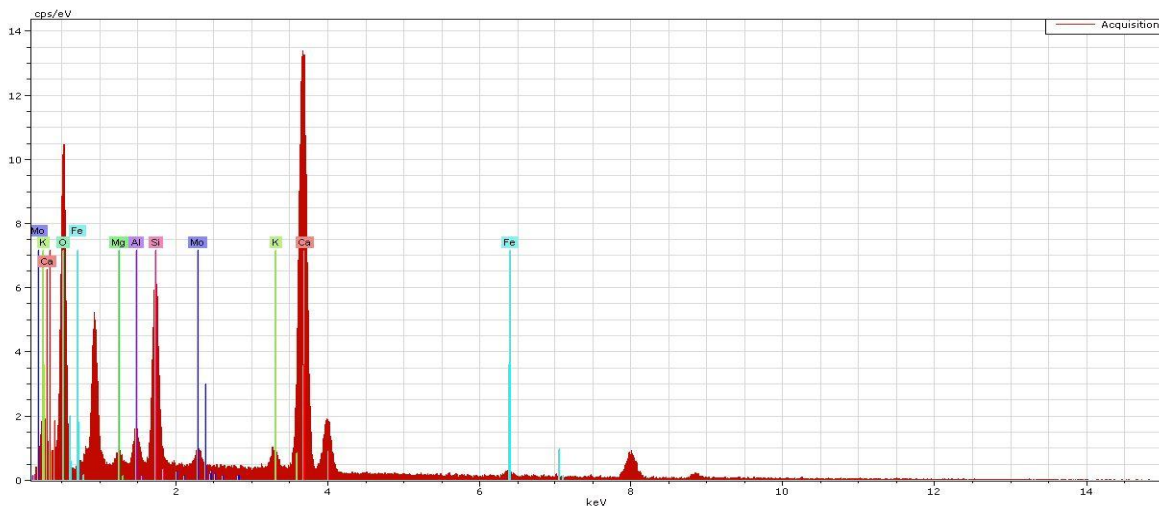
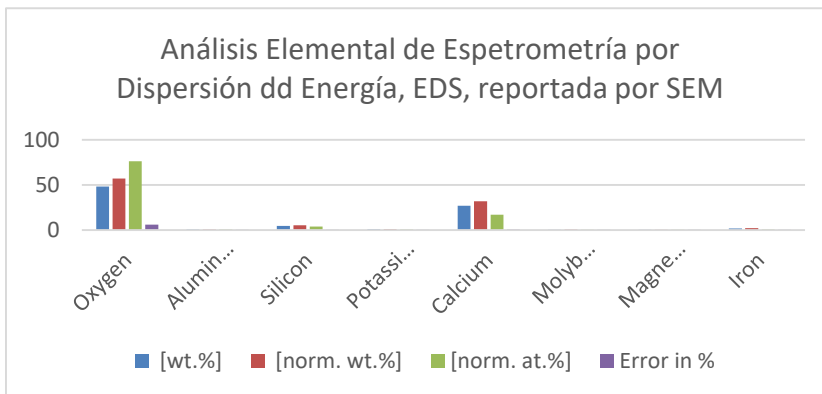
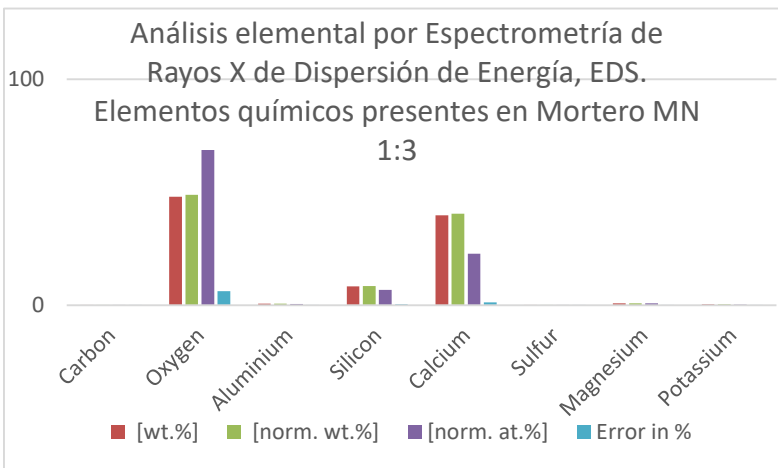


Figura 111. Análisis elemental por EDS de muestra de mortero con CPC 30R RS, 1000X, en MEB.

2.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N° 1, adicionada con OFI, MN 1:3, 1000X, CU 1 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	C [wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbon	0.0735116	0.074947942	0.14025749	0.15932372
Oxygen	47.965649	48.90285595	68.7030563	6.16449044
Aluminium	0.6518006	0.664536225	0.55360175	0.06314088
Silicon	8.3033737	8.465614441	6.77519548	0.37870936
Calcium	39.742879	40.51942071	22.7249371	1.22094515
Sulfur	0.1872516	0.190910349	0.13382283	0.03744987
Magnesium	0.8122514	0.828122137	0.76585103	0.0773528
Potassium	0.3468158	0.353592247	0.20327799	0.04363818
Suma	98.083533	100	100	



C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.

C[norm. Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.

C atom [at.%].- El % del peso del elemento

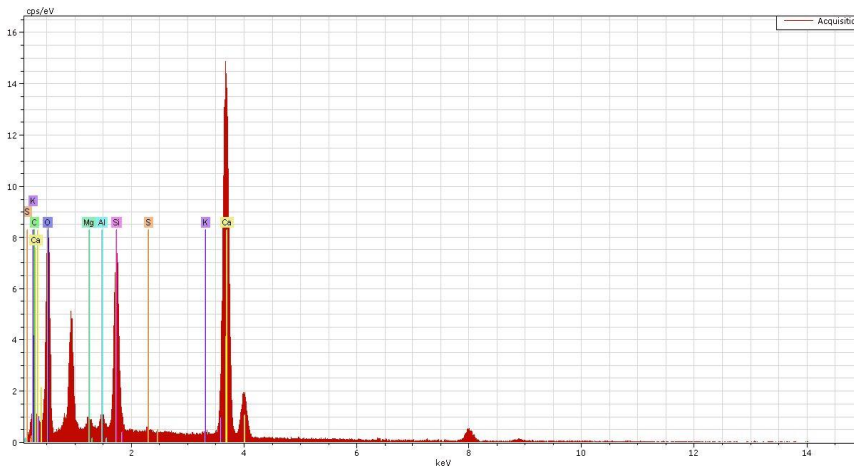


Figura 86.- Análisis elemental por EDS de muestra de Mortero N°1, MN 1:3, 1000X, en SEM.

3.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N° 1, adicionada con OFI, MN 1:3, 5000X, CU 1 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

2.- CU 1 MA FIC PCPC 14 5000X. Oxígeno: 50.40%, Calcio: 36.23%

Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbon	K-series	1.772796	1.96387001	3.70707711	0.761258
Oxygen	K-series	41.115125	45.5465621	64.5431178	5.188442
Aluminium	K-series	0.3590678	0.39776861	0.33424262	0.045882
Silicon	K-series	7.0058308	7.76092762	6.26512191	0.320505
Calcium	K-series	39.743796	44.0274291	24.9066509	1.212952
Magnesium	K-series	0.140214	0.15532641	0.14489311	0.036286
Sulfur	K-series	0.0557909	0.06180408	0.04369889	0.02953
Chlorine	K-series	0.0779144	0.08631207	0.05519761	0.030613
	Sum:	90.270534	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.

C[norm.Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.

C atom [at.%].- El % del peso del elemento

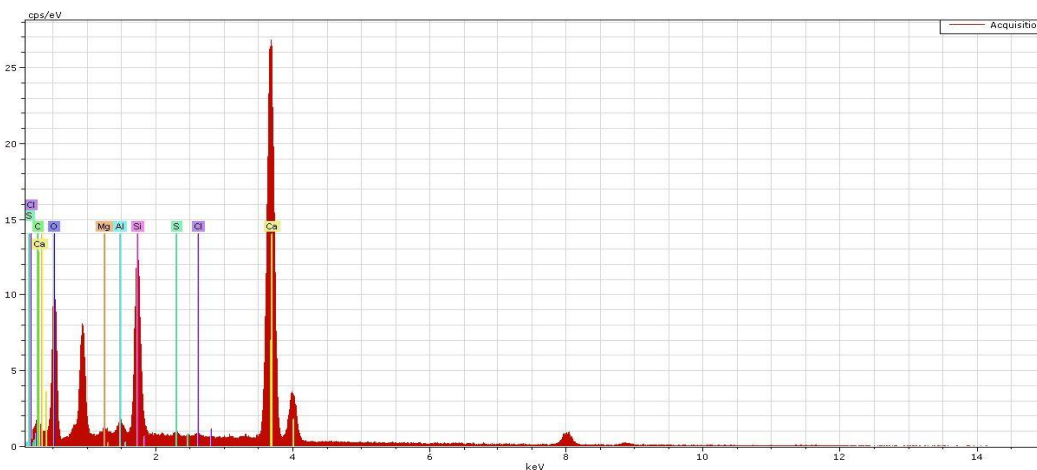
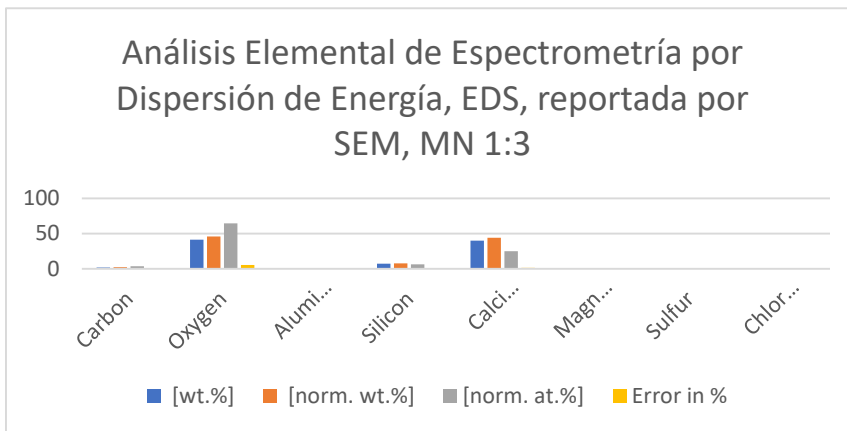


Figura 113. Análisis Elemental por EDS de muestra de Mortero N°1, MN 1:3, a 5000X, en SEM.

4.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N° 2, adicionada con OFI, MN 1:3, 1000X, CU 2 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	C [wt.%]	C [norm. wt.%]	C[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	52.36676	60.80648	77.44305	6.700032
Aluminium	2.18925	2.542082	1.919814	0.136527
Silicon	7.985915	9.272971	6.727799	0.366701
Potassium	2.290036	2.659111	1.385846	0.107953
Calcium	19.11966	22.20109	11.28768	0.611278
Sulfur	0.238803	0.27729	0.176208	0.040297
Iron	1.489898	1.730019	0.631229	0.105573
Magnesium	0.440037	0.510956	0.428375	0.057205
Suma:	86.12035	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.

C[norm.Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.

C atom [at.%].- El % del peso del elemento

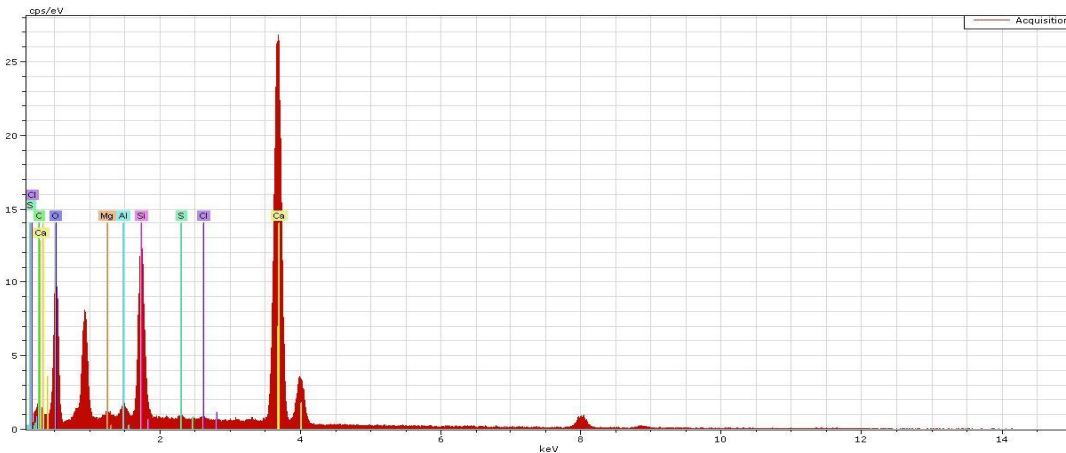
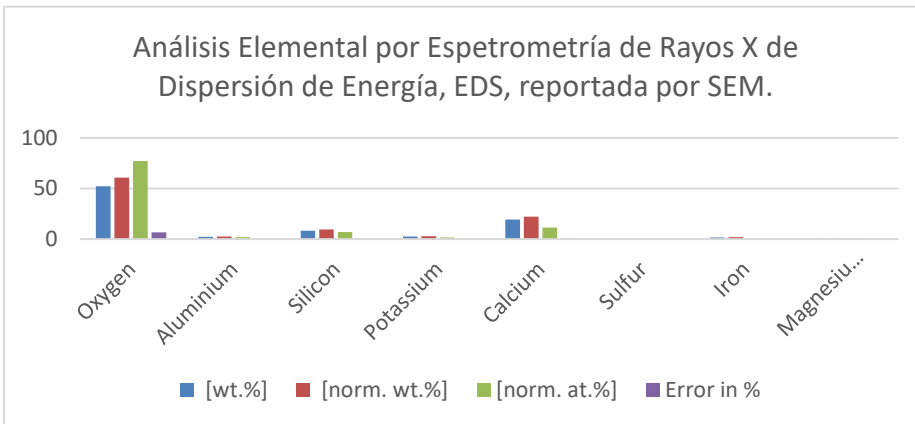


Figura 114.- Análisis Elemental por EDS de muestra de Mortero N°2, MN 1:3, a 1000X, en SEM.

5.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N° 2, adicionada con OFI, MN 1:3, 5000X, CU 2 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbon	0.201285	0.230086	0.383609	0.368566
Oxygen	56.67776	64.78758	81.08949	6.754941
Aluminium	0.382645	0.437397	0.324627	0.04708
Silicon	2.81395	3.216589	2.293453	0.146671
Sulfur	0.491565	0.561902	0.350907	0.046751
Chlorine	0.517866	0.591965	0.334367	0.04703
Calcium	25.68973	29.36558	14.67267	0.796143
Potassium	0.324376	0.37079	0.189909	0.039872
Magnesium	0.383272	0.438113	0.360967	0.050253
	87.48245	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.

C[norm.Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.

C atom [at.%].- El % del peso del elemento

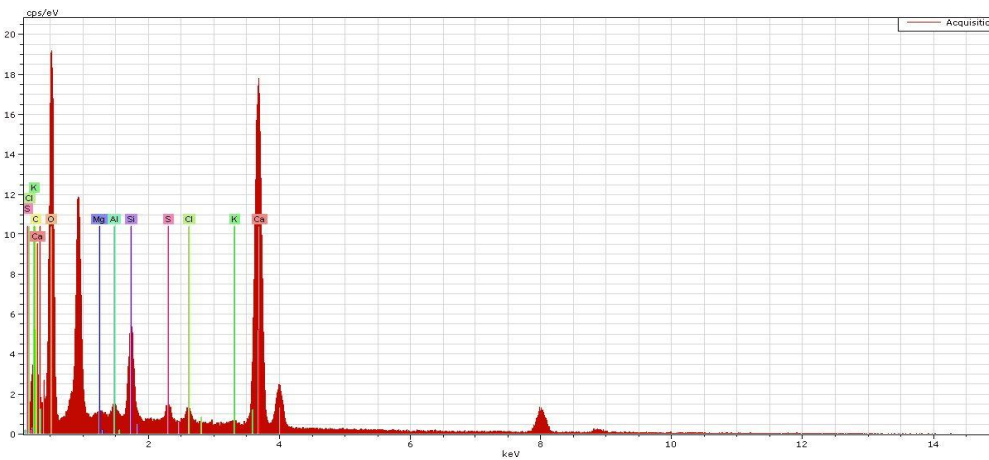
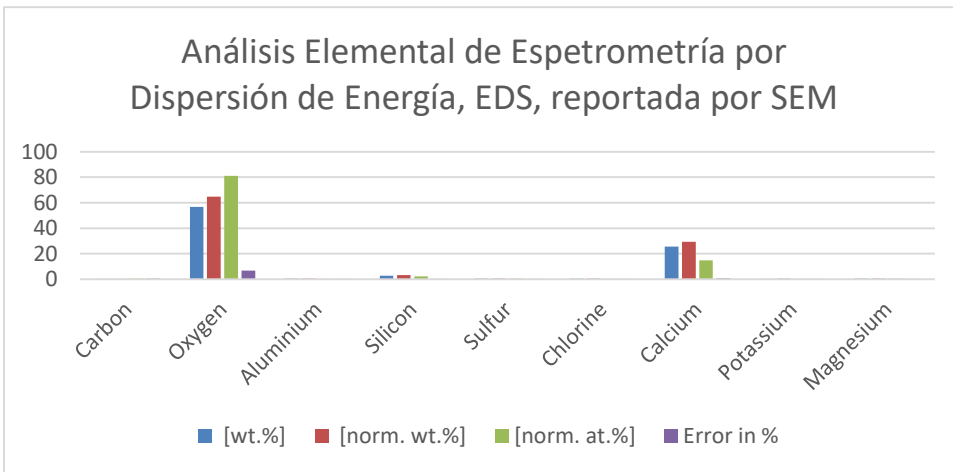


Figura 115.- Análisis Elemental por EDS de muestra de Mortero N°2, MN 1:3, a 5000X, en SEM.

6.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N° 3, adicionada con OFI, MN 1:3, 1000X, CU 2 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	[wt.%]	norm. wt.%	norm. at.%	Error in %
Carbon	0.187662	0.208257	0.352959	0.354696
Oxygen	56.81496	63.05007	80.22048	7.228296
Aluminium	0.539937	0.599192	0.452067	0.05838
Silicon	1.815707	2.01497	1.460461	0.109861
Calcium	29.26933	32.48146	16.49806	0.911906
Sulfur	0.399892	0.443778	0.281724	0.046649
Magnesium	0.307908	0.341699	0.286188	0.049547
Potassium	0.77547	0.860573	0.448057	0.059103
Sum:	90.11087	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.
 C[norm.Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.
 C atom [at.%].- El % del peso del elemento

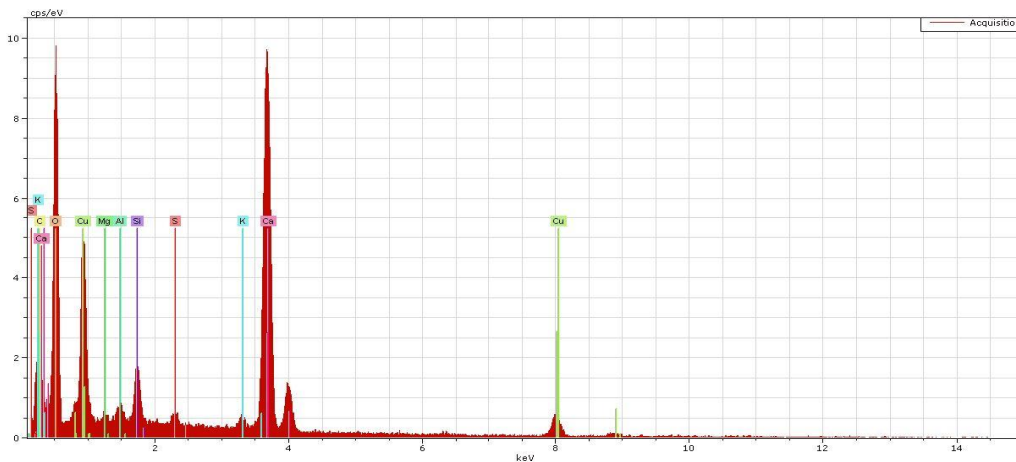
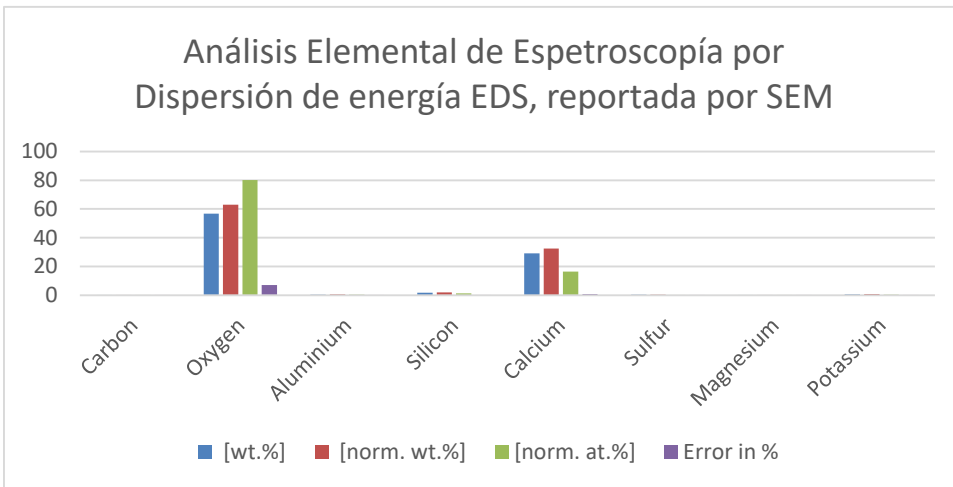


Figura 116.- Análisis Elemental por EDS de muestra de Mortero N°3, MN 1:3, a 1000X, en SEM.

7.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N°4, adicionada con OFI, MN 1:3, 1000X, CU 2 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	[wt.%]	norm. wt.%	norm. at.%	Error in %
Oxygen	46.62566	60.74536	75.36448	6.141177
Aluminium	2.942401	3.833452	2.820205	0.171018
Silicon	15.92875	20.75247	14.66712	0.695808
Potassium	2.741816	3.572123	1.813535	0.122543
Calcium	7.357506	9.585589	4.747555	0.261925
Sulfur	0.145725	0.189855	0.117526	0.036226
Iron	1.014066	1.321157	0.469582	0.087178
Sum:	76.75592	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.
 C[norm.Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.
 C atom [at.%].- El % del peso del elemento

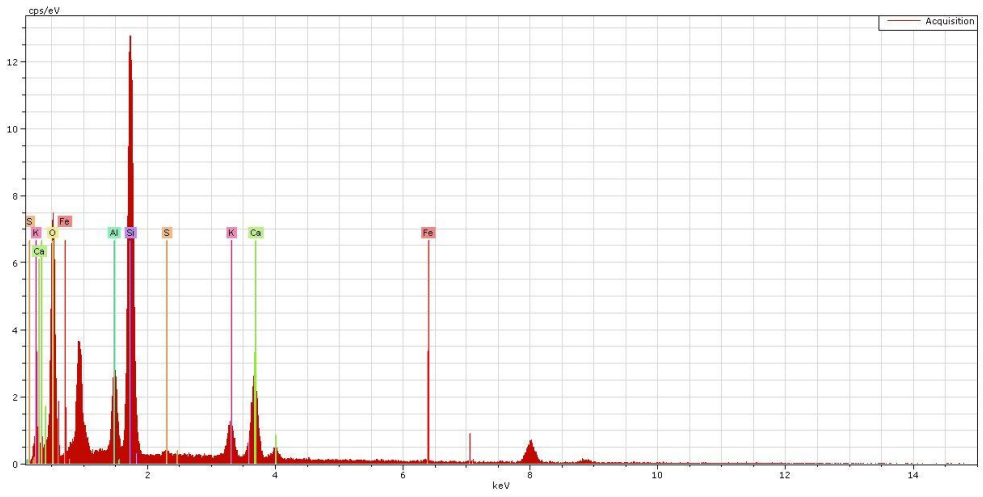
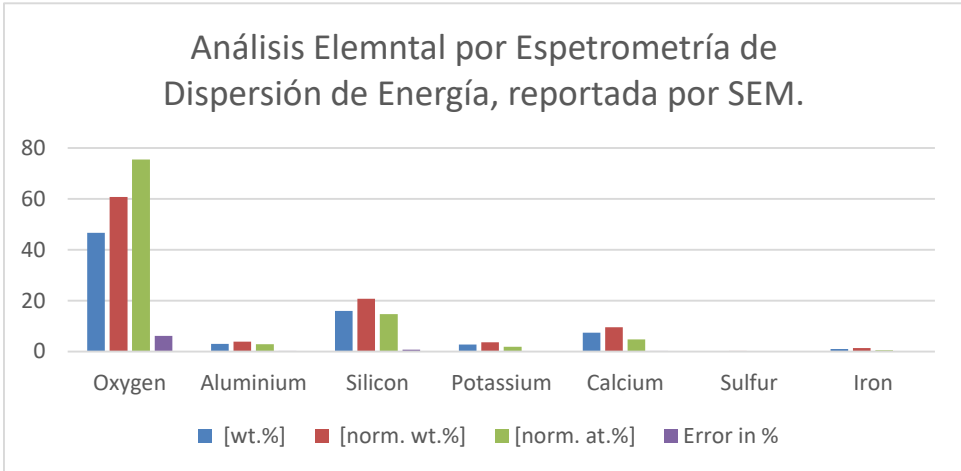


Figura 117.- Análisis Elemental por EDS de muestra de Mortero N°4, MN 1:3, a 1000X, en SEM.

