



**UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis Profesional
**“EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y POR CRITERIOS DE
DURABILIDAD DE MATRICES CEMENTICIAS CON
SUSTITUCIONES ORGÁNICAS”**

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

VICTOR HUGO BLANCAS HERRERA

Asesor:

M. A. Ing. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Coasesores:

M.I.T. CIPRIANO BERNABÉ REYES

M.I.T. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

Morelia Michoacán, México, Mayo de 2017



DEDICATORIAS

A **mis amados padres** Roberto Blancas Cervantes y María Guadalupe Herrera Guízar, que son los que me dieron la vida y a quien les debo todo lo que he logrado y realizado en mi andar. Son ustedes mi más grande inspiración y mi ejemplo a seguir porque son las personas más inteligentes y luchadoras de este mundo, porque han sabido llevarnos de la mano a mí y a mis hermanos por el buen camino de la vida. La responsabilidad y dedicación que le he dado al estudio desde pequeño se los debo a ustedes porque si en la vida existen dos personas tan trabajadoras y responsables para todo esos son ustedes. ¡Los amo padres míos!

A **mis hermanos** Laura Gabriela Blancas Herrera, José Roberto Blancas Herrera y Sandra Paulina Blancas Herrera; porque son ustedes de quien he recibido un gran cariño y amor durante toda mi vida. Beto eres y serás ese hermano respetable que siempre estará ahí para apoyarme en todo, créeme que en la vida soy dichoso de tener un hermano como tu porque para a todos lados hemos ido juntos, te amo “bro”. Laura eres esa hermana mayor a la que siempre veré con un gran respeto eres esa flor intocable que amo y que amaré toda la vida. Sandra por siempre mi hermana chiquita, espero poder estar ahí para ti siempre; échale ganas a todo y cumple cada uno de tus sueños, te amo “Sandrita”.

En general a toda mi familia, a mis abuelos, tíos, primos, a mi novia y amigos cercanos porque a todos les tengo un gran cariño y respeto.

AGRADECIMIENTOS

A Dios primeramente por permitirme llegar hasta donde estoy junto a la gente que quiero y que amo.

A mis padres por dar todo de ellos para que yo terminara una licenciatura y como dicen a “superarme para bien mío y de toda mi familia”, por apoyarme en las buenas y malas. Gracias papá por siempre ayudarme desde que yo era un niño en mis tareas, en estar al pendiente de mí para que siempre fuera responsable tanto yo como mis hermanos, por motivarnos a hacer mejores todos los días. Gracias mamá porque siempre has estado ahí amaneciendo temprano para mí, porque tú siempre te preocupaste porque yo saliera limpio de nuestra casa y con algo de desayuno en mi estómago, gracias



por enseñarme la forma de soñar, luchar y alcanzar lo que uno se propone. Papá y mamá son mi ejemplo a seguir en la vida y en verdad los admiro mucho a los dos ¡son mi más grande inspiración!

A mis hermanos por siempre ayudarme a superarme porque juntos hemos hecho un gran equipo más allá que cada quien tiene rumbos distintos.

A mi novia Lupita por esa paciencia que siempre ha tenido conmigo en tantos días pesados que pase durante gran parte de la licenciatura y hasta ahora. Gracias por todos tus ánimos que siempre me has echado y por ese apoyo incondicional que siempre he recibido de tu parte. ¡Muchas gracias amor mío!

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme ser parte de ella. A la Facultad de Ingeniería Civil, por formarme como Ingeniero Civil y darme las bases necesarias para serlo. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales, Corrosión y a toda persona que lo constituye, por brindarme las instalaciones, material y equipo necesario para desarrollar con éxito la presente investigación.

A mi asesor de tesis: M. A. Ing. Wilfrido Martínez Molina, por su gran apoyo para la realización de la presente investigación, así como por el apoyo económico. Gracias ingeniero por la disponibilidad que siempre mostró ante nuestro trabajo, por confiar en mí como estudiante y como persona, porque es un ejemplo a seguir como maestro y como ser humano. Le agradezco el invitarme a poder ser parte de la sección de Resistencia de Materiales, porque definitivamente es ahí donde más he aprendido de todo y de todos. Gracias Maestro Wilfrido por reconocer mi esfuerzo y dedicación hacia el estudio, porque a nivel académico nunca nadie lo había hecho.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por confiar en mí desde que tuve la fortuna de tomar clase con usted, por darme la oportunidad de incorporarme al laboratorio para dar mi servicio social y por creer en todo el grupo de tesis para realizar la presente investigación. Gracias Dra. Elia por los muchos consejos que me ha dado y gracias por tanta atención puesta en mí.

Al Dr. Hugo Luis Chávez, por sus consejos y asesorías dadas con el fin de obtener mejores resultados en las pruebas realizadas. A la M. C. Cindy Lara Gómez por darnos la confianza de ingresar en días y horas no laborales en las secciones de Resistencia de materiales y Corrosión para realizar los ensayos requeridos por la investigación.



A mis coasesores de tesis: M. I. T. Sandra del Carmen Arguello Hernández y M. I. T. Cipriano Bernabé Reyes, porque sin ustedes nunca hubiera sido posible realizar toda esta investigación. Por tantas y tantas horas puestas en nosotros sin esperar nada a cambio, por guiarnos en cada una de las tantas pruebas realizadas, por defender siempre nuestro trabajo y por brindarnos desde un principio su amistad incondicional. Maestra Sandra y maestro Berna los admiro y les tengo un gran respeto como seres humanos que son, siempre les seré agradecido ¡Muchas gracias!

A mi compañero y amigo inseparable Fidel Bautista Leon que desde el primer día de clase de la licenciatura siempre ha estado ahí apoyándome en todo. Gracias por tanta ayuda amigo en cada una de las pruebas que pasamos dentro y fuera del laboratorio, sí que hicimos una muy buena dupla de trabajo.

A mis amigos de la licenciatura; Imer, Fidel, Gabriel, Juan Carlos, Luis, Julio y Sóstenes. Con los cuales conformamos un enorme grupo de trabajo porque aunque fuera de noche siempre veíamos la forma de poder trabajar juntos y siempre de la misma manera. De todos ustedes aprendí mucho y por ustedes logre tanto. Gracias por esa amistad que espero perdure siempre.

A mis compañeros de tesis: Fabián López Regalado, Sixto Alberto Pineda Pineda, Giovani Arciga, Osiel Morales, Fidel Bautista Leon y Ariel Villanueva Guzmán. A los demás tesisistas del laboratorio: Amiraís Flores Ponce, Bersain De León Ambrocio, Óscar Cuellar Martínez, Jesús Daniel Rodríguez Palominos, Job Daniel Álvarez, Tranquilino, Luis Colín Velázquez.

A los jóvenes de los veranos Nicolaitas (2015 y 2016) por su ayuda y tiempo en algunas actividades de esta investigación.

A mis compañeros de trabajo de la sección de resistencia de materiales: Isaías, Noel, Marco Mondragón, Don Chuy, Wilbert, Laura y Mayra; porque nunca dejaron de echarme porras para que yo terminara este presente trabajo, con la famosa y recordada frase: “¿Y la tesis Blancas?”.

Les agradezco en general a todas las personas que siempre me han ayudado de alguna u otra forma para que logre cada una de mis metas siempre estaré enormemente agradecido con todos ustedes.



Índice de Contenido

DEDICATORIAS.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
JUSTIFICACIÓN.....	xvii
OBJETIVOS	xxiii
HIPÓTESIS.....	xxiii
1. Introducción	1
2. Marco teórico.....	2
2.1 Antecedentes	2
2.1.1 Del uso del cemento, el mortero y las sustituciones de material orgánico	2
2.2 Cemento	10
2.2.1 Proceso de fabricación del cemento Portland	10
2.2.2 Clasificación y tipos de cemento	16
2.2.3. Propiedades del cemento.....	17
2.2.3.1. Propiedades físicas del cemento.....	21
2.2.3.2. Propiedades mecánicas del cemento.....	22
2.2.4. Especificaciones.....	23
2.2.5. CPC 30R – RS, Cemento empleado en la investigación	25
2.3. Agregados pétreos (cuerpo interno del concreto y mortero).....	26
2.3.1. Origen de los agregados pétreos.....	27
2.3.2. Propiedades de los agregados.....	29
2.3.2.1. Propiedades químicas	29
2.3.2.2. Propiedades físicas	29
2.3.2.3. Propiedades mecánicas.....	30
2.3.3. Agregado proveniente de “Joyitas”, empleado para la Investigación	31
2.4. Agua (elemento fundamental para la reacción química del cemento).....	33
2.4.1. Características del agua.....	33
2.4.2. Especificaciones del uso del agua en morteros.....	33
2.4.3. Agua utilizada en la investigación	35
2.5. Aditivos.....	35



2.5.1.	Tipos y Usos.....	36
2.5.2.	Aditivo empleado en la Investigación	37
2.6.	Mortero (material objeto de estudio).....	38
2.6.1.	Tipos y usos del mortero	39
2.7.	Materiales en estudio como sustitución parcial del cemento	40
2.7.1.	Fibra de Cactus Opuntia blanco deshidratada	40
2.7.1.1.	Características	40
2.7.1.2.	Antecedentes	41
2.7.1.3.	Tipos y usos de la fibra de nopal dentro de la construcción	41
2.7.1.4.	Fibra de nopal utilizada en la investigación	43
2.7.2.	Fécula de Maíz o Almidón	44
2.7.2.1.	Características	44
2.7.2.2.	Antecedentes	44
2.7.2.3.	Tipos y usos del almidón dentro de la construcción	45
2.7.2.4.	Fécula de maíz utilizada en la investigación.....	46
3.	Metodología	47
3.1.	Caracterización de materiales y propiedades físico-mecánicas de los morteros	47
3.1.1.	Material cementante: Cemento y sustituciones de material orgánico.....	47
3.1.1.1.	Densidad del cemento.....	47
3.1.1.2.	Consistencia del material cementante.....	49
3.1.1.3.	Fraguado del material cementante.....	54
3.1.2.	Material pétreo fino: Arena	56
3.1.2.1.	Cuarteo del agregado pétreo.	57
3.1.2.2.	Humedad actual en arenas.....	60
3.1.2.3.	Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.	62
3.1.2.4.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS).	64
3.1.2.5.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).....	66
3.1.2.6.	Granulometría en el agregado fino (arena).....	67
3.1.2.7.	Colorimetría en arenas.....	73
3.1.2.8.	Sedimentación en arenas.....	76
3.1.2.9.	Material que pasa por la malla No. 200	78
3.1.2.10.	Terrones de arcilla.....	80



3.1.2.11.	Densidad de la arena.....	83
3.1.2.12.	Equivalente de arena.....	85
3.1.3.	Agua.....	88
3.1.4.	Aditivo	89
3.2.	Pruebas realizadas al mortero fresco.....	91
3.2.1.	Fluidez	92
3.2.2.	pH.	95
3.2.3.	Temperatura.....	96
3.2.4.	Elaboración de especímenes.....	96
3.2.4.1.	Cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm.....	98
3.2.4.2.	Briquetas.	101
3.2.4.3.	Cilindros de 5 cm \varnothing x 10 cm h.	103
3.2.4.4.	Prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.	104
3.2.5.	Losas de 1 m ² x 7 cm para pruebas de adherencia.	106
3.2.6.	Colocación de pastas de mortero en estudio para la prueba de adherencia.	110
3.2.7.	Cuantificación de los especímenes elaborados.....	110
3.2.8.	Curado de los especímenes.....	111
3.3.	Pruebas realizadas al mortero endurecido.	112
3.3.1.	Pruebas no destructivas.	112
3.3.1.1.	Densidad.....	113
3.3.1.2.	Gravedad específica (densidad relativa).	115
3.3.1.3.	Resistividad eléctrica.....	117
3.3.1.4.	Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).....	120
3.3.2.	Pruebas destructivas.	124
3.3.2.1.	Resistencia a la compresión simple.....	125
3.3.2.2.	Resistencia a la tensión por flexión en prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.	127
3.3.2.3.	Resistencia a la tensión directa en briquetas.....	131
3.3.2.4.	Resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de mortero (tensión indirecta en cilindros de 5 cm \varnothing x 10 cm h).	133
3.3.2.5.	Resistencia a la tensión por adherencia.....	136
3.3.3.	Pruebas por durabilidad en el mortero.....	140
3.3.3.1.	Ataque por sulfatos.	141
3.3.3.2.	Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros.	146



3.3.3.3.	Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.	151
3.3.3.4.	Estimación de la profundidad de carbonatación.	156
3.3.3.5.	Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.	159
3.3.3.6.	Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos).	161
4.	Resultados y discusiones.	166
4.1.	Caracterización de materiales y propiedades físico-mecánicas de los morteros.	167
4.1.1.	Material cementante: Cemento y sustituciones de material orgánico.....	167
4.1.1.1.	Densidad del cemento.....	167
4.1.1.2.	Consistencia del material cementante.....	168
4.1.1.3.	Fraguado del material cementante.....	168
4.1.2.	Material pétreo: Arena.....	169
4.1.2.1.	Cuarteo del agregado pétreo.	169
4.1.2.2.	Humedad actual en arenas.....	169
4.1.2.3.	Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.	169
4.1.2.4.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS).	170
4.1.2.5.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).....	170
4.1.2.6.	Granulometría en el agregado fino (arena).....	171
4.1.2.7.	Colorimetría en arenas.....	174
4.1.2.8.	Sedimentación en arenas.....	174
4.1.2.9.	Material que pasa por la malla No. 200.	175
4.1.2.10.	Terrones de arcilla.....	175
4.1.2.11.	Densidad de la arena.....	176
4.1.2.12.	Equivalente de arena.....	176
4.1.2.13.	Resumen de resultados de la caracterización de la arena “Joyitas”.	177
4.1.3.	Estudio del agua utilizada en la investigación.....	178
4.2.	Pruebas realizadas al mortero fresco.....	179
4.2.1.	Fluidez.	179
4.2.2.	pH.	179
4.2.3.	Elaboración de especímenes.....	180
4.2.4.	Curado de los especímenes.....	180
4.3.	Pruebas realizadas al mortero endurecido.	180
4.3.1.	Pruebas no destructivas.	180



4.3.1.1.	Densidad.....	180
4.3.1.2.	Gravedad específica (densidad relativa).....	182
4.3.1.3.	Resistividad eléctrica.....	183
4.3.1.4.	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	187
4.3.2.	Pruebas destructivas.....	190
4.3.2.1.	Resistencia a la compresión simple.....	190
4.3.2.2.	Resistencia a la tensión por flexión en prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.	193
4.3.2.3.	Resistencia a la tensión directa en briquetas.....	194
4.3.2.4.	Resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de mortero (tensión indirecta en cilindros de 5 cm Ø x 10 cm h).	196
4.3.2.5.	Correlación de resultados de resistencias mecánicas de los especímenes elaborados.....	197
4.3.2.6.	Resistencia a la tensión por adherencia.....	198
4.3.3.	Pruebas por durabilidad.....	200
4.3.3.1.	Ataque por sulfatos.....	200
4.3.3.2.	Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros.....	207
4.3.3.3.	Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.....	208
4.3.3.4.	Estimación de la profundidad de carbonatación.....	210
4.3.3.5.	Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.....	212
4.3.3.6.	Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos).....	218
4.4.	Resumen de resultados.....	219
5.	Conclusiones.....	222
6.	Bibliografía.....	227

Índice de Tablas

Tabla 1.	Producción y consumo de cemento en los últimos años en México. (CANACEM, 2016).....	xvii
Tabla 2.	Principales entidades productoras de Nopal (SIAP, 2016).....	xxi
Tabla 3.	Principales entidades productoras de maíz (SIAP, 2016).....	xxii
Tabla 2. 1.	Clasificación de los cementos de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014.....	16
Tabla 2. 2.	Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)....	17
Tabla 2. 3.	Abreviaturas de los óxidos del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).....	18
Tabla 2. 4.	Componentes principales del cemento Portland (Shetty, 2005).....	18
Tabla 2. 5.	Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).....	19
Tabla 2. 6.	Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	23
Tabla 2. 7.	Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	23



Tabla 2. 8. Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	24
Tabla 2. 9. Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	24
Tabla 2. 10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	24
Tabla 2. 11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).....	34
Tabla 2. 12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua (Instituto del Concreto, 1997).....	35
Tabla 3. 1. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos.	56
Tabla 3. 2. Tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de granulometría.	71
Tabla 3. 3. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.	72
Tabla 3. 4. Límites máximos de carbón y lignito en el agregado fino (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).....	73
Tabla 3. 5. Materiales finos que pasan por la criba 0.075 mm (malla No.200) (NMX-C-111-ONNCCE, 2014). 80	
Tabla 3. 6. Dosificación del CRISOTAN R-5 en polvo para una mezcla de concreto (Christianson, S.A. de C.V.).	89
Tabla 3. 7. Dosificación de las mezclas en estudio (V. H. Blancas Herrera, 2017).	96
Tabla 3. 8. Contenido de la mezcla de concreto.	107
Tabla 3. 9. Cantidad de especímenes requeridos por cada tipo de mortero en estudio.	111
Tabla 3. 10. Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto (NMX-C-514-ONNCCE, 2016).	119
Tabla 3. 11. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 2000).	123
Tabla 3. 12. Normativa correspondiente a los ensayos de durabilidad.....	141
Tabla 3. 13. Tipo de permeabilidad por ataque de cloruros (ASTM C 1202,2012).	151
Tabla 3. 14. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la porosidad total (CYTED-DURAR, 1998).	166
Tabla 4. 1. Resultado de la densidad del cemento utilizado.....	167
Tabla 4. 2. Resultados de la consistencia normal del material cementante.	168
Tabla 4. 3. Resultados de tiempo de fraguado.	168
Tabla 4. 4. Resultados del contenido total de Humedad actual evaporado por secado.	169
Tabla 4. 5. Resultados del porcentaje de humedad de absorción en la arena.....	170
Tabla 4. 6. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de la arena.....	170
Tabla 4. 7. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de la arena.	171
Tabla 4. 8. Módulo de Finura de la muestra 1.	171
Tabla 4. 9. Módulo de Finura de la muestra 2.	171
Tabla 4. 10. Módulo de Finura de la muestra 3.	172
Tabla 4. 11. Módulo de Finura promedio.	172
Tabla 4. 12. Resultados de la prueba de colorimetría.	174
Tabla 4. 13. Porcentaje de material fino que contiene la arena.....	175
Tabla 4. 14. Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena.	176
Tabla 4. 15. Resultados de la densidad de la arena.	176
Tabla 4. 16. Resultados de equivalente de arena.	177
Tabla 4. 17. Resumen de resultados de la caracterización de la arena “Joyitas”.....	177



Tabla 4. 18. Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero.	178
Tabla 4. 19. Resultados de la prueba de fluidez para las distintas mezclas en estudio.....	179
Tabla 4. 20. Correlación de resultados de resistencias mecánicas de los especímenes elaborados.....	198
Tabla 4. 21. Resultados cualitativos de la resistencia a la tensión por adherencia.....	198
Tabla 4. 22. Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 180 días.	207
Tabla 4. 23. Resultados de extrapolación para determinar el número de ciclos cuando RE=0.....	210
Tabla 4. 24. Serie de datos para el primer espécimen cubico de la mezcla FN 0.5%.	212
Tabla 4. 25. Resultados de Porosidad Total en cubos a la edad de 90 y 180 días.	218
Tabla 4. 26. Resumen de resultados de pruebas realizadas al mortero fresco.	219
Tabla 4. 27. Resumen de resultado de pruebas no destructivas.....	219
Tabla 4. 28. Resumen de resultados de pruebas destructivas.	220
Tabla 4. 29. Resumen de resultados de pruebas por durabilidad.	221