8.- Resultados de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, EDS. Análisis de muestra N°5, adicionada con OFI, MN 1:3, 1000X, CU 2 MA 2 FIC PCPC 14, en microscopio electrónico de barrido, SEM.

Element	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxygen	6.387002	7.874397	17.63322	2.09295
Silicon	0.024101	0.029714	0.037905	0.004879
Calcium	74.6999	92.09589	82.32888	2.272338
Suma:	81.111	100	100	

C[wt.%].- Concentración no normalizada en % del peso del elemento.
 C[norm.Wt.%].- Concentración normalizada en % del peso del elemento.
 C atom [at.%].- El % del peso del elemento

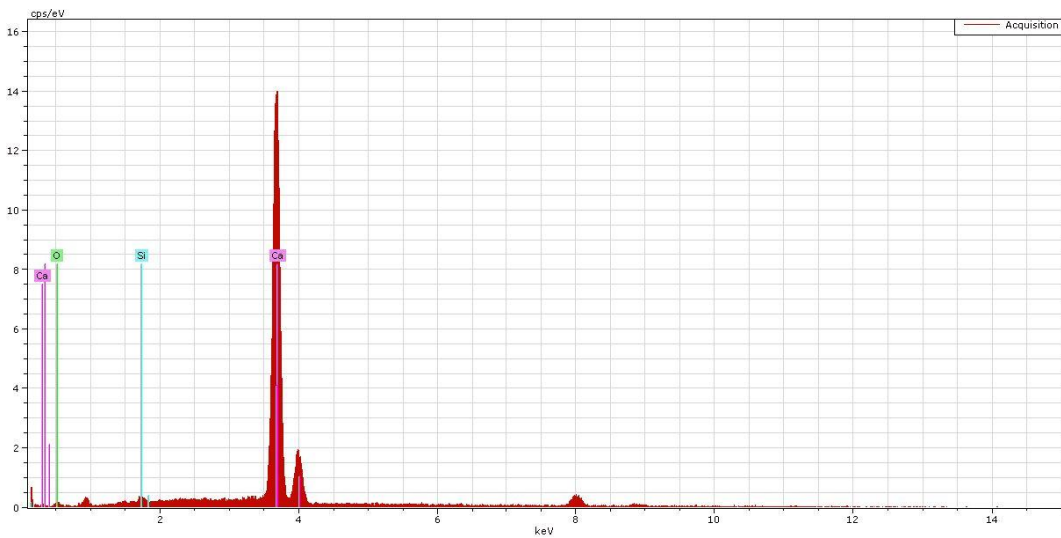
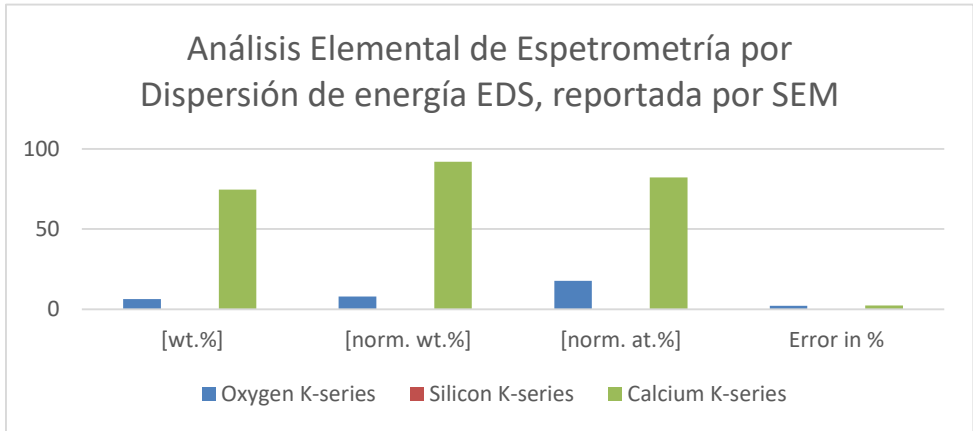


Figura 118.- Análisis Elemental por EDS de muestra de Mortero N°4, MN 1:3, a 1000X, en SEM.

7.4. Efecto de la fibra de Nopal y de la fécula de Almidón en el comportamiento físico-mecánico de morteros base CP.

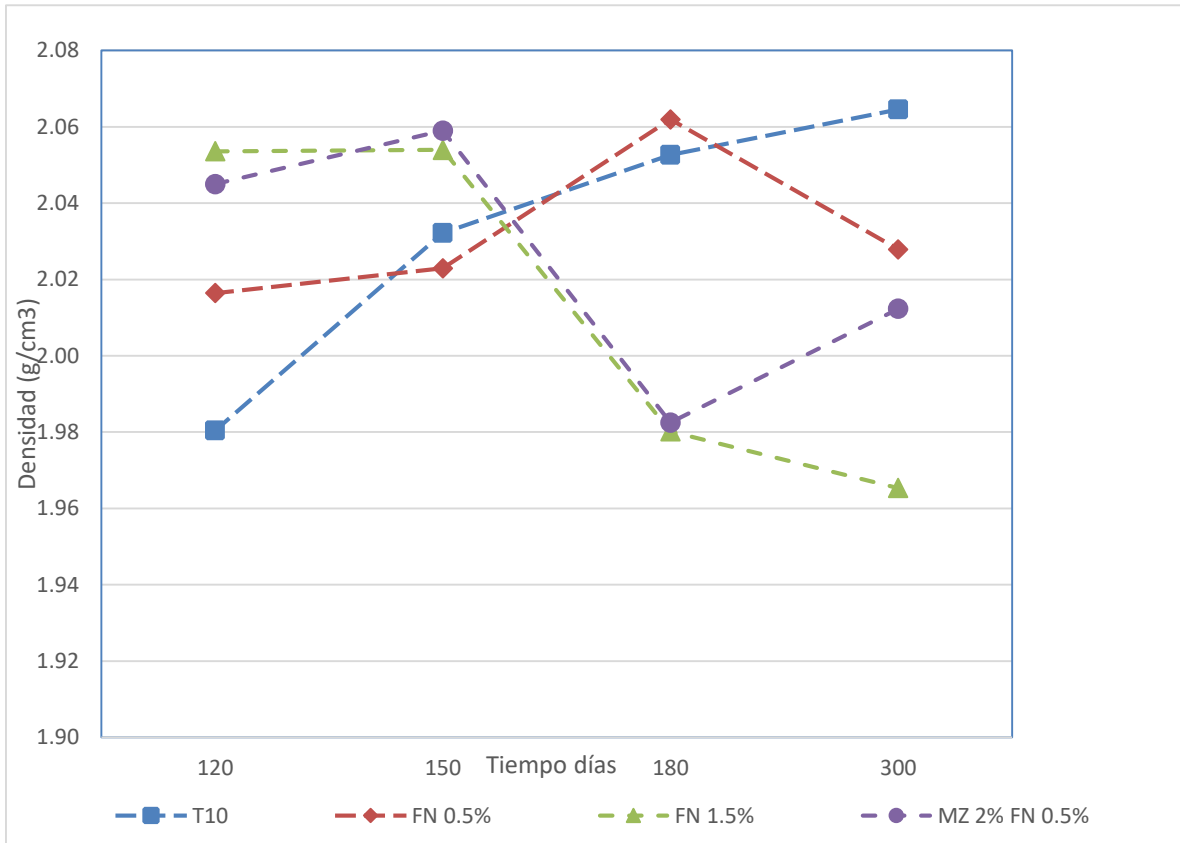


Figura 119.- Densidad, en función de la edad. (Blancas V.H., 2017).

Como se observa en la Figura 119, las mezclas en estudio logran una densidad a los 300 días menor a la mezcla control, siendo este un valor aproximado a los 2000 kg/m^3 . Teniendo en cuenta que los morteros tradicionales alcanzan una densidad de hasta 2100 kg/m^3 , se puede concluir que la matriz de los morteros con sustituciones orgánicas se encuentra en buenas condiciones y son considerados de una calidad aceptable.

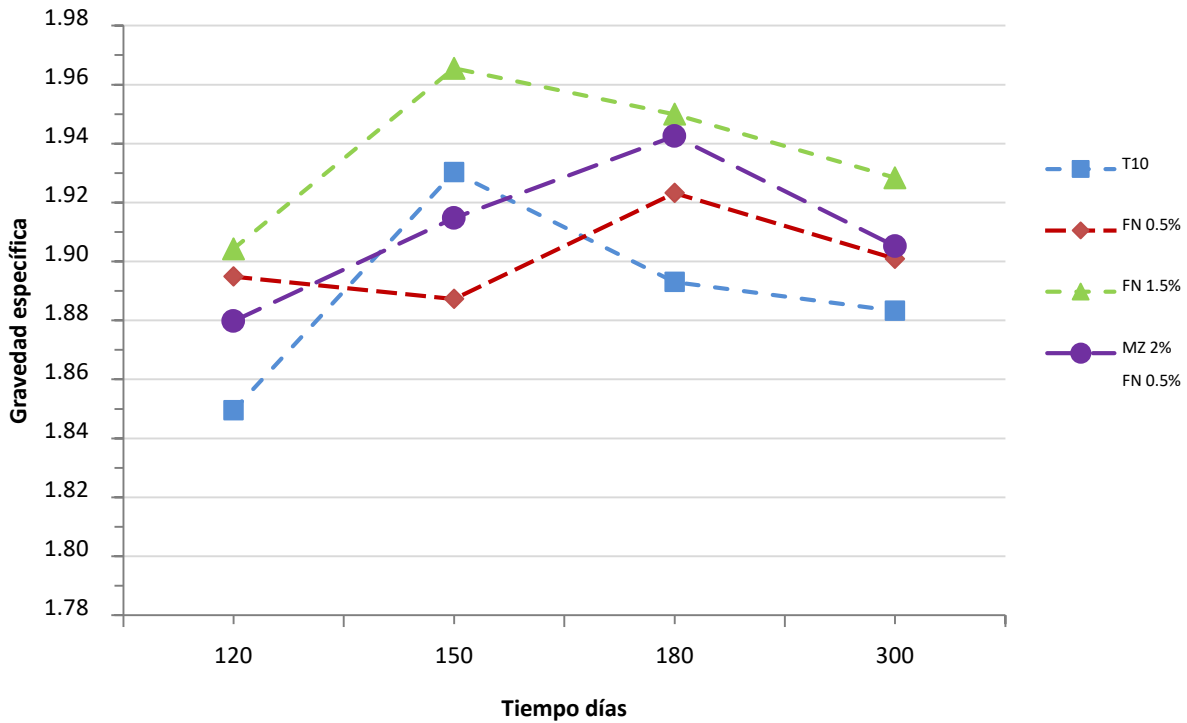


Figura 120.- Gravedad específica, en función de la edad. (Blancas V.H., 2017).

De manera general, observando la Figura 1120, la densidad de los cubos a edades tardías de las tres diferentes mezclas, están por debajo de la densidad que presenta la mezcla control al cabo de los 300 días, ya que al estar totalmente saturado cada espécimen considerado como masa constante, su volumen va incrementándose gradualmente.

Observando las Figuras 119 y 120, se logró identificar que las tres mezclas con adiciones orgánicas en comparación con la mezcla control, tienen valores promedio más altos a lo largo de todas las edades en estudio. Tomando en consideración que tanto para edades tempranas como para edades tardías, la mezcla con sustitución del 1.5% de fibra de nopal (FN) presentó mejores resultados en la prueba (López Regalado, 2016). Esto indica que las sustituciones densifican la matriz cementicia del mortero.

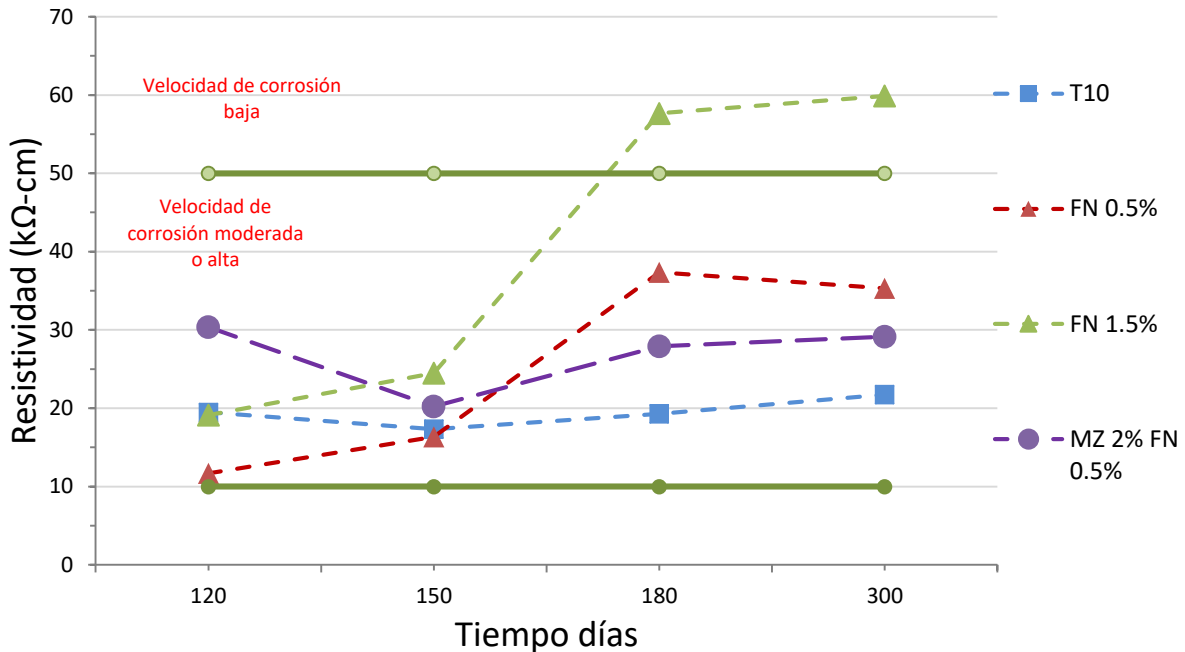


Figura 121.- Resistividad eléctrica en cubos, en función de la edad. (Blancas V.H., 2017).

En cuanto a resistividad eléctrica, se realizó la prueba a especímenes cúbicos, prismáticos y cilíndricos, los resultados fueron muy peculiares respecto al comportamiento de las mezclas en estudio conforme transcurrió el tiempo, tales que, a la edad de 300 días, la resistividad estuvo muy por encima de los valores del control.

La práctica ha demostrado que los valores de resistividad eléctrica RE (ρ) en los especímenes ensayados se pueden emplear como parámetros de durabilidad, así teniendo en cuenta un criterio general, según la normativa (NMX-C-514-ONNCCE, 2016) para la evaluación del mortero, este puede ser con muy bajas o muy altas velocidades de corrosión según sea el caso. Los valores de resistividad se presentan en las Figuras 121 a 123, cuyos resultados fueron morteros con velocidades de corrosión moderada o alta.

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.

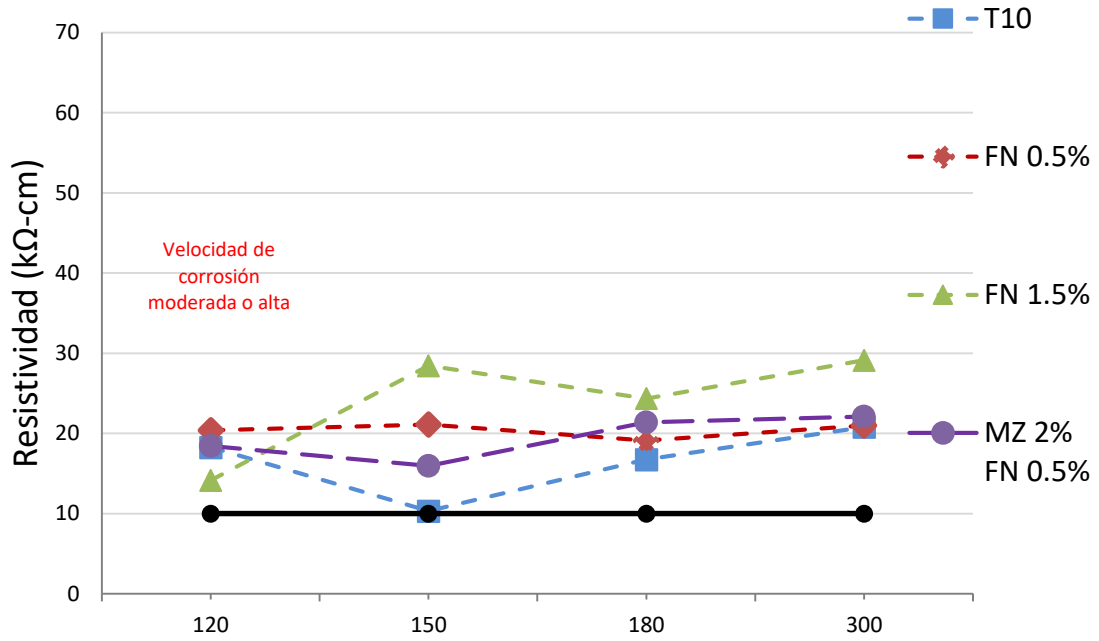


Figura 122.- Resistividad eléctrica en cilindros, en función de su edad. (Blancas V.H., 2017).

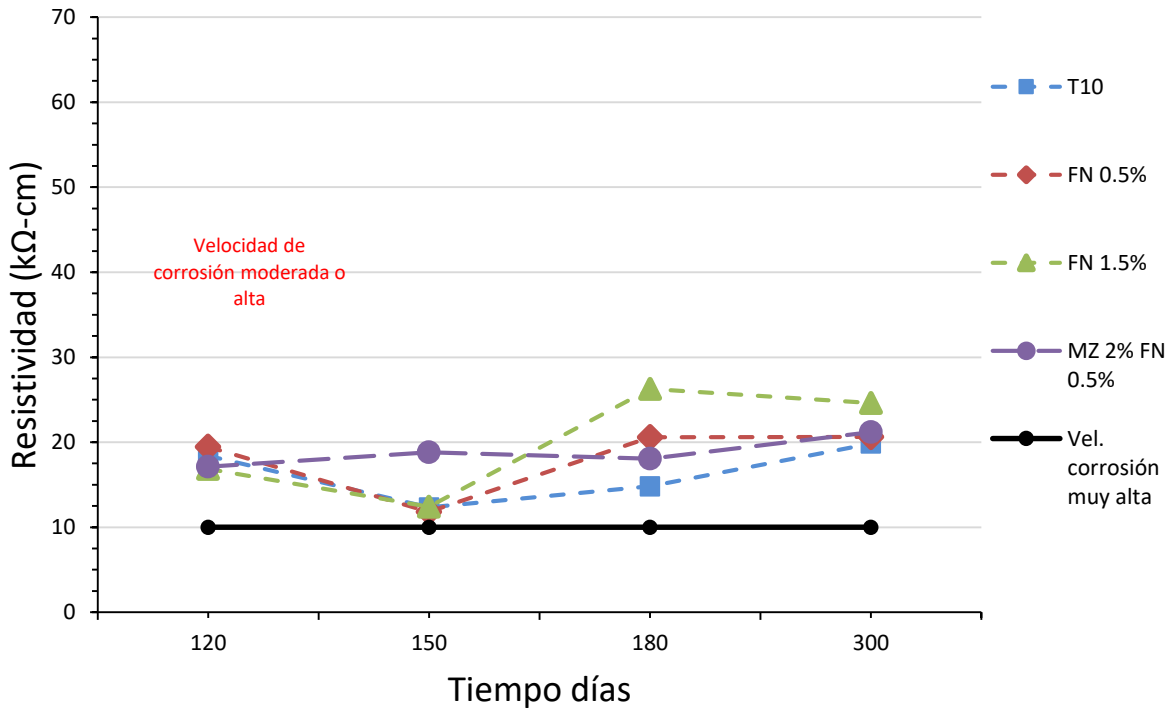


Figura 123.- Resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba. (Blancas V.H., 2017).

En este ensayo de resistividad eléctrica, el Control T10 presenta valores por debajo de las distintas mezclas, permaneciendo este comportamiento durante las diferentes edades de prueba hasta llegar a la edad final de 300 días.

Observando las Figuras 121, 122 y 123; la fibra de nopal como sustitución en 1.5% (FN 1.5%) de la masa del cemento presenta un aumento de su resistividad a partir de 150 días en adelante, sobresaliendo de las demás mezclas y obteniendo valores de hasta 59.9 kΩ-cm en especímenes cúbicos. El comportamiento de las otras dos mezclas restantes (FN 0.5% y MZ 2% FN 0.5%) es muy similar a la de la muestra control.

7.4.1.- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

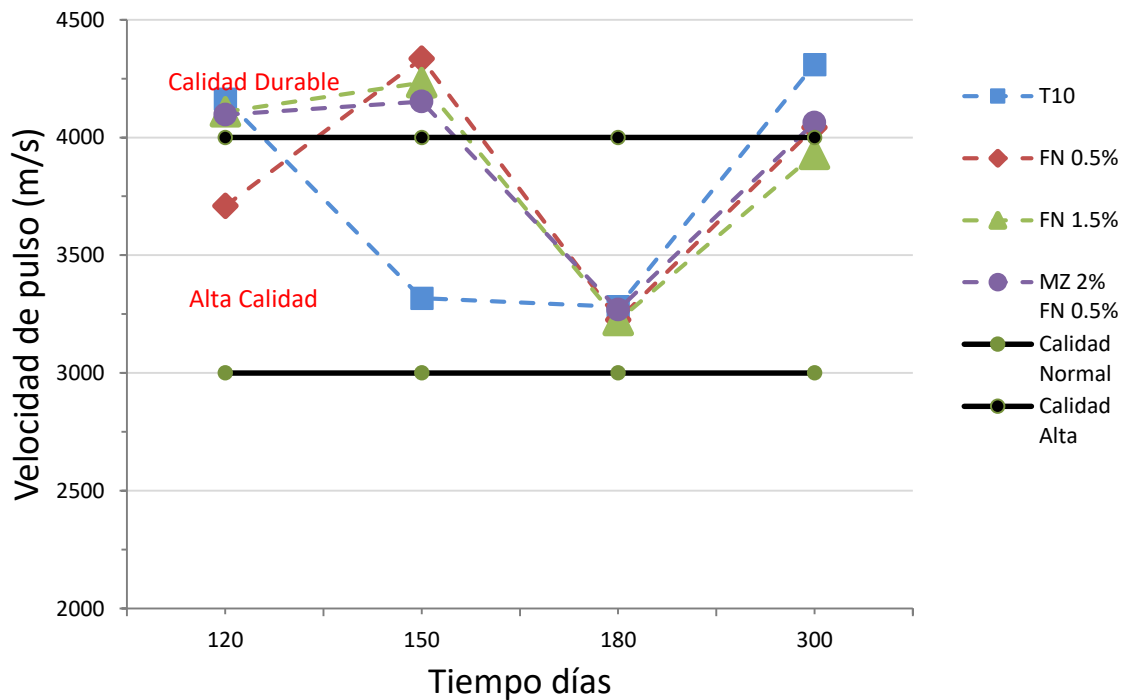


Figura 124.- Velocidad de pulso ultrasónico en cubos, por edad. (Blancas V.H., 2017).

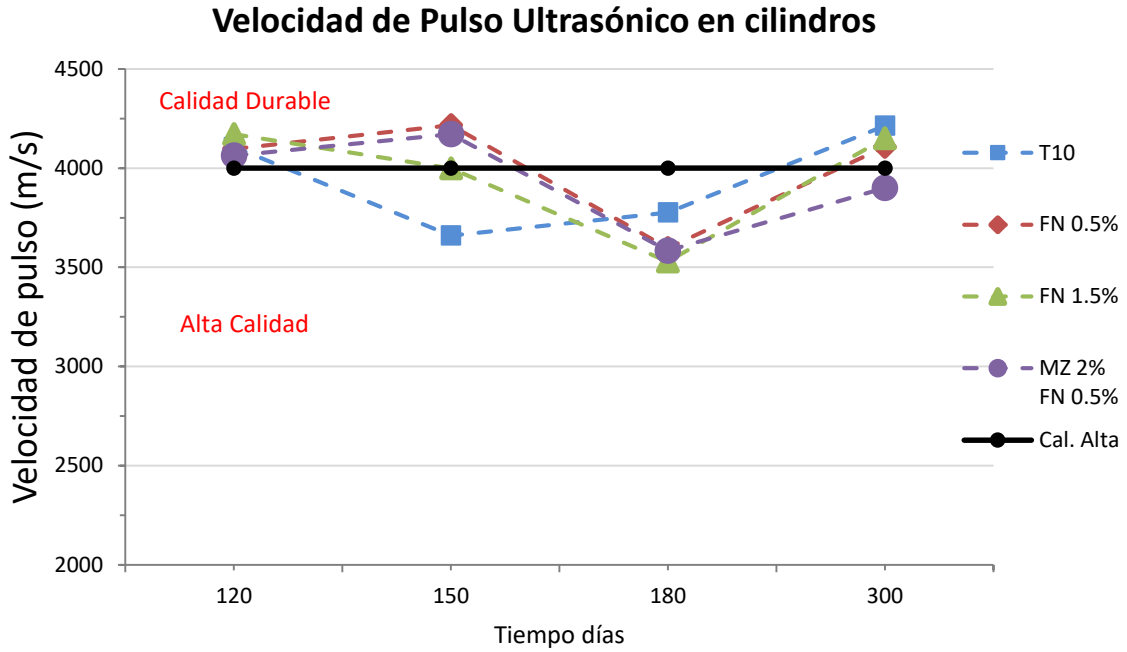


Figura 125.- Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros, por edad. (Blancas V.H., 2017).

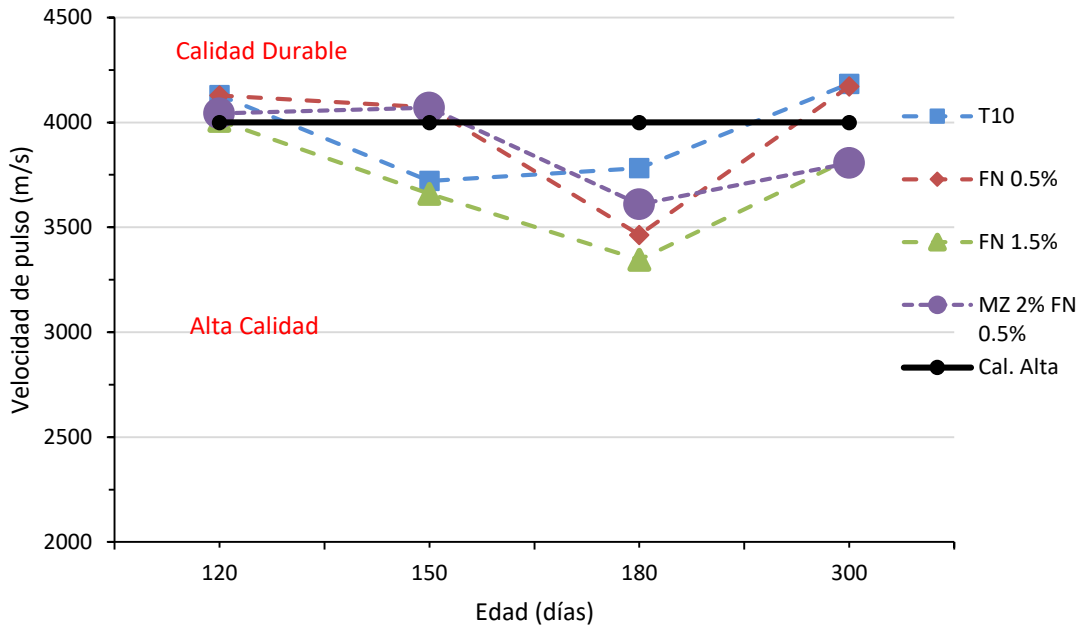


Figura 126.- Velocidad de pulso ultrasónico en prismas, por edad. (Blancas V.H., 2017).

En las Figuras 124 a 126, se presentan los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico para especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos a cuatro edades tardías de prueba (120, 150, 180 y 300 días). Los resultados de las 3 distintas mezclas en estudio muestran una tendencia similar al de la muestra control (T10) pero con valores menores a este, alcanzando valores a la edad de 300 días de hasta 4172.25 m/s en prismas con sustitución parcial de 0.5% de fibra de nopal, los cuales se clasifican por la RED DURAR (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000) como morteros de calidad durable.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en los distintos especímenes de prueba, presentó resultados con una calidad del mortero alta y durable a los 300 días de prueba, siendo la mezcla de 0.5% en sustitución con fibra de nopal (FN 0.5%) la de mejor comportamiento en los tres diferentes especímenes, específicamente en prismas. Los valores de los resultados de las mezclas MZ 2% FN 0.5% y FN 1.5% están por debajo de la mezcla control y la FN 0.5%, obteniendo parámetros de alta calidad y calidad durable en los diferentes especímenes ensayados.

7.4.2.- Resistencia a la compresión simple.

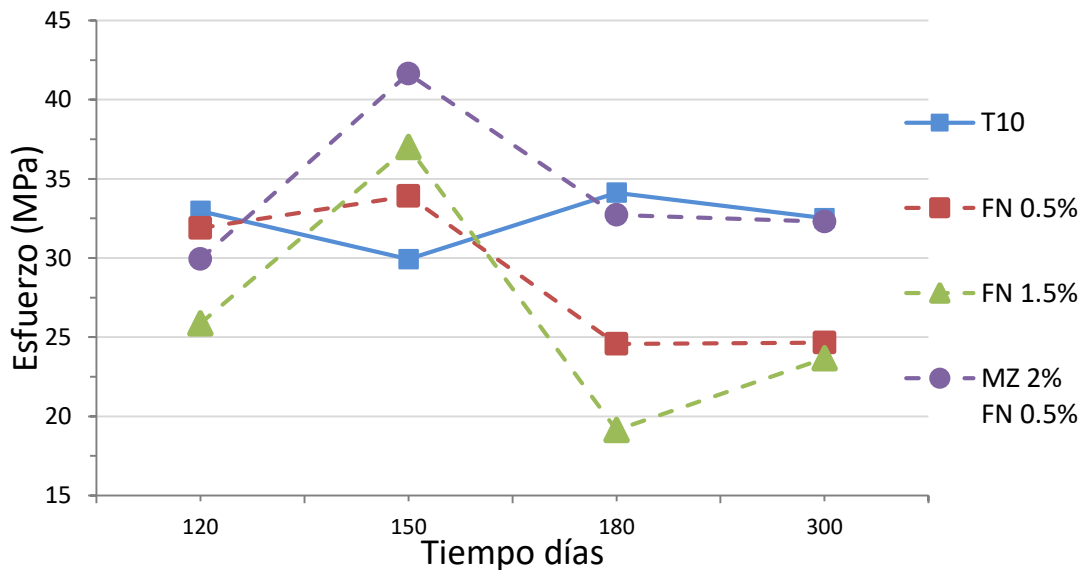


Figura 127.- Tendencia de compresión simple en cubos, por su edad de prueba. (Blancas V.H., 2017).

La resistencia a la compresión simple es una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de las distintas muestras en estudio respecto a su capacidad de resistencia mecánica; además de que, para morteros es la única prueba que se encuentra normada respecto a cubos de 5 cm de lado. Observando la Figura 127, la resistencia a la compresión simple de las diferentes mezclas de mortero respecto al mortero control, alcanza valores de hasta 32.30 MPa (mezcla de MZ 2% FN 0.5%) a los 300 días de edad, quedando por debajo de la mezcla control (T10). La combinación de la fibra de nopal con fécula de maíz (MZ 2% FN 0.5%) en sustitución de la masa del cemento en la mezcla de mortero arrojó resultados satisfactorios, teniendo un comportamiento similar al mortero control (T10), y como se observa en la Figura 127 a la edad de 150 días el valor incrementó considerablemente hasta 41.63 MPa, superando al Control T10 y a las demás mezclas con sustitución de fibra de nopal; pero sin embargo su comportamiento se mantuvo en las siguientes dos edades de prueba por debajo del control pero muy similar a este; teniendo como significado usual que la matriz cementicia de los morteros ha logrado su densificación manteniendo su resistencia conforme transcurre el tiempo.

El mejor resultado de la compresión simple en los cubos de mortero con fibra de nopal se presentó a la edad de 150 días con un valor de 37.02 MPa para la mezcla de FN 1.5%, presentando a lo largo de las demás edades esfuerzos a compresión simple por debajo de la FN 0.5%.

Las especificaciones de la normativa mexicana (NMX-C-021-ONNCCE, 2015) para morteros de albañilería sin adiciones 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. Ahora bien, si la comparación la realizamos con los morteros de la investigación teniendo en cuenta que las edades de prueba son tardías, las cuatro mezclas en estudio incluyendo el mortero control, se encuentran muy por encima de las especificaciones que establece la normativa, según lo observado en la Figura 127.

El valor de la resistencia mecánica por sí solo no es indicativo de la durabilidad del concreto, pero en general se acepta que concretos de elevada resistencia (>45 MPa) son durables y que concretos por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad (Publicación Técnica #128, IMT). Comparando lo anterior con los resultados de la Figura 127 se determina que los morteros en estudio se encuentran con una durabilidad y resistencia moderada y por encima de los 20 MPa especificados.

7.4.3.- Resistencia a la tensión por flexión en prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

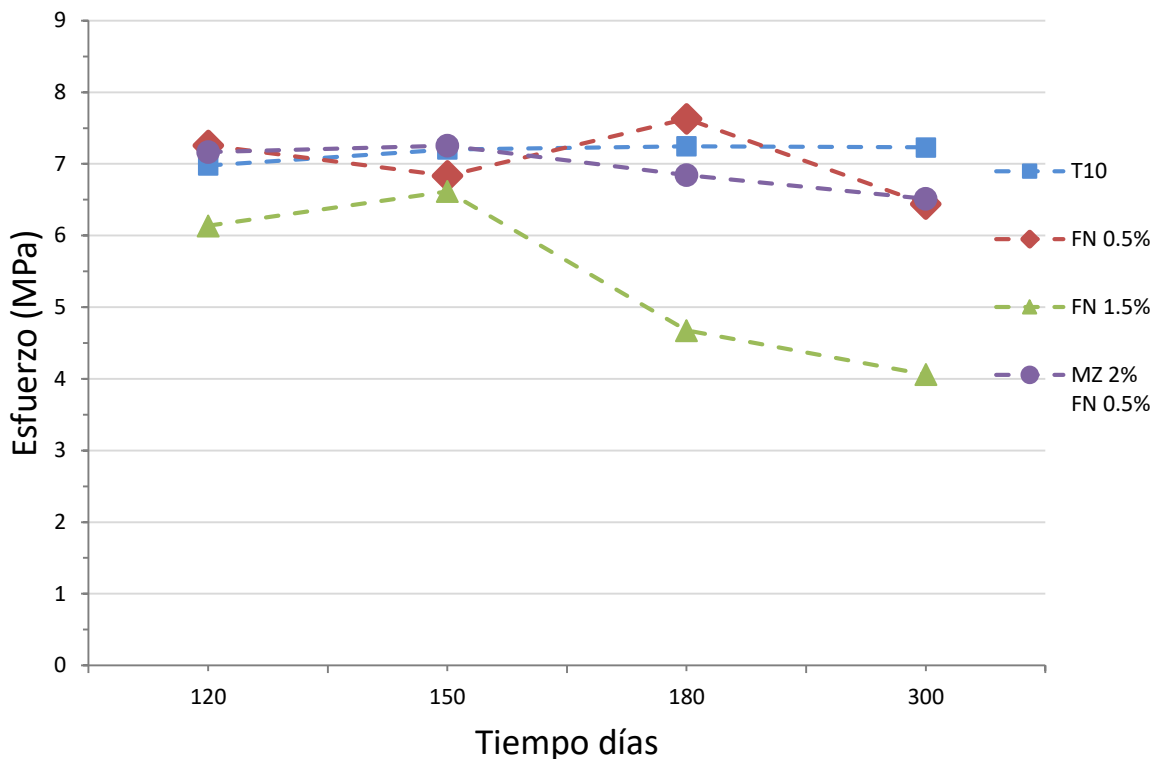


Figura 128.- Resistencia a la flexión en prismas, en función de la edad. (Blancas V.H., 2017).

Para concreto, el valor del esfuerzo a la flexión o valor del módulo de ruptura en especímenes de forma prismática es de 0.7 a 0.8 por la raíz del esfuerzo a compresión (Kosmatka et al, 2004). En el caso del ensayo que se realizó para esta investigación de acuerdo a lo observado en la Figura 128, todas las mezclas de

morteros con y sin sustitución de material orgánico trabajan a flexión ya que ninguna está por debajo de los límites que indica la referencia establecida, e incluso lo superan en todos los casos siendo la de menor resistencia a la flexión la mezcla FN 1.5%.

En la Figura 128 también se puede observar que el mortero control (T10) tiene un comportamiento estable en las cuatro edades de prueba logrando una resistencia a flexión mayor que los morteros con porcentaje de sustitución de fibra de nopal y almidón. Comparando los datos de las tres mezclas analizadas en esta investigación se observa que la fibra de nopal con 0.5% de sustitución logra superar a la edad de 120 y 180 días el valor de la flexión del Control T10 y a lo largo de las edades de prueba su comportamiento es mejor que las otras dos mezclas (FN 1.5% y MZ 2% FN 0.5%) teniendo en cuenta que el mortero de FN 1.5% presenta los resultados de flexión más desfavorable.

7.4.4.- Resistencia a la tensión directa en briquetas.

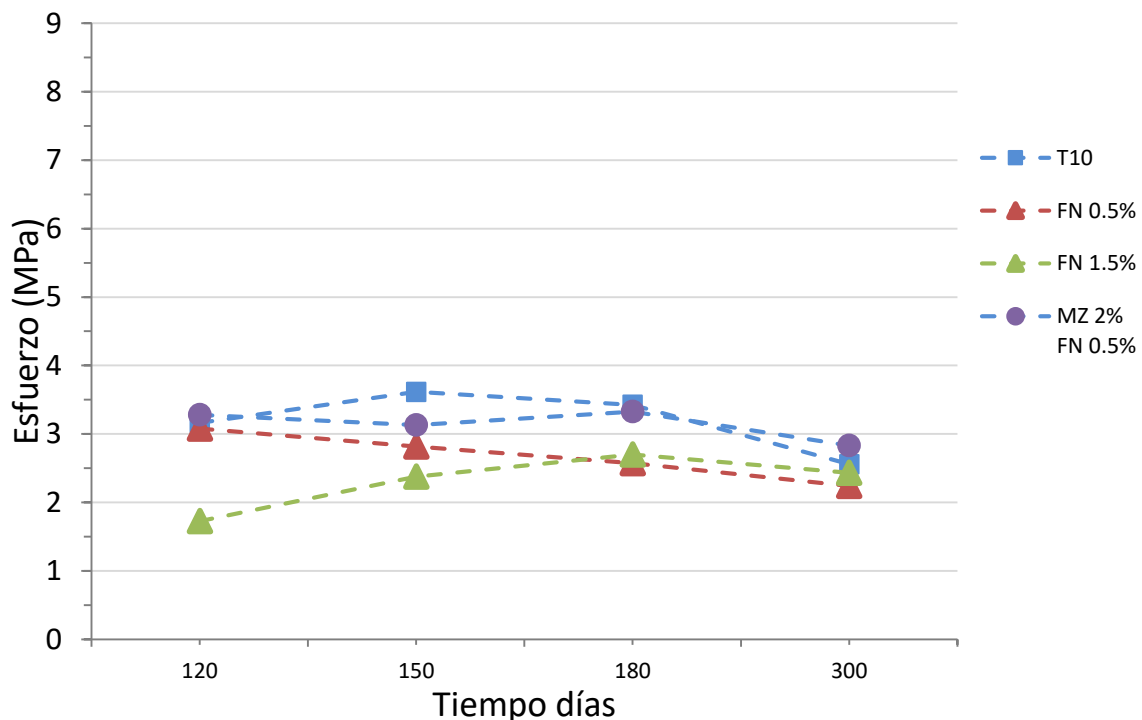


Figura129.- Resistencia a tensión directa en briquetas, por edad. (Blancas V.H., 2017).

Bien es sabido que el mortero resiste bajas cargas a tensión, por lo cual los valores obtenidos por este tipo de ensayos adquieren importancia en el agrietamiento de las mezclas luego del proceso de secado, ya que, en los diseños estructurales, siempre se asume que el concreto o mortero estará trabajando a compresión o incluso flexión si fuera el caso.

Es por ello que en la presente investigación se realizaron pruebas de este tipo teniendo valores de tensión directa de hasta 3.63 MPa en la mezcla control (T10) y de hasta 3.33 MPa para la mezcla de almidón con fibra de nopal (MZ 2% FN 0.5%), siendo esta última la más favorable de las tres mezclas con sustitución.

De acuerdo a lo observado en la Figura 129, las mezclas con sustitución de MZ 2%-FN 0.5% tiene un comportamiento similar al mortero T10, alcanzando valores mayores a los 180 días de hasta 3.33 MPa debajo del valor alcanzado por el Control T10.

Comparando resultados de la edad de 300 días en las distintas mezclas se observa que la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% se encuentra por encima de la mezcla control, seguido de la mezcla FN 1.5% y FN 0.5% con valores de 2.43 y 2.24 MPa respectivamente.

Una de las referencias (Neville & Brooks, 1999), dice que el esfuerzo a tensión se encuentra entre 0.4 a 0.7 por la raíz del esfuerzo a compresión, siendo un parámetro no normalizado. Los resultados obtenidos en las cuatro edades de prueba y para las cuatro diferentes mezclas son favorables, siendo en muchos casos con resistencias superiores al rango mencionado.

7.4.5.- Resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de mortero (tensión indirecta en cilindros de 5 cm Ø x 10 cm h).

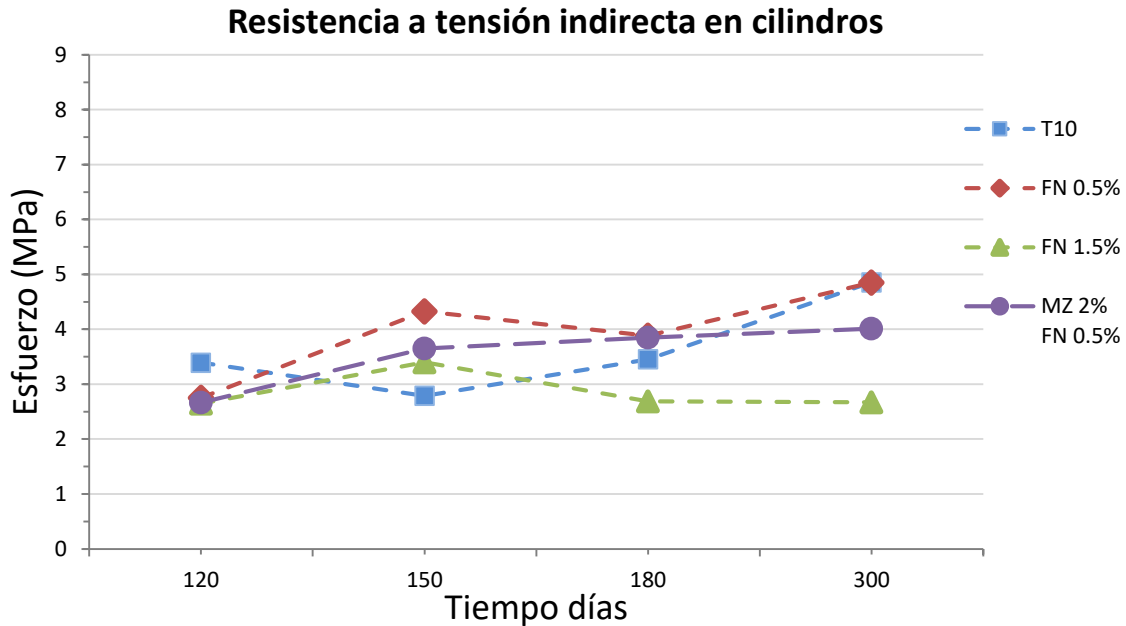


Figura130.- Resistencia tensión indirecta, cilindros, por edad. (Blancas V.H., 2017).

Es la tensión indirecta un parámetro que sirve cuando no se tienen los elementos necesarios para calcular una tensión directa. La Figura 130 muestra que la mezcla MZ 2%-FN 0.5% incrementa su resistencia a tensión indirecta hasta 4 MPa, quedando por debajo de la mezcla control. La mezcla con 0.5% de sustitución se comportó de distinta manera que en la prueba de tensión directa sobrepasando a todas las mezclas a la edad de 300 días teniendo un resultado de 4.85 MPa e igualando al Control T10.

7.4.7.- Resistencia a la tensión por adherencia.

La prueba de adherencia arrojó resultados cualitativos de acuerdo al tipo de falla obtenida con el equipo de Pull Off, siendo en la mayoría de las veces una falla por tensión en las mezclas de mortero, es decir que las mezclas tuvieron una buena

adherencia como material de reparación o revestimiento con el sustrato de concreto. En la Tabla 27 siguiente se muestra el tipo y número de falla que se presenta al momento de realizar la prueba, y en la Figura 131 el esfuerzo de tensión por adherencia calculado por el equipo de prueba.

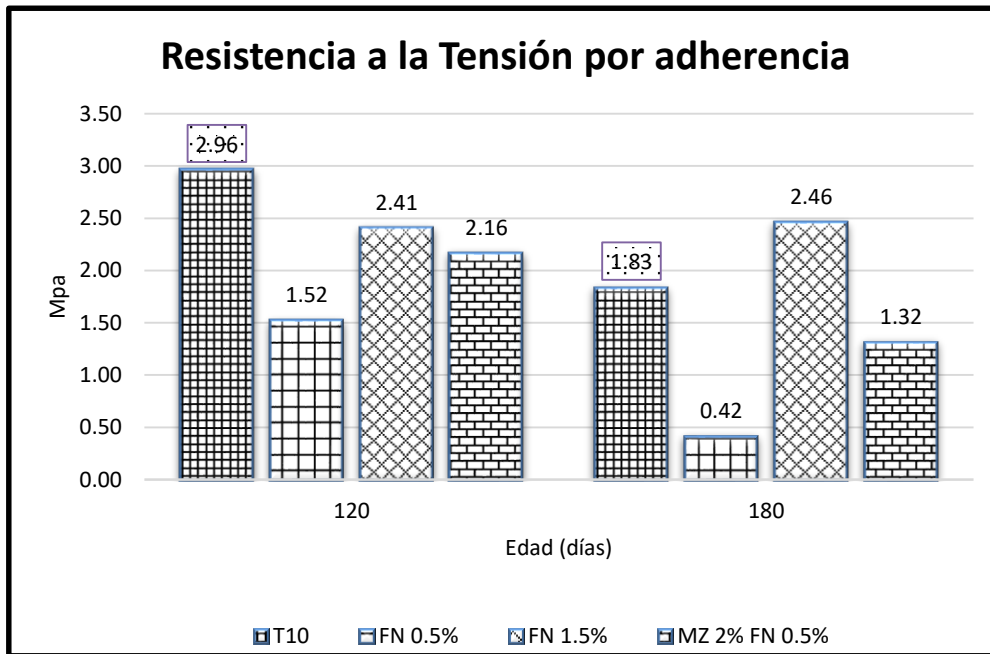


Figura 131. Resultados de resistencia a la tensión por adherencia a las edades de 120 y 180 días. (Blancas V.H., 2017).

7.4.8.- Ataque por sulfatos.

El ensayo de ataque por sulfatos consistió en tres pruebas principalmente, teniendo dos pruebas de durabilidad (Resistividad Eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico) y una más de pérdida de masa en donde el principal objetivo es conocer si los morteros se acercan a su máximo estado de servicio, es decir si al final de los 5 ciclos los morteros en contacto con los sulfatos necesitan un tratamiento para repararlo o llegan a su total deterioro. Se dice que el espécimen alcanzó su estado máximo de servicio al tener una pérdida de masa del 5%. Los resultados se obtuvieron a la edad de 90 y 180 días. Figuras 132 y 133.

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.

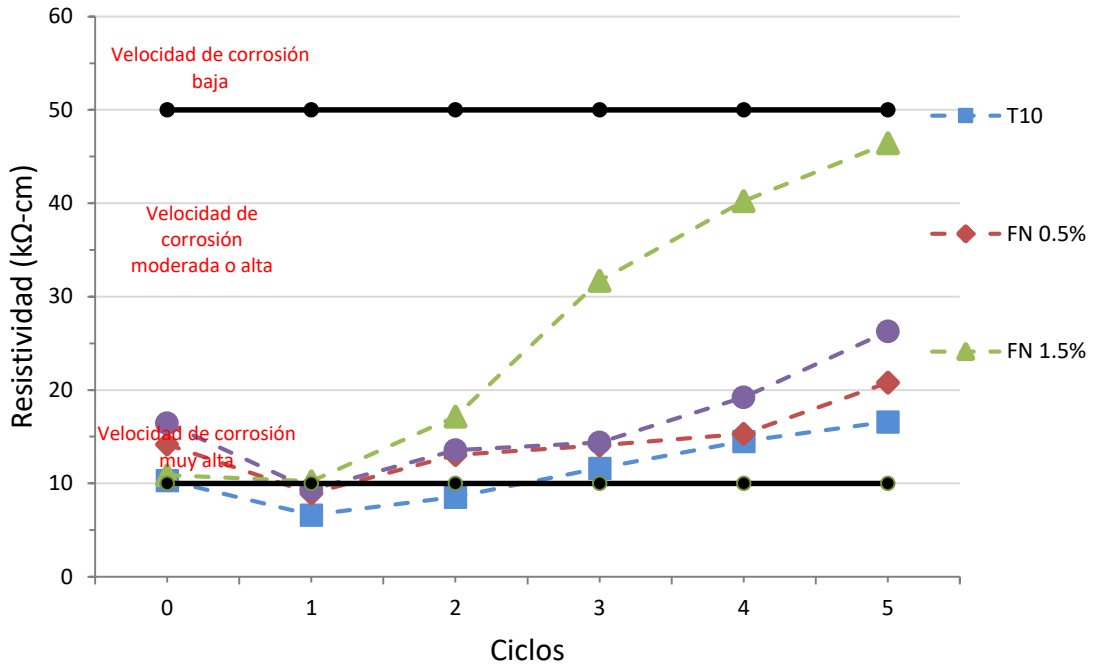


Figura132.- Resistividad eléctrica, cubos sometidos a sulfatos, 90 días. (Blancas V.H., 2017).