Índice de Figuras

Figura 2. 1. Etapas en la producción tradicional del cemento portland [Diseño y Control de Mezclas de Concreto].....	11
Figura 2. 2. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco [“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”].	14
Figura 2. 3. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997).	20
Figura 2. 4. Resistencia de los componentes principales del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).	20
Figura 2. 5. Arena de banco "Joyitas", carretera Morelia - Quiroga entrada a San Bernabé, Michoacán (V. H. Blancas Herrera, 2017).	32
Figura 2. 6. Fluidificante Crisotan R-5 (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	37
Figura 2. 7. Materiales que componen habitualmente a un mortero.	38
Figura 2. 8. Fibra de nopal utilizada en la investigación, grado alimenticio. (V. H. Blancas Herrera, 2017)....	43
Figura 2. 9. Almidón o fécula de maíz utilizada en la investigación, grado alimenticio. (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	47
Figura 3. 1. Aparato de Vicat utilizado para realizar las pruebas de consistencia normal.	50
Figura 3. 2. Formación del cráter de cemento (V.H. Blancas Herrera, 2017).	51
Figura 3. 3. Caída del agua sobre el cráter de cemento (V. H. Blancas Herrera, 2017).	52
Figura 3. 4. Muestra de cemento humedecida (V. H. Blancas Herrera, 2017).	52
Figura 3. 5. Medición del tiempo de fraguado, fraguado inicial (V.H. Blancas Herrera, 2017).	55
Figura 3. 6. Cuarteo por divisor mecánico (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	58
Figura 3. 7. Cuarteo Manual (V. H. Blancas Herrera, 2017).	59
Figura 3. 8. Secado del material, para la obtención de la Humedad actual (V.H. Blancas Herrera, 2017)....	61
Figura 3. 9. Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico (V. H. Blancas Herrera, 2017).	63
Figura 3. 10. Caída libre del agregado (Arguello Hernández, 2012).	65
Figura 3. 11. Determinación de la masa del material en el recipiente (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	65
Figura 3. 12. Mallas colocadas en orden decreciente (V. H. Blancas Herrera, 2017).	69



Figura 3. 13. Empleo de la máquina Raf-tap para agitar la muestra (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	69
Figura 3. 14. Extracción del material retenido en cada una de las malla (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	70
Figura 3. 15. Material retenido en cada una de las mallas previamente pesado (V.H. Blancas Herrera, 2017).	70
Figura 3. 16. Límites de granulometría para morteros y concreto (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).....	72
Figura 3. 17. Elaboración de la solución de color normal. (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	74
Figura 3. 18. Vaciado del material dentro del biberón (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	75
Figura 3. 19. Muestras de arena después de 24 horas en reposo (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	75
Figura 3. 20 . Tabla colorimétrica. (V. H. Blancas Herrera, 2017).	76
Figura 3. 21. Incorporación del agregado al recipiente (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	77
Figura 3. 22. Muestras en reposo (V. H. Blancas Herrera, 2017).	77
Figura 3. 23. Lavado del material (V.H. Blancas Herrera, 2017).	79
Figura 3. 24. Desintegración de los terrones de arcilla. (V. H. Blancas Herrera, 2017).	82
Figura 3. 25. Preparación de la solución de trabajo (V. H. Blancas Herrera, 2017).	86
Figura 3. 26. Inyección de solución de trabajo a la probeta (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	87
Figura 3. 27. Reposo de las muestras (V. H. Blancas Herrera, 2017).	87
Figura 3. 28. Medición de la cantidad de aditivo requerida (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	90
Figura 3. 29. Incorporación del aditivo en el agua (V.H. Blancas Herrera, 2017).	91
Figura 3. 30. Elaboración de mezcla de mortero, partiendo de una relación a/c baja (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	93
Figura 3. 31. Compactación de la mezcla (V. H. Blancas Herrera, 2017).	93
Figura 3. 32. Expansión de la mezcla de forma manual, haciendo girar la manivela (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	94
Figura 3. 33. Medición del diámetro de la mezcla (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	94
Figura 3. 34. Papel indicador de pH (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	95
Figura 3. 35. Papel indicador puesto en contacto con el mortero (V.H. Blancas Herrera, 2017).	95
Figura 3. 36. Mezclado en cubetas de 19 litros (V. H. Blancas Herrera, 2017).	97
Figura 3. 37. Mezclado de la pasta de portero (V. H. Blancas Herrera).....	97
Figura 3. 38. Molde para elaboración de cubo (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	99
Figura 3. 39. Llenado de los moldes (V. H. Blancas Herrera, 2017).	99
Figura 3. 40. Forma de apisonar el cubo por capa consecutiva (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).....	100
Figura 3. 41. Enrazado del cubo (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	100
Figura 3. 42. Desmolde del cubo (V.H. Blancas Herrera, 2017).	100
Figura 3. 43. Etiquetado del cubo (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	101
Figura 3. 44. Molde para la fabricación de briquetas (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	101
Figura 3. 45. Llenado del molde (V. H. Blancas Herrera, 2017).	102
Figura 3. 46. Retiro del molde (V.H. Blancas Herrera, 2017).	102
Figura 3. 47. Fraguado de la mezcla en forma de briquetas (V. H. Blancas Herrera, 2017).	103
Figura 3. 48. Enrazado de los cilindros (V. H. Blancas Herrera, 2017).	104
Figura 3. 49. Llenado y apisonado de los prismas (V. H. Blancas Herrera, 2017).	105
Figura 3. 50. Enrazado de los prismas (V. H. Blancas Herrera, 2017).	105
Figura 3. 51. Preparación de la cimbra (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	107
Figura 3. 52. Colocación de malla electrosoldada. (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	108



Figura 3. 53. Vaciado y enrazado del concreto (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	109
Figura 3. 54. Colocación de capa de mortero (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	109
Figura 3. 55. Revestimiento en la losa de concreto (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	110
Figura 3. 56. Curado de especímenes (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	112
Figura 3. 57. Determinación de la densidad (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	114
Figura 3. 58. Espécimen sumergido con ayuda de la canastilla (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	116
Figura 3. 59. Identificación de la cara más plana del espécimen cubico (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	118
Figura 3. 60. Muestra sometida al “Resistómetro” (V.H. Blancas Herrera, 2017).....	118
Figura 3. 61. Relación entre resistencia a compresión y velocidad de pulso ultrasónico para pasta de cemento endurecido, mortero y concreto, en condición seca y húmeda (Tecnología del concreto, A.M. Neville).....	121
Figura 3. 62. Equipo comercial de ultrasonido (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	122
Figura 3. 63. Transmisión directa de prueba, para la obtención de la VPU (V.H. Blancas Herrera, 2017). ...	122
Figura 3. 64. Aplicación de la carga axial en el espécimen (V. H. Blancas Herrera).....	126
Figura 3. 65. Marca de crayola en los extremos del prisma para los apoyos (V. H. Blancas Herrera, 2017).	128
Figura 3. 66. Colocación del espécimen en la máquina universal de pruebas (V. H. Blancas Herrera, 2017).	129
Figura 3. 67. Aplicación de la carga sobre el espécimen (V. H. Blancas Herrera, 2017).	129
Figura 3. 68. Representación gráfica de la prueba de flexión estática, mediante un solo punto de carga (NMX-C-303-ONNCCE-2010).	130
Figura 3. 69. Resultados de la prueba de flexión estática. Tipo de ruptura al centro (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	131
Figura 3. 70. Briqueta sujeta por las mordazas de la máquina de prueba (V. H. Blancas Herrera, 2017).	132
Figura 3. 71. Aplicación de la carga hasta la falla de la muestra (V. H. Blancas Herrera, 2017).	132
Figura 3. 72. Resultados de la prueba de tensión directa en morteros (V. H. Blancas Herrera, 2017).	133
Figura 3. 73. Espécimen en la máquina de prueba (NMX-C-163-ONNCCE, 1997).	135
Figura 3. 74. Aplicación de la carga sobre el espécimen (V. H. Blancas Herrera, 2017).	135
Figura 3. 75. Resultado de la prueba de tensión indirecta, donde se presenta la falla (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	136
Figura 3. 76. Pegado de los discos de acero mediante el uso de epóxico (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	138
Figura 3. 77. Colocación del equipo Pull Off por encima del perno a tensionar (V. H. Blancas Herrera, 2017).	138
Figura 3. 78. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off (Arguello Hernández, 2012).	139
Figura 3. 79. Resultados de la prueba Pull Off (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	140
Figura 3. 80. Preparación de la solución de sulfato de sodio (V. H. Blancas Herrera, 2017).	143
Figura 3. 81. Colocación de las muestras en los recipientes con solución (V. H. Blancas Herrera, 2017).	144
Figura 3. 82. Extracción y aplicación de pruebas físico-mecánicas a las muestras (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	144
Figura 3. 83. Resultados de la prueba de ataque por sulfatos (V. H. Blancas Herrera, 2017).	145
Figura 3. 84. Discos de mortero para la prueba (V. H. Blancas Herrera, 2017).	148
Figura 3. 85. Obtención de vacío dentro del desecador (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	149
Figura 3. 86. Colocación del disco de mortero en las celdas de cloruros (V. H. Blancas Herrera, 2017).....	150
Figura 3. 87. Funcionamiento del equipo automatizado “Proove IT” (V. H. Blancas Herrera, 2017).	150



Figura 3. 88. Resultados de la permeabilidad rápida de cloruros (V. H. Blancas Herrera, 2017).	151
Figura 3. 89. Elaboración de especímenes prismáticos para la prueba de congelamiento y deshielo (V. H. Blancas Herrera, 2017).	153
Figura 3. 90. Registro de pruebas realizadas al espécimen (V. H. Blancas Herrera, 2017).	154
Figura 3. 91. Introducción de los especímenes en el recipiente con agua (V. H. Blancas Herrera, 2017).	154
Figura 3. 92. Proceso de deshielo, después de sacar los especímenes del enfriador (V. H. Blancas Herrera, 2017).	155
Figura 3. 93. Corte en la cara transversal de la muestra y colocación del indicador ácido-base (V. H. Blancas Herrera, 2017).	158
Figura 3. 94. Medición de la profundidad de carbonatación (V. H. Blancas Herrera, 2017).	158
Figura 3. 95. Secado de los especímenes hasta masa constante (V. H. Blancas Herrera, 2017).	164
Figura 4. 1. Gráfica de composición granulométrica de la arena de “Joyitas”.	173
Figura 4. 2. Comparación del color de las muestras con la tabla colorimétrica (V. H. Blancas Herrera, 2017).	174
Figura 4. 3. Resultados de la prueba de sedimentación (V. H. Blancas Herrera, 2017).	175
Figura 4. 4. Resultados del pH en el mortero fresco (V. H. Blancas Herrera, 2017).	179
Figura 4. 5. Resultados de densidad a edades tardías.	181
Figura 4. 6. Tendencia de resultados de densidad, por su edad de prueba.	181
Figura 4. 7. Resultados de gravedad específica a edades tardías.	182
Figura 4. 8. Tendencia de la gravedad específica, por su edad de prueba.	183
Figura 4. 9. Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cubos, a edades tardías.	184
Figura 4. 10. Tendencia de resistividad eléctrica en cubos, por su edad de prueba.	184
Figura 4. 11. Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cilindros, a edades tardías.	185
Figura 4. 12. Tendencia de resistividad eléctrica en cilindros, por su edad de prueba.	185
Figura 4. 13. Resultados de resistividad eléctrica (RE) en prismas, a edades tardías.	186
Figura 4. 14. Tendencia de resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba.	186
Figura 4. 15. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cubos, a edades tardías.	187
Figura 4. 16. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos, por su edad de prueba.	188
Figura 4. 17. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cilindros, a edades tardías.	188
Figura 4. 18. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros, por su edad de prueba.	189
Figura 4. 19. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en prismas, a edades tardías.	189
Figura 4. 20. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en prismas, por su edad de prueba.	190
Figura 4. 21. Resultados de compresión simple en cubos, a edades tardías.	191
Figura 4. 22. Tendencia de compresión simple en cubos, por su edad de prueba.	192
Figura 4. 23. Resultados de resistencia a la flexión en prismas, a edades tardías.	193
Figura 4. 24. Tendencia de resistencia a la flexión en prismas, por su edad de prueba.	194
Figura 4. 25. Resultados de resistencia a tensión directa en briquetas, a edades tardías.	195
Figura 4. 26. Tendencia de resistencia a tensión directa en briquetas, por su edad de prueba.	195
Figura 4. 27. Resultados de resistencia a tensión indirecta en cilindros, a edades tardías.	196
Figura 4. 28. Tendencia de resistencia a tensión indirecta en cilindros, por su edad de prueba.	197
Figura 4. 29. Resultados de resistencia a la tensión por adherencia a la edad de 120 y 180 días.	199
Figura 4. 30. Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.	200
Figura 4. 31. Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.	201



Figura 4. 32. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.	201
Figura 4. 33. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.	202
Figura 4. 34. Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.	202
Figura 4. 35. Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.	204
Figura 4. 36. Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.	204
Figura 4. 37. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.	205
Figura 4. 38. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.	205
Figura 4. 39. Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.	206
Figura 4. 40. Resultados de Resistividad Eléctrica (RE) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados.	208
Figura 4. 41. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados.	209
Figura 4. 42. Resultados de la profundidad de carbonatación en una proyección a 25 años.	211
Figura 4. 43. Prueba de absorción capilar para un espécimen cúbico de la mezcla FN 0.5%.	213
Figura 4. 44. Resultados de Sorción Capilar (s) a la edad de 90 y 180 días.	215
Figura 4. 45. Resultados de la resistencia a la penetración del agua (m) a la edad de 90 y 180 días.	216
Figura 4. 46. Resultados de absorción capilar (k) a la edad de 90 y 180 días.	217
Figura 4. 47. Resultados de Porosidad efectiva (ϵ_e) a la edad de 90 y 180 días.	217



RESUMEN

El presente estudio es una investigación sobre el uso de puzolanas de origen orgánico y/o natural, como sustitutos parciales del Cemento Portland (CP). Las puzolanas son materiales que al ser agregados al concreto/mortero tienden a llenar los poros, densificando la matriz e incrementando la durabilidad. El empleo de fibra de cactus *Opuntia* blanca o fibra de nopal (FN) y el almidón (fécula de maíz, MZ) como sustitutos de la masa total de cemento Portland en la elaboración de morteros, tiene como objetivo mejorar las propiedades físico – mecánicas, reducir la cantidad de cemento empleado y prevenir la acción de mecanismos que deterioran al concreto en ambientes extremos en su mayoría. Los dos materiales orgánicos, FN y MZ, son de origen comercial procesados de manera específica por el fabricante y llevados al laboratorio en condiciones óptimas de almacenaje. Los morteros fueron elaborados en cuatro distintas formas: cúbica, prismática, cilíndrica y en forma de “cacahuete” (briqueta); con arena extraída del banco de materiales llamado “Joyitas”, ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia - Quiroga en el acceso a la localidad de San Bernabé en Michoacán.

Se diseñaron 3 mezclas de mortero, de acuerdo a la norma ASTM-C-109/2002, con una relación agua/cemento = 0.68 e 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 de 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.

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 y de durabilidad prevaecientes en el mortero testigo.

Palabras clave: mortero, puzolanas, sustitución, durabilidad, densificación.



ABSTRACT

This study is an investigation on the use of pozzolans of organic and / or natural origin, as partial substitutes for Portland Cement (CP). Pozzolans are materials that when added to the concrete / mortar tend to fill the pores, densifying the matrix and increasing durability. The use of Opuntia white cactus fiber or nopal fiber (FN) and starch (maize starch, MZ) as substitutes for the total mass of Portland cement in the preparation of mortars, aims to improve the physical - mechanical properties, reduce the amount of cement used and prevent the action of mechanisms that deteriorate the concrete in extreme environments in its majority. The two organic materials, FN and MZ, are of commercial origin specifically processed by the manufacturer and brought to the laboratory under optimum storage conditions. The mortars were elaborated in four different geometric shapes: cubic, prismatic, cylindrical and "peanut" shape (briquette); with sand taken from the bank of materials called "Joyitas", located at km 28 of Morelia - Quiroga road near of the access to the town of San Bernabe in Michoacan.

Three mixtures of mortar were designed according to ASTM-C-109/2002, with a water / cement ratio = 0.68 and incorporating a superplasticizer additive to achieve optimum workability of the mixture. This mixtures were: control mortar (cement-sand-water), two mixtures with partial replacement of cement portland by nopal fiber (FN): 0.5 and 1.5% respectively and a mixture of 2% of starch with 0.5% of nopal fiber (MZ 2% - FN 0.5%). Specimens were tested at the age of 120, 150, 180 and 300 days; and subjected to non-destructive tests: density, specific gravity, electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and resonance frequency; Destructive tests: simple compression, direct tension, bending, indirect tension and adhesion stress; as well as durability tests: sulfate attack, carbonation, chlorides, freezing and thawing, capillary absorption and total porosity penetration. The results for durability tests were obtained at the age of 90 and 180 days.

The substitution of nopal fiber and starch densified significantly to the cementitious matrix, which resulted in the improvement of the physical-mechanical properties and durability prevailing in the control mortar.

Keywords: mortars, pozzolans, partial substitution, durability, densification.



JUSTIFICACIÓN

En la actualidad debido a los grandes avances nacionales tanto científicos como tecnológicos están encaminados a la generación de nuevos productos conjuntamente con el establecimiento de nuevos procesos que garanticen un desarrollo sustentable, los cuales involucran sin dejar duda alguna a todas las áreas del conocimiento y es por ello que en el área de la construcción es bien visto el estudio de materiales sustentables que puedan llevar a un buen desarrollo sustentable a nivel nacional e internacional en la actualidad.

El concreto es el material más utilizado en la construcción y es por ello que en el mundo existe un alto consumo de cemento Portland, el cual genera emisiones de CO₂ del orden de 0.6 a 0.8 por tonelada por tonelada de producción, por lo tanto es de máxima importancia que las empresas que se dedican a la producción de este material encuentren la manera de reducir el impacto ambiental que generan, una de ellas podría ser el mejoramiento en sus procesos de producción en planta y una segunda opción representa el empleo de materiales alternativos.

En México para el año de 2014 la producción nacional de cemento Portland alcanzó la cifra de 36.6 millones de toneladas, correspondientes a 294 kg/habitante de acuerdo a la tabla i que se presenta a continuación.

Tabla 1. Producción y consumo de cemento en los últimos años en México. (CANACEM, 2016).

Año	Producción	Consumo Nacional (Millones de ton)	Habitantes	Kg/Habitante
2010	34.5	33.9	112,550,697	301
2011	35.4	34.4	114,975,406	299
2012	36.2	34.6	116,901,761	295
2013	34.6	32.7	118,395,054	276
2014	36.6	35.2	119,713,203	294

El cemento Portland y el concreto son elementos insustituibles para la transición hacia una sociedad baja en carbono y hacia un futuro con materiales sustentables y más durables.

Producción del Cemento Portland según el Sistema GNR

El sistema GNR (Getting the Numbers Right) es hasta la fecha la base de datos con las más amplia cobertura de la industria del cemento a nivel mundial. Actualmente, los participantes GNR cubren el 21% de la producción mundial, con una alta representación (por encima del 70%) en Europa y América y más del 41% en la India.



En China, el resto de Asia y Medio Oriente, se están realizando esfuerzos para aumentar la cobertura como partes adicionales que se unen al esfuerzo. La región latinoamericana y el caribe (Centroamérica) es la que corresponde a los países FICEM con una cobertura casi del 70% de las plantas (González Castro, 2016).

México para el año de 2013 contaba con 4 compañías asociadas al sistema GNR que comprendía 29 plantas productoras de cemento. El sistema GNR proporciona cifras sobre la producción del clínker, cemento gris y emisiones de dióxido de carbono. En la figura i se muestra una comparativa de la producción del clínker en varios años.

Si se realiza una comparación de las figuras i y ii, se observa que la producción del clínker es menor con respecto la producción mundial de cemento gris y blanco, esto se debe a que el clínker es la materia prima para la producción pero no el único componente.

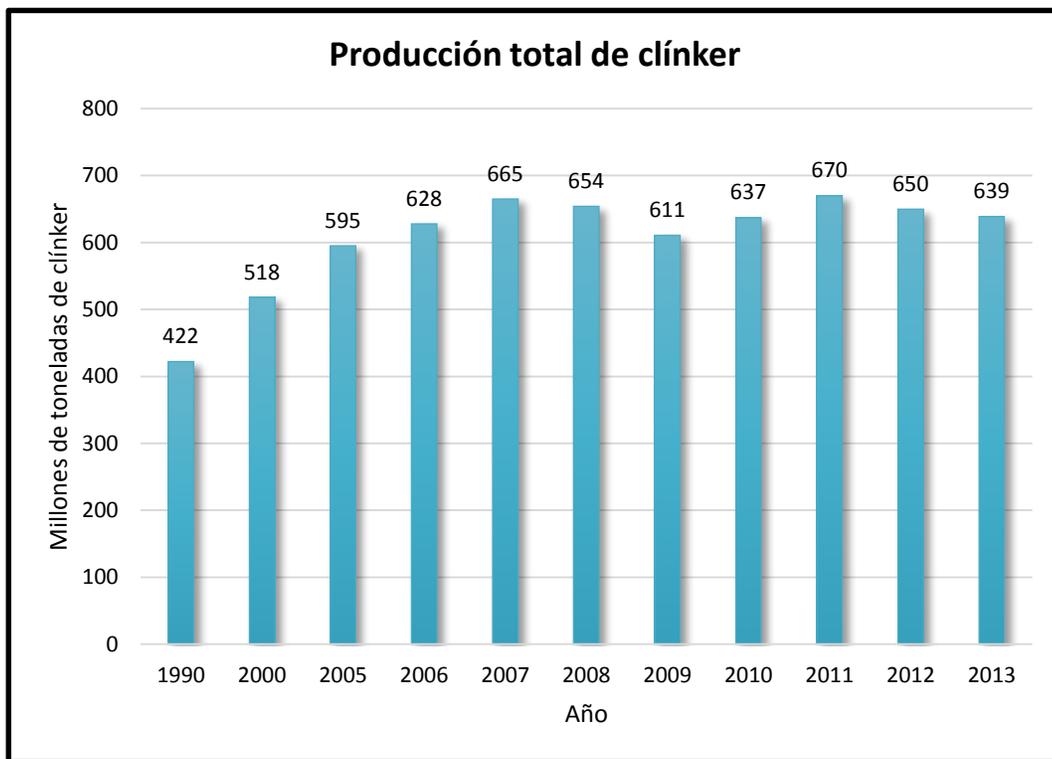


Figura i. Producción total del clínker para el año de 2013 (Sistema GNR).