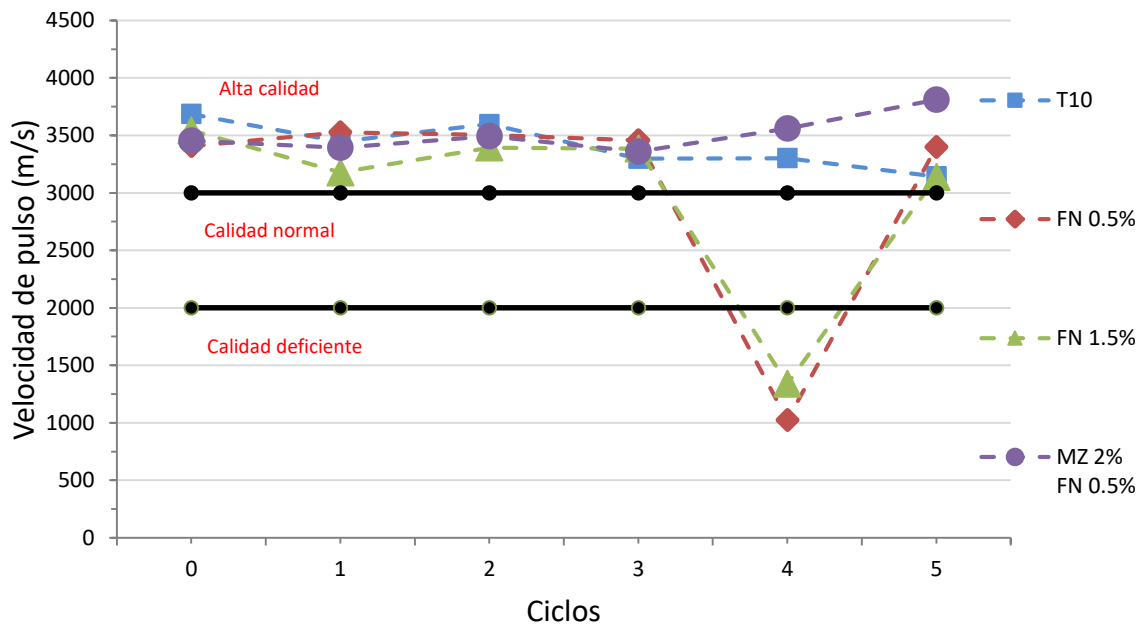


Figura133.- Velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a 90 días. (Blancas V.H., 2017).

Observando las Figura 132, los valores de resistividad eléctrica van aumentando en las distintas mezclas hasta llegar al último ciclo de prueba, es decir que los poros internos de la matriz de mortero se llenan de sulfato lo que hace que la resistividad eléctrica aumente. Las cuatro mezclas en estudio presentaron al final de la prueba un riesgo de velocidad de corrosión alto o moderado siendo la mezcla MZ 2%-FN 0.5% la que alcanzo valores de resistividad de hasta 46.44 k Ω -cm y sobrepasando todas las mezclas al Control T10 siendo este el de mayor peligro de corrosión.

Los morteros atacados por sulfatos no tuvieron problema cuando se realizó la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, Fig. 133, ya que los resultados son muy estables y durante todos los ciclos de prueba se encontraron en la zona de alta calidad según la clasificación de la Red DURAR (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000), rebasando los 3000 m/s de velocidad de propagación de la onda ultrasónica. Como se puede observar en el ciclo 4 de la prueba las mezclas FN 0.5% y FN 1.5% presentaron valores pequeños y muy diferentes en comparación con las otras mezclas esto debido a una falla directa en el equipo.

Ahora bien, si se observa la Figura 134 se puede ver que la pérdida de masa solo se presenta en las mezclas de FN 0.5% y FN 1.5%, siendo esta última la de mayor pérdida de masa, alcanzando un valor del 2.97% solo por encima de la mezcla FN 0.5% pero sin alcanzar su máximo estado de servicio permisible (5%). Durante la prueba las dos mezclas restantes T10 y MZ 2%-FN 0.5% ganaron masa en un porcentaje menor al 0.5% al llegar al quinto ciclo.

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.

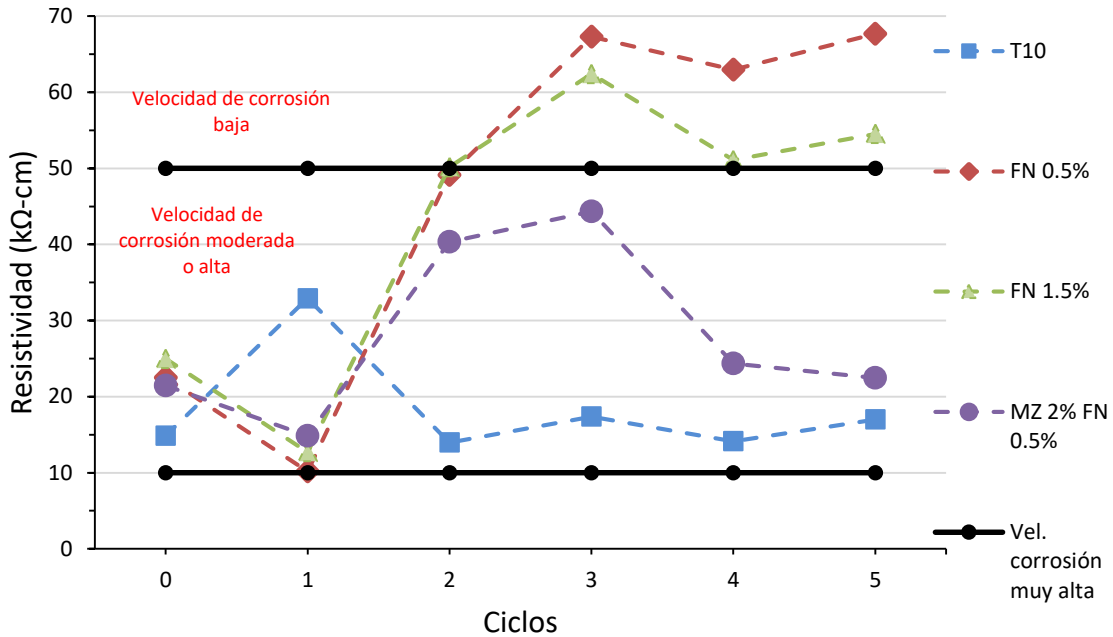


Figura134.- Resistividad eléctrica cubos sometidos a sulfatos, 180 días. (Blancas V.H., 2017).

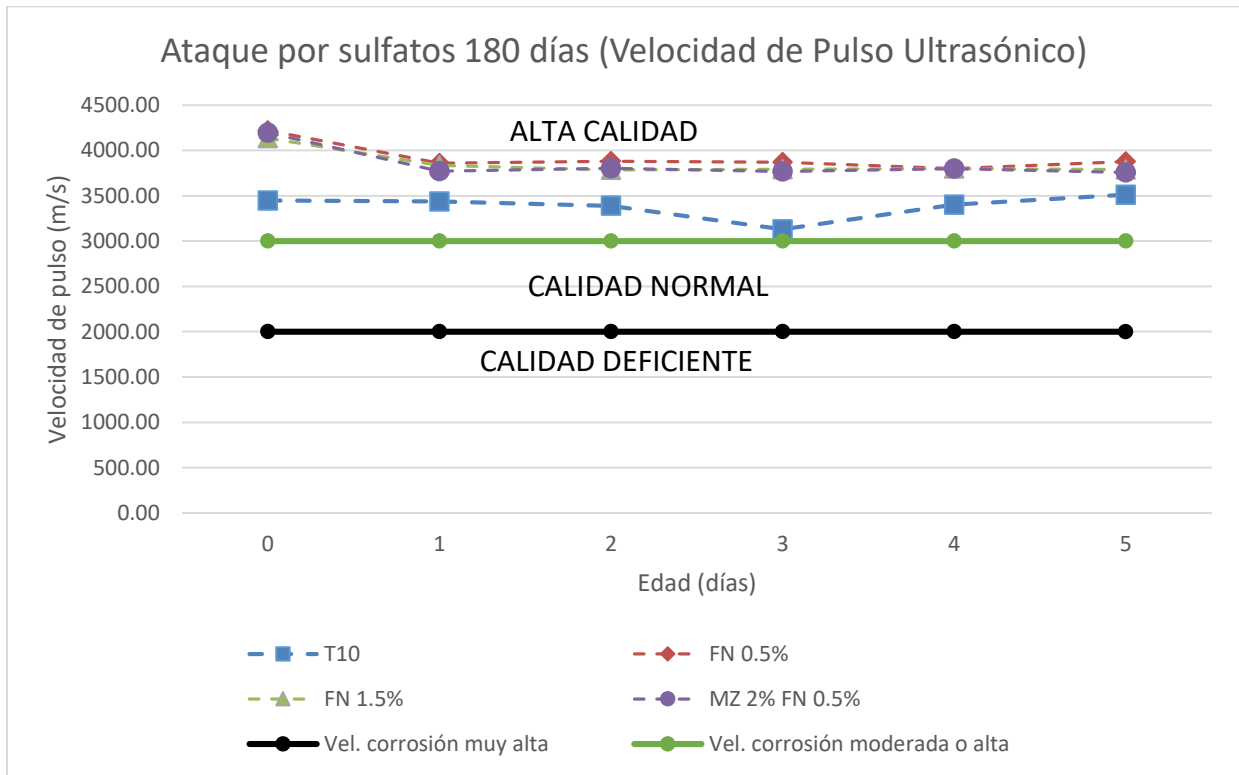


Figura135.- Velocidad pulso ultrasónico, cubos a sulfatos a 180 días. (Blancas V.H., 2017).

Las tres mezclas con sustituciones orgánicas FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN0.5% arrojaron valores mayores de velocidad de pulso ultrasónico en comparación con la mezcla Control T10 y adquirieron un criterio de calidad alta durante los 5 ciclos de ataque por sulfatos a los 180 días, Figura 135. El mortero de FN 0.5% tuvo un mejor comportamiento al ataque por sulfatos y esto se pudo observar a lo largo de la prueba, ya que los cubos en la parte superficial no presentaban de manera visual ninguna fisura en su estructura. Al quinto ciclo de prueba la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% fue la que presentó desprendimiento de la capa superficial de los cubos, pero sin que el sulfato afectara en su forma original.

7.4.9.- Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros.

Como ya se ha mencionado la edad de prueba es un factor fundamental en los resultados para conocer el tipo de permeabilidad a la que estará expuesta la estructura de concreto o mortero. Expuesto lo anterior se propuso realizar la prueba a la edad de 180 días obteniendo los siguientes resultados (Tabla 28),

Tabla 25.- Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 180 días. (Blancas V.H., 2017).

Permeabilidad rápida de cloruros (180 días)			
Mezcla	No. de espécimen (parte central)	Coulombs	Tipo de permeabilidad
T10	1	2450	Moderada
	2	2175	Moderada
	3	2095	Moderada
FN 0.5%	1	1830	Baja
	2	2340	Moderada
	3	1630	Baja
FN 1.5%	1	1790	Baja
	2	1445	Baja
	3	1490	Baja
MZ 2%-FN 0.5%	1	1580	Baja
	2	1520	Baja
	3	1520	Baja

Como se puede observar en la tabla 28 la prueba de permeabilidad a 180 días arrojó resultados similares en las distintas mezclas, teniendo en la mezcla control T10 un riesgo de penetración de cloruros moderada y presentado valores de carga eléctrica transferida superiores a las mezclas FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% las cuales presentaron un tipo de permeabilidad baja en promedio.

7.4.10.- Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.

Los resultados de la resistencia de las distintas mezclas de mortero expuestas a 14 ciclos de congelación y deshielo acelerados fueron obtenidos después de cumplir cada espécimen una edad de 180 días, los resultados se presentan:

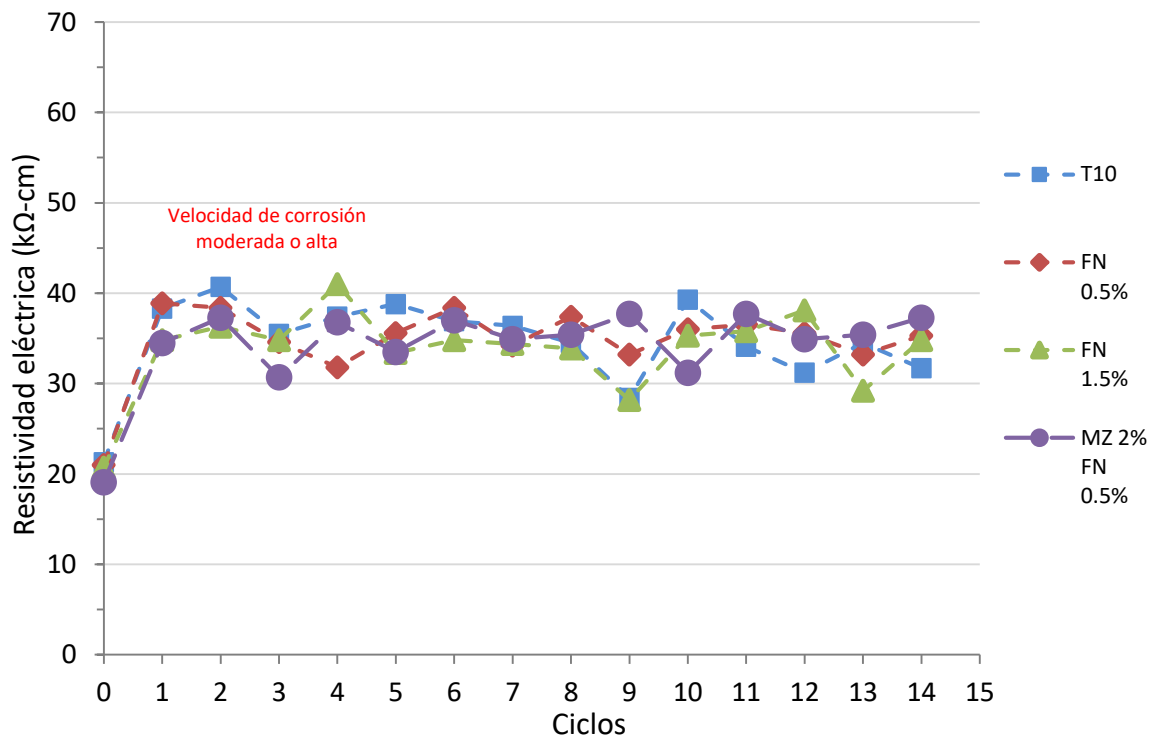


Figura136.- Resistividad Eléctrica (RE) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados. (Blancas V.H., 2017).

De los resultados de resistividad eléctrica se observa en la Figura 136 que al inicio de la prueba de congelamiento y deshielo en el ciclo 0 presenta un valor por debajo de los demás ciclos y conforme transcurren los ciclos los valores de la RE de cada mezcla tienden a decrecer. De acuerdo con las especificaciones de la normativa vigente de RE, las cuatro mezclas de mortero se consideran con un riesgo de “velocidad de corrosión moderada o alta”.

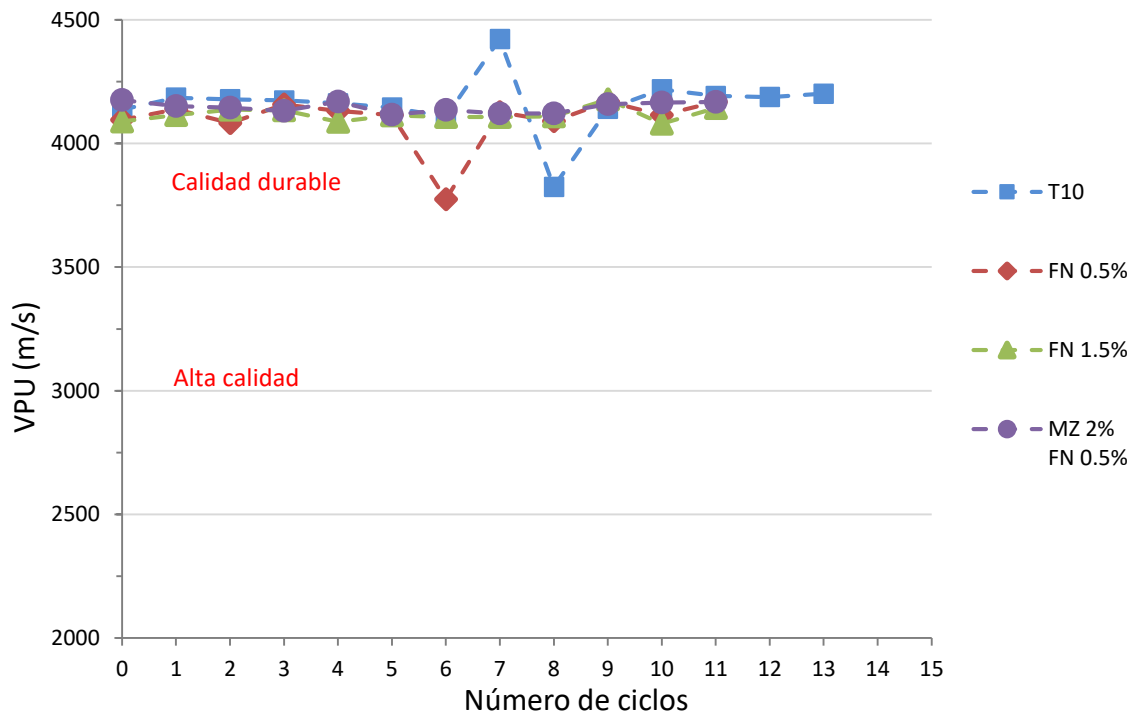


Figura137.- Velocidad de Pulso Ultrasonico (VPU) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados. (Blancas V.H., 2017).

Con respecto a los resultados de VPU (Figura 137), las variaciones que se observan del ciclo 6 al 9 se debieron a la sensibilidad del equipo y no una característica propia del material. Es importante mencionar que en esta prueba no existe una variación considerable en el ciclo cero con los demás. De acuerdo con la red temática DURAR, las cuatro mezclas se consideran como “Calidad durable”.

De acuerdo a lo establecido en el apartado de experimentación de la presente investigación debe realizarse el cálculo de módulo de elasticidad dinámico y un factor de durabilidad, los cuales no se calcularon debido a que después de consultar literatura de ensayos de esta índole se llegó a la conclusión de que estos parámetros dan resultados estables en 100 o más ciclos de congelamiento y deshielo. Pero sin embargo se calculó un número de ciclos necesarios (Tabla 29), extrapolando la tendencia del comportamiento de cada mezcla de mortero, para que la RE llegue a una lectura de 0 k Ω -cm y considerando así la falla total del material.

Tabla 26.- Resultados de extrapolación para determinar el número de ciclos cuando RE=0.

Mezclas	N° de ciclos para RE = 0 KΩ-cm
T10	75
FN 0.5%	231
FN 1.5%	172
MZ 2% FN 0.5%	309

Considerando los resultados de la tabla 29 anterior, se concluye que la mejor mezcla es la de MZ 2%-FN 0.5% ya que requiere un mayor número de ciclos en comparación con las otras dos mezclas para que llegue a su falla total.

7.4.11.- Estimación de la profundidad de carbonatación.

Para conocer la constante característica de carbonatación que nos permitió realizar una predicción de la velocidad de carbonatación se optó por realizar un promedio del valor de la constante por edad (90, 135 y 180), esto debido a que la predicción de la profundidad de carbonatación se da a partir del producto de la raíz cuadrada del tiempo medido en años y la constante de la primera edad de prueba, la cual debe coincidir con las demás edades posteriores por su comportamiento lineal ascendente que se presenta al momento de calcular su predicción de carbonatación en el material. Los resultados se muestran en la Figura 138.

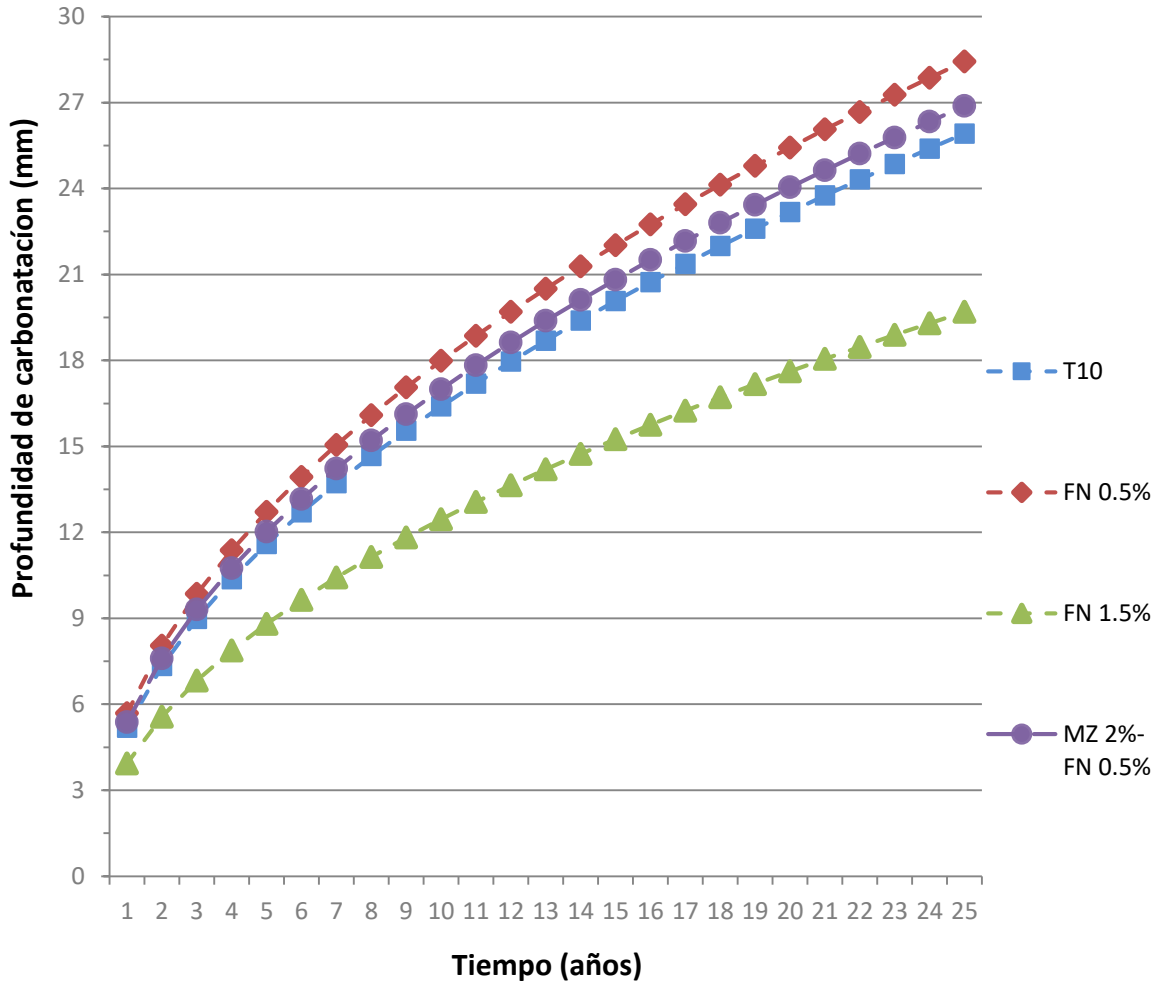


Figura138.- Perfil de carbonatación en una proyección a 25 años. (Blancas V.H., 2017).

Las mezclas con sustitución de fibra de nopal (FN 0.5% y FN 1.5%) presentaron profundidades de carbonatación en un rango de 2.5 a 4.3 mm para FN 0.5% y de 1.8 a 3.0 mm para FN 1.5%, mientras que la mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5% presentó profundidades de carbonatación de 2.1 a 4.3 mm y la mezcla control T10 de alrededor de 2.5 a 3.5 mm.

Ahora bien, resultando estos valores de profundidad de carbonatación y calculando las constantes de carbonatación tenemos que la mezcla Control T10

estaría alcanzando una profundidad de 25.92 mm a los 25 años de exposición, la mezcla FN 0.5% una profundidad de 28.43 mm, la mezcla FN 1.5% una profundidad de 19.69 mm y la mezcla MZ 2%-FN 0.5% una profundidad de carbonatación de 26.88 mm.

De acuerdo a la Red DURAR los valores de la constante de carbonatación " X_{CARB} " de 2 a 3 mm/año^{0.5} pueden considerarse como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores de " X_{CARB} " superiores a los 6 mm/año^{0.5} indican concretos/morteros de muy baja resistencia.

Por lo tanto, todas las mezclas se clasifican como morteros de resistencia media a la carbonatación.

7.4.12.- Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.

Fueron dos las edades de prueba para iniciar con la determinación de la absorción capilar en los especímenes cúbicos para cada mezcla de mortero en estudio.

La primera edad fue a los 90 días después de la elaboración de las mezclas. Como ejemplo del cálculo se presenta la Tabla 30 la cual contiene datos de 1 de los 5 cubos empleados (mezcla FN 0.5%) y valores calculados después del ensayo de Fagerlund.

El desarrollo de cálculo que a continuación se presenta se aplicó para las mezclas T10, FN 0.5%, FN 1.5%, MZ 2%-FN 0.5% y para cada uno de los 5 especímenes sometidos a la prueba.

Al final se realizó un promedio de los coeficientes obtenidos por espécimen de cada mezcla.

Tabla 27.- Serie de datos para el primer espécimen cúbico de la mezcla FN 0.5%.(Blancas V.H., 2017).

FN 0.5% 1/5	Wo (Kg) = 0.2537	Área {Ao} (m ²) = 0.00251		
Tiempo (s)	Raíz cuadrada (s) ²	altura (z) (m)	Wt (Kg)	(Wt – Wo)/Ao (kg/m ²)
0	0.00	0.0000	0.2537	0.00
300	17.32	0.0499	0.2541	0.16
600	24.49	0.0499	0.2543	0.24
900	30.00	0.0499	0.2543	0.24
1800	42.43	0.0499	0.2547	0.40
3600	60.00	0.0499	0.2551	0.56
7200	84.85	0.0499	0.2556	0.76
14400	120.00	0.0499	0.2563	1.04
21600	146.97	0.0499	0.2569	1.27
86400	293.94	0.0499	0.2584	1.87
172800	415.69	0.0499	0.2594	2.27
259200	509.12	0.0499	0.2596	2.35
345600	587.88	0.0499	0.2600	2.51
432000	657.27	0.0499	0.2604	2.67
518400	720.00	0.0499	0.2606	2.75
604800	777.69	0.0499	0.2608	2.83
691200	831.38	0.0499	0.2611	2.95
777600	881.82	0.0499	0.2612	2.99
864000	929.52	0.0499	0.2614	3.07
950400	974.88	0.0499	0.2616	3.15
1036800	1018.23	0.0499	0.2617	3.19
1123200	1059.81	0.0499	0.2618	3.23
1209600	1099.82	0.0499	0.2618	3.23

De la tabla 30 se procede a realizar una gráfica (Figura 139) con 2 de las columnas de dicha tabla, colocando los valores de la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las abscisas y el valor de la columna (Wt-W₀)/A₀ en el eje de las ordenadas. Se observan dos pendientes: la primera que forman los primeros puntos y que representa la absorción del agua por la muestra y la segunda que la forman los

puntos con valores muy parecidos entre sí de $(W_t - W_0)/A_0$ con diferencia de un día, la cual representa la saturación del mismo.

Al ser menos pronunciadas estas pendientes y asemejar una curva se interpreta que el material no se satura con rapidez y presenta buena resistencia a la penetración del agua y cualquier agente disuelto en ella, por lo tanto, un bajo porcentaje de porosidad efectiva.

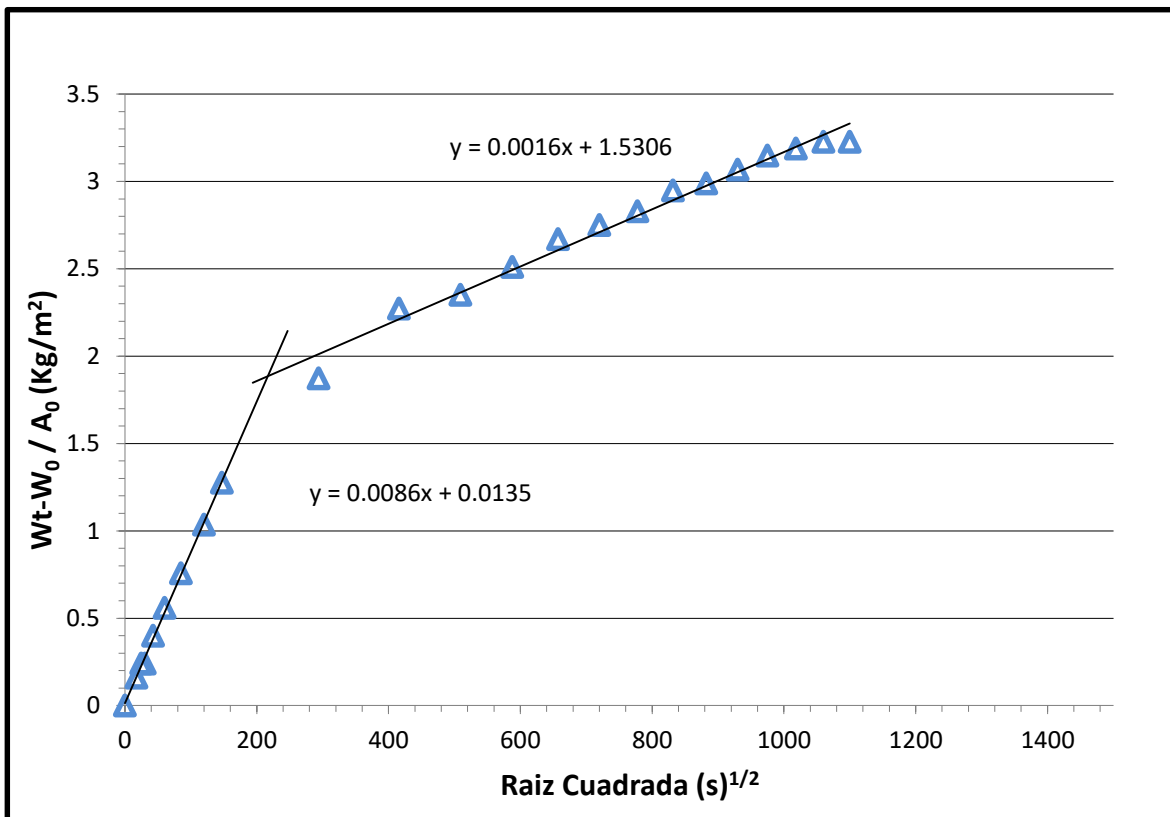


Figura139.- Absorción capilar para el espécimen cúbico No. 1 de la mezcla FN 0.5%. (Blancas V.H., 2017).

El cálculo del coeficiente de absorción capilar (k) se da a partir del cruce que tienen las dos líneas de tendencia que presentan el cambio de comportamiento de la absorción del espécimen, es decir se ocupa conocer las coordenadas del punto donde se intersectan las dos líneas, es por eso que se tienen dentro del gráfico una ecuación para cada línea que describe su pendiente, es entonces que teniendo

estas dos ecuaciones se encuentra la raíz cuadrada del tiempo en "x" y la $(W_t - W_0)/A_0$ en "y" como se muestra a continuación:

Teniendo un sistema de dos ecuaciones:

$$y = 0.0086x + 0.0135$$

$$y = 0.0016x + 1.5306$$

Igualando la variable "y" de las dos ecuaciones:

$$0.0086x + 0.0135 = 0.0016x + 1.5306$$

Despejando la variable "x":

$$0.007x = 1.5171$$

$$x = 1.5171/0.007$$

$$x = 216.73$$

$$(\sqrt{t} = 216.73 \text{ s}^{1/2})$$

Entonces, sustituyendo "x" en una de las dos ecuaciones originales:

$$y = 0.0086 (216.72) + 0.0135$$

$$y = 1.88$$

$$((W_t - W_0)/A_0 = 1.88 \text{ kg/m}^2)$$

Por lo tanto, se calcula el valor del coeficiente de absorción capilar (k) como:

$$k = \frac{216.73}{1.88} = 0.0087 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^{1/2}}$$

El cálculo de m (resistencia a la penetración) se realiza con los datos de la tabla de cálculo correspondientes al tiempo y altura (cuando z representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo "t") del punto de quiebre, donde se intersectan ambas pendientes. Los demás coeficientes requeridos obedecen a las ecuaciones siguientes:

$$t_n = (\sqrt{t})^2 = (216.73)^2$$

$$t_n = 46971.89 \text{ s}$$

Resistencia a la penetración (m):

$$m = \frac{46971.89}{0.0499^2} = 18,864,137.09 \text{ s/m}^2$$

Porosidad efectiva (ϵ_e):

$$\epsilon_e = \frac{0.0087 * \sqrt{18,864,137.09}}{1000} = 0.0377 \text{ m/s}^2$$

$$\epsilon_e = 3.78 \%$$

Tomando en cuenta el valor anterior de m, se calcula la sorción capilar como:

$$s = \frac{1}{\sqrt{m}} = \frac{1}{\sqrt{18,864,137.09}} = 0.00023 \text{ m/s}^{1/2}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de cada una de los especímenes y promediando estos valores se obtienen resultados gráficos presentados en las siguientes figuras por edad de prueba y por mezcla. En la Figura 140 se da a conocer la sorción capilar obtenida en las dos edades de prueba.

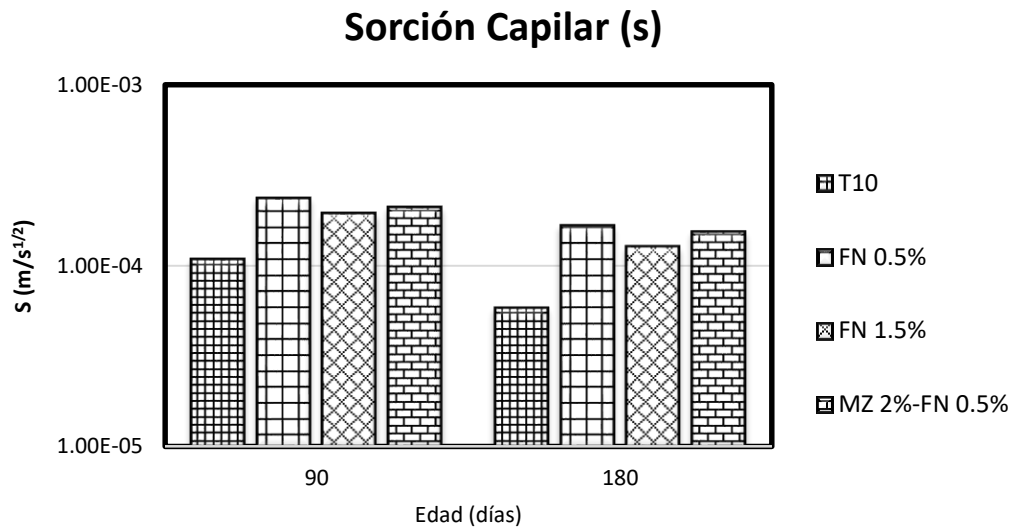


Figura140.- Sorción Capilar a las edades de 90 y 180 días. (Blancas V.H., 2017).

Realizando una comparación entre las mezclas, se puede observar en la Figura 140 que el mortero con sustitución de FN 0.5% presenta una mayor sorción

de agua por los poros capilares, ligeramente mayor a las otras dos mezclas con sustitución (FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5%) y superando en las dos edades todas las mezclas al mortero T10. La Red DURAR especifica que valores menores de sorción de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ es apto para exposiciones severas, y para condiciones menos severas se aceptan valores de $10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$, rango en que se encuentran las mezclas elaboradas, con el valor más alto a 90 días de $1.08 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla Control T10; $2.34 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla FN 0.5%; $1.92 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla FN 1.5% y finalmente un valor de $2.09 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$. Las Figuras 141 a 143 muestran los valores promedios obtenidos en las dos edades de prueba de la resistencia a la penetración (m), el coeficiente de absorción capilar (k) y la porosidad efectiva (ϵ_e).

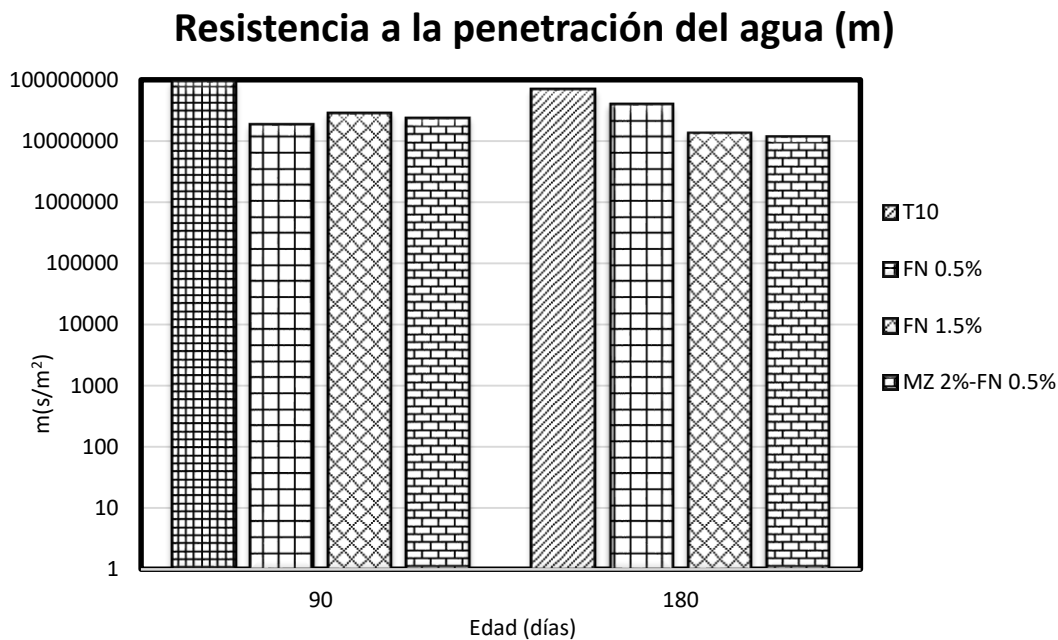


Figura141.- Figura Resistencia a la penetración del agua (m) a las edades de 90 y 180 días. (Blancas V.H., 2017).

Observando la Figura 141, la resistencia a la penetración del agua es superior en la mezcla Control T10 lo cual significa que la porosidad de las muestras de T10 es menor y por consiguiente su valor de sorción. La mezcla FN 0.5% mejora y

aumenta la resistencia a la penetración del agua a la edad de 180 días y es la que se encuentra por debajo de la mezcla Control T10. Es la mezcla MZ 2%-FN 0.5% la de valor promedio más bajo, reflejando más porosidad y sorción en su estructura.

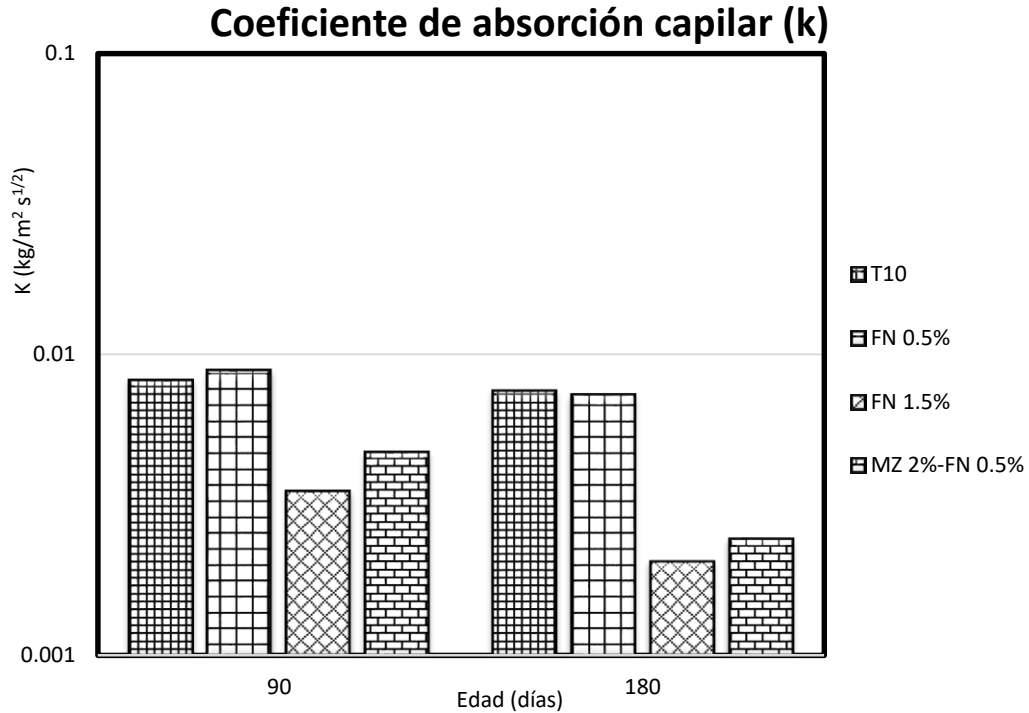


Figura 142.- Coeficiente de Absorción capilar (k) a las edades de 90 y 180 días. (Blancas V.H., 2017).

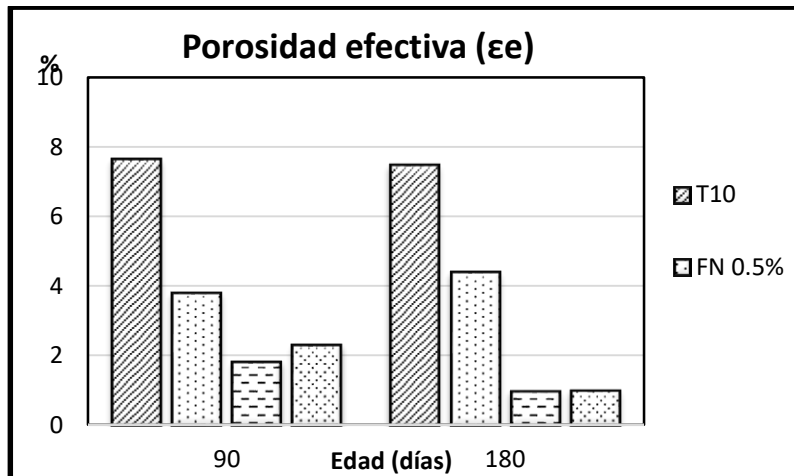


Figura143.- Porosidad efectiva (ϵ) a las edades de 90 y 180 días. (Blancas V.H., 2017).

De acuerdo con la Red DURAR, valores menores al 10% de porosidad indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10% y 15% indican un concreto de calidad moderada, y un concreto >15% de porosidad indican un concreto de durabilidad inadecuada.

Con base en estas especificaciones se puede concluir que la mezcla Control T10 y las mezclas con sustitución de FN y MZ son de alta durabilidad y buena calidad, quedando todos los valores de las mezclas debajo del 10% marcado.

7.4.13.- Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos).

Después de hervir las muestras para cada una de las mezclas y de esa manera obtener la porosidad total, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 31.

Tabla 28.- Resultados de Porosidad Total en cubos a la edad de 90 y 180 días. (Blancas V.H., 2017).

Porosidad total		
Mezcla	Edad de Prueba (días)	
	90	180
T10	12.78	15.88
FN 0.5%	10.84	10.13
FN 1.5%	8.16	5.22
MZ 2% - FN 0.5%	8.12	6.41

Los resultados de la Tabla 31 muestran valores de porosidad total menor en las mezclas que cuentan con sustituciones del material cementante, esto se interpreta como una mejor resistencia a la degradación por penetración de agentes degradantes agresivos y de mejor respuesta de durabilidad y de calidad en su matriz cementicia.

La FN 1.5% presentó la menor porosidad total en su edad tardía seguido de la mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5%, por lo que se consideran como

materiales de buena calidad y compacidad según las especificaciones de la red DURAR (Tabla 19 de la presente investigación).

La mezcla de FN 0.5% sobrepasa un valor de porosidad total de 10% por lo que se considera como un material de moderada calidad y por último la mezcla Control T10, siendo esta la más desfavorable con mayor porcentaje de poros en su estructura y con una durabilidad inadecuada.

7.4.14.- Resumen de resultados anteriores.

Recopilando los resultados de las diferentes pruebas que se realizaron a las distintas mezclas en estudio se tienen las Tablas 32 a 35.

- **Pruebas realizadas al mortero fresco:**

Tabla 29.- Resumen de resultados de pruebas realizadas al mortero fresco. (Blancas V.H., 2017).

Prueba elaborada	Mezcla			
	MC	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%+FN 0.5%
Tiempos de fraguado	Dentro de los límites permisibles - inicial = 150 min y final = 390 min	Rebasa el límite de F_{final} y actúa como retardante - inicial = 120 min y final = 1260 min	Rebasa el límite de F_{final} y actúa como retardante - inicial = 210 min y final = 1515 min	Rebasa el límite de F_{final} y actúa como retardante - inicial = 135 min y final = 1174 min
Fluidez	Por debajo del límite estándar - 99%	En el límite superior estándar - 115%	Sólo por debajo del límite estándar - 104%	Dentro del límite estándar - 112%
pH	Mezcla alcalina - pH = entre 12 y 14			
Elaboración de especímenes	Sin problemas significativos de exudación o de desmolde			
Cuantificación de especímenes elaborados	72 cubos de 5 x 5 cm, 20 briquetas, 20 prismas de 4 x 4 x 16 cm y 20 cilindros de 5 x 10 cm			

- Pruebas no destructivas en el concreto endurecido:

Tabla 30.- Resumen de resultado de pruebas no destructivas.

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Densidad	Mayor densidad a los 300 días (2060 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable	Por debajo del T10 a los 300 días (2030 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable	Menor densidad a los 300 días (1970 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable	Por debajo de FN 0.5% a los 300 días (2010 kg/m ³) - Matriz de mortero en buenas condiciones y de calidad aceptable
Gravedad específica	Menor gravedad específica a los 300 días = 1.88	Menor grav. específica en sustitución a los 300 días = 1.90 - Densifica la matriz cementicia del mortero	Mayor gravedad específica a los 300 días = 1.93 - Densifica la matriz cementicia del mortero	Grav. Específica a los 300 días = 1.91 - Densifica la matriz cementicia del mortero
Resistividad eléctrica (NMX-C-514-ONNCCE-2016)	RE (300 días) = 21.75 kΩ-cm Velocidad de corrosión moderada o alta	RE (300 días) = 35.32 kΩ-cm Velocidad de corrosión moderada o alta	RE (300 días) = 59.9 kΩ-cm Velocidad de corrosión baja	RE (300 días) = 29.12 kΩ-cm Velocidad de corrosión moderada o alta
Velocidad de Pulso Ultrasónico (Red Durar,2000)	VPU (300 días) = 4309.8 m/s Mortero de calidad durable	VPU (300 días) = 4172.25 m/s Mortero de calidad durable	VPU (300 días) = 4150.6 m/s Mortero de calidad durable	VPU (300 días) = 4062.4 m/s Mortero de calidad durable

▪ Pruebas destructivas en el concreto endurecido:

Tabla 31.- Resumen de resultados de pruebas destructivas.

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Resistencia a la compresión simple	Resistencia mayor a los 180 días de 34.12 MPa - Mortero con una durabilidad y resistencia moderada	Resistencia mayor a los 150 días de 33.92 MPa - Mortero con una durabilidad y resistencia moderada	Resistencia mayor a los 150 días de 37.02 MPa - Morteros con una durabilidad y resistencia moderada	Resistencia similar al control y mayor a los 150 días de 41.63 MPa - Mortero con una durabilidad y resistencia moderada
Resistencia a la flexión	Resistencia mayor a los 300 días (MR = 7.23 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia similar al control a los 300 días (MR = 6.44 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia menor a los 300 días (MR = 4.06 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia similar al control y a la FN 0.5% a la edad de 300 días (MR = 6.51 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 \checkmark Compresión (MPa)
Resistencia a la tensión directa	Resistencia mayor a los 150 días = 3.62 MPa - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	3.08 MPa (120 días) - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia menor de 2.70 MPa (180 días) - En el límite inferior de 0.4 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia similar al control = 3.33 MPa (180 días) - Supera los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)
Resistencia a la tensión indirecta	Resistencia similar a FN 0.5% a los 300 días (4.86 MPa) - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia a los 300 días (4.85 MPa) - Superando los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia menor de las mezclas = 3.40 MPa (150 días) a los 300 días - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)	Resistencia a los 300 días de 4.01 MPa - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 \checkmark Compresión (MPa)
Resistencia a la tensión por adherencia	Resistencia mayor alcanzada a la edad de 120 días = 2.96 MPa - Resistencia (180 días) = 1.83 MPa	Resistencia menor en las 2 edades de prueba - 1.52 MPa (120 días) y 0.42 MPa (180 días)	Resistencia mayor alcanzada a la edad de 180 días = 2.46 MPa - Resistencia (120 días) = 2.41 MPa	Resistencia media en comparación con las otras mezclas - 2.16 MPa (120 días) y 1.32 MPa (180 días)

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.

- Pruebas por durabilidad en el concreto endurecido:

Tabla 32.- Resumen de resultados de pruebas por durabilidad. (Blancas V.H., 2017).