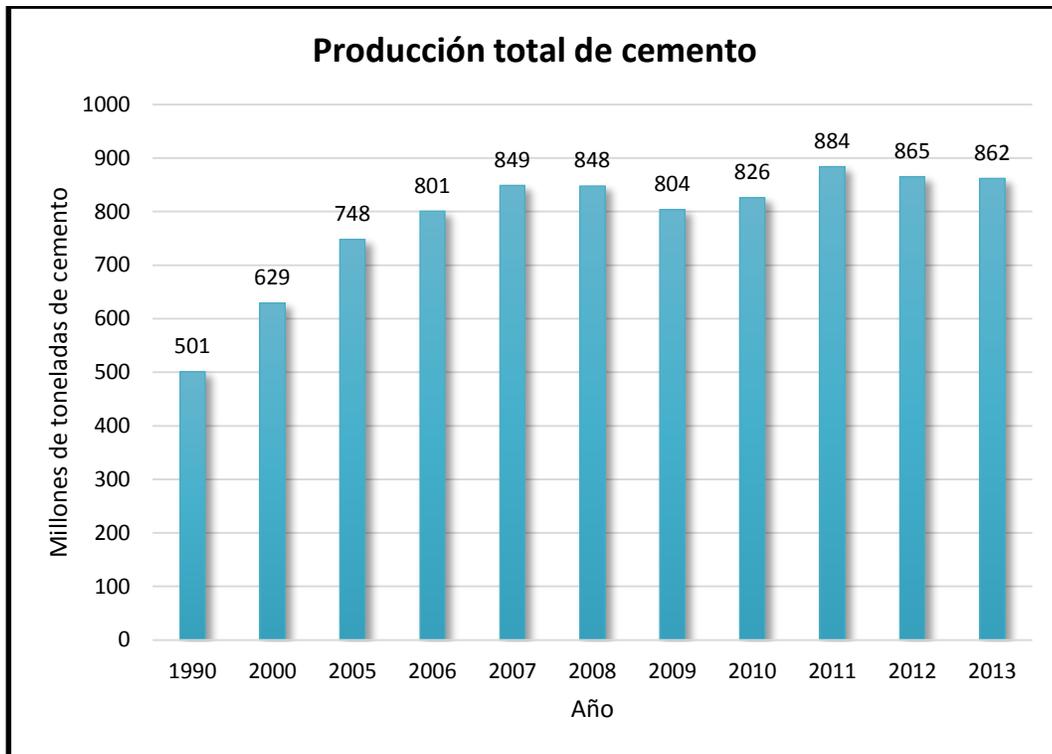


Figura ii. Producción total de cemento gris y cemento blanco para el año de 2013 (Sistema GNR).

En la figura iii se presenta las emisiones de CO₂ producidas durante los procesos de producción:

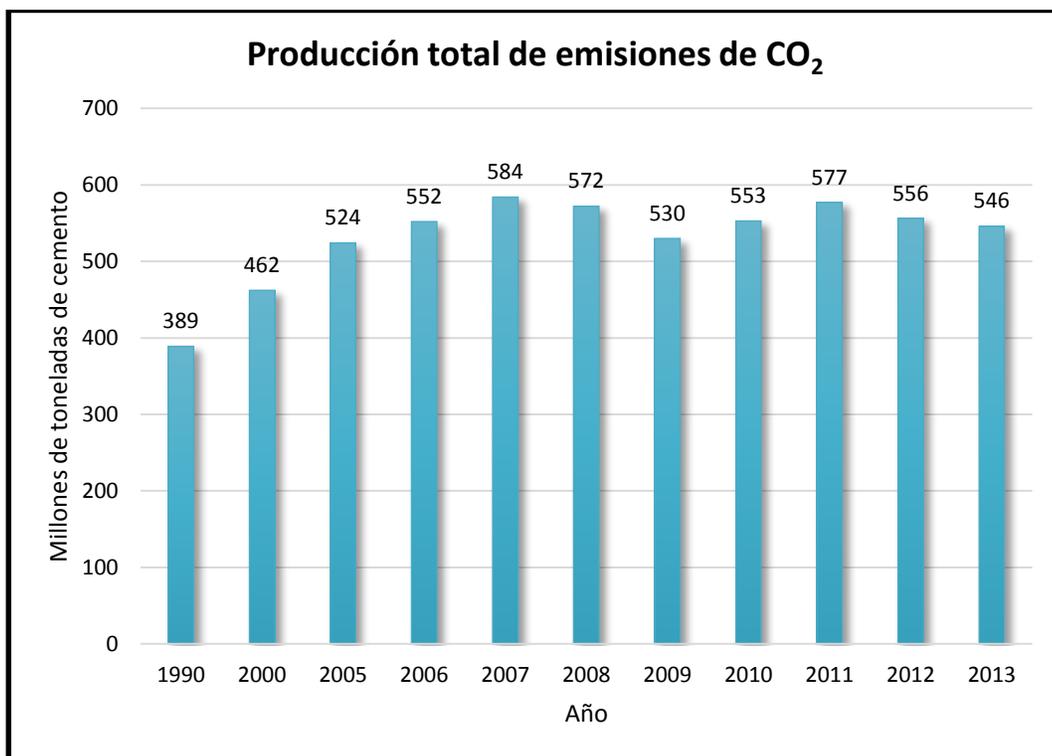


Figura iii. Total bruto de emisiones de CO₂ excluyendo el CO₂ de la generación de energía in.situ correspondientes a cemento gris y blanco, para el año 2013 (Sistema GNR).



La figura iv muestra la tendencia a la baja sobre la energía consumida en el proceso de fabricación del cemento. Con un panorama alentador a continuar los esfuerzos, se puede concluir con base en los gráficos mostrados que a pesar de que la producción de cemento en el mundo ha ido en aumento, las emisiones producidas y la energía utilizada cada vez es menor.

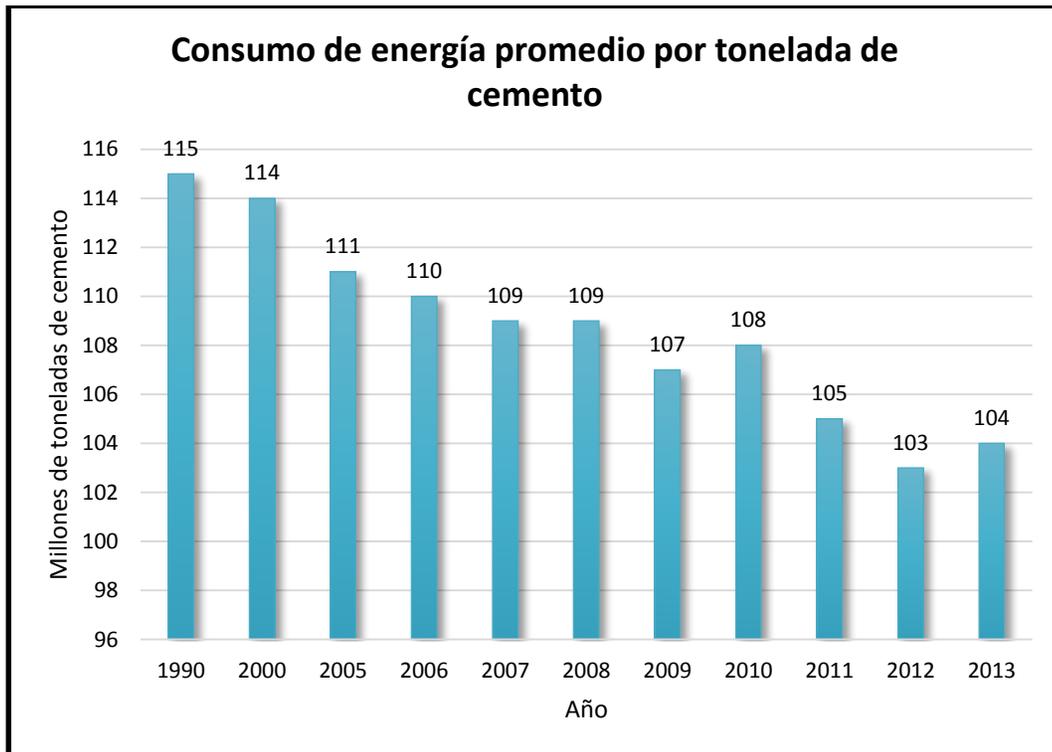


Figura iv. Consumo promedio de energía ponderado por tonelada de cemento (gris y blanco) (Sistema GNR).

La demanda de cemento se prevé que continúe aumentando en todo el mundo, en particular en las economías emergentes, donde es muy necesaria la construcción de viviendas y aumenta la infraestructura. Por lo tanto, la reducción de las emisiones de CO₂ procedentes de la producción de cemento es una tarea importante y urgente para el sector del cemento (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, 2014-2015).

Producción de Nopal en México

De acuerdo con cifras obtenidas del “Atlas Agroalimentario 2016” publicado por SAGARPA, en México para el año del 2015 se alcanzó una producción de 813 mil toneladas, mostrando una disminución de acuerdo a la producción de años anteriores (figura v). En el año 2012 la producción alcanzó las 857 mil toneladas de nopal en todo el país, siendo la de mayor volumen según registro.

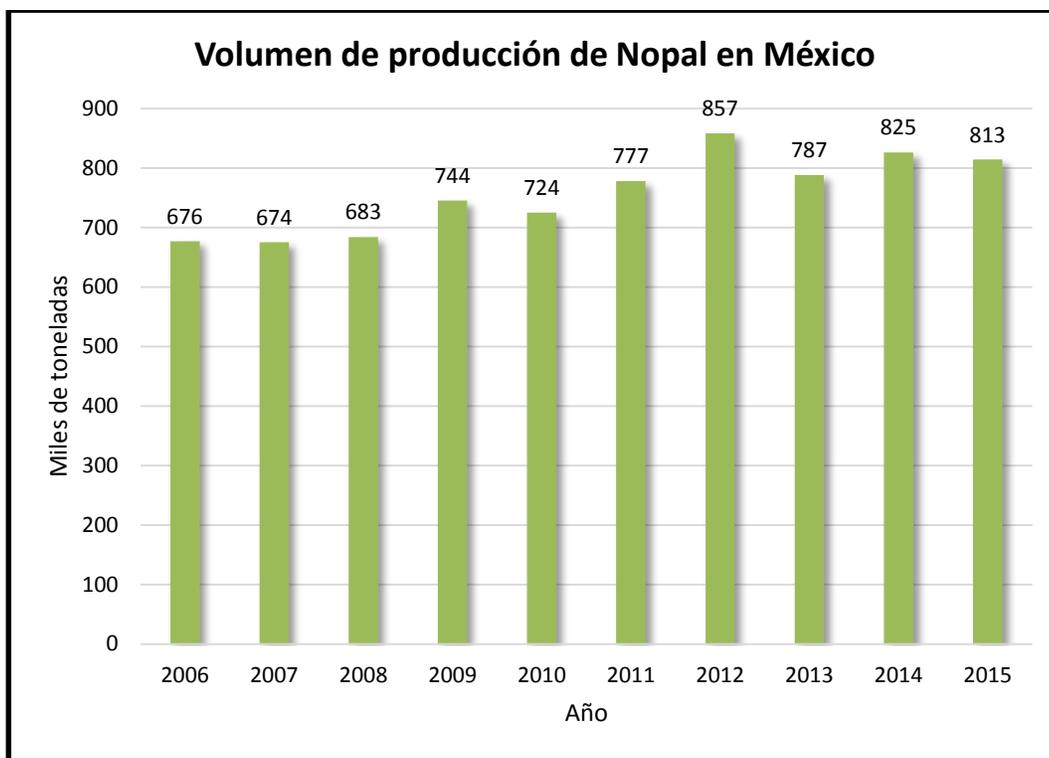


Figura v. Volumen de producción nacional de nopal en México (SIAP, 2016).

En la tabla ii se muestran las principales entidades productoras de nopal, cabe resaltar que el estado de Michoacán se encuentra dentro de las 10 entidades con mayor producción de nopal con 10,821 toneladas para el año de 2015.

Tabla 2. Principales entidades productoras de Nopal (SIAP, 2016).

Rank	Entidad federativa	Volumen (toneladas)
	Total nacional	812,705
1	Morelos	352,603
2	Ciudad de México	254,611
3	México	82,903
4	Puebla	25,143
5	Baja California	22,860
6	Tamaulipas	12,320
7	Jalisco	12,051
8	Michoacán	10,821
9	Zacatecas	10,281
10	Aguascalientes	8,286
	Resto	20,827

Producción de Maíz en México

El maíz de grano, es base de la dieta de la población mexicana, se siembra en todo el país, en 2015 la superficie con el cultivo fue mayor de 174 mil hectáreas respecto a las del año pasado (figura vi). El



cultivo de maíz requiere para un óptimo desarrollo de una temperatura cálida, mucho sol para el buen crecimiento y bastante agua, alrededor de cinco milímetros diarios.

Michoacán se encuentra dentro del top 10 de producción de maíz (tabla iii), con un volumen de producción de 1,721,658 toneladas de maíz para el último año registrado.

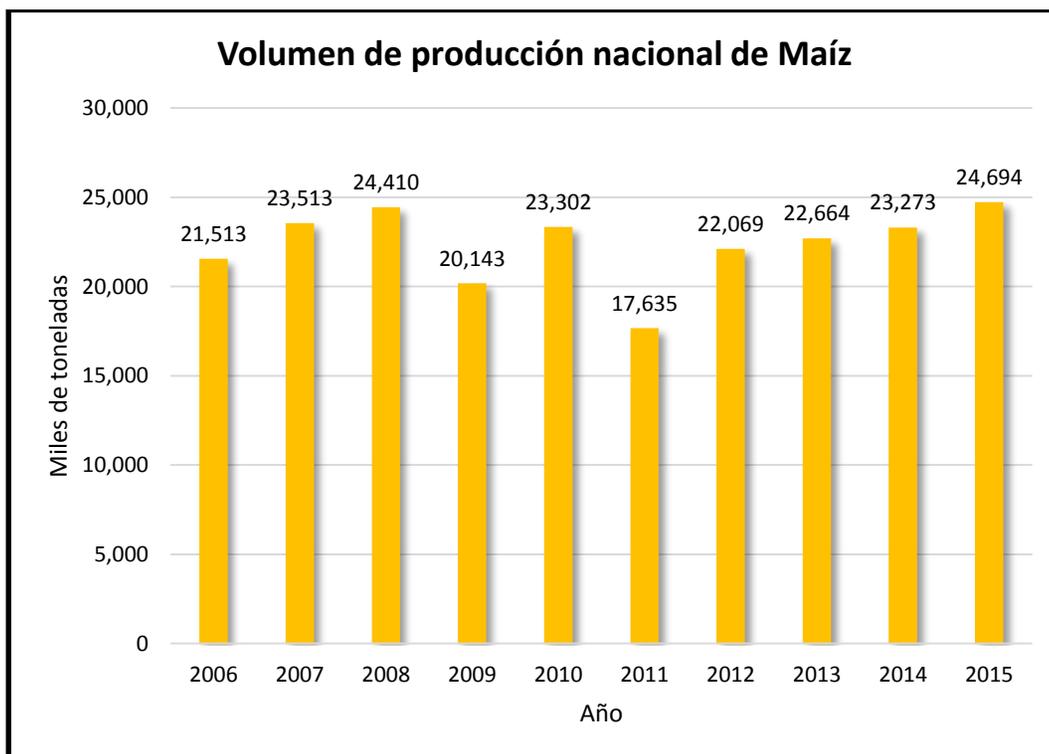


Figura vi. Volumen de producción nacional (SIAP, 2016).

Tabla 3. Principales entidades productoras de maíz (SIAP, 2016).

Rank	Entidad federativa	Volumen (toneladas)
	Total nacional	24,694,046
1	Sinaloa	5,380,042
2	Jalisco	3,338,766
3	México	2,036,339
4	Michoacán	1,721,658
5	Chihuahua	1,436,560
6	Guanajuato	1,361,922
7	Veracruz	1,212,089
8	Chiapas	1,067,994
9	Tamaulipas	1,007,931
10	Puebla	1,002,155
	Resto	5,128,590



OBJETIVOS

Objetivo General:

El objetivo general de la presente investigación es el de diseñar y elaborar mezclas de mortero de base cemento incorporando fibra de nopal (FN) y fécula de maíz (MZ) como sustituto parcial de cemento Portland (CP) en porcentajes óptimos analizados, para posteriormente evaluar su desempeño por resistencia mecánica y durabilidad.

De igual manera al reducir el consumo del cemento Portland se busca obtener un material de restauración o de recubrimiento para obras civiles de concreto reforzado para contrarrestar la degradación de las mismas producto del ataque de agentes agresivos, así como reducir la cantidad de carbono emitida por la producción del cemento.

Objetivos Específicos:

- Estudiar las propiedades y características físicas y mecánicas así como la resistencia que presentan por durabilidad de especímenes elaborados con materiales puzolánicos tales como la fibra de nopal y la fécula de maíz, comprándolos con la muestra testigo o control (T10) y presentar los resultados haciendo un análisis de ellos.
- Determinar qué tipo de material presenta un mejor comportamiento como sustituto parcial del cemento y el porcentaje más idóneo del mismo con respecto al peso del cemento.
- Determinar si es factible o no, el uso de dichos materiales puzolánicos en la elaboración de morteros, con el fin de incrementar su durabilidad y así disminuir la cantidad total de cemento que se utiliza en un mortero convencional.

HIPÓTESIS

La sustitución de materiales orgánicos como lo son la fibra de nopal y el almidón en pequeñas concentraciones con respecto a su masa en morteros de base cemento incrementa y mejora sus propiedades físico-mecánicas a edades tardías así como sus condiciones de resistencia y de durabilidad.



1. Introducción

Las condiciones agresivas al ambiente han dado pie a que se analicen de forma más precisa a los materiales que conforman los elementos de una estructura de concreto reforzado, la cual para que logre cubrir su vida útil en condiciones óptimas de servicio, es indispensable considerar un diseño por durabilidad adecuada a las condiciones atmosféricas en donde se construya y no solo diseñar bajo criterios de resistencia mecánica.

El concreto reforzado es uno de los materiales cuyo uso está más difundido en la industria de la construcción, en obras como edificios, puentes, presas, puertos, entre otros [Publicación Técnica No. 328 de la IMT (Torres Acosta, Martínez Molina, Lomelí González, & Pérez Gallardo, 2010)]. La producción de cemento Portland, involucra una huella de carbono y se hace imprescindible evitar su mantenimiento. Para disminuir la huella hay dos alternativas, la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta y disminuir el consumo del cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto (Águila, 2008). La segunda usar el cemento con el diseño que prolongue su vida útil sin necesidad de mantenimiento, conservación o reparación. El concreto reforzado es el material más producido dentro de la industria de la construcción, para repararlo se emplea mortero de cemento. El mortero se puede definir como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecer presentan propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto (Sánchez de Guzmán, 2006).

Los manejos inadecuados de materiales, construcción deficiente, faltas de normas por durabilidad, etc., han ocasionado que estructuras relativamente nuevas (menos de 10 años) presenten daños por corrosión. En la ingeniería civil se ha tratado el problema de la corrosión orientado hacia técnicas de monitoreo, reparación, rehabilitación y protección de estructuras de concreto (Torres Acosta, Martínez Molina, Lomelí González, & Pérez Gallardo, 2010) y modificando el diseño de mezclas de concreto, para trabajar en el diseño por durabilidad, muchos autores coinciden en adicionar o sustituir parcialmente fibras naturales o puzolanas al concreto/mortero que pueden ayudar a prevenir la acción de mecanismos que deterioran al concreto en ambientes extremos en su mayoría.

Las puzolanas son materiales que al ser agregados al concreto/mortero tienden a llenar los poros, densificando la matriz e incrementando la durabilidad. El sustituto parcial del cemento en la presente investigación es el nopal perteneciente al género *Opuntia*, del grupo cacti, originaria de México y que



contiene 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). Otro material orgánico que sustituye la masa total de cemento en una mezcla de mortero es la fécula de maíz la cual es un producto base de la dieta de la población mexicana.

Diversas especies del cactus de nopal se han empleado como fuente de aditivos a la producción de cal y la conservación de la arquitectura en América Latina. Resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ($\leq 2\%$ en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado (Torres Acosta, Martínez Molina, Lomelí González, & Pérez Gallardo, 2010). De los ensayos realizados a los especímenes endurecidos, se clasifican en: No Destructivos, Destructivos y por Durabilidad; las primeras se realizan a los materiales, para determinar cierta característica física, mecánica o química del material en cuestión y no alteran de forma permanente sus propiedades.

2. Marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Del uso del cemento, el mortero y las sustituciones de material orgánico

Desde la antigüedad se tenía la necesidad de realizar elementos de piedra ligados con un material cementante que permitiera conformar una estructura simple como lo era una habitación que les fuera resistente para su protección, que en muchos casos dichos elementos han permanecido hasta nuestros días.

El material cementante que se ha utilizado a lo largo de la historia es el cemento, que ha sido el principal material de construcción empleado por la humanidad, puesto que los cementos portland y sus derivados están formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son minerales muy abundantes en la naturaleza.

Desde los primeros usos de este producto, se ha continuado experimentado con sus aplicaciones en todo tipo de obras y, actualmente, está presente en todo tipo de casas, puentes, carreteras, hospitales, etc.



Una de las construcciones más antiguas en las que se empleó una mezcla primitiva semejante al cemento es el suelo de una cabaña en Lepenski Vir (Yugoslavia), que data del 5.600 a.C., la cual se trataba de un compuesto formado por cal roja y aditivos. Mientras que, en Chile alrededor del 3.000 a.C. los indios usaban un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas en las paredes de sus chozas (oficemen, 2016).

En el año 500 a.C. los antiguos Griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se le adicionaba arena, para recubrir, unir piedras y ladrillos no cocidos, los Palacios de Creso y Atala fueron construidos de esta forma. La adición a estas mezclas de piedra triturada, tejas rotas o ladrillo, dieron origen al primer concreto de la historia. Probablemente, la civilización Romana copió la idea de la producción de concreto de los griegos. Se han encontrado obras de concreto Romanas fechadas con anterioridad al año 300 a.C.

El origen del empleo del mortero de cal parece remontarse a la época neolítica. Los griegos y romanos perfeccionaron enormemente la técnica del mortero de cal, mientras que los egipcios dominaban la preparación y aplicación de los morteros de yeso (Álvarez Galindo, 1995).

Como los morteros de cal viva no resistían bien la acción del agua durante periodos largos, se presume que a esta mezcla se incorporaron toda clase de agregados y durante estas pruebas empíricas se descubrió que las arenas provenientes de ciertas rocas volcánicas tenían mayor resistencia y durabilidad tanto en aguas dulces como saladas (Instituto del Concreto, 1997).

Por ejemplo, los Griegos emplearon una toba volcánica extraída de la Isla de Santorín y los Romanos usaron un material con apariencia de arena rosada que se encuentra en gran cantidad alrededor de la Bahía de Nápoles el cual es una ceniza volcánica que contiene sílice y alúmina que se combina químicamente con la cal dando como resultado lo que luego se conociera como cemento Puzolánico. Este nombre obedece a que se le encontró por primera vez en la región donde estaba la población de Pozzuoli, cerca de Vesubio.

Con la caída del imperio romano declinó el uso del concreto y mucho de los conocimientos desarrollados desaparecieron completamente. Durante la Edad Media y el Renacimiento el concreto fue poco empleado. Posiblemente no se usó en gran escala por la mala calidad debido a una cocción incompleta de la cal, descuido en la mano de obra y carencia de tobas volcánicas. Después del siglo XXII, mejoró la calidad y de nuevo se utilizó gracias a una perfecta calcinación de la cal y el uso de



algún material similar en propiedades a las tobas volcánicas anteriormente mencionadas (Instituto del Concreto, 1997).

Posteriormente el 21 de octubre de 1824, Joseph Aspdin un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de 3 partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual la molió y pulverizó consiguiendo la patente para producir el primer cemento Portland; así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Portland.

El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando logró con éxito, fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clínker, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse con métodos de ese tiempo y describió sus experimentos más explícitamente que Aspdin.

Únicamente hasta el año 1900 aproximadamente empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar los experimentos realizados por los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y por el alemán Michaelis, con los cuales se logró producir cemento de calidad uniforme que pudiera ser usado en la industria de la construcción.

En segundo lugar, dos invenciones mecánicas muy importantes se hicieron al principio del siglo: los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda. Con estas dos máquinas, pudo producirse el cemento Portland, en cantidades comerciales. A partir de ese momento se desarrolla el rápido crecimiento de esta industria que hoy produce un material de construcción imprescindible, dentro del actual sistema de vida (Instituto del Concreto, 1997).

La cal como ligante y el *mortero* de cal se mencionan ya en la Biblia (Deuteronomio 5-27,2), algunos autores (Furlan, 1975) renuncian a datar los primeros morteros de cal, mientras que otros (Malinowski, 1991) lo sitúan muy al comienzo de la Historia del hombre, cuando éste empezó a usar el fuego para calentarse en cuevas de rocas calizas o cuando se preparaba la comida en hogares contruidos de dicho material. La caliza calcinada se apagaba en contacto con la humedad o la lluvia, y el polvo resultante tenía propiedades ligantes de materiales pétreos.

Malinowski (1982 y 1991) hace referencia a esas primeras culturas. El uso de morteros sólo de cal tiene su primer empleo conocido en la Máscara de Jericó, una calavera cubierta con un emplasto de cal pulido, que data del año 7000 a.C. Se han encontrado casas construidas con ladrillos, y con



suelos hechos de un mortero de cal con superficies pulidas (llamadas "enlucidos" o "emplastes" por los arqueólogos), y a menudo, superficies con una capa de emplasto duro coloreado. Granos de cereales y otros restos orgánicos presentes en el mortero han permitido datarlo alrededor del 7000 a.C., mediante la técnica del carbono-14. El nivel estratigráfico más profundo se ha estimado que es del 9000 al 8000 a.C.

Los egipcios fueron los primeros en utilizar el yeso para el mamposteo de los bloques de la pirámide de Keops (hacia 2600 a.C.) (Furlan, 1975). El uso de mortero de yeso queda casi exclusivamente limitado en la Antigüedad, a los morteros egipcios (Martinet, 1992; Ragai, 1987; Ragai, 1988; Ragai, 1989; Ghorab, 1986) y algún otro caso aislado señalado en la literatura (Frizot, 1975). Sólo en Grecia se ha encontrado el yeso como ligante en las paredes del Palacio de Mycenae y entre los bloques gigantes del antiguo fondeadero de Kition, en Chipre (600 a.C.) (Malinowski, 1982).

Se puede afirmar que fue en Egipto donde se logró en la Antigüedad el mayor conocimiento del yeso, de su preparación y aplicaciones, y también donde prácticamente se utilizó por primera vez el yeso puro como mortero.

Los morteros medievales en Francia, en los siglos IX, X y XI, son, generalmente, de calidad muy mediocre, a pesar de la presencia de tejo, el cual desempeña dos funciones bien distintas en los morteros. Por su naturaleza porosa, los pequeños fragmentos de tierra cocida hacen a los morteros más permeables al aire y así permiten una mejor carbonatación de la cal. Por otra parte, ciertas arcillas cocidas pueden tener una actividad puzolánica. No obstante, la "reactividad" es a menudo muy débil o nula, porque depende de la naturaleza de la arcilla y de la temperatura de cocción. Los mejores resultados se obtienen generalmente para temperaturas por debajo de la temperatura de cocción de ladrillos y tejas. En consecuencia, la adición de tejo no mejora necesariamente la calidad de un mortero (Furlan, 1975).

Se atribuye este descenso de la calidad particularmente a la pérdida de los procedimientos romanos de fabricación de la cal; esto implica su selección, la cocción y extinción, y también la homogeneidad y proporción de las mezclas. Efectivamente, se encuentran en la literatura ejemplos de este último factor, con grandes variaciones de la relación ligante/agregado (Gutiérrez-Solana, 1989), y siempre con una proporción de aglomerante muy superior a la de los morteros actuales.



Otros aspectos que parecen haber sido descuidados en la elaboración de los morteros medievales, que repercuten de forma directa en su calidad, son la calidad del agregado, su granulometría, si tuvo o no tratamiento previo, y el proceso de homogeneización de la mezcla.

Sin embargo, la consideración de que la disminución de calidad se debió a la variación en la preparación de la cal, subestima la importancia de la aplicación del mortero en la obra, que influye en la consistencia y durabilidad del mismo (Malinowski, 1961; Furlan, 1975).

A partir del siglo XII las mezclas son más homogéneas y la calidad de los ligantes mejora de nuevo. A menudo, los morteros eran mezcla de gravas gruesas y cal con carbón de leña. Visto el alto contenido en carbón, puede admitirse que no se trata de una impureza, sino que este material poroso juega el mismo papel que los trozos de tierra cocida. Para los lechos y las juntas, los albañiles utilizaban arena fina y cal muy blanca (Furlan, 1975).

Al principio del siglo XIII, razones de economía impusieron a veces restricciones a los constructores. Se veían obligados a utilizar muy poca cal y la arena aparecía, a veces, mezclada con tierra; de ahí que los morteros de las catedrales de Laon, Troyes, Chalon-sur-Marne y Sées sean de muy baja calidad (Furlan, 1975). Por el contrario, en los siglos XIV y XV, raramente se emplearon las gravas gruesas; se utilizaba sobre todo arena de planicie, que parece que en ocasiones era lavada para quitarle toda traza de arcilla y de tierra. Obvio es decir que estas medidas permitían la fabricación de un mortero de mucha mejor calidad.

Con relación a la composición de estos morteros medievales, formados por agentes ligantes naturales, como arcilla, y, en especial, agentes ligantes aéreos, cal fundamentalmente, merece consideración la incorporación de proteínas animales y otro tipo de aditivos (Furlan, 1990).

Algunos autores (Hennig y Bleck, 1968) consideran que no existe fundamento alguno para la creencia persistente de que se adicionaron proteínas animales a los morteros medievales. De hecho, para estos autores, la adición de tales sustancias como la clara de huevo, leche, caseína o sangre, no está atestiguada en la literatura histórica; por otra parte, estos investigadores han examinado muestras de morteros de los siglos XI al XVII en Alemania, y nunca han podido establecer la presencia de materias orgánicas.

Otros autores (Sickels, 1981), sin embargo, han realizado estudios comparativos entre los aditivos usados por los antiguos constructores, y sobre los que no hay dudas acerca de su empleo, y



los aditivos nuevos, con el propósito de emplear estos últimos en la restauración de obras históricas. Sickels se apoya en trabajos previos, que atestiguan el empleo, ya desde la Antigüedad, de aditivos orgánicos, desde goma arábica o tragacanto en Rodas, albúmina de huevo, queratina y caseína como aditivos comunes de los egipcios, hasta el empleo en la época de Vitruvio de jugo de higo, sangre, clara de huevo y pasta de centeno. También a finales del siglo IX se añadió sangre de buey a los morteros de la catedral de Rochester.

Alrededor del año 1200 parece comprobado el uso de cerveza, cera de abejas, huevos y la clara, jugos de frutas, gluten, malta, arroz, azúcar y orina; alrededor del año 1500, se usaron cerveza, cera de abejas, sangre, huevos y claras, jugos de frutas, gluten, goma arábica, malta, arroz, azúcar y orina (Sickels, 1981).

Parece pues tomar fuerza la idea de la adición de sustancias orgánicas, con función de ligantes, a los antiguos morteros, corroborada por los trabajos de Newton y Sharp (1987) que han demostrado la presencia de pelos de animales en enlucidos del Renacimiento.

No cabe duda que el empleo de estos aditivos puede llevar aparejada la facilidad de ataque por microorganismos y una mayor solubilidad en agua (Sickels, 1981). Sobre lo que no existen controversias, entre los distintos autores, es en lo referente a la adición de yeso o tejo, aditivos clásicos.

De esta forma, prescindiendo de las variaciones más o menos grandes en lo que concierne a la calidad, no se produce, durante la Edad Media, ningún progreso notable en la fabricación del mortero (Álvarez Galindo, 1995).

El descubrimiento de los ligantes hidráulicos modernos se remonta a 1756. Smeaton, encargado de la construcción del faro de Eddyston (Plymouth), se propuso encontrar una cal que pudiera resistir la acción del agua de mar. Los ensayos efectuados con una caliza de Aberthan dieron resultados positivos. Se llegó así a la conclusión de que “la presencia de arcilla en la caliza debe ser uno de los factores principales o el único que determina la hidraulicidad”. La influencia de la tradición romana retardó probablemente el descubrimiento de los ligantes hidráulicos artificiales, ya que en la literatura romana se insiste sobre el hecho de que para obtener una buena cal hay que partir de una caliza muy pura. En consecuencia, las calizas arcillosas eran rechazadas sistemáticamente (Furlan, 1975; Rassineux, 1989).



Hacia 1812, Vicat estudia las mezclas de calizas puras y de arcillas, y demuestra definitivamente que las propiedades hidráulicas dependen de los compuestos que se forman durante la cocción entre la cal y los constituyentes de la arcilla. En efecto, por la acción del calor, hay primero una deshidratación de la arcilla, luego una descomposición de la caliza y por fin la combinación entre la cal, la sílice y los óxidos de hierro y aluminio, originando algunos silicatos de calcio hidratados (CSH) (Furlan, 1975). Según el contenido en arcilla, la temperatura y el tiempo de cocción, la reacción es más o menos completa y los productos obtenidos más o menos hidráulicos.

Los primeros ligantes así fabricados tenían muy a menudo las características de los cementos rápidos actuales. Eran ricos en aluminatos, generalmente, y por ello caracterizados por un fraguado muy rápido, no por desecación del mortero y carbonatación de la cal, sino por la reacción de los aluminatos y silicatos con el agua. Los trabajos de Vicat, separándose del empirismo de sus predecesores, constituyen una base científica para la fabricación y empleo de la cal hidráulica (Ashurst, 1983).

La cal hidráulica puede ser considerada como producto intermedio entre la cal hidratada y el cemento Portland actual. Es más, con los constituyentes hidráulicos, la cal presenta siempre un contenido elevado en cal libre y, por ello, deben ser sometidas a extinción. Esta operación, que consiste en hidratar el óxido de calcio libre, debe hacerse con una cantidad moderada de agua, para evitar la hidratación de los constituyentes hidráulicos, proceso que era ya conocido por los precursores de Vicat (Furlan, 1975).

En 1811, James Frost patenta un cemento artificial obtenido por calcinación lenta de caliza molida y arcilla, anticipándose al proceso que después llevó al establecimiento de algunos cementos hidráulicos “artificiales”, el más famoso de los cuales se conoce como “Portland”, por su supuesta apariencia y similitud con la roca caliza del mismo nombre.

El comienzo del siglo XIX conllevó como hemos visto muchos experimentos e investigaciones sobre estos materiales, fundamentalmente por Vicat (Ashurst, 1983). Joseph Apsdin, un albañil de Wakefield, patenta en 1824 un cemento “tan duro como la piedra Portland”.

Este es el origen del primer tipo de cemento Portland. Apsdin lo preparaba desmenuzando y calcinando la caliza, mezclando la cal resultante con arcilla y tierra y luego hidratando la mezcla cuidadosamente.



A continuación calcinaba la mezcla, la desmenuzaba y la calcinaba por segunda vez, con lo que se desprendía el ácido carbónico residual.

Como se empleaban temperaturas bajas, la calidad del cemento no podía ser alta (Furlan, 1975; Ashurst, 1983).

En 1838, el hijo de Apsdin, William, fabricó cemento en Gateshead, para la construcción de un túnel bajo el Támesis con resultados más satisfactorios.

Quizás fue que la calcinación se llevó a cabo a temperaturas más altas (Ashurst, 1983). A partir del trabajo de Johnson en Rochester, se obtuvo el cemento Johnson. El descubrimiento de Johnson consistió en que el clínker obtenido por fusión parcial de los elementos constitutivos de la primera materia sobrecalentada, y que hasta entonces se había tirado siempre como desecho inutilizable, da resultados mucho mejores que el cemento habitual, a condición de ser finamente triturado.

Los cementos producidos a partir de 1850 lo fueron con métodos modernos, moliendo la cal y la arcilla en un molino húmedo y calcinando la mezcla a temperaturas entre 1300° y 1500° C. La caliza se convierte así en cal viva, que se une químicamente con la arcilla formando un clínker de cemento Portland. Después de volver a moler y calcinar, el clínker blanco caliente se deja enfriar y se añade una pequeña cantidad de yeso para prolongar el tiempo de fraguado.

La Exposición Universal de 1851, permitió una demostración del nuevo producto, lo que le dio una gran publicidad. Desde ese momento, la mayor parte de los fabricantes de ligantes practican la calcinación a alta temperatura, y la cal fue reemplazada progresivamente por el cemento.

Las principales objeciones al uso de cales hidráulicas, cementos naturales y especialmente cemento Portland se basan en su alta resistencia, su carácter más bien impermeable y el riesgo de transferencia de sales solubles, en concreto sales de sodio, que alteran los materiales de construcción (Furlan,1975; Ashurst, 1983).

Desde el final del siglo XIX, los principios generales de la fabricación del cemento Portland no han cambiado apenas. Sin embargo, se ha asistido a una evolución técnica y científica muy importante, que ha llevado a la preparación de ligantes aplicables a situaciones muy específicas, que han abierto un enorme campo en la investigación de estos materiales.



2.2 Cemento

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.

Para la construcción, el cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer en contacto con el agua o sumergidos en ella, en virtud de su reacción química, por lo que se les da el nombre de cementos hidráulicos (Neville A. , 1998).

2.2.1 Proceso de fabricación del cemento Portland

Una vez conocida la definición de cemento portland, se entiende que está compuesto principalmente de materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla o pizarra. También se utiliza la marga, que es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos.

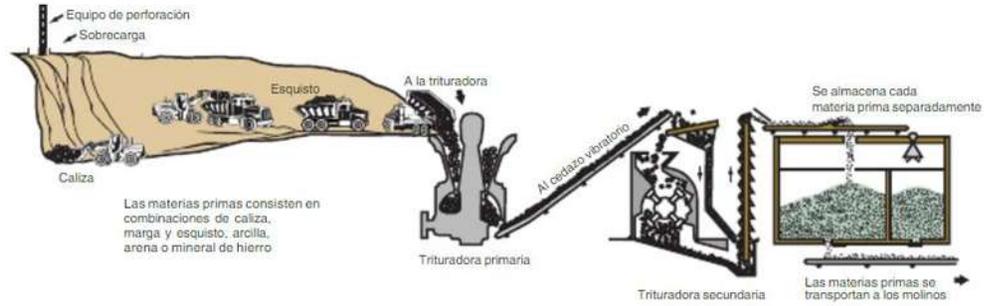
La materia prima para la fabricación del cemento portland se encuentra en casi todos los países, por lo que se encuentran operando fábricas de cemento en todo el mundo.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura de aproximadamente 1, 450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clínker. El clínker se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino, después se adiciona un poco de yeso, y el producto resultante es el cemento portland comercial que tanto se usa en todo el mundo.

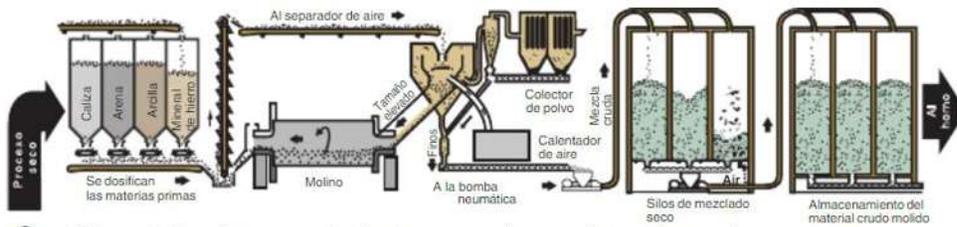
De manera más específica se describen a continuación algunos detalles de la fabricación del cemento, siguiendo el proceso mediante la figura 2.1.