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2%-FN 0.5%
Ataque por sulfatos (90 y 180 días)	(Menor estabilidad) - Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta [RE (90 días) = 16.6 kΩ-cm y RE (180 días) = 16.99 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3142.67 m/s y VPU (180 días) = 3756 m/s] - Pierde % de masa a 180 días (3.81% en el 5° ciclo)	Mortero con velocidad de corrosión baja a los 180 días [RE (90 días) = 20.69 kΩ-cm y RE (180 días) = 67.68 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3397 m/s y VPU (180 días) = 3876 m/s] - Pierde % de masa a 90 días (2.68% en el 5° ciclo)	(Mayor estabilidad) - Mortero con velocidad de corrosión baja a los 180 días [RE (90 días) = 46.44 kΩ-cm y RE (180 días) = 54.52 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3138.67 m/s y VPU (180 días) = 3788 m/s] - Pierde % de masa a 90 días (2.97% en el 5° ciclo)	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta [RE (90 días) = 26.27 kΩ-cm y RE (180 días) = 22.44 kΩ-cm] - Mortero de alta calidad [VPU (90 días) = 3810.33 m/s y VPU (180 días) = 3756 m/s] - Gana % de masa a 90 y 180 días (0.80% en el 5° ciclo a 180 días)
Penetración Rápida de Cloruros (180 días)	Riesgo de Penetración de cloruros moderado (2242 Coulombs)	Riesgo de Penetración de cloruros bajo (1731 Coulombs)	Riesgo de Penetración de cloruros bajo (1574 Coulombs)	Riesgo de Penetración de cloruros bajo (1538 Coulombs)
Congelamiento y deshielo (180 días)	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere un menor número de ciclos para su falla total (75 ciclos)	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere 231 ciclos para su falla total	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere 172 ciclos para su falla total	Mortero con velocidad de corrosión moderada o alta y de calidad durable - Requiere un mayor número de ciclos para su falla total (309 ciclos)
Profundidad de Carbonatación	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.18$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 25.92 mm	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.69$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 28.43 mm	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 3.94$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 19.69 mm	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.38$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los 25 años = 26.88 mm

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.

Fagerlund	Mortero aptos para condiciones menos severas [s (90 días) = $1.08 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $5.81 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 7.63% y ϵ_e (180 días) = 7.47%]	Mortero aptos para condiciones menos severas [s (90 días) = $2.34 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $1.65 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 3.79% y ϵ_e (180 días) = 4.39%]	Mortero aptos para condiciones menos severas [s (90 días) = $1.92 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $1.27 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 1.81% y ϵ_e (180 días) = 0.97%]	Mortero aptos para condiciones menos severas [s (90 días) = $2.09 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y s (180 días) = $1.53 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - Mortero de alta durabilidad y buena calidad [ϵ_e (90 días) = 2.29% y ϵ_e (180 días) = 0.99%]
Porosidad Total	Mortero de durabilidad inadecuada (90 días = 12.78% y 180 días = 15.88%)	Mortero de calidad moderada (90 días = 10.84% y 180 días = 10.13%)	Menor porosidad - Mortero de buena calidad y compacidad (90 días = 8.16% y 180 días = 5.22%)	Mortero de buena calidad y compacidad (90 días = 8.12% y 180 días = 6.41%)

7.4.15. Análisis de resultados a morteros con sustitución de FN

Innovar en el diseño de morteros de base cemento Portland para lograr fines mecánicos, físicos, sustentables y mitigar la degradación de las estructuras de concreto son en la actualidad situaciones que conciernen a todas las disciplinas, y llevan a realizar investigaciones para intentar reducir las emisiones de carbono a la atmósfera producto de la producción y consumo de cemento Portland empleado en la elaboración de concreto/mortero en obras civiles, y a la par optar por productos orgánicos y endémicos de nuestro país, que sustituyen un porcentaje de la cantidad total del cementante, obteniendo así materiales de restauración o de recubrimiento que contrarrestan la degradación producto del ataque de agentes agresivos.

En la fabricación de los morteros FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% se tuvo la precaución de que su elaboración fuera bajo las mismas condiciones que un mortero convencional (T10), y de esta manera se observó que sí existen mejoras en sus propiedades tanto físico-mecánicas como de durabilidad. El empleo de Fibra de Nopal y de Fécula de Maíz (Almidón) en la mezcla de mortero, le infieren una

densidad aceptable por lo que se puede decir que dichos materiales densifican y estabilizan a la matriz cementicia.

Para el empleo del agregado fino (arena de "Joyitas") se realizaron procedimientos experimentales de acuerdo a la normativa vigente NMX, y por medio de la caracterización se presentaron parámetros físicos muy favorables para su uso en materiales de construcción, esto debido a la baja absorción, a una muy buena densidad y a una distribución granulométrica aceptable, así como un módulo de finura dentro de los rangos establecidos por la normativa vigente.

La propiedad cementante más importante observada en las pastas de mortero con las distintas sustituciones de material orgánico fue el tiempo de fraguado, las cuales presentaron un tiempo de fraguado final superior al control y a los límites establecidos por la normativa. Es entonces que estos productos como lo son la Fibra de Nopal y el Almidón trabajan como aditivos retardantes del fraguado debido a las cantidades de azúcares que contienen, beneficiando con ello el transporte y construcción de obra civil en lugares con temperaturas muy altas, ya que se presenta un bajo calor de hidratación y se tiene un mayor tiempo para la colocación de dichas pastas. La FN 1.5% presentó un tiempo de fraguado final mayor a las demás pastas, de 1515 minutos después de su elaboración (contra lo convencional de 600 minutos ó 10 horas).

Con relación a las pruebas no destructivas o parámetros físicos relacionados con la durabilidad, se obtuvo una resistividad eléctrica más alta en especímenes de FN 1.5% clasificado como un mortero con una velocidad de corrosión baja, obteniendo un valor de 59.9 k Ω -cm; superando considerablemente a las otras dos mezclas con sustitución (FN 0.5% con RE=35.32 k Ω -cm y MZ 2%-FN 0.5% con RE = 29.12 k Ω -cm) y al mortero control (T10 con RE = 21.75 k Ω -cm), teniendo estas mezclas una velocidad de corrosión moderada o alta. Respecto a la prueba de velocidad de pulso ultrasónico todos los morteros tienen una clasificación de calidad durable, siendo el mortero T10 el que alcanza, a los 300 días, velocidades de pulso

de hasta 4309.8 m/s; la mezcla de 0.5% en sustitución con fibra de nopal (FN 0.5%) es la de mejor comportamiento a diferencia de las otras dos mezclas con sustituciones.

Con relación a las pruebas destructivas o ensayos de resistencia mecánica, en compresión simple la MZ 2%-FN 0.5% arrojó resultados satisfactorios superando al T10 con resistencia de 41.63 MPa a los 150 días, pero teniendo un comportamiento similar al mortero control (T10) y a las demás mezclas de fibra de nopal. Teniendo como significado usual que la matriz cementicia de los morteros logra su densificación y mantiene su resistencia conforme transcurre el tiempo. El mejor resultado de la compresión simple en los cubos de mortero con fibra de nopal se presentó a la edad de 150 días con resistencia de 37.02 MPa para la mezcla de FN 1.5%, pero teniendo a lo largo de las demás edades un comportamiento por debajo de la FN 0.5%.

En cuanto a la resistencia a la tensión por flexión el mortero control (T10) es el que presenta un MR = 7.23 MPa, mayor que los morteros con porcentaje de sustitución de fibra de nopal y almidón a los 300 días. De las tres mezclas con sustitución orgánica se observa que la FN 0.5% logra superar a la edad de 120 y 180 días el valor de la flexión del T10, y a lo largo de las edades de prueba su comportamiento es mejor que las otras dos mezclas (FN 1.5% y MZ 2% FN 0.5%). El mortero de FN 1.5% es en la prueba de flexión la mezcla en estudio más desfavorable.

El comportamiento de la MZ 2%-FN 0.5% en el ensaye de tensión directa, es similar pero menor al mortero T10, alcanzando valores mayores a los 180 días de hasta 3.33 MPa. Ahora bien, comparando resultados de la edad de 300 días en las distintas mezclas se observa que la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% se encuentra por encima de la mezcla control, seguido de la mezcla FN 1.5% y FN 0.5% con valores de 2.43 y 2.24 MPa respectivamente. En la tensión indirecta las mezclas con mayor valor fueron el T10 y FN 0.5% con valores de 4.86 MPa y 4.85 MPa respectivamente.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la tensión por flexión y tensión directa e indirecta, fueron comparados con los valores de la prueba a compresión en cubos, siendo ésta la única que se encuentra normada. Dichos resultados se encontraron dentro de los parámetros establecidos por la referencia para concreto e inclusive estuvieron por encima de los límites superiores, teniendo entonces, que la durabilidad y resistencia de los morteros se clasifica como alta.

En la prueba por resistencia a la adherencia las cuatro mezclas en estudio presentaron falla por resistencia a la tensión, lo que quiere decir que las distintas mezclas tuvieron una buena adherencia como material de reparación o revestimiento con el sustrato de concreto, alcanzando una resistencia de hasta 2.46 MPa a los 180 días en la mezcla de FN 1.5%, mayor que las demás mezclas puestas en estudio.

Con respecto a los ensayos de durabilidad se logró obtener una clasificación de velocidad de corrosión baja para las mezclas con sustitución de fibra de nopal y de una alta calidad en todas las mezclas expuestas al ataque por sulfatos, teniendo entonces que las mezclas con sustituciones orgánicas en sus distintos porcentajes superaron a la mezcla control (T10) y en las dos edades de prueba no sobrepasaron su máximo estado de servicio. El mortero de FN 0.5% fue el que presentó mejores resultados y el Control T10 el más desfavorable pero con riesgo de corrosión moderada y de una buena calidad, según la red Durar.

La mezcla con combinación de MZ 2%-FN 0.5% presentó un riesgo bajo de penetración de cloruros (1538 Coulombs), mejor resultado que el obtenido en las mezclas con fibra de nopal y de la mezcla Control T10, siendo esta última la más desfavorable presentando una clasificación de riesgo moderado con un valor de penetración de 2242 Coulombs.

De la prueba de congelamiento y deshielo no existieron resultados significativos por las pruebas de RE y VPU debido a que el número de ciclos fue

muy pequeño en comparación de los 100 ciclos o más que dice la literatura respecto a ensayos de esta índole, por lo que extrapolando los valores obtenidos de la RE se llegó a la conclusión de que el mortero de MZ 2%-FN 0.5% necesita un mayor número de ciclos (309 ciclos) para llegar a su destrucción total por encima de la mezcla FN 0.5% la cual necesita 231 ciclos para ello. El mortero T10 es el más desfavorable requiriendo solo 75 ciclos para su destrucción.

Estimando la profundidad de carbonatación en los distintos morteros a una edad de 25 años, se tiene que la FN 1.5% tiene el menor valor de profundidad con 19.69 mm solo por debajo de la mezcla Control T10 (25.92 mm) y se considera por su constante de carbonatación como un mortero con una resistencia media a la carbonatación al igual que las otras mezclas.

En los resultados de absorción capilar se concluye que todas las mezclas tienen una baja porosidad efectiva, siendo la de menor valor la FN 1.5% (0.97%) y con una sorción capilar apta para ambientes no tan severos. Con estos valores todas las mezclas se clasifican como morteros de buena calidad y alta compacidad. En la prueba de porosidad total la FN 1.5% presentó la menor porosidad total en su edad tardía (5.22%) seguido de la mezcla combinada de MZ 2%-FN 0.5% (6.41%), por lo que se consideran como un material de buena calidad y compacidad según las especificaciones de la red DURAR.

La sustitución de fibra de nopal y almidón densificó notablemente a la matriz cementicia, lo que dio como resultado el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas tanto como las de durabilidad prevalecientes en morteros convencionales.

De manera favorable la FN 1.5% presenta mejores resultados de durabilidad, así como un mejor comportamiento en las pruebas físicas, que de igual manera el mortero de FN 0.5% destaca por sus valores significativos en las pruebas no destructivas.

En la pruebas mecánicas o destructivas la mezcla de MZ 2%-FN 0.5% es la que presenta mayores valores de resistencia, considerándose como un mortero de resistencia aceptable, pero sin dejar a un lado las sustituciones de fibra de nopal que en comparación con las de un mortero convencional no presenta diferencia en sus resistencias mecánicas.

Para estudios posteriores se propone continuar con la cantidad de sustitución de fibra de nopal en 1.5% debido a los resultados favorables de durabilidad.

En lo que respecta de la combinación de fibra de nopal y almidón, se recomienda proponer nuevos porcentajes de sustitución en las combinaciones y comparar los resultados con los de la actual investigación.

Finalmente, sí se logró el objetivo principal de obtener materiales con un comportamiento físico-mecánico y de durabilidad aceptable, que superen las características de un mortero convencional para así disminuir el empleo y producción de cemento Portland y con ello las emisiones de carbono a la atmósfera.

Dado que se tuvieron buenos resultados en las distintas mezclas elaboradas, se concluye que los materiales pueden emplearse en la aplicación de recubrimientos o de restauración en obras civiles de elementos de concreto, siendo estos los usos habituales de un mortero hidráulico.

7.5. Discusión de resultados por fase experimental.

1.- Concreto elaborado con cantos rodados, 2% de adición de fibra de OFI (7,14,28 y 40 días de edad). Se incrementa la resistencia a la compresión f_c de cilindros adicionados con fibra de OFI, en 10% sobre los controles CC, siendo ésta casi constante desde los 14 y hasta los 40 días. En flexión MR los cilindros con fibra de OFI presentan valores bastante menores respecto a los especímenes control, alcanzando solo el 32% del MR de las vigas control CC a esa edad. La RE de cilindros control CC son 10% promedio mayor que la RE de los especímenes adicionados con fibra de OFI, teniéndose en ambos casos que la mayor RE fue a

los 14 días de edad, habiéndose medido hasta los 40 días, hasta donde se catalogan ambos concretos como de “Alto riesgo”, según DURAR. La VPU es mayor en los cilindros control a partir de los 14 días; edad a partir de la cual ambas mezclas aumentan su VPU, terminando los CC con una VPU del 12% mayor que los cilindros adicionados con fibra de OFI. CC se considera como “Durable”, mientras que CF como de calidad “Alta” según DURAR. El Fraguado Inicial de la mezcla con OFI fue 21% mayor que CC. El Fraguado Final de CF también fue mayor que CC en 15%. Como conclusión: la resistencia a compresión f_c fue mayor en CF que CC; sin embargo, en f_t , RE y VPU, CC fue mayor que CF. Los tiempos de fraguado inicial y final fueron mayores en el concreto adicionado con OFI, actuando la fibra OFI como retardante. Las resistencias mecánicas de CF a las primeras edades (7 días) son siempre menores que las de CC.

2. Concreto elaborado con grava triturada, 2% de adición de fibra de OFI (7,14,28 y 40 días de edad). Hasta antes de 14 días CC es mayor que CF, en resistencia a compresión, pero a partir de esa edad CF es mayor 7%, manteniéndose por encima de CC en 20% a los 40 días. En resistencia a tensión f_t , CF está por debajo de CC hasta 32 días, edad a partir de la cual CF supera a CC en f_t . En RE de CC se mantiene por arriba de CF, y en 17% a los 40 días. Ambas mezclas de concreto, para todas las edades de prueba se catalogan como de “Alto riesgo”, según DURAR. Para cilindros la VPU es prácticamente igual a los 14 días en ambos concretos. En adelante y hasta los 40 días CF supera a CC en 5%, catalogándose como “Durable” y CC como de calidad “Alta”. Para vigas la VPU coincide a los 7 días en ambos casos; a partir de ahí siempre CC se mantiene sobre CC, ligeramente y coinciden prácticamente a los 40 días en VPU catalogándose como solo de calidad “Alta”, según DURAR. En flexión a los 7 días CF está por encima de CC; a los 40 días CF supera a CC en 50%. Como conclusión: la resistencia a compresión f_c fue mayor en CF que CC desde los 14 días. La resistencia a tensión f_t fue ligeramente mayor en CF a 40 días. RE es mayor en CC que en CF. La VPU en cilindros es mayor en CF que en CC, ligeramente. En vigas

la VPU es prácticamente igual, aunque CC muy ligeramente por encima. En resistencia a flexión CF supera a los 40 días a CC.

En conclusión, para los concretos estudiados:

a.- Las resistencias mecánicas estudiadas, compresión simple, tensión indirecta, flexión (módulo de ruptura) de CF a las primeras edades, 7 días, son siempre menores, con mucho, que las de CC. Discusión: La fibra de OFI actúa como un retardante de fraguado y de resistencia mecánica, probablemente por ser un polisacárido, que es un hidrato de carbono formado por la unión de moléculas de azúcar, que actúa retardando la velocidad de hidratación.

b.- A los 40 días, fin de la prueba, f_c es mayor en CF que en CC, para concretos con agregados gruesos de cantos rodados y de grava volcánica triturada. Discusión: la densificación de la matriz cementicia se ha incrementado por la formación de cristales de oxalato de calcio que contienen weddellita, lo que genera una mayor densidad en el concreto. Contribuye a incrementar la resistencia el curado interno provocado por la retención de agua de la fibra de OFI, ayudando al proceso de hidratación.

c.- En flexión los CC con cantos rodados tienen mayor MR, pero los elaborados con grava triturada CF tienen mayor MR, por lo que se invierten los resultados. Discusión: En realidad se trata de una prueba combinada de compresión y tensión, en donde ésta última falla primero, por lo que la falla por tensión es la más crítica; es probable que la fibra de OFI disminuya la adherencia en la interfase entre los cantos rodados y la matriz cementicia, originándose menor resistencia a tensión y por lo tanto a flexión, que el control. En el caso de concretos con grava triturada, se estima que los cristales de oxalato de calcio originados por la incorporación de la fibra de OFI se adhieren mejor por la mayor rugosidad de las partículas, incrementando el MR de las mezclas.

d.- En cilindros, la RE es mayor, a lo largo de las diferentes edades monitoreadas y hasta 40 días, en CC que en CF, independientemente del tipo de agregado grueso para elaborar concreto. Discusión: Al tenerse mezclas con mayor humedad interna, por la retención de agua debido a la presencia de fibra de OFI, se tiene una mayor conductividad eléctrica, que es inverso de la resistividad, en los concretos adicionados. Se especula que a mayores edades el agua retenida se convertirá en agua de reacción, por lo que aumentará la resistencia mecánica y disminuirá la RE.

e.- En cilindros con cantos rodados, a edades tempranas ambos resultados casi coinciden, y la VPU es mayor en CC, a los 40 días. En cilindros con grava triturada la VPU de CF es ligeramente mayor que en CC; en vigas son prácticamente iguales, aunque la VPU en CC está arriba de CF. Discusión: No existe prácticamente diferencia notable en las mediciones de VPU, por lo que las densidades de ambas mezclas serían también parecidas. Contrastar VPU vs Densidad y Gravedad Específica.

3. Mortero elaborado con mucílago de OFI, en proporciones MN 1:2, y MN 1:3. Agregados volcánicos (Edades: 7,14,28,45,90,120,150 y 300 días).

Respecto a la Compresión fc.: a 7 días los morteros con mucílago MN tienen una gran diferencia respecto a los morteros control MC, ya que, en promedio fc de éstas son del orden del 10% respecto a MC. A los 300 días MN 1:3 tiene 13% más fc que MC y que MN 1:2, los cuales prácticamente coinciden. Discusión: Comparando los resultados de morteros con concretos, se espera que en morteros se tengan diferencias más acendradas, ya que la cantidad de áridos es menor, lo que – se especula- haga más sensibles los estudios con éstos. Al ser el mucílago de OFI un retardante de fraguado y resistencia, la hidratación se hace más lenta originando menores resistencias mecánicas en los primeros 7 días y hasta los tres meses, en donde prácticamente coinciden las resistencias fc de MC y MNs. Al igual que muchas mezclas adicionadas con puzolanas, a los 90 días se empiezan a tener

resultados prometedores. El f_c de las mezclas adicionadas comienzan a estar por encima de los valores de MC. A los 300 días MN 1:3 está por encima de MC y de MN 1:2 en 10%. A esta edad se han formado una mayor cantidad, que a edades previas, de productos de la incorporación de OFI, oxalatos de calcio principalmente, densificándose la matriz cementicia. Flexión MR: a 7 días el promedio del MR de MNs es del orden del 20% del de MC. Todos los MR se incrementan con la edad, con altibajos. A 300 días MR de MN 1:3, que es el más prometedor, está 15% sobre MC y 17% sobre MN 1:2. Como conclusión, se tiene que edades tempranas los morteros adicionados MNs presentan muy bajo MR, comparado con MC, por la presencia de azúcares en el OFI, lo que retarda los tiempos de fraguado, la velocidad de hidratación y por lo tanto la resistencia mecánica (MR), de todo tipo inclusive. A los tres meses, similar a lo sucedido con f_c , prácticamente coinciden los MRs de las tres mezclas de concreto. A los 300 días MN 1:3 está por encima del control y de MN 1:2. A esta edad se han formado una mayor cantidad, que a edades previas, de productos de la incorporación de OFI, oxalatos de calcio principalmente, densificándose la matriz cementicia e incrementando la adherencia de ésta, en la interfase, con los agregados finos, teniéndose una mejor liga arena-matriz. Resistividad eléctrica RE: en general, para cubos, la RE en MC fue mayor que en las mezclas MN 1:3 y MN 1:2; a los 300 días las superó en 10% y 23% respectivamente. La RE medida en cilindros y en vigas tuvo un comportamiento cualitativo similar, siempre quedando el MC por encima de los morteros MN. Discusión: La RE se incrementó en todas las mezclas a medida que avanzaba la edad de las mismas. Al igual que en concretos adicionados con fibra de OFI, en morteros la RE de MC se mantiene por encima de MNs a lo largo de los 300 días, lo que indica que la conductividad eléctrica es mayor en los morteros adicionados, probablemente por tenerse una mayor humedad todavía en MNs. Aunque hay que recordar que, para evaluar la durabilidad a los materiales base cemento Portland, son necesarias muchas pruebas, ya que una sola no determina las condiciones de durabilidad de estos materiales.

Velocidad de Pulso Ultrasónico VPU: respecto a la VPU en cubos, a medida que tienen mayor edad, todas las muestras tienden a aumentarla, con algunos altibajos entre los 45 y los 120 días. Similar a lo ocurrido con las pruebas de compresión y flexión, a los 7 días la VPU de MC está muy por encima de los valores de MN 1:3 y MN 1:2, en un 32% y 60% respectivamente. A los 300 días, nuevamente todos los morteros incrementan los valores de VPU, casi coincidiendo, pero estando por encima MN 1:3 de C y de MN 1:2, en 1% y 3% respectivamente. Por lo anterior, hasta esta edad, no parece tener influencia la adición del mucílago de OFI en la VPU de un mortero base CP. A los 300 días, en cilindros el comportamiento es similar, lo mismo que en vigas. En la primera semana la VPU en MNs es muy poca debido a que la hidratación ha sido muy lenta, por los azúcares del mucílago de OFI. A edades tardías no existe prácticamente diferencia notable en las mediciones de VPU, aunque MN 1:3 está por encima; posiblemente exista ya una mayor densidad de este mortero. por lo que las densidades de ambas mezclas serían también parecidas. Tensión Indirecta fti: a los 7 días, la fti es del orden de 15 veces superior en MC que el promedio de fti en MN. Sin embargo a los 45 días fti de MC y de MN 1:3 son iguales, quedando MN 1:2 por debajo. A partir de ahí todos incrementan su valor de fti, con altibajos. A los 300 días fti de MC está por encima de MN 1:3 y de MN 1:2, en un 19% y 33% respectivamente. Los morteros elaborados con mucílago de OFI, MNs, tienen una resistencia muy baja a edades tempranas en fti, porque la hidratación ha sido muy lenta, por la presencia de azúcares en el OFI. A edades tardías el mucílago de OFI impide una alta adherencia entre la matriz-arena. Esto podrá constatarse en las pruebas de pull-off. Checar. Este resultado podría no considerarse, ya que no encuentro explicación, al contraponerse con la prueba de tensión directa, en donde los resultados son contradictorios. Tensión Directa ft: a los 7 días y consecuentemente con la prueba de Tensión Indirecta, MC está muy por encima de MN 1:3 y MN 1:2. De los 7 a los 28 días estas dos últimas mezclas tienen un notable incremento. A partir de los 28 días y hasta los 300, todas las mezclas presentan altibajos, con tendencia a incrementar sus valores. A los 300 días MN 1:3 se ubica con valores por encima de MN 1:2 y de C, en un 16% y 33 %

respectivamente. A edades tempranas es evidente la influencia de mucílago de OFI, por las muy bajas resistencia ft. A edades tardías ya se formaron suficientes productos para aumentar ft de MN 1:3 por encima de MN 1:2 y de MC. Porosidad Total: a los 7 días de edad MC presenta una PT del 31%, MN 1:3 del 25% y MN 1:2 del 21%. A los 300 días todos los morteros decrementaron su PT, para quedar MN 1:3 y MN 1:2 por debajo de MC en 19% y 25% por debajo, respectivamente. La VPU a edades tempranas es mayor en MC que en MNs y también su porosidad total, lo cual no tiene explicación lógica. A edades tardías casi coinciden las VPU aunque MN 1:2 está por lo general arriba; la PT de las MNs es menor que MC, lo que indica que la matriz se ha densificado con los productos de OFI. Tiempos de fraguado: en relación al fraguado inicial FI, se observa un incremento en el tiempo del 380% y 315% de las proporciones MN 1:2 y MN 1:3, respectivamente respecto al control MC. En el caso del fraguado final FF el incremento es de 230% y 215% respectivamente, respecto a MC. La adición de Nopal OFI, al agua de mezclado del mortero, actúa como retardante de fraguado, tanto inicial como final, con las proporciones consideradas, por los azúcares que contiene el mucílago de OFI, decrementando la velocidad de hidratación.