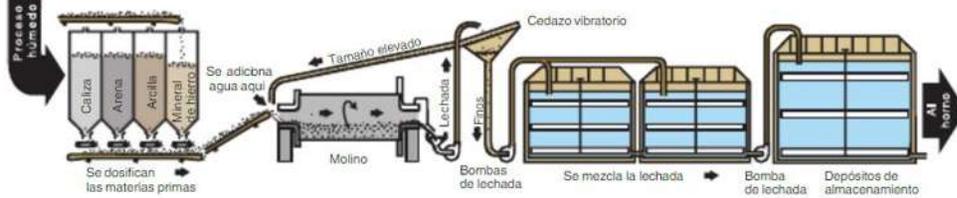
“EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y POR CRITERIOS DE DURABILIDAD DE MATRICES CEMENTICIAS CON SUSTITUCIONES ORGÁNICAS”



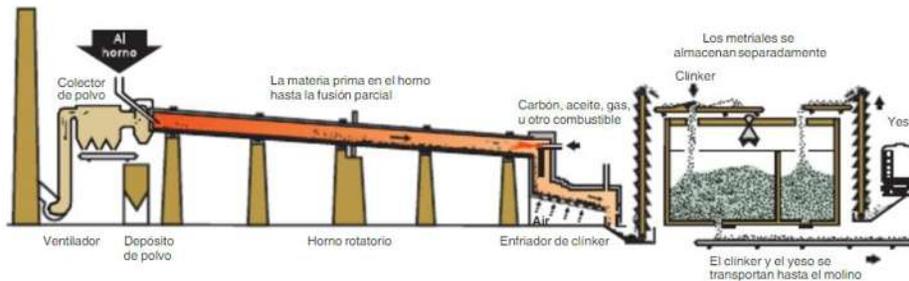
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces se almacenar.



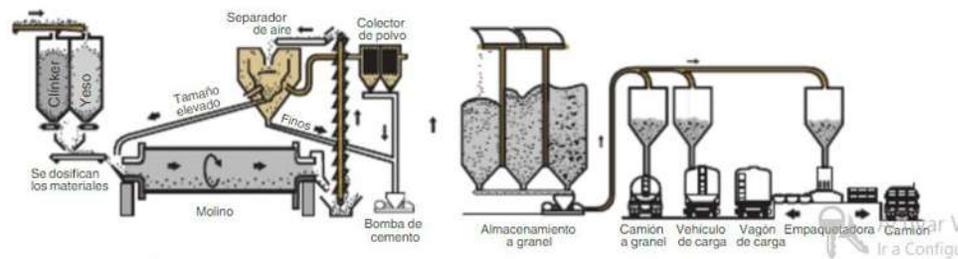
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



2. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada y se mezclan



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínger de cemento.



4. Se muele el clínger junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Figura 2. 1. Etapas en la producción tradicional del cemento portland [Diseño y Control de Mezclas de Concreto].



La mezcla y la trituración de las materias primas pueden efectuarse tanto en condiciones húmedas como secas; siendo así un proceso “húmedo” o “seco”. En la actualidad, el método de fabricación depende también de la dureza de la materia prima empleada y de su contenido de humedad.

El proceso húmedo como inicio de la fabricación, se inicia empleando marga, triturándola finamente y dispersándola en agua en un molino de lavado, siendo este un pozo circular con brazos revolvedores radiales con rastrillos, que rompen los aglomerados de materias sólidas. La arcilla también se tritura y se mezcla con agua, generalmente en un molino de lavado semejante al anterior. En seguida se bombean las dos mezclas, de forma tal que se mezclan en proporciones determinadas y pasan a través de una serie de cribas. Resultando de este proceso una lechada que fluye a estanques de almacenamiento.

Ahora bien si se emplea caliza, ésta debe barrenarse, triturarse (generalmente en dos trituradoras, una más pequeña que la otra) y luego depositarse en un molino de bolas, con la arcilla dispersa en agua. Dentro del mismo molino se continúa el molido de la caliza hasta lograr la finura de harina y la lechada que resulta en este proceso se bombea a estanques de almacenamiento. De aquí en adelante, el proceso es el mismo, sin tomar en cuenta la naturaleza original de las materias primas.

La lechada es un líquido de consistencia cremosa, con un contenido de agua entre 35 y 50 por ciento, y solo una pequeña fracción del material, alrededor del 2 por ciento, es mayor que la abertura que pasa el tamiz de 90 μm (ASTM-170). Para su almacenamiento generalmente se guarda la lechada en varios tanques de almacenamiento; la sedimentación de los sólidos suspendidos se impide mediante agitación mecánica o por burbujeo de aire comprimido. El contenido de cal de la lechada lo determina la proporción de materiales calcáreos y arcillosos originales, tal como se ha mencionado anteriormente. Para obtener la composición química requerida, puede efectuarse un ajuste final mezclando lechadas de diferentes tanques de almacenamiento, utilizando en la mayoría de las veces un sistema complicado de tanques de mezclado. De manera contraria y ocasional, existe la planta más nórdica del mundo, en Noruega, la materia prima es una roca de composición tal que solo se tritura y no requiere ninguna combinación.

Finalmente, la lechada con el contenido de cal deseado pasa a un horno rotatorio, que consta de un cilindro de acero de gran tamaño, recubierto de material refractario, con diámetro interior hasta de 8 m y una longitud que a veces alcanza 230 m, el cual gira lentamente alrededor de su eje, levemente inclinado hacia la horizontal. La lechada se deposita en el extremo superior del horno, mientras se



añade carbón pulverizado mediante la inyección de aire en el extremo inferior, donde la temperatura alcanza de 1,450 a 1,500 °C. El carbón, que no debe contener demasiada ceniza, merece especial mención, puesto que se consumen habitualmente 220 kg de carbón para la fabricación de una tonelada de cemento. Desde los años ochenta casi todas las fábricas que quemaban petróleo se han convertido al carbón, que es el combustible más común para la producción de cemento en la mayoría de los países. El carbón con alto contenido de azufre, por ser quemado en el horno se puede emplear sin que resulten emisiones dañinas.

Cuando la lechada desciende dentro del horno, encuentra progresivamente mayores temperaturas, eliminando el agua y liberando el contenido de CO₂; posteriormente, el material seco sufre una serie de reacciones químicas hasta que, finalmente, en la parte más caliente del horno, de 20 a 30 por ciento del material se vuelve líquido y la cal, la sílice y la alúmina vuelven a combinarse. La masa que resulta de esta combinación, se funde en bolas de diámetro que varían entre 3 y 25 mm, conocidas como clínker. El clínker cae dentro de enfriadores de diferentes tiempos que a menudo favorecen un intercambio de calor con el aire que luego se utiliza para la combustión del carbón pulverizado. El horno tiene que operar continuamente a una temperatura de 1,650 °C, asegurando un régimen constante, y con ello la uniformidad del clínker, y con ello también para reducir el deterioro del forro refractario.

En la actualidad la fabricación de cemento por medio del proceso húmedo ha dejado de efectuarse por el intensivo consumo de energía, es por ello que las nuevas fábricas dan escape únicamente a la producción de cemento por medio del proceso seco y semiseco (figura 2.2). En tales procesos, se adicionan y se trituran las materias primas, para después secarlas y reduciendo su tamaño a un polvo fino. El polvo seco o grano molino crudo, se bombea al silo de mezclado y se ajusta en las proporciones de los materiales que se requieren para la manufactura del cemento. Para obtener una mezcla íntima y uniforme, se mezcla el grano crudo, generalmente bombeando por turnos aire comprimido, induciendo un movimiento ascendente del polvo y reduciendo su densidad aparente. El material aireado en todos los cuadrantes del silo se comporta como un líquido, el cual mediante un periodo de alrededor de una hora, resultando una mezcla uniforme.



“EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y POR CRITERIOS DE DURABILIDAD DE MATRICES CEMENTICIAS CON SUSTITUCIONES ORGÁNICAS”

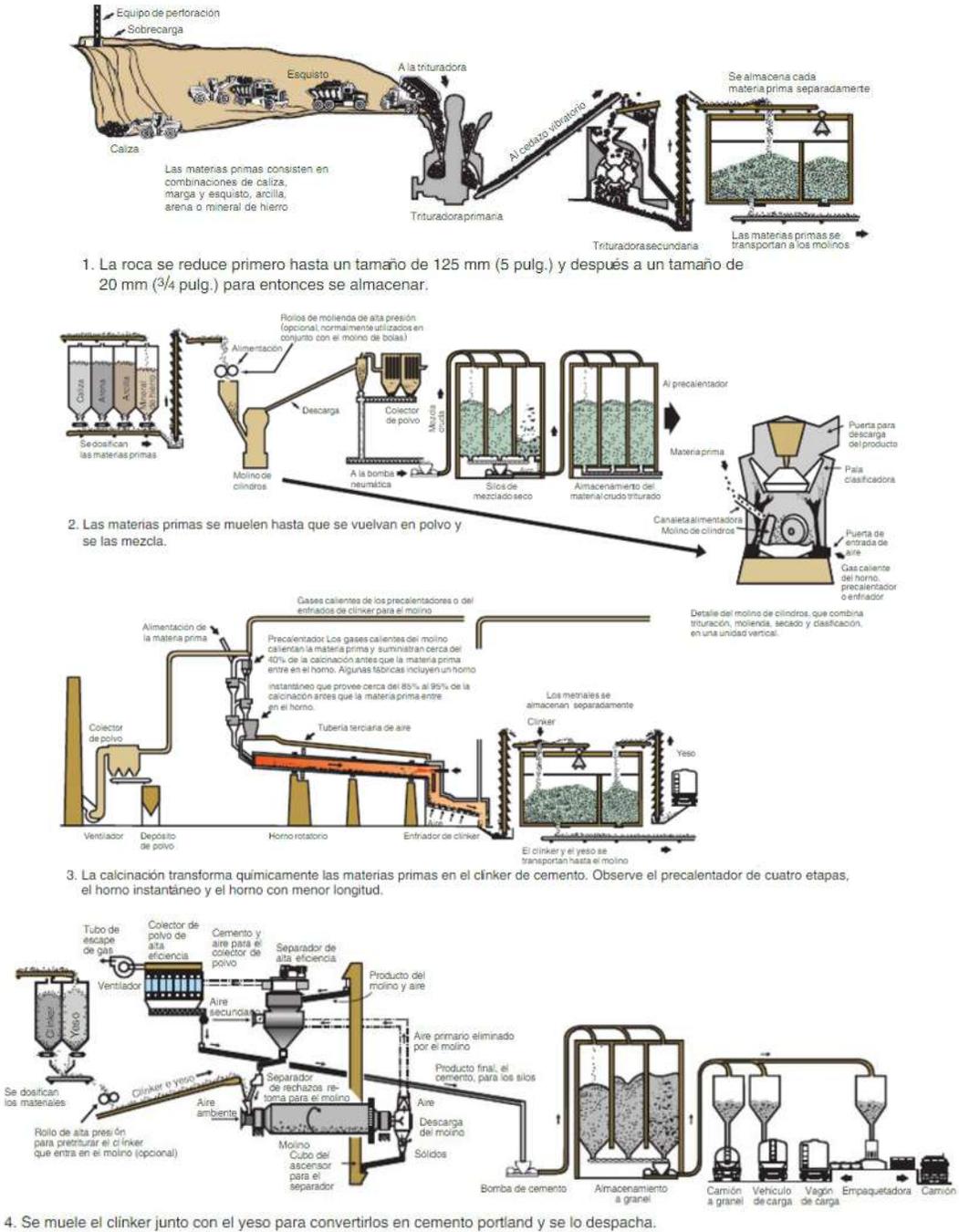


Figura 2. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco [“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”].

El grano crudo con un contenido de humedad de cerca de 0.2 por ciento, en el proceso seco, se hace pasar, previo a introducirlo al horno, por un precalentador con una temperatura cerca de 800 °C, generalmente de tipo de suspensión. El horno puede tener un tamaño mucho menor al que se encuentra en el proceso por vía húmeda, debido a que el grano crudo ya ha sido precalentado y no tiene que eliminarse su humedad. La mayor parte del grano crudo puede pasarse a través de un calcinador



fluidizado con temperatura de alrededor de 820 °C (que usa una fuente de calor separada) introducido entre el precalentador y el horno. El precalentamiento utiliza el gas caliente que sale del horno, debido a que contiene una porción importante de álcalis volátiles y cloruros.

El efecto del calcinador fluidizado es aumentar la descarbonatación (disociación de CaCO_3) del grano crudo antes de entrar al horno y así aumentar en forma importante la rapidez de producción del horno. La fábrica de proceso seco más grande del mundo utiliza un horno de 6.2 m de diámetro y 105 m de largo, produciendo 10,000 toneladas de clínker al día, dicha producción de un solo horno es igual a aproximadamente un quinto del consumo de cemento de todo el Reino Unido.

A diferencia del proceso seco y en semejanza con el húmedo, en el proceso semiseco, el grano molido crudo y mezclado se pasa por un tamiz y se deposita en una cuba giratoria llamada granulador, agregándole agua en un 12 por ciento del peso del grano molido adicionado y formándose con esto pastillas duras con un diámetro interior de 15 mm aproximadamente. Las pastillas se hornean en una rejilla de precalentamiento, mediante gases calientes del horno, hasta endurecer. Después de esta etapa las pastillas se meten al horno y sus operaciones posteriores son las mismas que en el proceso de fabricación en húmedo. El horno utilizado en este proceso es de dimensiones considerablemente menores, así como la cantidad de calor, comparado con el empleado en el proceso húmedo, debido a que el contenido de humedad de las pastillas es de sólo 12 por ciento. Este proceso es bastante económico (si las materias primas se encuentran relativamente secas) y el consumo total de carbón es pequeño como 100 kg por tonelada de cemento.

Sea cual sea el proceso de producción, se requerirá una mezcla íntima y uniforme de las materias primas, ya que una parte de las reacciones dentro del horno ocurren por difusión en materiales sólidos. Ahora bien a la salida del horno, siendo de igual manera cualquier tipo de proceso, el clínker se enfría obteniendo características particulares de un color negro, brillante y duro, para posteriormente mezclarlo con yeso para evitar un fraguado relámpago del cemento.

El sistema de molienda de circuito cerrado es empleado en casi todas las fábricas. La molienda se hace en un molino de varios compartimentos con bolas que progresivamente reducen su tamaño, precedido esto en algunas veces por el paso a través de una prensa de rodillo. El cemento que descarga el molino pasa por un separador, removiendo las partículas finas para el silo de almacenaje con una corriente de aire, mientras que las partículas gruesas se pasan una vez más a través del molino. La molienda de circuito cerrado evita la producción de una cantidad grande de material excesivamente fino o de una



cantidad pequeña de material demasiado grueso. El rendimiento de un molino de bolas se puede mejorar con la molienda previa del clínker en una trituradora de impacto horizontal.

Cuando el cemento se haya molido satisfactoriamente, teniendo como 1.1×10^{12} partículas por kg, entonces se encontrará listo para el transporte a granel. Existen otros tipos de cemento que siempre se empacan en sacos o tambores, los cuales son el cemento blanco, hidrofóbico, expansivo, de fraguado controlado, para pozo de petróleo y de alta alúmina. En el mundo los sacos de 25 kg se están volviendo populares.

La producción de cemento no es siempre en cantidades grandes, cuando se requiere producir pequeñas cantidades, se emplea un horno vertical tipo Gottlieb, el cual arroja nódulos de grano crudo y polvo fino de carbón combinados y produce clínker aglomerado, triturándolo posteriormente. China utiliza miles de estos hornos, teniendo una altura y produciendo hasta 300 toneladas de cemento al día.

Existen también otros procesos de fabricación de cemento, como lo es uno que emplea yeso en vez de cal, utilizando un horno rotatorio en donde se quema yeso, arcilla y coque con arena y óxido de hierro, teniendo como productos finales el cemento portland y dióxido de azufre, el cual es posteriormente convertido en ácido sulfúrico.

2.2.2 Clasificación y tipos de cemento

La obtención de cemento en el mundo se realiza en grandes cantidades a niveles extraordinarios, produciendo en todos sus casos la molienda de clínker portland, así como mezclas con materiales con escorias granuladas de alto horno hasta materiales puzolánicos; lo que proporciona una clasificación del cemento producido a nivel mundial. La norma mexicana (NMX-C-414-ONNCCE, 2014) clasifica a los diversos tipos de cemento de fabricación nacional o extranjera que se comercializan en territorio nacional, dicha norma hace mención a la clasificación del cemento de acuerdo a sus componentes, a su resistencia a la compresión y de acuerdo a sus características especiales, como lo muestra la Tabla 2.1:

Tabla 2. 1. Clasificación de los cementos de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014.

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado



CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Realizando una comparativa de la norma vigente en México con la norma internacional (ASTM-C-150, 2016)/C150M-16, que especifican las características del Cemento Portland, se designan los siguientes tipos de cemento, usando los números romanos (tabla 2.2), como a continuación se presenta:

Tabla 2. 2. Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

NMX-C-414-ONNCCE (Vigente)	NMX-C-001 (Cancelada) NORMA ASTM C-150/C150M-16
CPO 30, CPO 30R, CPC 30 Y CPC 30R	Tipo I (Portland normal)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y RS	Tipo II (Portland moderada resistencia a los sulfatos)
CPO 40,CPO 40R Y CPC 40R	Tipo III (Portland fraguado rápido, alta resistencia inicial)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH	Tipo IV (Portland bajo calor de hidratación)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial RS	Tipo V (Portland alta resistencia a los sulfatos)
CPO o CPC que cumpla con la característica especial B	Blanco
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA	Especial, bajo álcali; todos los tipos

2.2.3. Propiedades del cemento

Por la calidad del cemento se entiende el grupo de propiedades que caracterizan el cemento en su uso final como aglomerante hidráulico en concretos y morteros, utilizados para actividades de construcción. Dichas propiedades son importantes para la fabricación, la ejecución y la vida útil de los productos de concreto para los cuales el cemento es utilizado (Propiedades de los cementos, 2017).



El estudio de las propiedades del cemento Portland permite conocer algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter químico, físico y mecánico; dependen del estado en el cual se encuentren.

El clínker de cemento portland es el factor más importante en cuanto a las propiedades del cemento. Para comprender la relación entre las características del clínker y las propiedades del cemento es importante darse cuenta de que el clínker consta, en todos sus casos, de un grupo de cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes (ARQHYS 2. , 2017).

El proceso de clínkerización del cemento Portland involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento Portland frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en la tabla 2.3. Se consideran cuatro compuestos como los componentes principales del cemento Portland, que se forman a partir de óxidos; enumerados en la tabla 2.4, junto con sus símbolos de abreviación.

Tabla 2. 3. Abreviaturas de los óxidos del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).

Fórmula	Nombre	Abreviatura
CaO	Óxido de Calcio "Cal"	C
SiO ₂	Dióxido de Silicio "Silicato"	S
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio "Aluminato"	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro "Hierro"	F

Tabla 2. 4. Componentes principales del cemento Portland (Shetty, 2005).

Nombre del compuesto	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrita tetracálcica	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Por consiguiente las fases se presentan con las características siguientes, contribuyendo cada uno de ellos en el comportamiento del cemento.

- **Halita, con alto contenido de C₃S:** es la fase principal de la mayoría de los clínkers Portland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica.



Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial (Instituto del Concreto, 1997).

- **Belita:** es usualmente la segunda fase en importancia del clínker. Su componente principal (C_2S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días. Las fases belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suman aproximadamente de 70 a 80% del cemento Portland. Se supone que de manera aproximada, el C_3S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas) y el C_2S a mediano y largo plazo (contribución al desarrollo de la resistencia de la cuarta semana en adelante).

- **Aluminato tricálcico:** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO_2 y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto, propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento (Instituto del Concreto, 1997).

- **Ferrito C_4AF , solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de calcio:** este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del clínker y difícil de eliminar (Neville A. , 1998).

Las cantidades efectivas de los diferentes tipos de compuestos varían considerablemente de un cemento a otro y realmente es posible obtener distintas clases de él (tabla 2.5), agregando en forma proporcional los materiales correspondientes.

Tabla 2. 5. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

Cemento Portland	Composición Química en %			
	C3S	C2S	C3A	C4AF



Tipo I	48	27	12	8
Tipo II	40	35	5	13
Tipo III	62	13	9	8
Tipo IV	25	50	5	12
Tipo V	38	37	4	9

En la figura 2.3 y figura 2.4 se muestra esquemáticamente la contribución de los componentes principales del cemento, de acuerdo al calor de hidratación y a la resistencia a la compresión (Instituto del Concreto, 1997).

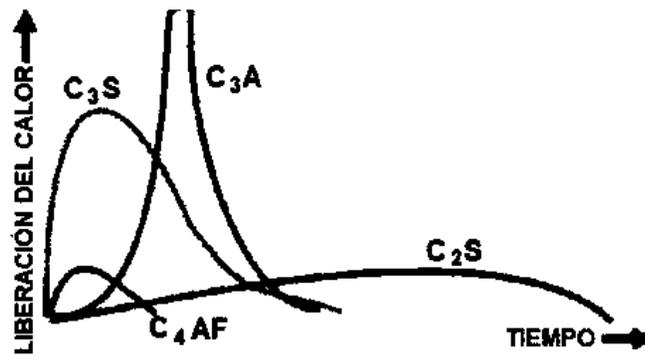


Figura 2. 3. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

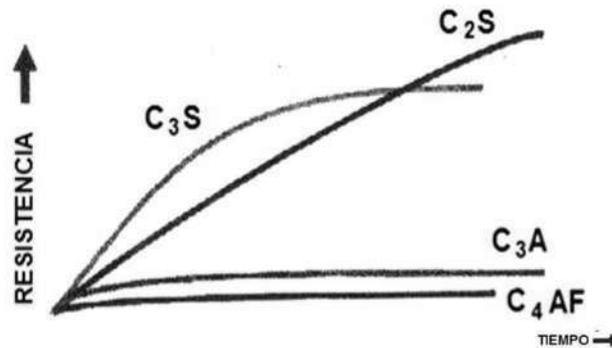


Figura 2. 4. Resistencia de los componentes principales del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).

Todos y cada uno de los componentes del cemento contribuyen de una u otra forma a la resistencia, pues es claro que todos los productos de hidratación llenan espacios, reduciendo con ellos la porosidad en el concreto (Neville A. , 1998).

Hidratación del cemento: la reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.



Calor de hidratación: durante el proceso de hidratación, se efectúan reacciones químicas exotérmicas, es decir reacciones que liberan calor, haciendo que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura. Este incremento es importante en estructuras de concreto, ya que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso de la temperatura, se origina contracción del material, que puede conducir a la formación de grietas y fisuras. El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. Depende de la composición del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los compuestos individuales. El C_3A y el C_3S son los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor (Instituto del Concreto, 1997).

2.2.3.1. Propiedades físicas del cemento

Si bien las propiedades químicas son de lo más importante en la estructura interna del cemento, las propiedades físicas le dan la esencia a cada tipo de cemento; dentro de ellas se encuentran como las más importantes: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión.

- **Densidad:** es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Portland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 g/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.
- **Finura:** el proceso de molienda de clínker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.
- **Consistencia normal:** es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% (Instituto del Concreto, 1997).



- **Tiempos de fraguado:**
 - **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica formada por la hidratación del cemento pierde su fluidez, llegando a disminuir su viscosidad y por tanto su plasticidad.
 - **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta endurece.
 - **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
 - **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.
- **Expansión en autoclave:** para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Las normas (NMX-C-062-ONNCCE, 2010) y (ASTM-C-151, 2015), limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave. Este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 25.4 cm elaboradas de pasta de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

2.2.3.2. Propiedades mecánicas del cemento

Las propiedades mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

- **Resistencia a la compresión:** este ensayo se realiza de acuerdo a las normas vigentes (NMX-C-061-ONNCCE, 2015) y (ASTM C 109 M, I., 2002) sobre cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) de 5.08 cm de arista. La resistencia a la tensión equivale del 8 al 12% del esfuerzo obtenido a compresión.



- **Resistencia a la flexión:** se realiza de acuerdo a la norma ASTM-C-348 en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero en prismas de 4 X 4 X 16 cm (Instituto del Concreto, 1997).

2.2.4. Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites enunciados en la tabla 2.6.

Tabla 2. 6. Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios ⁽¹⁾
		Principales					
		Clínker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos ⁽²⁾	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50 - 94	-	6 - 50	-	-	0 - 5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40 - 94	6 - 60	-	-	-	0 - 5
CPC	Cemento Portland Compuesto ⁽³⁾	50 - 94	6 - 35	6 - 35	1 - 10	6 - 35	0 - 5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90 - 99	-	-	1 - 10	-	0 - 5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20 - 39	61 - 80	-	-	-	0 - 5

(1) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales representados en la tabla.

(2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

(3) El Cemento Portland Compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual o en conjunto con Clínker + yeso.

Los requisitos que deben cumplir los componentes principales del cemento están mostrados en la tabla 2.7.

Tabla 2. 7. Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Componente principal	Índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días (% mínimo)	Carbonatos totales (% mínimo)
Escoria Granulada de Alto Horno	75	-
Puzolana	75	-



Humo de Sílice	100	-
Caliza	-	75

Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R y 40 R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en la tabla 2.8.

Tabla 2. 8. Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Clase Resistente	Resistencia a compresión MPa			Tiempo de fraguado (mín.)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días mínimo	28 días mínimo	Máximo	Inicial mínimo	Final máximo	Expansión máximo	Contracción máximo
20	-	20	40	45	600	0.8	0.2
30	-	30	50	45	600	0.8	0.2
30 R	20	30	50	45	600	0.8	0.2
40	-	40	-	45	600	0.8	0.2
40 R	30	40	-	45	600	0.8	0.2

Para los siguientes tipos de cemento y todas las clases resistentes se deben cumplir con las especificaciones químicas de la tabla 2.9.

Tabla 2. 9. Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Propiedades	Tipos de Cemento	Especificación (% en masa)
Perdida por ignición	CPO, CEG	Max 5.0 %
Residuo insoluble	CPO, CEG	Max 5.0 %
Sulfato (SO ₃)	Todos	Max 4.0 %

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.1, este debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 2.10.

Tabla 2. 10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por reacción álcali agregado (máx. %)		Calor de hidratación (máx.) KJ/Kg (Kcal/Kg)		Blancura (min. %)
		1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistente a los Sulfatos	0.1	-	-	-	-	-



BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	-	0.02	0.06	-	-	-
BCH	Bajo Calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-
B	Blanco	-	-	-	-	-	70

2.2.5. CPC 30R – RS, Cemento empleado en la investigación

El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 28 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

El cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta 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 $250 \text{ m}^2/\text{kg}$. El cemento resistente a los sulfatos debe cumplir con la norma BS 12: 1978 para cemento Portland normal.

En los Estados Unidos de Norteamérica, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma ASTM C 150, 2016. 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 a un 6%.

Desde el punto de vista químico, se debería esperar que el C_4AF formara sulfoaluminato de calcio y sulfoferrita de calcio y, por lo tanto que produjera 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 es baja.

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente 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 alto 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 por 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 hace 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 forma cuando esta endurecido, produzca su destrucción (Instituto del Concreto, 1997).

2.3. Agregados pétreos (cuerpo interno del concreto y mortero)

Según la norma mexicana (NMX-C-122-ONNCCE, 2004), los agregados son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros.

Los agregados le proporcionan el cuerpo al concreto y mortero, proporcionan resistencia y estabilidad volumétrica. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos en la interfaz del agregado y la pasta de cemento.

El sólo hecho de que los agregados ocupen del 70 al 80 % del volumen del concreto, su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable. Para saber más sobre el concreto es muy importante que se aprenda más acerca de los agregados que constituyen el mayor volumen del concreto. La profundidad y el alcance de los estudios que se requieren para entender sus efectos variables y su influencia en las propiedades del concreto no pueden ser subestimados (Shetty, 2005).

La fuente de materiales debe ser localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o de las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura (Instituto del Concreto, 1997).

Los agregados económicamente hablando son más baratos que el cemento, no obstante, esto no es la única razón para utilizar agregados en los concretos o morteros, si no por lo contrario éstos



proporcionan además al concreto una enorme ventaja técnica, al darle mejor estabilidad volumétrica y más durabilidad que si se empleara solamente pasta de cemento (Neville & Brooks, 1999).

2.3.1. Origen de los agregados pétreos

Casi todos los materiales áridos naturales provienen de rocas madre. De esta forma, existen tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estas clasificaciones se basan en el modo de formación de las rocas.

Cabe recordar que las rocas ígneas se forman por el enfriamiento de la lava en la superficie de la cresta (basalto) o muy por debajo de la cresta (granito). Las rocas sedimentarias se forman inicialmente debajo del mar y posteriormente emergen o las aguas modifican su cauce. Las rocas metamórficas son originadas por rocas ígneas o sedimentarias que posteriormente se transforman debido al calor extremo y la presión, flora y fauna (Shetty, 2005).

Rocas Ígneas. Constituyen la mayor parte de la porción sólida de la tierra, de ellas se derivan los otros grupos de rocas y la mayor parte de los agregados del concreto en América. Estas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma y tienen una estructura masiva, totalmente cristalina o vítrea o una combinación entre ellas, dependiendo de la velocidad a la que se enfriaron durante su formación. Dependiendo del porcentaje de sílice que contienen se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie (Instituto del Concreto, 1997).

La mayoría de las rocas ígneas son idóneas para producir concreto, ya que normalmente son duras, resistentes y densas. Son los agregados del concreto más químicamente activos y muestran una tendencia a reaccionar con los álcalis en el cemento (Shetty, 2005).

Rocas Sedimentarias. Las rocas ígneas o rocas metamórficas son sometidas a los agentes de la intemperie como el sol, la lluvia y el viento. Estos agentes descomponen, fragmentan, transportan y depositan las partículas de roca, muy por debajo del lecho marino donde se cementan entre sí por algún material cementante. Los materiales de cementación pueden ser carbonosos, silíceos o arcillosos encontrados en la naturaleza. Al mismo tiempo, el depósito y el material cementante son sometidos a presión estática del agua y se convierten en la capa compacta de roca sedimentaria. La deposición, cementación y consolidación toman lugar capa por capa debajo del lecho marino.



Estas formaciones de rocas sedimentarias subsecuentemente son levantadas y se convierten en continentes. Las rocas sedimentarias de la estructura estratificada se extraen y algunos agregados de concreto se derivan de ellas. La calidad de los agregados derivados de las rocas sedimentarias variará en calidad dependiendo del material de cementación y la presión bajo la cual estas rocas fueron originalmente compactadas.

Las rocas sedimentarias pueden variar de suaves a duras, de porosas a densas y de ligeras a pesadas. El grado de consolidación, el tipo de cementación, el espesor de las capas y la contaminación, son factores importantes para determinar la conveniencia de las rocas sedimentarias para producir concreto (Shetty, 2005).

Rocas Metamórficas. Tanto las rocas ígneas como las rocas sedimentarias pueden ser sometidas a altas temperaturas y presiones que causan metamorfismo produciendo un cambio en la estructura y textura de las rocas.

Muchas de las propiedades de los agregados, como composiciones químicas y mineralógicas, descripción petrográfica, peso específico, dureza, resistencia, estabilidad física y química y estructura de poros entre otros, dependen principalmente de la calidad de la roca madre. Sin embargo, algunas propiedades poseídas por los agregados que son importantes, en lo que se refiera a la elaboración del concreto, no tienen ninguna relación con la roca madre, en particular, la forma y tamaño.

Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena roca madre producen un concreto de calidad, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores a las sugeridas en reglamentos, obtenidos a partir de rocas madre no tan buenas. Estos agregados, que no son tan buenos, pueden ser utilizados para elaborar concreto satisfactorio debido al hecho de que una capa de pasta de cemento en los agregados, logra mejoras respecto a las características de durabilidad y resistencia. La selección de los agregados debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico, la abundancia, pero especialmente la resistencia y la reactividad en el cemento Portland. En general, aquel agregado que proporcionará la calidad deseada en el concreto con el menor gasto, debe ser seleccionado (Shetty, 2005).



2.3.2. Propiedades de los agregados

2.3.2.1. Propiedades químicas

Las exigencias químicas que se deben solicitar a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto, son las de evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos, entre los cuales el más frecuente parece ser la sílice activa.

- **Epitaxia:** esta es la única reacción química favorable de los agregados conocidos hasta el momento. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.
- **Reacción álcali-agregado:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.2.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas que tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición. La malla No. 4 separa las gravas de las arenas. Los morteros se elaboran con todo el material que pasa la malla No. 4.
- **Porosidad y absorción.** Cuanto más poroso es el material, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad. La porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción influyen en las propiedades de los agregados tales como la adherencia entre éste y la pasta de cemento hidratada, en la resistencia del concreto a la congelación y deshielo, así como su estabilidad química y en la resistencia a la abrasión (Neville & Brooks, 1999).



- **Masa unitaria.** La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa (Instituto del Concreto, 1997).
- **Forma.** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles intrusiones en la roca y su estado de meteorización. La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.
- **Textura.** Reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como: densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar.

2.3.2.3. Propiedades mecánicas

- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.
- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe



buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurecida. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.

- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto.** Es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.
- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto entre agregado y pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico – químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.3. Agregado proveniente de “Joyitas”, empleado para la Investigación

El agregado fino es el material comúnmente conocido como arena que pasa por la criba con abertura de 4.75 mm (malla No. 4) y se retiene en la criba con abertura de 0.075 mm (malla No. 200).

La arena al mezclarse con los aglomerantes constituye el soporte para el mortero y evita el resquebrajamiento que se produciría si se empleara el aglomerante solo, aparte de que su uso reduce a menos de un tercio el aglomerante.



Las arenas estarán libres de sustancias que impidan la adherencia o influyan desfavorablemente en el proceso de endurecimiento como ácidos, grasas, restos vegetales y cantidades perjudiciales de arcilla y sales minerales. En morteros de cal y cemento sólo se podrá usar arena lavada. Las proporciones de mezcla están dadas para cada caso en particular, según el uso que se vaya a dar al mortero, y la clase de arena empleada en su preparación (ARQHYS 2. , 2017).

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

El agregado fino utilizado en los morteros fue obtenido del banco de materiales llamado “Joyitas” que está ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia - Quiroga entrada a San Bernabé en Michoacán, el tipo de propiedad es particular, el material obtenido es volcánico y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado; no requiere explosivos para la obtención del material y económicamente hablando el material es aceptable.

El agregado volcánico del banco “Joyitas”, fue tomado de un depósito de material y llevado al sitio de estudio (figura 2.5) para realizarle las pruebas correspondientes de laboratorio. Una vez colocado en un compartimento de materiales se tamizo por la malla No. 4 para llegar al tamaño máximo de agregado fino.



Figura 2. 5. Arena de banco "Joyitas", carretera Morelia - Quiroga entrada a San Bernabé, Michoacán (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Los usos probables que se le dan a ese material son como material de revestimiento sub – base, base, y en la elaboración de concreto hidráulico.



2.4. Agua (elemento fundamental para la reacción química del cemento)

2.4.1. Características del agua

Del latín “*aqua*”, el agua es una sustancia cuyas moléculas están compuestas por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno (H_2O). Se trata de un líquido inodoro (sin olor), insípido (sin sabor) e incoloro (sin color), aunque también puede hallarse en estado sólido (cuando se conoce como hielo) o en estado gaseoso (vapor). El agua es el componente que aparece con mayor abundancia en la superficie terrestre (cubre cerca del 71% de la corteza de la Tierra). La circulación del agua en los ecosistemas se produce a través de un ciclo que consiste en la evaporación o transpiración, la precipitación y el desplazamiento hacia el mar (Diccionario, 2017).

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de mortero y/o concreto debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad física y química. Por consiguiente existen normas de la calidad del agua para empleo en morteros y concreto, en los diferentes países del mundo. En México la norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2004) regula la calidad del agua, mientras que en EE.UU. la ASTM-C-94 hace lo correspondiente.

2.4.2. Especificaciones del uso del agua en morteros

El agua referida en la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004, que se pretenda usar en la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas el agua de mar, debe cumplir con los requisitos que aparecen en la tabla 2.11. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la tabla 2.11, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.



Tabla 2. 11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulforetistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el Cl (a)		
Para concreto con acero de pre-esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como SO ₄ ⁼ (a)	3000	3500
Magnesio como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5

(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.

(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.

(c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl₂ como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo,



inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). En la tabla 2.12 se dan a conocer los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

Tabla 2. 12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua (Instituto del Concreto, 1997).

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencia	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire Incluido	Hidratación
pH	x	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	x	x	x	x	x	---	---	---
Sulfatos	x	x	x	x	x	x	---	---
Cloruros	x	x	x	x	---	---	---	---
Hidratos de carbono	x	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas solubles en éter	x	x	---	---	---	---	x	x

x Causa efecto negativo
 --- No causa efecto negativo

2.4.3. Agua utilizada en la investigación

El agua empleada cumple con lo establecido en la norma NMX-C-122-ONNCCE, 2004 y proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El agua utilizada para la elaboración de los morteros se obtuvo directamente de las tarjas del laboratorio, de manera tal que las mezclas se realicen lo más apegado posible a la realidad o a lo que se realiza en obra.

2.5. Aditivos

Las propiedades de un concreto endurecido se dan a partir de la combinación de los materiales fundamentales de una mezcla de concreto, como lo son los cementantes, los agregados y el agua principalmente, pero no obstante existe un ingrediente más de la mezcla de concreto: los aditivos; el cual su uso se extiende cada vez en el mundo y cuyo propósito fundamental es el de modificar



convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto.

Un aditivo se puede definir como un producto químico que, excepto en casos especiales, se agrega a la mezcla de concreto en cantidades no mayores de 5 por ciento por masa de cemento durante el mezclado o durante una operación adicional de mezclado antes de la colocación del concreto, para el propósito de realizar una modificación específica a las propiedades normales del concreto (Neville & Brooks, 1999).

Investigaciones anteriores (Arguello Hernández, 2012) mencionan que la definición que da el Comité ACI 116(26) de un aditivo puede interpretarse de la siguiente manera, en donde un material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento.

2.5.1. Tipos y Usos

El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, resistente, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas calidades se las puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados, preferiblemente al uso de aditivos (a excepción de los inclusores de aire cuando son necesarios).

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducción del costo de la construcción del concreto.
- Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
- Manutención de la calidad del concreto durante las etapas del mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.
- Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.
- Es más fácil adicionar materiales que producir cementos especiales.

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción.



Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue (ASTM C 494/C494M - 08a):

1. Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire).
2. Aditivos reductores de agua.
3. Plastificantes (fluidificantes).
4. Aditivos aceleradores (acelerantes).
5. Aditivos retardadores (retardantes).
6. Aditivos de control de la hidratación.
7. Inhibidores de corrosión.
8. Reductores de retracción.
9. Inhibidores de reacción álcali-agregado.
10. Aditivos colorantes.
11. Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad de material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.5.2. Aditivo empleado en la Investigación

El aditivo que se utilizó en esta investigación cumple con las características siguientes: su nombre comercial es Crisotan® R-5 (distribuido principalmente para la construcción), figura 2.6., aditivo plastificante (fluidificante), su presentación es en polvo con un color café oscuro.



Figura 2. 6. Fluidificante Crisotan R-5 (V. H. Blancas Herrera, 2017).



Los aditivos plastificantes o reductores de agua, son compuestos orgánicos e inorgánicos que permiten emplear menor agua de la que se usaría en condiciones normales en el concreto, produciendo mejores características de trabajabilidad y también de resistencia al reducirse la Relación Agua/Cemento.

Trabajan en base al llamado efecto de superficie, en que crean una interface entre el cemento y el agua en la pasta, reduciendo las fuerzas de atracción entre las partículas, con lo que se mejora el proceso de hidratación. Muchos de ellos también desarrollan el efecto aniónico que mencionamos al hablar de los incorporadores de aire.

Un aditivo de este tipo usualmente reduce el contenido de agua por lo menos en un 5% a 10% y la dosificación normal oscila entre el 0.2% al 0.5% del peso del cemento, usados diluidos en el agua de mezcla (Ingeniería y Construcción, Obtenido en 2017).

2.6. Mortero (material objeto de estudio)

El mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos (figura 2.6), que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto (Sánchez de Guzmán, 2006).