4. Morteros elaborados con sustitución de 0.50%, 1.50% de fibra de OFI y 1.50 de fécula de MZ más 0.50 de fibra de OFI, por cemento Portland CP, siendo tres tipos de morteros con sustitución más los controles. %). Los especímenes fueron ensayados a edades de 120, 150, 180 y 300 días. Compresión f.: en los cubos sometidos a compresión los controles MC fueron junto con los sustituidos con FN+MZ los que más fc alcanzaron a 300 días, quedando 12 % por encima de los sustituidos con fibra de OFI. Aunque inicialmente, a edades tempranas MC tuvo valores superiores de fc respecto a los demás. Flexión MR: en resistencia flexión para determinar MR, los control MC, a 300 días, tuvieron una mayor resistencia en 10% sobre FN 0.5% y FN+MZ; y estos por encima de FN 1.5% en 45%. Tensión Directa: en Tensión Directa en briquetas la combinación FN+MZ

estuvo 8% sobre MC; las demás sustituciones por debajo de MC en 6% y 14% respecto a FN 1.5% y FN 0.50% respectivamente. Tensión Indirecta fti: en Tensión Indirecta, a 300 días, FN 0.50% y MC coinciden por encima de la combinación de FN+MZ en 13%, y en 42% sobre FN 1.50%. Resistividad Eléctrica RE: en Resistividad Eléctrica en cubos FN 1.50% estuvo por encima a los 300 días en 40%, 50% y 64% de FN 0.50%, FN+MZ y MC, respectivamente. De manera cualitativa a esa edad se tuvo un comportamiento similar en la determinación de la RE en cilindros y en prismas. Velocidad e Pulso Ultrasónico VPU: la velocidad de Pulso Ultrasónico VPU fue mayor en MC que en FN+MZ, FN 1.50% y FN 1.50%, a los 300 días, en 6%, 7% y 9%, respectivamente. Cualitativamente también en cilindros y en vigas la VPU fue mayor en MC, a 300 días. Densidad D: respecto a la Densidad a 300 días fue mayor en MC en 2%, 3% y 5%, respectivamente. Gravedad Específica GE: en la Gravedad Específica fue mayor ésta en FN 1.50% que en FN+MZ, FN 0.50% y MC, en 1.50%, 2.00% y 3.00%, respectivamente.

7.6.- Discusión general de resultados.

Muchos constructores y estructuristas consideran que la resistencia a **Compresión Simple (fc)** es el índice más importante de la calidad de materiales base CP. En este estudio los resultados indican que, **para concretos**, la adición de fibra de OFI en 2% (CF) de la masa de CP, en las primeras dos semanas, decrementan la resistencia fc respecto al control (CC); pero a 40 días contribuye al incremento de fc entre 10% a 15%, para concretos con agregados gruesos de cantos rodados y volcánicos triturados (CF), respectivamente. En el caso de **Tensión Indirecta (fti)**, el concreto con cantos rodados CC supera siempre, hasta los 40 días, al CF. Para concretos con grava triturada, desde el inicio de la prueba, la fti de CF estuvo por debajo de CC, pero a 35 días se igualan, y a 40 días ya fti de CF supera a CC en 5%. Para concretos con cantos rodados, la resistencia a **Flexión (MR)** en CC queda muy por encima respecto a mezclas CF; MR de CF alcanzan valores de 1/3 del MR de las vigas CC. Esto cambia en concretos con grava triturada, en donde a 40 días MR es mayor en CF que en CC en 15%, aunque en

las primeras tres semanas el comportamiento es inverso. Hasta los 40 días, se mantiene la **Resistividad Eléctrica (RE)** de CC con cantos rodados 10% mayor que en CF. La RE de CC con grava volcánica triturada se mantiene por arriba de CF en la experimentación, y en 17% a los 40 días, máxima edad de prueba. En cilindros, se mantiene ligeramente arriba la **Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)** de CC sobre CF con cantos rodados; a los 40 días ya hay una diferencia del 12%; en los concretos con grava triturada, la VPU de CF y de CC son prácticamente iguales, pero a los 40 días la VPU de CF estuvo 4% arriba que en CC. En vigas con agregados triturados la VPU de CC y de CF son prácticamente iguales en todas las edades; a los 40 días la VPU de CC está 2% arriba de CF.

Respecto a **morteros** con sustitución de fibra de OFI se tiene: La sustitución de fibra de OFI en 0.50% y 1.50% por CP no contribuye a incrementar f_c en CC a 300 días, quedando 25% por debajo de controles CC. En el caso de sustitución combinada de fibra de OFI más fécula de Maíz (MZ), en 0.50% + 1.50% respectivamente, tampoco hay incremento, quedando las resistencias f_c a 300 días iguales en ambos casos. En morteros adicionados con mucílago de OFI, MN 1:2 y MN 1:3 (proporciones 1:2 y 1:3, OFI:agua), a 7 días los morteros con mucílago (MN) tienen una gran diferencia respecto a los morteros control MC, ya que, en promedio f_c de éstas son del orden del 10% respecto a MC. A los 300 días MN 1:3 tiene 13% más f_c que MC y que MN 1:2, los cuales prácticamente coinciden. Al ser el mucílago de OFI un retardante de fraguado y resistencia, la hidratación se hace más lenta originando menores resistencias mecánicas en los primeros 7 días y hasta los tres meses, en donde prácticamente coinciden las resistencias f_c de MC y MN. Al igual que muchas mezclas adicionadas con puzolanas, a los 90 días se empiezan a tener resultados prometedores. El f_c de las mezclas adicionadas comienzan a estar por encima de los valores de MC. A los 300 días MN 1:3 está por encima de MC y de MN 1:2 en 10%. En **Tensión Directa (f_t)** en briquetas de mortero con fibra, a 300 días la combinación FN+MZ estuvo 8% sobre MC; las demás sustituciones por debajo de MC en 6% y 14% respecto a FN 1.5% y FN 0.50% respectivamente.

Respecto a los morteros con mucílago, a los 7 días MC está muy por encima de MN 1:3 y MN 1:2. De los 7 a los 28 días estas dos últimas mezclas presentan un gran incremento. A partir de los 28 días y hasta los 300, todas las mezclas presentan altibajos, con tendencia a incrementar sus valores. A los 300 días MN 1:3 se ubica con valores por encima de MN 1:2 y de C, en un 16% y 33 % respectivamente. De los 180 a los 300 días MC y MN 1:3 bajaron en sus valores y solo MN 1:2 se incrementó. En **Tensión Indirecta (fti)**, a 300 días, FN 0.50% y MC coinciden por encima de la combinación de FN+MZ en 13%, y en 42% sobre FN 1.50%. Respecto a morteros con mucílago, a los 7 días, la fti es del orden de 15 veces superior en MC que el promedio de fti en MN. Sin embargo a los 45 días fti de MC y de MN 1:3 son iguales, quedando MN 1:2 por debajo. A partir de ahí todos incrementan su valor de fti, con altibajos. A los 300 días fti de MC está por encima de MN 1:3 y de MN 1:2, en un 19% y 33% respectivamente. En **Resistencia Flexión (MR)**, los controles con fibra MC, a 300 días, tuvieron una mayor resistencia en 10% sobre FN 0.5% y FN+MZ; y éstos por encima de FN 1.5% en 45%, lo cual no es prometedor. En morteros con mucílago, a 7 días el promedio del MR de MN es del orden del 20% del de MC. Todos los MR se incrementan con la edad, con altibajos. A 300 días MR de MN 1:3, que es el más prometedor, está 15% sobre MC y 17% sobre MN 1:2.

En **Resistividad Eléctrica (RE)** en cubos FN 1.50% estuvo por encima a los 300 días en 40%, 50% y 64% de FN 0.50%, FN+MZ y MC, respectivamente. De manera cualitativa a esa edad se tuvo un comportamiento similar en la determinación de la RE en cilindros y en prismas. En general, para cubos con mucílago, la RE en MC fue mayor que en las mezclas MN 1:3 y MN 1:2; a los 300 días las superó en 10% y 23% respectivamente. La RE medida en cilindros y en vigas tuvo un comportamiento cualitativo similar, siempre quedando el MC por encima de los morteros MN. **La velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)** en morteros con fibra fue mayor en MC que en FN+MZ, FN 1.50% y FN 1.50%, a los 300 días, en 6%, 7% y 9%, respectivamente. Cualitativamente también en cilindros

y en vigas la VPU fue mayor en MC, a 300 días. Respecto a la VPU en cubos con mucílago, a medida que tienen mayor edad, todas las muestras tienden a aumentarla, con algunos altibajos entre los 45 y los 120 días. Similar a lo ocurrido con las pruebas de compresión y flexión, a los 7 días la VPU de MC está muy por encima de los valores de MN 1:3 y MN 1:2, en un 32% y 60% respectivamente. A los 300 días, nuevamente todos los morteros incrementan los valores de VPU, casi coincidiendo, pero estando por encima MN 1:3 de C y de MN 1:2, en 1% y 3% respectivamente. Por lo anterior, hasta esta edad, no parece tener influencia la adición del mucílago de OFI en la VPU de un mortero base CP. A los 300 días, en cilindros el comportamiento es similar, lo mismo que en vigas. Para los morteros con fibra de OFI, a los 7 días de edad MC presenta una **Porosidad Total (PT)** del 31%, MN 1:3 del 25% y MN 1:2 del 21%. A los 300 días todos los morteros decrementaron su PT, para quedar MN 1:3 y MN 1:2 por debajo de MC en 19% y 25% por debajo, respectivamente. Respecto a la **Densidad (D)** en morteros con fibra de OFI, a 300 días fue mayor en MC en 2%, 3% y 5%, respectivamente. En la **Gravedad Específica (GE)** fue mayor ésta en morteros con fibra de OFI, FN 1.50% que en FN+MZ, FN 0.50% y MC, en 1.50%, 2.00% y 3.00%, respectivamente. En morteros con mucílago de Nopal, en relación al **Fraguado Inicial (FI)**, se observa un incremento en el tiempo del 380% y 315% de las proporciones MN 1:2 y MN 1:3, respectivamente respecto al control MC. En el caso del **Fraguado Final (FF)** el incremento es de 230% y 215% respectivamente, respecto a MC. Para morteros con mucílago de OFI, a 120 días de edad el MC tuvo mejor **adherencia** que morteros MN. A los 180 días MN 1:3 superó tres veces la adherencia del MC. En morteros con sustituciones con FN y MZ, a 120 días, la adherencia del mortero control MC superó a los morteros con sustituciones; a 180 días la mejor adherencia fue para FN 1.5%, superando en 35% al MC.

En morteros con mucílago de OFI, se sometieron a **Ataques de Sulfato de Sodio**, observándose que en el ciclo 5, para las dos edades de prueba, 90 y 180 días, específicamente MN 1:3, es el que pierde menos masa respecto a los otros

morteros, 4.4% y 1.5% respectivamente respecto a MN. Con respecto a los ensayos por ataque de sulfatos, al quinto ciclo o final de prueba, todos los morteros con sustituciones de biopolímeros (FN y MZ) en fibra y fécula, tuvieron una mayor RE que el MC, a 90 días, superando FN 1.5% casi siete veces al MC. A 180 días la RE de FN 0.5% superó a todas las demás y a MC cuatro veces, que fue la de RE más baja. En esta misma prueba de intemperismo acelerado, a 90 días y analizando el quinto ciclo, la VPU más alta fue para MZ 2%+FN 0.5%, superando a MC en 15%. A 180 días tanto FN 0.5% como MZ 2%+FN 0.5% tuvieron comportamientos similares, superando en el ciclo 5 a MC en aproximadamente 10%. En la evaluación de morteros con mucílago de OFI, con la prueba de **Permeabilidad Rápida de Cloruros** a 180 días, la mezcla Control MC y la mezcla MN 1:3 son de permeabilidad moderada, la mezcla MN 1:2 es de alta permeabilidad, de acuerdo a las especificaciones del sistema PROVEE ít. A 180 días la mezcla MZ 2%+FN 0.5% presentó un riesgo bajo de penetración de cloruros, mejor resultado que el obtenido en las otras mezclas con fibra de nopal y que el MC, siendo esta última la más desfavorable presentando una clasificación de riesgo moderado, la diferencia de penetración fue del 30% aproximadamente, de Coulombs. Se sometieron prismas de mortero adicionados con mucilago de OFI, a 14 ciclos acelerados de congelamiento -deshielo. Los especímenes se excitaron a vibración mediante ondas sonoras de banda audible, las vibraciones de resonancia resultantes se utilizaron para determinar las frecuencias fundamentales transversales. Se observó que el mortero MN 1:3 tuvo un comportamiento más lineal que las otras mezclas, significando no poseer muchos poros, habiéndose llenado de agua pocos poros o fisuras; en cambio, los morteros Control y MN 1:2, mostraron variaciones severas, dándose a conocer como materiales permeables con riesgo de desprendimiento. De la prueba de **Congelamiento y Deshielo**, a 180 días de edad de las mezclas, no existieron resultados significativos por las pruebas de RE y VPU debido a que el número de ciclos experimentado (14) fue muy pequeño en comparación de los 100 ciclos o más que dice la literatura respecto a ensayos de esta índole, por lo que estimando una extrapolación de los valores obtenidos de la RE, se considera que el

mortero MZ 2%+FN 0.5% requiere un mayor número de ciclos (309 ciclos) para llegar a su destrucción total por encima de la mezcla FN 0.5% la cual necesita 231 ciclos para ello. El mortero MC es el más desfavorable requiriendo solo 75 ciclos para su destrucción; es decir que MZ 2%+FN 0.5%, se estima, resiste 4 veces más que MC. Respecto a la VPU, a 180 días, no hubo diferencia significativa en las mezclas, quedando todas las mezclas por encima de los 4,000m/s, consideradas de "Calidad durable", según la Red DURAR. En relación a la carbonatación, se observa que los morteros con mucílago de OFI retardan el proceso. De los morteros estudiados ninguno se clasifica como de alta resistencia, pero el mortero Control MC es el más vulnerable, y el MN 1:2 es el de mejor resistencia, por tener un coeficiente bajo de carbonatación respecto a los otros morteros. El mortero de MN 1:2, en la proyección a 25 años alcanza solo 18 mm de profundidad, mientras que el MN 1:3 alcanza 23 mm y el MC llega a 25 mm. La determinación de la profundidad de carbonatación se realizó a la edad de 225 días. Respecto a morteros con sustitución de biopolímeros de OFI y MZ, se tiene que la FN 1.5% tiene el menor valor de profundidad con 19.69 mm, solo por debajo de la mezcla MC (25.92 mm) y se considera por su constante de carbonatación como un mortero con una resistencia media a la carbonatación al igual que las otras mezclas.

En relación a la absorción capilar, se tiene que el **Coefficiente de absorción capilar (k)**, permite determinar la capacidad de absorción del agua de los especímenes. Se observa que en la mezcla Control no hay variación en las edades estudiadas, mantienen la cantidad de agua absorbida; mientras que en los morteros con mucílago si existe variación, específicamente se observa muy claro en el MN 1:3, significa que este mortero disminuye su porosidad al reducir la capacidad de absorción. Se observa que a la edad de 90 y 180 días, la mezcla que más absorbe es el Control MC. La mezcla MN 1:3 tuvo un menor coeficiente de absorción, por lo tanto, era de esperarse la cantidad de agua absorbida fuera baja también. En los resultados de absorción capilar se concluye que todas las mezclas tienen una baja porosidad efectiva, siendo la de menor valor la FN 1.5% (0.97%) y con una sorción

capilar apta para ambientes no tan severos. Con estos valores todas las mezclas se clasifican como morteros de buena calidad y alta compacidad. En relación a la porosidad efectiva, este es el estado poroso capilar de los concretos y/o morteros, es decir, es la porosidad interconectada y conectada a su vez con el exterior. De acuerdo a la clasificación de la Red DURAR, a la edad de 90 días, las mezclas con mucilago se presentaron como materiales de buena calidad, pero a los 180 días el mortero MN 1:2 se mostró como material de calidad moderada. Las mezclas Control y MN 1:3 mantuvieron muy similares los valores en las dos edades de prueba. En la prueba de **Porosidad Total**, no solo se tomaron en cuenta los poros interconectados y conectados con el exterior, sino también los espacios intersticiales del gel de cemento y los espacios producidos por las burbujas de aire en la masa del mortero. Referenciando con la Red Durar, la mezcla Control y MN 1:2, se presentan como materiales inadecuados, pues su porosidad sobrepasa el 15 % en todas las edades; el mortero MN 1:3 se coloca como un material de calidad moderada a la edad de 90 y 180 días, manteniendo su porosidad a estas edades entre 10 % y 15 %. En la prueba de Porosidad Total la FN 1.5% presentó la menor Porosidad Total en su edad tardía (5.2%) seguido de la mezcla combinada de MZ 2%-FN 0.5% (6.4%), por lo que se consideran como un material de buena calidad y compacidad según las especificaciones de la red DURAR.

7.7.- Consideraciones sobre las discusiones anteriores.

Si se considera que el Nopal, *Opuntia ficus-indica*, de la familia de las Cactáceas, contiene cristales del mineral Weddelita (oxalato cálcico hidratado), como en las Cactáceas endémicas del Istmo de Tehuantepec, en las cuales mediante DRX se mostró que las tres especies sintetizan este biomineral Weddelita, en el cual, mediante análisis elemental con EDX, se cuantificó la presencia de Calcio en una alta proporción, en relación a otros elementos (Si, Fe, Mg, Mn, Na, Cl); al respecto es posible que la presencia del Calcio contribuya a la densificación de la matriz cementicia de las mezclas base cemento Portland, lo que contribuiría al

aumento en las prestaciones mecánicas estudiadas de éstas (compresión, tensión, flexión).

Generalmente cuando en la construcción se tienen requerimientos de concretos de altas prestaciones mecánicas y de durabilidad, se diseñan las mezclas con bajas relaciones agua/cemento, se trata de aumentar la cantidad del cementante y necesariamente se recurre, entonces, a utilizar aditivos fluidificantes, para poder tener colados adecuados en obra. Así mismo se curan las mezclas, ya sea adicionando agua a las mismas o impidiendo que se deshidraten, sobre todo a edades tempranas. En el empleo del Nopal y del Almidón de Maíz, estas adiciones también actúan como agentes retenedores iniciales (absorción) de agua, lo cual implica que se tenga la incorporación de un curado interno en las mezclas, actuando como materiales depositarios de reservas de agua al interior de las mezclas, liberándose el agua lentamente (desorción), con lo cual, se origina que el proceso de hidratación -reacción química entre cemento y agua- continúe realizándose con alta intensidad, al convertirse el agua absorbida por agua de reacción, colaborando así al incremento de la resistencia mecánica de morteros y concretos. El curado por incorporación de agua desde el exterior puede no ser suficiente en concretos altamente densos, al disminuir éstos su porosidad.

El mucílago de nopal es también un lubricante entre los agregados de las mezclas, provocando una mejor fluidez en las mismas al momento del colado.

Por los azúcares que contiene el nopal se tienen tiempos de fraguado mayores en las mezclas adicionadas con él; se tienen así menores contracciones por retracción al disminuir la velocidad de la hidratación, con la consecuente disminución de grietas, aumentando la durabilidad. Se dice que el azúcar retrasa la velocidad de hidratación ya que sus partículas recubren de forma coloidal a las partículas de cemento evitando que se agrupen y formen la pasta que fragua con rapidez. Otra teoría sugiere que el azúcar reacciona con el aluminio y el calcio, formando complejos insolubles que interfieren en el proceso de endurecimiento

disminuyendo la cantidad de aluminio y calcio que pueden reaccionar con el agua. Sería deseable producir pectinas de nopal, para comercializar el nopal en polvo para mezclarlo con agua y generar un mucílago con capacidad de gelificar, que actúe como adición en las mezclas de mortero y concreto base cemento Portland, siendo la pectina una fibra natural que se encuentra en las paredes celulares del nopal, que funciona como espesante natural. En investigaciones realizadas en Ecuador se encontró que la pectina del nopal representa el 0.60% del tejido fresco. La adición de Nopal deshidratado disminuye la trabajabilidad de concretos y morteros ya que aparentemente coagulan el agua de mezclado. Lo mismo sucede con el Almidón.

Numerosas investigaciones reportan la presencia de cristales en el tejido dérmico de las catáceas. *Cephalocereus apicicephalum*, *C. nizandensis* y *C. totolapensis* son cactáceas endémicas del Istmo de Tehuantepec, que presentan abundantes cristales prismáticos en la epidermis. Las inclusiones minerales se han registrado como oxalato de calcio debido a la alta birrefringencia que los distingue de otras inclusiones minerales. Los oxalatos de calcio son cristales iónicos casi insolubles en agua; son compuestos químicos que en algunas plantas nocivas forma cristales con forma de agujas llamados rafidios, su fórmula es: CaC_2O_4 ó $\text{Ca}(\text{COO})_2$.

Las fuentes minerales son la Whewellita (monohidrato conocido de algunas capas de carbón), la Weddellita (dihidrato) y un muy raro trihidrato llamado Caoxita.

Bárceñas-Argüello M.L. et al estudiaron las tres cactáceas antes mencionadas. El análisis de DRX mostró que las tres especies sintetizan Weddellita; mediante el MEB se observó una gran diversidad en sus formas, predominando las esféricas. El análisis coN EDX detectó diferentes concentraciones de Calcio de entre el 90.4% y el 93.4%, así como cantidades significativas de elementos como Si, Mg, K, Cl y Fe. La presencia de Weddellita es compartida con especies de *Opuntia*. Otros autores han registrado que *C. apicicephalum* tenía cristales de oxalato de calcio monohidratado (Whewellita).

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

8.1. Efecto del Mucílago de Nopal OFI en materiales base CP para la construcción.

Se considera que la adición de Mucílago de Nopal al agua de mezclado para elaborar mezclas base cemento Portland, para la construcción, es favorable para mejorar y/o modificar varias características de estos materiales básicos:

- Tiende a aumentar la resistencia mecánica a la compresión, tensión, flexión desde edades medias, desde los 90 días y hasta los 300 días monitoreados.
- Disminuye la resistencia mecánica a edades tempranas, tendiendo a incrementarla a partir de los 90 días.
- Aumenta la resistividad eléctrica (RE) a partir de edades medias, desde los 90 días.
- Aumenta la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) a partir de edades medias.
- Aumenta la adherencia en morteros a sustratos de concreto a 180 días.
- Tiende a disminuir la porosidad total, a partir de edades medias.
- Tiende a aumentar la densidad relativa, a partir de edades medias.
- Aumentan los tiempos de fraguado tanto inicial como final.
- Tiende a aumentar la resistencia al congelamiento-deshielo.
- Contribuye a disminuir la cantidad de aire atrapado, tendiéndose a tener mezclas con menor fricción entre agregados.
- Contribuye a disminuir la velocidad de penetración de iones despasivantes (cloruros y sulfatos) y de CO₂, a partir de edades medias y tardías.
- Tiende a aumentar la impermeabilidad.
- Retiene agua de mezclado provocando un curado interno.
- Contribuye a que los agregados permanezcan en su lugar y no se precipiten por la acción de la gravedad, al actual como un espesante el mucílago, debido a la viscosidad y tensión superficial del mucílago de nopal.

8.2. Efecto de la Fibra de Nopal OFI en mezclas de concretos y morteros base CP.

La adición de Mucílago de Nopal para elaborar mezclas de mortero o concreto base cemento Portland, para la construcción, se considera adecuada para mejorar y/o modificar varias características de estos materiales para la construcción:

- Disminuye la huella de carbono al sustituir CP por fibra de nopal.
- Densifica la matriz cementicia, a partir de edades medias, desde los 90 días.
- Incrementa los tiempos de Fraguado Final.
- Tiende a incrementar la Resistividad Eléctrica, a partir de edades medias.
- Contribuye a disminuir la velocidad del frente de carbonatación, a partir de edades medias y tardías.
- Tiende a disminuir la absorción capilar.
- Tiende a disminuir la porosidad total a edades tardías
- Mantiene un comportamiento de resistencia mecánica similar al concreto sin adición
- Su inclusión tiende a aumentar la adherencia con sustratos de concreto, a partir de edades de 180 días.
- Ayuda a mejorar la durabilidad en pruebas de ataque por sulfato de sodio, disminuyendo el riesgo por corrosión.
- Disminuye el riesgo por penetración de cloruros.

8.3. Efecto de la Fécula de Almidón de Maíz MZ más Fibra de Nopal OFI en mezclas de mortero base CP.

La adición de Almidón de Maíz MZ en fécula más fibra de Nopal para elaborar mezclas base cemento Portland, para la construcción, se considera adecuada para mejorar y/o modificar varias características de estos materiales:

- Tiende a aumenta la impermeabilidad, a partir de edades medias, desde los 90 días.
- Incrementa el fraguado final
- Aumenta la Resistencia a la Compresión a 150 días
- Aumenta la adherencia, a partir de edades medias, desde los 90 días.
- Contribuye a presentar menor tenencia a permeabilidad de cloruros.
- Aumenta marginalmente los valores de resistencia mecánica
- Disminuye ligeramente la velocidad del frente de carbonatación

Consideraciones finales.