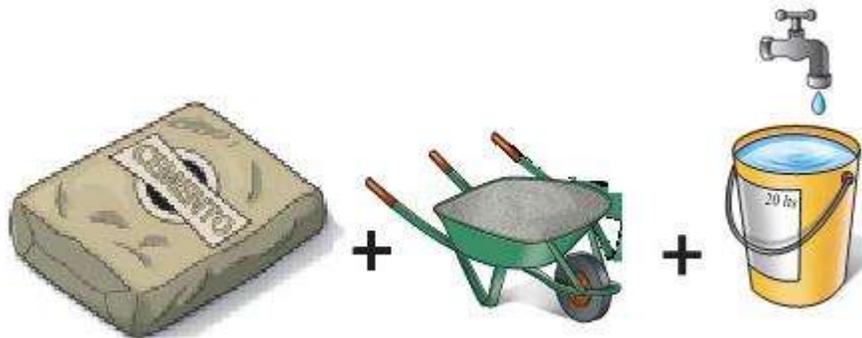


Figura 2. 7. Materiales que componen habitualmente a un mortero.

A diferencia del concreto, la resistencia a la compresión no es la propiedad más importante del mortero. Otras propiedades importantes del mortero son la facilidad del trabajo, la resistencia a la tracción, la resistencia a la congelación y la descongelación, y la retención de agua (Arreola Sánchez, 2013).



2.6.1. Tipos y usos del mortero

Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición en:

- **Mortero físico:** El paso del estado pastoso o semilíquido a un sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.
- **Mortero químico:** El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero se cuenta con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.
- **Mortero aéreo:** Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.
- **Mortero bituminoso:** Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.
- **Mortero hidráulico:** Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento (Mendoza-Anaya, 2004).

Los morteros más comunes y puestos en estudio en esta investigación, son los de cemento y están compuestos de:

MORTERO = AGLUTINANTE + MATERIAL INERTE + LIQUIDO DE AMASADO

Mortero= (cemento) + (arena) + (agua)

Generalmente, se utilizan para obras de albañilería, como material de agarre, revestimiento de paredes, etc. Su uso tradicional ha sido para pegar ladrillos y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeños resquicios



ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos. Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia (Constructor Civil, 2016).

De acuerdo al uso deseado, se debe utilizar diferente granulometría. En el reglamento de construcción del estado de Michoacán se especifica una resistencia mínima del mortero de 4 MPa para uso estructural, para pegar, juntar y repellar; en esta investigación se proponen estos usos; los cuales se logra utilizando todos los tamaños de la arena que se utilizan para elaborar concreto.

En el caso de aplanados finos se utiliza material que pasa la malla No. 16 y se retiene en la No. 30, tal como se especifica en la norma (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

2.7. Materiales en estudio como sustitución parcial del cemento

2.7.1. Fibra de Cactus *Opuntia* blanco deshidratada

2.7.1.1. Características

El nopal es uno de los recursos de mayor importancia económica de la flora mexicana. Actualmente, por sus varias propiedades nutritivas, químicas, industriales, ecológicas, medicinales y simbólicas, entre otras, el nopal es uno de los recursos vegetales más importantes para los habitantes de las zonas áridas y semiáridas de México.

El género *Opuntia* debe su nombre a un pueblo antiguo de Grecia llamado Opus u Opuncia, de la región de Leócrida, Beocia, donde se dice que crecía una planta similar a las cactáceas. Los nopales son el género de mayor distribución de la familia de las cactáceas y fueron nombrados por Linneo en 1753 como *Cactus Opuntia*. Posteriormente, Miller corrigió y *Opuntia ficus-indica* fue designada como especie tipo del género, del cual hoy se reconocen cerca de 220 especies y en México existen entre 60 y 90. La complejidad en su nomenclatura es reflejo de su diversidad morfológica (Biodiversidad mexicana, 2012).

Actualmente, los científicos relatan que el nopal es una planta llena de secretos y de beneficios que a lo largo de la vida los vamos descubriendo. Uno de estos acontecimientos más actuales es el uso del



nopal como aditivo en el concreto, esto que para aumentar su resistencia, manejabilidad y disminuir su costo (Arguello Hernández, 2012).

2.7.1.2. Antecedentes

El origen e historia del nopal están íntimamente relacionados con las civilizaciones más antiguas de nuestro país, pero en especial con las mesoamericanas y de manera particular, con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica, fueron las que iniciaron su cultivo de modo formal.

Los antiguos relatos hacen mención a la gran variedad de nopales que existían, así como el uso que se les daba. Al acercarse la época de fructificación de los nopales, los pobladores se alimentaban de sus frutos. Sin duda, los nopales influyeron en el asentamiento de tribus errantes que concurrían en la época de fructificación a las zonas habitadas por estas plantas; y acababan por fijar ahí su residencia.

La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en excavaciones de Tamaulipas y Puebla. En éstas se encontraron fosilizadas semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal, con antigüedad de siete mil años (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).

2.7.1.3. Tipos y usos de la fibra de nopal dentro de la construcción

Los usos tradicionales que tiene el nopal y sus derivados, además del valor que tiene como alimento en forma directa en México, se suma su aplicación en rubros tan ajenos a los anteriores, como el de la construcción por sus propiedades aglutinantes en adobes y pinturas, o anticorrosivos, como infiltradores de suelo entre otros (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).

Son muchos los sectores industriales que se pueden beneficiar con la explotación del nopal, ya que esta planta es de gran ayuda para el desarrollo de diferentes tecnologías para beneficio del hombre, pero sin embargo el uso que se le da para la construcción es relevante para el estudio dentro de este capítulo. A continuación se mencionan algunas de ellas (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010):



- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas de tuna y nopalitas).
- Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas).
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal).
- Industria cosmética (cremas, “*shampoo*”, lociones de cladodios).
- Industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios).
- Industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta).
- Sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios).
- Sector energético (producción de biogás a partir de las pencas).
- Sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos).
- Sector turismo (artesanías con base en cladodios lignificados).
- Industria textil (uso de colorantes naturales, como el carmín de cochinilla).
- Aditivo anticorrosivo en concreto reforzado (del Valle Moreno, 2015).

En México hay una larga historia del uso del mucílagos 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. A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante, el cual puede ser aplicado 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. El mortero de cal adicionado con baba de nopal se utiliza también para restaurar y proteger edificios históricos debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. Estos morteros tienen una alta resistencia mecánica, una protección impermeable creciente, y características antihongos (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).

Lo anterior indicado por la publicación técnica # 326 del IMT, en donde el estudio del nopal, a lo largo de la literatura, se relaciona únicamente con los morteros de cal adicionándole baba de nopal y la pregunta por contestar sobre la fibra deshidratada de nopal como adición y sustitución en pastas de cemento, mortero y concreto todavía existe.



Se sabe que el uso del cemento en la restauración de edificios históricos tiene efectos perjudiciales porque es demasiado duro e incompatible con el adobe. El empleo de este material restringe la transpiración, aumentando el riesgo del daño causado en humedad.

De acuerdo a la publicación técnica #328 de la SCT y del IMT, resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ($\leq 2\%$ en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado.

2.7.1.4. Fibra de nopal utilizada en la investigación

La fibra de nopal, utilizada en la investigación, es un producto obtenido de manera comercial, de marca CU-CU®, figura 2.12, y distribuido como producto alimenticio para humanos.



Figura 2. 8. Fibra de nopal utilizada en la investigación, grado alimenticio. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Para esta investigación se empleó, como sustitución de la masa total de cemento, el 0.5% y 1.5% de *cactus opuntia* en estado deshidratado en forma de polvo, esto para dar seguimiento a lo que indica la publicación técnica #328 de la SCT y del IMT.



2.7.2. Fécula de Maíz o Almidón

2.7.2.1. Características

El almidón o fécula de maíz es un polisacárido que se obtiene de moler las diferentes variedades del maíz. Suele formar parte de los carbohidratos que se ingieren de manera habitual a través de los alimentos; en estado natural se presenta como partículas complejas que, en presencia de agua, forman suspensiones de poca viscosidad. Su composición es principalmente de glucosa, aunque puede haber otros componentes presentes en menor cantidad.

El almidón de maíz debe conservarse y almacenarse en lugares secos, frescos y no debe estar en contacto con olores fuertes. Es un ingrediente sumamente versátil, se presenta como un polvo blanco muy fino que tiene un sabor característico y proporciona entre el 70 y el 80% de las calorías que consume el ser humano. Por lo regular, el almidón de maíz suele utilizarse como agente espesante en diferentes procedimientos, sin embargo sus usos son más variados (Jacobo Jacobo, 2014).

La fécula de maíz cuenta con diversas características como son:

- **Gelatinización:** Durante la gelatinización o formación de gel o mucílago, se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio de temperatura, siendo los gránulos más finos los que primero gelatinizan.
- **Retrogradación:** Se define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y reaccionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos.
- **Gelificación:** Cuenta con excelente gelificación debido a que tiene una baja viscosidad y es opaca (QuimiNet, 2016).

2.7.2.2. Antecedentes

El almidón es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales, y la principal fuente de calorías de la mayoría de la humanidad. Es importante como constituyente de los alimentos en los que está presente, tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico. Gran parte de las propiedades de la harina y de los productos de panadería y repostería pueden explicarse conociendo



el comportamiento del almidón. Además el almidón, aislado, es un material importante en diversas industrias, entre ellas la alimentaria. La técnica para su preparación se conocía ya en el antiguo Egipto, y está descrita por diversos autores clásicos romanos. En esas épocas se utilizaba especialmente para dar resistencia al papiro, y como apresto de tejidos. Actualmente la industria alimentaria es un gran consumidor, al ser el más barato de los materiales gelificantes.

A nivel mundial, son importantes fuentes de almidón el maíz, trigo, papa y mandioca. A escala local, o para aplicaciones especiales, se obtiene también almidón de la cebada, avena, centeno, sorgo, sagú, guisante, batata y arrurruz. El almidón más importante desde el punto de vista industrial es el de maíz. Al año se utilizan unos 60 millones de toneladas de maíz para fabricar almidón, bien para su uso como tal o como materia prima para la obtención de glucosa y fructosa (Jacobo Jacobo, 2014).

2.7.2.3. 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, esta 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, 2014).

2.7.2.4. Fécula de maíz utilizada en la investigación

El almidón o fécula de maíz que se utilizó en esta investigación tiene la característica de ser un grano alimenticio para humanos de nombre comercial *Maizena*® (Figura 2.9), 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 testigo de concreto, son en pruebas de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica.



Figura 2. 9. Almidón o fécula de maíz utilizada en la investigación, grado alimenticio. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Metodología

3.1. Caracterización de materiales y propiedades físico-mecánicas de los morteros

3.1.1. Material cementante: Cemento y sustituciones de material orgánico

El propósito de estudiar a fondo las propiedades del cementante es el de encontrar las proporciones óptimas de posibles adiciones para obtener un mejoramiento en las propiedades físicas y mecánicas, y ubicar al producto final con un alto criterio de durabilidad.

3.1.1.1. Densidad del cemento.

El peso específico del cemento (densidad, peso volumétrico, peso unitario, masa unitaria) se define como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas. La masa específica se presenta en megagramos por metro cúbico o gramos por centímetro cúbico (el valor numérico es el mismo en las dos unidades). El peso específico del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Mg/m³. El cemento portland de alto horno y el portland puzolánico, tienen pesos específicos que varían de 2.90 hasta 3.15, con promedio de 3.05 Mg/m³.



El peso específico del cemento no es una indicación de la calidad del cemento, su principal uso es en los cálculos de las proporciones, diseño y control de la mezclas de concreto (Concretos, Obtenido en 2017).

La densidad del cemento desempeña un papel significativo en su producción y funcionamiento. Los minerales crudos se calientan en hornos enormes para promover cambios químicos en éstos. De este proceso se obtiene lo que comúnmente es llamado “clínker”. El cemento se muele hasta una finura determinada puesto que la influencia del tamaño de partícula tanto en su cinética de hidratación así como en el desarrollo de la resistencia de este es bien conocida. Para un contenido de cemento dado, una reducción en los tamaños de partícula medios, produce generalmente una resistencia compresiva más alta.

La norma NTC 221, también menciona que la densidad “real” del cemento o peso específico es aproximadamente 3 g/cm^3 . No obstante se utiliza mucho la densidad “aparente” del cemento, que es aproximadamente $1,1 \text{ g/cm}^3$ (Tomorrow's, 2017).

El análisis de la densidad aparente del cemento se realiza a una muestra representativa del cemento a emplear en el diseño de la mezcla de concreto/mortero tal y como se obtiene después de la fabricación y comercialización del cemento.

Equipo a emplear en la prueba:

- Muestra representativa de cemento.
- Frasco de Le Chatelier.
- Balanza con aproximación a los 0.1 gramos.
- Queroseno exento de agua, o nafta cuya densidad no sea menor de 62 API o petróleo.
- Un recipiente con agua.
- Un termómetro.

Procedimiento:

Para conocer la densidad aparente del cemento se realiza la prueba de laboratorio, la cual consiste en que conocido un peso de cemento, se calcula su volumen por medio de desplazamientos de líquido. Los pasos a seguir durante la prueba son los siguientes:



1. Se vierte el líquido (petróleo) no mezclable con agua en el frasco de Le Chatelier hasta un nivel entre 0 y 1 ml. Como resultado del ingreso de tales líquidos se formaran burbujas de aire y se presentará la adherencia de estos líquidos a las paredes del frasco.
2. Se gira sobre un círculo horizontal sumergiendo la parte inferior del frasco en un baño de agua a la temperatura del líquido con la finalidad que se establezca un nivel líquido.
3. Se toma la lectura en la parte inferior del menisco y se anota como una lectura inicial del líquido.
4. Se pesan alrededor de 64 gramos para cemento portland, con la finalidad que al verterlo en el frasco, el líquido alcance a sobre pasar las lecturas superiores a la esfera intermedia del frasco.
5. Se sujeta el frasco en forma vertical, se agrega el cemento muy lentamente de manera que el cemento vaya pasando al interior sin obstruirse.
6. Se coloca el tapón del frasco, se inclina y rueda horizontalmente de manera de lograr que salga el aire atrapado en el cemento y baje el que haya quedado en las paredes interiores.
7. Se sumerge nuevamente el frasco en el baño de agua, repitiendo el paso N° 2, para lograr que se establezca nuevamente el nivel del líquido hasta lograr que sea rápidamente la misma lectura.
8. Se toma la lectura de la parte inferior del menisco tomándola como una lectura final para los cálculos.

Cálculos: Partiendo de la masa del cemento de alrededor de 64 gramos y considerando como volumen del cemento a la diferencia de lectura final y lectura inicial, se tiene que el cálculo de la densidad aparente del cemento es:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa del cemento}}{\text{volumen del cemento}} = \frac{\text{alrededor de 64 gramos}}{L_f - L_i}$$

El valor resultante del cálculo queda representado en unidades de gr/cm^3 .

3.1.1.2. Consistencia del material cementante.

Es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 26 y 33% (Instituto del Concreto, 1997).

La consistencia del cemento se mide por medio del aparato de Vicat (figura 3.1), en donde tal propiedad del cemento resulta como la cantidad de agua necesaria que requiere una pasta de cemento



para presentar una penetración de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, bajo la superficie libre, empleando una aguja de 1 cm de diámetro y un molde para colocar tal pasta, en un tiempo de 30 segundos después de haber iniciado la prueba (NMX-C-057-ONNCCE, 2015); (ASTM-C-187-04, 2004).

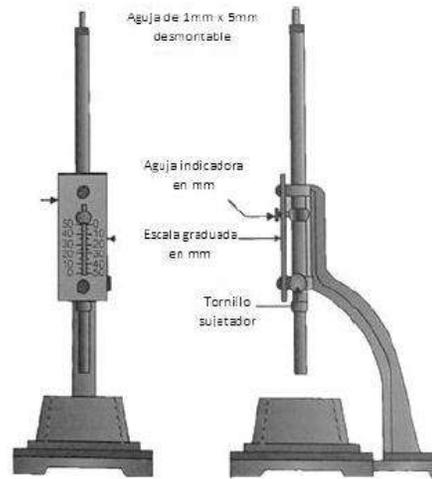


Figura 3. 1. Aparato de Vicat utilizado para realizar las pruebas de consistencia normal.

Una vez obtenida la cantidad de agua necesaria en la pasta de cemento, se efectuara la combinación de una determinada masa de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado.

Equipo a emplear en la prueba:

- Muestra representativa de cemento.
- Agua destilada o limpia.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Recipiente para realizar la mezcla del cemento con el agua.
- Pesas con las variaciones permitidas en la tabla A.S.T.M. C187-55.
- Probeta graduada de 100 y 200 mililitros con aproximación a 1 y 2 mililitros respectivamente.
- Aparato de Vicat.
- Cristal liso



Procedimiento:

En base a la norma NMX-C-057-ONNCCE, 2015 y al libro Análisis de Materiales (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011) el desarrollo de la prueba para conocer la consistencia normal se resume en dos incisos principalmente.

- a) Obtención de la muestra representativa de cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.

A continuación se describe paso a paso el desarrollo de la prueba, teniendo en cuenta los dos incisos anteriores.

1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable, formando una especie de cráter con el cemento (figura 3.2) con ayuda de una pequeña espátula.



Figura 3. 2. Formación del cráter de cemento (V.H. Blancas Herrera, 2017).

2. Se fija una cantidad de agua expresada en por ciento respecto al peso del cemento seco. Se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (figura 3.3). Al mismo tiempo de la caída del agua sobre el cemento se mide el tiempo de la prueba con ayuda de un cronómetro.



Figura 3. 3. Caída del agua sobre el cráter de cemento (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Con la espátula se lleva el material de la orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (tiempo máximo de 30 segundos). Figura 3.4.



Figura 3. 4. Muestra de cemento humedecida (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador para colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
5. Se procede al amasado de la pasta (colocándose guantes de hule ligeramente húmedos) en un tiempo global de 90 segundos, contados a partir del paso 2 anterior. El procedimiento a seguir para el amasado y la incorporación de la esfera de pasta al anillo cónico es el siguiente:
 - En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.



- En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 centímetros, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe de repetir 6 veces terminado lo anterior.
- En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansamos la bola en la palma de la mano, se introduce a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se sostiene con la otra mano llenado completamente el anillo con pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).

Una vez sometida la pasta en el anillo cónico de Vicat, el exceso de esta que permanezca en la boca grande se remueve con un movimiento simple de la palma de la mano.

A continuación se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa la boca superior con una pasa de boca de albañil o una espátula que se mantendrá formando un pequeño ángulo en el borde de la cuchara durante las operaciones de enrasado y enlisado, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.

6. **Determinación de la consistencia.**

- La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo, que forma un émbolo, se coloca en contacto con la superficie de la pasta y se sujeta al tornillo; después se coloca el indicador móvil F en la marca cero ubicado en la parte superior de la escala (todo lo anterior se puede hacer previo al realizado de la mezcla para ya no entretenerse ya que esto se debe hacer dentro de los 30 segundos).
- Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30s y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento. Si la lectura no es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, se repite el procedimiento antes descrito hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento.

En esta investigación se repite el mismo procedimiento para las distintas pastas de cementante, agregando la sustitución parcial de material orgánico correspondiente, hasta lograr los porcentajes deseados de consistencia normal para determinar posteriormente los tiempos de fraguado.



3.1.1.3. Fraguado del material cementante.

Es el término utilizado para describir la rigidez de la pasta del cemento. En general, el fraguado se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al incremento de resistencia de una pasta de cemento fraguada. En la práctica, se utilizan los términos de fraguado inicial y fraguado final para describir etapas de fraguado elegidas arbitrariamente (Neville & Brooks, 1999).

El fraguado inicial según la norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2014) se define como el tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.

El fraguado final es el tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.

Para la determinación del fraguado inicial como final del cemento hidráulico se realiza la prueba de tiempos de fraguado mediante las agujas de Gillmore, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-266. El desarrollo de la prueba se realiza con ayuda del manual de prácticas de Análisis de Materiales, en donde el procedimiento de tal análisis es el siguiente:

Equipo a emplear en la prueba:

- Aparato de Gillmore.
- Balanzas.
- Pesas.
- Probetas graduadas.

Temperatura y humedad:

La temperatura del laboratorio, material y equipo deben mantenerse entre 20° y 27° C, la que respecta a la del agua de mezclado y la cámara de humedad no deben variar de 23° C \pm 2° C y la humedad relativa del laboratorio no será inferior a 50.



Procedimiento:

▪ **Preparación de la pasta de cemento.**

Siguiendo el procedimiento descrito en la preparación de mezcla para la consistencia normal se mezclan 650g del cemento con el agua necesaria para su consistencia normal.