En la industria de la construcción se han generado innumerables avances tecnológicos para mejorar su calidad y durabilidad así como disminuir las materias primas artificiales y cambiarlas por materiales naturales que no afecten el medio ambiente y disminuyan el efecto invernadero. Entre las mejoras es tratar de utilizar

materiales que proporcionen sustentabilidad, que en su producción no requieran el consumo de energía excesivo y la disminución de emisiones de CO₂ hacia el medio ambiente. Esto implica crear materiales de construcción cuya vida útil llegue a valores de 100 años. Para ello se necesita que los materiales sean durables a la acción del medio ambiente, sobre todo en aquellos en donde la agresividad es alta, como el caso de ambientes marinos, urbanos, industriales o una combinación de éstos. Así se propone el uso de nopal para mejorar la durabilidad de materiales de construcción base cemento Portland CP, en sus dos principales presentaciones: deshidratado (fibra) o coloide (mucílago), así como el almidón de maíz en polvo (fécula) en combinación con la fibra de nopal. Se ha encontrado así que estos biomateriales tienden a aumentar la durabilidad de materiales de construcción base CP, en dos formas: la primera es disminuyendo la permeabilidad de materiales porosos como las lechadas, morteros y concretos base CP a la acción de agua, gases, iones de cloruros y sulfatos. La segunda es funcionando como un inhibidor de corrosión para los metales que se embeben en materiales porosos como las lechadas, morteros y concretos base CP, especialmente acero de refuerzo y presfuerzo. Existen varios procedimientos para hacer que los materiales de construcción base CP sean más durables. Todos ellos están relacionados con la disminución de la porosidad de los mismos, lo que trata de hacerlos menos permeables al transporte de sustancias líquidas o gases dentro de estos materiales. Los análisis químicos e industriales del líquido del nopal comúnmente llamado "mucílago" indican que contiene gran cantidad de pectina y varios azúcares (Cárdenas et al., 1998; Goycoolea y Cárdenas, 2003). El conocimiento total del comportamiento del mucílago del nopal en materiales base CP no es aún del todo desconocido. Por ejemplo en pastas de cemento disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión (Chandra, 1998). Del trabajo de investigación realizado, se puede determinar que las adiciones de nopal deshidratado incrementan la resistencia a la compresión del mortero si se mantiene la relación agua/cemento constante (Martínez, 2005). Por el contrario, al buscar una misma maniobrabilidad del mortero cambiando la relación agua/cemento de la

mezcla, se pudo observar que aunque se necesitaba más contenido de agua en las mezclas con mayor contenido de nopal deshidratado, la resistencia a la compresión obtenida a edades tempranas fue menor que los controles (sin adición de nopal), pero conforme las edades eran mayores (>120días) la resistencia de estos morteros con nopal alcanzaba valores similares a los controles a las mismas edades tardías. También se evaluaron las propiedades físicas de materiales base CP con nopal deshidratado, comparándolos con los morteros convencionales de cemento. No fue mucha la diferencia en cuanto a mejoras en las propiedades físicas de los morteros con diferentes concentraciones de nopal a edades menores de 120 días de haberse fabricado. Y esto se debió a que los morteros fueron fabricados con diferentes cantidades de cemento, al ir disminuyendo el cemento conforme aumentaba la cantidad de nopal deshidratado adicionado. Aun así, estas propiedades como la de resistividad eléctrica húmeda o la de porosidad capilar fueron mejorando a edades 200 días de fabricación de los morteros. Es decir, mejoraron los morteros con adiciones de nopal deshidratado a edades tardías. Estas mejoras fueron marginales, como un 20% mejor desempeño los morteros con nopal que los morteros sin nopal. Se verificó el efecto de la inclusión de nopal deshidratado en morteros para ver su comportamiento en el transporte de cloruros dentro de este material. Los resultados mostraron que los morteros con cantidades pequeñas de nopal deshidratado (<2% por peso de cemento) tuvieron menor cantidad de cloruros absorbidos, en comparación con los controles. De esta manera se determinó que el nopal funciona también como un taponeador de poros en materiales base cemento y de esta manera aumenta el tiempo en que el cloruro pueda alcanzar el acero de refuerzo e inicie su corrosión.

Los morteros con las diferentes concentraciones de mucílago de nopal absorbían y desabsorbían más lentamente el agua, comparado con el mortero control. Esto demostró que el nopal en forma coloidal funciona mejor como una barrera impermeable contra el transporte de agua que como funcionó el nopal deshidratado.

Es claro observar que todos los parámetros evaluados en las pruebas físicas no destructivas de resistividad eléctrica (RE), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos y porosidad efectiva fueron mejores los morteros con mucílago de nopal que el mortero control: mayores valores de RE y UPV; menores valores de vacíos y poros capilares.

La prueba mecánica por excelencia para caracterizar morteros es la de compresión. Una vez terminadas las pruebas físicas, descritas anteriormente, se continuó con la prueba destructiva de resistencia a la compresión. Se pudo observar que hubo un incremento en la resistencia mecánica a la compresión de los morteros con adición de mucílago de nopal, en relación a la obtenida por el mortero control sin esta adición. También se observó que esta resistencia se incrementó al paso del tiempo, por lo que demuestra que el mucílago de nopal no se degrada con el tiempo si está mezclada en materiales base CP como el mortero estudiado. Aprovechando que la prueba de resistencia a la compresión es de carácter destructivo, se realizó la prueba de profundidad de carbonatación, siguiendo metodología conocida a base de un indicador húmedo (Durar, 2002). Para calcular la velocidad de penetración del CO₂ (o constante K_{CO2} de carbonatación) en los morteros estudiados, se utiliza la ecuación de la raíz cuadrada del tiempo. De los resultados se concluye que el mucílago de nopal también disminuye el transporte de CO₂ dentro de materiales base cemento, incrementando así la vida útil de este material.

La propuesta que se hace en este trabajo consiste en usar productos de nopal, tanto deshidratado, en fibra, como coloidal (mucílago), así como almidón de maíz (fécula) combinada con fibra de nopal, en la mejora de la durabilidad de los materiales de construcción, concluyéndose que la inclusión de estos biopolímeros pueden funcionar para:

- 1.- Mejorar las propiedades de materiales base cemento Portland (lechada, grout, mortero, concreto) al disminuir los porcentajes de poros vacíos o poros

capilares que transportan líquidos y gases dentro de estos materiales. Estos vacíos son llenados por los mismos productos de reacción entre el cemento y el nopal.

2.- Disminuir el ingreso de agentes agresivos como el ion cloruro y el gas dióxido de carbono o azufre, y los sulfatos provenientes del medio ambiente de exposición.

3.- Funcionar como un inhibidor de corrosión del acero de refuerzo en materiales base cemento Portland (lechada, grout, mortero, concreto).

Pero el uso en estas aplicaciones es aún más prometedor por la producción a nivel industrial que se tiene en todo el mundo los materiales de construcción y en especial el cemento Portland. En México la producción de cemento es del orden de 40 millones de toneladas de al año. Si se considera usar en promedio un porcentaje de mucílago de nopal del 2% en un 25% de las construcciones fabricada con CP, y sabiendo que el mucilago representa un 10% del peso de un cladodio, entonces se necesitarían 2 millones de toneladas de cladodios de nopal para abastecer la producción total solo en México. Esto rebasaría la producción total nacional que actualmente se tiene en casi cinco veces, y se promovería la producción en el campo de esta planta nacional en todo el país, generando fuentes de trabajo y financiamiento que nuestro país necesita.

Se espera que este trabajo sea un grano de arena, para contribuir a que el concreto, una de las más sorprendentes creaciones del hombre y que ha cambiado la faz de la tierra, sea más durable, sustentable y ambientalmente amigable.

Bibliografía

- A.M. Neville, J. B. (1998). *Tecnología del concreto*. México: Trillas.
- AASHTO-T-259. (2001). *Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration*. AASHTO.
- Acha Palomares, A. (2009). *Efecto del mucílago de cactus opuntia adicionado en morteros de cal, en la absorción capilar por el método de fagerlund*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Alvarado Alcaraz, N. d. (2010). *Influencia de la Morfología de Pétreos: Volcánicos, Triturados y Cantos Rodados; Correlacionando Matemáticamente los Módulos de Elasticidad Estático y Dinámico en Cilindros de Concreto de 10 cm x 20 cm*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- ARQHYS. (23 de Noviembre de 2012). *Cemento tipo portland*. Obtenido de ARQHYS.com: <http://www.arqhys.com/arquitectura/cemento-tipo-portland.html>
- Arreola Sánchez, M. (2013). *Actividad Puzolánica de Materiales (Sustitutos Parciales del Cemento), para mejorar la Durabilidad de Morteros para reparación y/o construcción de Estructuras de Concreto*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres. Morelia: UMSNH. Recuperado el 2 de Noviembre de 2016
- Ashassi-Sorkhabi, M. M. (2004). Investigation of inhibition effect of some amino acids against steel corrosion in HCl solution. *Applied Surface Science*, 225(1-4), 176-185.
- ASTM C 109 M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. EE. UU.
- ASTM C 109M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Estados Unidos de America.
- ASTM C109. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken PA, EE:UU: ASTM.

ASTM C1202. (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C128. (2004). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C1583. (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)*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C192/C192M. (2016). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. México: ASTM.

ASTM C348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C490. (2011). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C597. (2009). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C666. (2015). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C702. (2003). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.

ASTM C88-13, S. T. (s.f.). *ASTM International. Helping our world work better*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C88.htm>

ASTM-C-117. (1987). *Materials Finer 75 (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. ASTM.

- ASTM-C-128. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM.
- ASTM-C270. (2014). Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. *ASTM International*, 9-10.
- Bentur Arnor, D. S. (1997). *Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice* (Primera ed.). Taylor And Francis Group.
- Bernabé R.C. (Febrero de 2012). Adiciones minerales de alta temperatura a morteros como modificadores de comportamiento físico-mecánico. Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 22 de Septiembre de 2018
- Bernabé Reyes, C. (2015). *Evaluación de morteros de cementos sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Bishop M.H., y. F. (1998). A consideration of the Ethnobotany of Nopal (*opuntia* spp) and Conservation implications. *WAAC Annual Meeting, Western Association of Art Conservation*. Recuperado el 24 de Junio de 2018
- Bocca Latte, L. (20 de Noviembre de 2015). Il Vesuvio, il vulcano più famoso al mondo. Italia. Recuperado el 13 de Noviembre de 2016, de <http://www.hotel-villamedici.com/vesuvio-vulcano-piu-famoso-al-mondo/>
- BS-4027. (1996). *Specification for sulfate-resisting Portland cement*. British Standards.
- Calleja, J., & Del Olmo, C. (1971). La cal libre de los cementos y la expansión en autoclave. *Consejo Superior de Invetigaciones Científicas*, 25-29.
- Callister W.D., J. (2002). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (S. L. Universidad de Utah, Ed.) Salt Lake City, E.E. U.U.: Reverté S.A.
- Cámara Nacional del Cemento. (2016). *Procesos de Producción*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2016, de <http://canacem.org.mx/produccion-y-consumo/>
- Cárdenas, A. A. (1998). On the possible role of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar Performance in the Protection of Historical Buildings. (A. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Ed.) *Jurnal of the Professional Association for Cactus Development*.

- Castro B. P. et al, C. R. (1998). *Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, Inspección, Vida útil y Reparaciones* (Primera ed.). (IMCYC, Ed.) Instituto Mexicano del cemento y el concreto A.C.
- Cazalla Vázquez, O. (2002). *Morteros de Cal. Aplicación en el Patrimonio Histórico*. Universidad de Granada: Departamento de Mineralogía y Petrología.
- Celis-Mendoza, C. (2007). *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas*. Tesis de licenciatura, dirigida por el Dr. Andrés .a Torres Acosta, Querétaro. Recuperado el 24 de Junio de 2018
- Cervantes, B. W. (2006). *Aditivos y adiciones minerales para el concreto*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el 27 de Julio de 2018, de cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3159
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *INGENIERÍA REVISTA ACADÉMICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN*, 39-46.
- Chandra S, E. L. (Enero de 1998). Use of cactus in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(1), 41-51.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0008.8846\(97\)00254-8](https://doi.org/10.1016/S0008.8846(97)00254-8)
- Christianson S.A. de C.V. (2015). *Ficha Técnica de CRISOTAN R-5*. CDMX: Christianso S.A. de C.V.
- como se citó en Gardi, 1. (1999). *Mucílago de nopal como reductor de retracción en concreto auto-consolidable*. Maceió, Alagoas, Brazil: 54° Congresso Brasileiro do Concreto.
- Del Valle Moreno Angélica, T. P. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. (I. M. Transporte, Ed.) Sanfandila, Querétaro. Recuperado el 20 de JUNIO de 2018
- Durán-Herrera, A., Fajardo-San Miguel, G., Valdez-Tamez, P., & Juárez-Alvarado, C. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de cemento pórtland y ceniza volante. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 39 - 49.

- El-Etre, A. (2003). Inhibition of aluminium corrosion using Opuntia extract. *Corrosion Science*, 45(11), 2485-2495.
- Federación Interamericana del Cemento. (2013). *Informe Estadístico*. FICEM. Bogotá: FICEM. Recuperado el 10 de Noviembre de 2016, de http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- García Favela, B. (2013). *MUCÍLAGO DE NOPAL (Opuntia spp.) SOBRE PROPIEDADES MICROMORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DE SUELO EN TRIGO*. Montecillo, Texcoco, Edo. de México: Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Genescá, J. Á. (1999). *Más allá de la herrumbre*. México, D.F.: Fondo de cultura económica.
- Glosario Técnico. (24 de Febrero de 2016). *AMADA MIYACHI AMERICA*. Obtenido de AMADA MIYACHI AMERICA: <http://spanish.amadamiyachi.com/glossary/glosselectricalresistivity>
- González Castro, E. (2016). *Mezcla de Concreto Hidráulico con Ceniza de Bagazo de Caña como Sustituto del Cemento: Evaluación de las Propiedades Físico-Mecánicas y la Durabilidad*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- González Cuevas, O. R. (1977). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. México, Distrito Federal, México: Limusa. Recuperado el 27 de Julio de 2018
- Goycoolea, F. y. (2003). Pectins from opuntia spp: A short Review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*(5), 17.
- Guy , A. (1980). *Deterioro de los materiales*. México: Mc Graw Hill.
- Guzmán Torres, J. A. (2014). *Concreto de alta durabilidad y desempeño en infraestructura*. Morelia: UMSNH. Recuperado el 2 de Noviembre de 2016
- Hernández E.F. et al, H. P. (30 de Octubre de 2017). Influencia del mucílago de nopal y extracto de algas cafés en el grado de hidratación de pastas de Cemento Portland Ordinario. (U. N. Ingeniería, Ed.) *NEXO Revista científica*, 73-83. doi:<http://dx.doi.org/10.5377/nexo.v30i2.5526>

- Hernández-Zaragoza, J. y. (2003). Use of Nopal in the Construction Industry. *Proceedings IX Mexican and VII International Congress on Knowledge and Use of Nopal*, 286.
- HOLCIM. (2015). *Proceso de fabricación del cemento*. HOLCIM-Apasco. Cuajimalpa, CDMX: HOLCIM. Recuperado el 10 de Noviembre de 2016, de <http://www.holcim.es/editorials/proceso-de-fabricacion.html>
- Howland, J., & Martín, A. (2013). Study about the capillary absorption and the sorptivity of concretes. *Materiales de Construcción*, vol. 63, 515 - 527.
- IMCYC. (2006). Los aditivos para concreto. *TECNOLOGÍA*, 32-38.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- J.J., H., & A. R., M. (2013). *Study about the capillary absorption and sorptivity of concretes with cuban limestone aggregates*. La Habana, cuba: Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE).
- Jacobo Jacobo, S. (2014). *Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanocilice y almidón*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Kessler R.J., R. P. (1997). Cathodic protection using Zinc Sheet anodes and an ion conductive Gel Adhesive. *NACE Corrosion* .
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarase, W., & Tanesi, J. (2004). *Producción del Cemento Portland*. Skokie, Illinois, EE.UU: Diseño y Control de Mezclas de Concreto .
- López Celis, R., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M., Martínez Molina, W., Ariza Aguilar, L. E., . . . Valdez Salas, B. (2006). *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*. Sanfdila, Querétaro, México: Publicación Técnica No. 292.
- López Regalado, F. (2016). *Densificación de matrices cementicias a base de adiciones orgánicas*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Madrigal Valencia, J. A. (2013). *Evaluación del desempeño de un aditivo antiaglomerante en las propiedades físico-química-mecánicas de un*

concreto premezclado elaborado con 5 arenas de la región de Puruándiro, México. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

- Martínez Molina, W. A. (2008). Comportamiento mecánico de morteros de cal apagada artesanalmente, adicionados con mucílago de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales. *Revista de la Construcción*, 93-101.
- Martínez, R. (2005). *Adiciones de nopal y sábila deshidratado en mortero.* Querétaro. Recuperado el 24 de Junio de 2018
- Medina O.S. (Diciembre de 2011). Diseño, elaboración y evaluación de un reubrimiento geopolimérico para aumentar la durabilidad del concreto utilizado en las vías terrestres, sometido a intemperismo acelerado. Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 22 de Septiembre de 2018
- Medina Olvera. S. (11 de agosto de 2009). Análisis electroquímico de geopolímeros tipo inorgánico-orgánico utilizados como recubrimientos para disminuir la corrosión en estructuras de concreto de resistencia media, reforzado con varillas de acero. Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 22 de Septiembre de 2018
- Mendoza-Escobedo, O. H.-C. (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. (I. d. UNAM, Ed.) *Ingeniería, investigación y tecnología*, Vol VII, 57-70. Recuperado el 28 de Marzo de 2018
- Moreno, E. G. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. Vol 8, No 2, 117-. 8(2), 117-130.
- NACE, I. (2016). *G2MT Laboratories*. Obtenido de <http://www.g2mtlabs.com/corrosion/cost-of-corrosion/>
- NACE, I. (8 de Marzo de 2016). *Inspectioneering*, . Obtenido de NACE study estimates global cost of corrosion at \$2.5 trillion annually: <https://inspectioneering.com/news/2016-03-08/5202/nace-study-estimates-global-cost-of-corrosion-at-25-trillion-ann>
- Navarro Sánchez L.M. et al, M. M. (2007). *Análisis de Materiales* (Tercera Edición ed.). (F. d. Civil, Ed.) Morelia: Morevallado Editores S.A. de C.V. Recuperado el 27 de Julio de 2018

- Neville, A. (2010). *Concrete Technology (Permeability and Durability)*. England: Pearson.
- Neville, A. M. (1998). *Tecnología del concreto*. Trillas.
- Neville, A., & Brooks, J. (1999). *“Tecnología del concreto”*. México: Pearson.
- NMX-061-C-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes hidráulicos*. México: ONNCCE.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2015). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTO PARA ALBAÑILERÍA (MORTERO)-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-075-ONNCCE. (2006). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Sanidad por Medio de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio*. México: ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agua para concreto - Especificaciones*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-152-ONNCCE. (2010). *Método de prueba para la determinación del peso específico de cementantes hidráulicos*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: ONNCCE.
- NMX-C-160-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto*. CDMX: ONNCCE.

- NMX-C-160-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado en Obra de Especímenes de Concreto*. México: ONNCCE.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro*. México: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-480-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Geotecnia - Equivalente de Arena de Agregados Finos - Método de Ensayo*. Querétaro: ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción - Resistividad eléctrica del concreto hidráulico - especificaciones y métodos de ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NTCCM. (2017). caservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/743.pdf. Recuperado el 10 de Junio de 2018
- Orozco, J. (1998). *Cálculo de las pérdidas económicas por corrosión en el estado de Yucatán y su impacto en el PIB estatal*. Mérida: CINVESTAV.
- Páez Moreno, D. F., Leal Moreno, V. E., & Restrepo Burgos, M. (2009). Influence of Freeze-That Cycles in the Resistance Concrete (Tunja Case). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* vol. 8, no. 15, 95 - 110.
- Pérez Castellanos, N. A. (2009). Formulación de un mortero de inyección con mucílago de nopal para restauración de pintura mural. *Asesoría científica, Seminario-Taller de Pintura Mural ECRO*, 16-20.
- .
- Ramírez Arellanes, S., Cano Barrita, P., Julián Caballero, F., & Gómez Yáñez, C. (2012). *Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*. Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.
- Ramírez et al. (2012). *Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal*

como aditivo natural. Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.

Raymond, C. (2007). *Química* (Novena ed.). México: McGrawHill.

RED DURAR (Durabilidad de la Armadura). (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (Tercera Edición ed.). México: CYTED.

Ricardo Orozco Cruz, E. A. (2007). *Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico*. Recuperado el 28 de Marzo de 2018, de <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num2/articulos/corrosion/>

Rodríguez González, et al. (2011). *Optimización de la extracción del mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica)*. Morelia, Michoacán, México: XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.

Sáenz, C. S. (mayo de 2004). *Opuntia spp. mucilage's: A functional component with industrial perspectives*. *Journal of Arid Environments*, 57(3), 275-290. doi:10.1016/S0140-1963(3)00106-X

Saleh R. M. Ismail, A. a. (1983). Corrosion Inhibition by Naturally Occurring Substances III: The effect of aqueous extracts of some leaves and fruit-peels on the corrosion of stel, Al, Zn, and Cu in acids. *British Corrosion Journal*, 17(3), 131-135.

Saravia Tasayco, P. L. (2010). *Agrupamientos productivos (CLUSTER) del nopal*. México: Contactopyme.

SCT. (2002). Materiales para mamposterías-Morteros. En SCT, *Características de los Materiales* (pág. 5). México.

SINAREFI. (10 de Diciembre de 2016). *Red Nopal*. Obtenido de Red Nopal: http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_nopal.html#cajalInformes

Steven H. Kostmatka, B. K. (2017). *Diseño y Control de mezclas de Concreto*. (P. C. Association, Ed.) Skokie, Illinois.

Torres A., A. A. (2016). *Corrosión en el Puerto de Progreso, Yucatán*. Ponencia magistral, IMT, Pachuca, Hidalgo. Recuperado el 9 de Noviembre de 2016

- Torres Acosta Andrés Antonio, R. R. (2006). *Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado con cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales* (Vol. 287). (I. M. Transporte, Ed.) Querétaro.
- Torres Acosta, et al. (2010). *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas*. Sanfandila, Querétaro, México: Publicación Técnica No. 326.
- Torres Acosta, A. A. (2001). *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad, Publicación Técnica 181*. (I. m. Transporte, Ed.) Sanfandila., Querétaro, México. Recuperado el 21 de Junio de 2018
- Torres Acosta, A. A., Celis Martínez, C. E., Martínez Molina, W., & Lomelí González, M. G. (2010). *Mejora de la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cetáceas*. Querétaro, México: Publicación Técnica #326, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- Torres Acosta, A. M. (2005). El efecto de la corrosión y su efecto en la infraestructura del concreto en México. (C. d. México, Ed.) *Ingeniería Civil*(431), 30.
- Torres-Acosta, A. (2007). Opuntia-Ficus-Indica (Nopal) mucilage as steel corrosion inhibitor in alkaline media. *Journal of Applied Electrochemistry*, 37(7), 835-841.
- Torres-Acosta, A. M.-M. (11-15 de Noviembre de 2005). Mortar improvements from Opuntia Ficus Indica (Nopal) and Aloe Vera Additions. (IAC-NOCMAT, Ed.) *Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction*. Recuperado el 24 de Junio de 2018
- Torres-Acosta, A. M.-M. (3 a 7 de Abril de 2005). Nopal and Aloe Vera additions in Concrete: Electrochemical Behavior of the Reinforcing Steel. *NACE CORROSION*(05269).
- Torres-Acosta, A. M.-M.-G. (2012). State of the Art on Cactus Additions in Alkaline Media a Corrosion Inibitors, in Corosion of Reinforced Concrete. *International Journal of Corrosion*, 212(ID 646142), 9.

- Torres-Montes, L. R.-G. (2005). Analysis of Stucco Floors from the Citadel of the archeological zone of Tetihuacan, Mexico. (M. R. Society, Ed.) *Materials Research Society*(006.1).
- Valencia, G., Mejía de Gutierrez, R., Barrera, J., & Delvasto, S. (2012). Durability and Corrosion Study of reinforced blended mortars with tuff and sugar cane bagasse ash. *Revista de la Construcción vol. 11 no. 2*, 112 - 122.
- Valenzuela, A. (2015). Las patentes de hormigón armado. Del gran negocio al gran desarrollo tecnológico. Los antecedentes del movimiento moderno. (Dialnet, Ed.) *Rita: Revista Indexada de Textos Académicos, Fundación Dialnet*, 134-135. Recuperado el 28 de marzo de 2018
- Vidaud Quintana, E., & Vidaud Quintana, I. (2016). ULTRASONIDO: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *TECNOLOGÍA*, 32 - 35.
- Villalobos Onchard, J. (15 de Diciembre de 2016). *Departamento de Geología UNIVERSIDAD DE CHILE*. Obtenido de Departamento de Geología UNIVERSIDAD DE CHILE: <http://www.geologia.uchile.cl/las-rocas-y-sus-procesos-de-formacion>
- Villanueva Guzmán, M. A. (2016). *Cerámicos Base Cemento Portland con Substituciones Parciales de Materiales Orgánicos Para Incremento de la Durabilidad*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Y. Kulshreshtha, E. E. (15 de Noviembre de 2017). CrRncrete: A corn stached based building material. (Elsevier, Ed.) *corn stached building*, 154, 411-423.

Adiciones verdes a materiales base cemento Portland, para aumentar la durabilidad en obras civiles.