▪ **Moldeado del espécimen.**

Con la pasta de cemento preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia de aproximadamente 4" por lado, se hace una pastilla de poco más o menos 7.5 centímetros de diámetro y 1.3 centímetros de espesor en la parte central, disminuyendo hacia los bordes. Para moldearla, se aplana primero la pasta de cemento sobre el vidrio moviendo la cuchara desde los bordes hacia el centro, aplanando a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo, salvo cuando vaya efectuarse determinaciones del tiempo de fraguado.

▪ **Determinación de los tiempos de fraguado.**

Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la de menor masa, figura 3.5), sin que marque huellas apreciables. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore Final (la de mayor peso), sin que marque huella apreciable (ASTM-C-266, 2015).



Figura 3. 5. Medición del tiempo de fraguado, fraguado inicial (V.H. Blancas Herrera, 2017).

Especificaciones respecto a la prueba:

El tiempo de fraguado se afecta no solo por el porcentaje de sustitución, temperatura del agua empleada y cantidad de amasado que haya recibido la pasta, sino también por la humedad relativa del ambiente, entonces su determinación es solo aproximada.



3.1.2. Material pétreo fino: Arena

Como ya se mencionó en el capítulo anterior la arena utilizada para la elaboración del mortero con sustituciones parciales de fibra de nopal y almidón fue del banco de materiales “Joyitas” ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia - Quiroga entrada a la comunidad de San Bernabé en Michoacán.

El caracterizar el agregado conlleva no solo a conocer en qué condiciones se encuentra el material traído desde el banco “Joyitas”, sino por el contrario, se efectúan principalmente para tener datos de prueba que nos lleven a un mejor diseño de las mezclas.

Los ensayos a desarrollarse para conocer las características principales de la arena están regidos por una serie de normas tanto mexicanas como extranjeras, las cuales se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos.

PRUEBA DE LABORATORIO	NORMA NMX	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97



Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCE-03	ASTM-D-2419-02

3.1.2.1. Cuarteo del agregado pétreo.

El cuarteo es un método para reducir la muestra de agregados obtenida en el campo al tamaño requerido para las pruebas y que se conserven representativas (documents.mx, 2015).

Es primordial antes de realizar cualquier prueba, para conocer las diversas propiedades del agregado, obtener una muestra representativa del material a granel que se obtuvo directamente del banco de material. Para obtener esta muestra representativa se realiza el método de cuarteo.

“El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y solo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio” (NMX-C-030-ONNCE, 2004).

La muestra principal se forma de diferentes porciones tomadas de diversos puntos del total. Para identificar la muestra representativa, en todas las etapas de reducción es necesario asegurarse de que el material no pierda su carácter de representatividad, a fin de que dicha muestra contenga todas las propiedades de la muestra principal (Neville & Brooks, 1999).

Para realizar el cuarteo o reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo, existen tres técnicas o métodos distintos, los cuales se describirán a continuación.

Método “A” Cuarteo Mecánico, divisor de muestra.

Equipo a emplear:

- Cuarteador de muestras
- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.



Procedimiento:

1. Se toma la muestra y se coloca en una charola ancha y se realiza el vaciado sobre la parte superior del divisor o cuarteador mecánico (figura 3.6), procurando repartirla en toda la longitud del divisor, de tal forma que fluya por cada uno de los conductos cantidades aproximadamente iguales de material.



Figura 3. 6. Cuarteo por divisor mecánico (V. H. Blancas Herrera, 2017).

2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo.
3. Si se desea una muestra más pequeña, el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, repitiendo el proceso de división y eliminación, cuantas veces sea necesario, hasta lograr la muestra del tamaño requerida.

Método “B”, Cuarteo Manual (cuarteo con palas)

Equipo a emplear:

- Pala
- Cucharón de punta recta o cuchara de albañil
- Escoba o cepillo.

Procedimiento:

1. Se coloca la muestra original sobre un nivel de superficie limpio y duro, donde no pueda existir ninguna pérdida de material o adición accidental de material foráneo.



2. Se mezcla el material completamente traspaleando toda la muestra en una pila cónica, depositando cada paleada sobre la anterior. Este paso se realiza tres veces de un extremo a otro.
3. Ejerciendo presión sobre el vértice por medio de la pala, se aplanada la parte superior de la pila.
4. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales, utilizando la pala, removiendo y eliminando dos de los cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona.
5. Se emplean los dos cuartos restantes para efectuar las pruebas requeridas.

NOTA: Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.



Figura 3. 7. Cuarteo Manual (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Especificaciones respecto a la prueba:

Las muestras de campo de agregado fino deben estar superficialmente secas, y deben reducirse en tamaño por el método “A”. Las muestras de campo que se reduzcan por el método “B” deben encontrarse húmedas superficialmente, de no ser así se deben humedecer debiendo ser remezcladas.



Referencia:

(NMX-C-170-ONNCCE, 1997); (ASTM-C-70, 2003).

3.1.2.2. Humedad actual en arenas.

La normativa define a la humedad actual como la cantidad total de agua que contiene la muestra de agregado, al momento de efectuar la determinación de su masa, para dosificar una revoltura, puede estar constituida por la suma del agua superficial y la absorbida (NMX-C-166-ONNCCE, 2006).

El objetivo de realizar este análisis, es el de determinar el porcentaje de humedad que contiene el agregado en el momento de utilizarlo para la elaboración de una mezcla y así poder realizar la corrección correspondiente por humedad.

El desarrollo de la prueba consiste en realizar una serie de pasos para posteriormente aplicar la siguiente fórmula, según lo establecido en las normas (NMX-C-166-ONNCCE, 2006) y (ASTM-C-566, 2013).

$$\% \text{ humedad actual} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Dónde:

M_h = Masa de la muestra en gramos.

M_s =Masa seca del material en gramos.

$M_h - M_s$ = Masa del agua que contenía el material.

Equipo a emplear:

- Muestra representativa de arena (NMX-C-030-ONNCCE, 2004), previamente homogenizada y de aproximadamente un kilogramo.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica o de gas.
- Charolas metálicas.
- Agitador o espátula de tamaño adecuado.
- Vidrio de aproximadamente 10 mm de espesor.



Procedimiento:

1. Se toma una muestra del material preparado conforme a la norma (NMX-C-030-ONNCCE, 2004), de aproximadamente 300 gramos, registrando este valor como masa inicial de la muestra o masa húmeda actual (Mh).
2. Se seca totalmente la muestra en el recipiente metálico, por medio de la parrilla eléctrica, teniendo la precaución de evitar pérdidas de partículas durante el secado. Durante el secado se debe mover continuamente la muestra con la espátula, para acelerar la operación y evitar sobrecalentamiento (figura 3.8).



Figura 3. 8. Secado del material, para la obtención de la Humedad actual (V.H. Blancas Herrera, 2017).

3. Se coloca el vidrio sobre el material y en el momento que este no se empañe, se deja de calentar el agregado en la parrilla, lo cual significa que el material ya se encuentra seco.
4. Se deja enfriar un poco el material y se pesa posteriormente, registrando tal medición, como la masa final o masa seca de la muestra (Ms).



Especificaciones respecto a la prueba:

La desviación estándar del contenido de humedad de agregados para un operador con el mismo equipo, es de 0.28%. Por lo tanto el resultado de dos pruebas conducidas por el mismo operador con el mismo equipo y sobre la misma muestra, no debe diferir una de la otra por más de 0.79%.

3.1.2.3. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.

La humedad superficial se expresa como un porcentaje de la masa del agregado saturado y superficialmente seco y se le conoce como el contenido de humedad (Neville & Brooks, 1999).

La absorción en arenas se define como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como porcentaje de la masa seca y es índice de la porosidad del material (NMX-C-165-ONNCCE, 2014).

El ensayo que se realiza para determinar la cantidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje consiste, sencillamente, en encontrar la pérdida de masa de una muestra de agregado sometida a secado en una bandeja colocada sobre una fuente de calor. Dicha prueba se realiza a continuación, considerando como referencias principales la norma mexicana (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) y la norma americana (ASTM-C-128, 2015).

Equipo a emplear:

- Una muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Una parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Un cono metálico (truncocónico).
- Un pisón.
- Una espátula.

Procedimiento:

1. La muestra de 2 kilogramos se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras ya descritos anteriormente.



2. Al término de este tiempo, se seca superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico como se describe a continuación:
- Se coloca la cantidad de arena suficiente en la charola, para posteriormente ponerla en contacto con la parrilla eléctrica con el propósito de eliminar el exceso de agua que contiene la muestra, dicho esto de otra manera, es hacer el secado de la arena en forma superficial.
 - Dado el proceso de secado del agregado, para saber el momento en que la arena se encuentra seca superficialmente, se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo (figura 3.9). Se llena el molde con la arena en cuatro capas, distribuyendo 25 golpes dados con el pisón; dando 10 a la primera, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse, significa que se ha secado superficialmente y si por el contrario la arena mantiene la forma del cono significa que la arena conserva agua en exceso, por lo tanto hay que continuar secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Figura 3. 9. Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico (V. H. Blancas Herrera, 2017).



3. Una vez que se ha notado que la arena se encuentra seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando esta masa, como masa saturada y superficialmente seca (M_h).
4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Para saber cuándo el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrarlo como masa seca del material (M_s), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material hasta secarlo completamente.

Cálculos de la prueba:

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Donde:

M_h = Masa saturada y superficialmente seca (gramos).

M_s = Masa seca del material (gramos).

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

Se le considera masa volumétrica de los agregados, a la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena consiste en conocer una masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural. Dicho ensayo se lleva a cabo como se indica en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004, desarrollada de la siguiente manera.



Equipo a emplear:

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de masa y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharón y una pala.

Procedimiento:

1. Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura de aproximadamente 5 centímetros, medida a partir de la arista superior del recipiente (figura 3.10), distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.



Figura 3. 10. Caída libre del agregado (Arguello Hernández, 2012).

2. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo (figura 3.11).



Figura 3. 11. Determinación de la masa del material en el recipiente (V. H. Blancas Herrera, 2017).



3. A la masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena. Siendo los cálculos de la prueba los siguientes.

Cálculos de la prueba:

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

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

Como su nombre lo indica la determinación de la masa volumétrica seca y varillada se realiza a partir de una determinada compactación (varillada) del agregado fino, dentro del mismo recipiente que se empleó para determinar la masa volumétrica seca y suelta anteriormente.

La prueba se rige por la norma NMX-C-073-ONNCCE, 2004 y aplica a agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 40 mm o menor.

Equipo a emplear:

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharón y una pala.

Procedimiento:

1. Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Cuidando que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.



2. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
3. Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Cálculos a realizar:

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

3.1.2.6. Granulometría en el agregado fino (arena).

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm, los cuales deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo; debiendo ser las partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, de recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo más conveniente para lograr una buena trabajabilidad (ARQHYS 2., 2017).

En el agregado fino hay dos elementos de máxima importancia y los cuales deben ser considerados, por un lado el módulo de finura (MF), y por otro lado la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finura aceptables (entre 1.9 y 3.5) pero carecer de algún tamaño granulométrico (Colín Velázquez, 2016).

El nombre de análisis granulométrico se le da a la sencilla operación de separar una muestra de agregado en fracciones, cada una de las cuales consta de partículas del mismo tamaño. En la práctica



cada fracción contiene partículas que se encuentran dentro de límites específicos, que son las aberturas de los tamices normales del muestreo (Neville A. , 1998).

El análisis granulométrico consiste en pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura. A continuación se presenta una metodología práctica del ensayo para la determinación de la granulometría en el agregado fino.

Equipo a emplear:

- Un juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola con su respectiva tapa.
- Una balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.
- Charolas, espátulas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos. Dicha muestra debe ser el resultado final de la reducción por cuarteo y no debe permitirse el ajuste a una masa predeterminada.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$ ($110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$).
3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Como se observa en la figura 3.12, se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), vaciando la muestra de 500 gramos en la parte inferior, para posteriormente tapar la malla de mayor abertura.



Figura 3. 12. Mallas colocadas en orden decreciente (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Una vez tapado el juego de mallas, con ayuda de un agitador manual o mecánico (Raf-tap), se agita la muestra (figura 3.13) durante un tiempo de 10 minutos como mínimo.



Figura 3. 13. Empleo de la máquina Raf-tap para agitar la muestra (V.H. Blancas Herrera, 2017).

6. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando las masas en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado (figura 3.14) y con ayuda de un cepillo de alambre se desalojará el material que se encuentra entre los espacios de las mallas 4, 8, 16 y 30, mientras que las mallas 50, 100 y 200 se limpiarán con cepillo de cerdas.



Figura 3. 14. Extracción del material retenido en cada una de las malla (V.H. Blancas Herrera, 2017).

7. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado (figura 3.15), esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error.



Figura 3. 15. Material retenido en cada una de las mallas previamente pesado (V.H. Blancas Herrera, 2017).

8. Se determina la masa retenida en cada criba por medio de una balanza o báscula que se específica en esta prueba, y se calculan los porcentajes hasta los décimos.

El informe del análisis granulométrico debe considerar una tabla como la que a continuación se presenta, dicha tabla presenta el registro de las masas retenidas en cada tamiz o malla. Incluyendo como resultado:

- El porcentaje total del material que pasa cada criba, o bien.
- El porcentaje del material retenido acumulado en cada criba, o también.
- El porcentaje del material retenido entre dos cribas consecutivas.



Tabla 3. 2. *Tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de granulometría.*

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MALLA	MASA RETENIDA	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
CHAROLA				
SUMA				

Cálculos a realizar:

1. Teniendo como referencia, la numeración de las columnas de la tabla 3.2, se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas en la columna (2).
2. El retenido de la columna (3) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{suma masa retenida}} * 100$$

3. El % acumulativo se calcula a partir de los datos de la columna (3) como sigue:

$$\% \text{ acumulativo} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior}$$

4. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ que pasa la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de malla}$$

Se calculan los porcentajes basándose en la masa total de la muestra incluyendo el del material que pasó la criba 0.075 mm (malla No. 200).

5. Módulo de finura:

$$M. F. = \frac{\text{suma del \% acumulativo de todas las mallas sin incluir la charola}}{100}$$

Recomendaciones y especificaciones del cálculo:

Consignar los porcentajes en números enteros excepto para el porcentaje que pasa la criba 0.075 mm (malla No. 200) que debe informarse hasta 0.1 del porcentaje (NMX-C-077-ONNCCE, 1997), (ASTM-C-136, 2014), (NMX-C-251-ONNCCE, 1997).



Para fines de calidad se recomienda que el Módulo de finura esté entre 2.5 y 3.0. De acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) puede estar entre 2.3 y 3.2.

En la tabla 3.3 Bureau Of Reclamation A.S.T.M. menciona las siguientes especificaciones granulométricas.

El porcentaje referido de dos mallas sucesivas no debe ser mayor a 45%.

La figura 3.16 presenta los límites granulométricos para agregado fino para mezclas de concreto y mortero.

Tabla 3. 3. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.

MALLA	% QUE PASA
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10

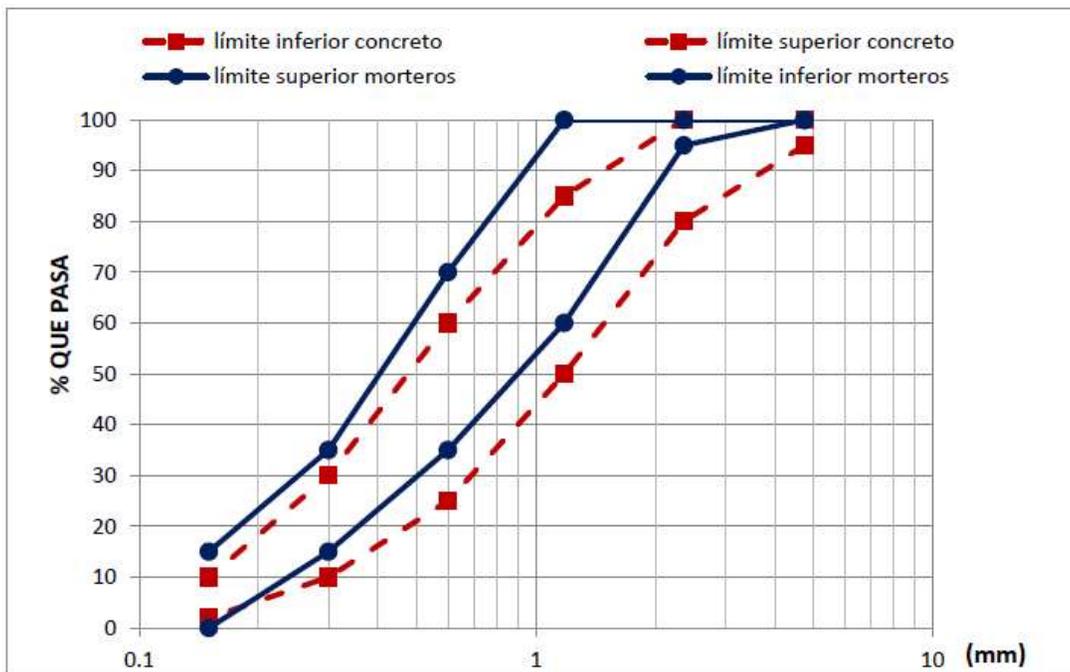


Figura 3. 16. Límites de granulometría para morteros y concreto (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).



3.1.2.7. Colorimetría en arenas.

Existen tres amplias categorías de sustancias perjudiciales que pueden encontrarse en los agregados: *impurezas orgánicas*, que interfieren en el proceso de hidratación del cemento; *recubrimientos*, que impiden el desarrollo de una buena adherencia entre el agregado y la pasta del cemento, y algunas partículas individuales que son en sí mismas débiles o inestables.

En relación con las materias orgánicas, no todas son perjudiciales y lo mejor es verificar sus efectos haciendo especímenes de prueba de compresión. Sin embargo, por lo general se ahorra tiempo si se determina primero que la cantidad de compuestos orgánicos es suficiente para ameritar una prueba ulterior. Esto se hace por medio de la llamada prueba de colorimetría (Neville & Brooks, 1999).

El ensayo de colorimetría consiste en determinar el contenido de material orgánico en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal.

Los agregados después de efectuar el ensayo de impurezas orgánicas, que den un color más oscuro que la coloración No. 3, deben rechazarse, excepto, si se demuestra que la coloración es debida a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas semejantes, especificadas en la tabla 3.4, o bien, si se demuestra que el efecto de las impurezas orgánicas en morteros ensayados a la edad de 7 días, dan resistencias calculadas no menores que el 95% conforme al método que establece la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

Tabla 3. 4. Límites máximos de carbón y lignito en el agregado fino (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

CONCEPTO	Material máximo permisible en la masa total de la muestra, en %
Carbón y lignito:	
En concreto aparente	0.5
En otros concretos	1.0

Equipo a emplear:

- Tres botellas iguales de plástico incoloro de 250 a 350 cm³ con marcas a cada 25 cm³ (frasco de biberón).
- Charolas, parrillas de secado, espátulas, balanza, vasos de precipitado.
- Material para las soluciones y tabla colorimétrica. Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de solución normal en agua destilada.



Procedimiento:

Cuando no se tiene la tabla colorimétrica hay que preparar la solución de color normal como sigue:

- Solución de ácido tánico 2 gramos en 10 cm³ de alcohol, posteriormente se añaden 90 cm³ de agua destilada, se hace en un vaso de precipitado (figura 3.17).
- Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de agua destilada.
- Se toman 2.5 cm³ de la primera solución (ácido tánico) y se reúnen con 97.5 cm³ de solución de sosa cáustica.

Esta solución es de color normal se hará simultáneamente con la prueba que se hace con la arena y se coloca en una botella de las indicadas anteriormente (frasco de biberón).



Figura 3. 17. Elaboración de la solución de color normal. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Posteriormente, al paso de 24 horas se comparan los colores:

- Se toma una muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
- Se seca hasta adquirir masa constante a una temperatura de 383 K \pm 5 K (110°C \pm 5°C).
- Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 133 cm³ (figura 3.18), adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 206 cm³.



Figura 3. 18. Vaciado del material dentro del biberón (V. H. Blancas Herrera, 2017).

- Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo, posteriormente se dejará reposar 24 horas (figura 3.19).



Figura 3. 19. Muestras de arena después de 24 horas en reposo (V.H. Blancas Herrera, 2017).

- Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica (figura 3.20). Si no se tiene esta, se compara con el color de la solución normal que se haya hecho en la otra botella idéntica.

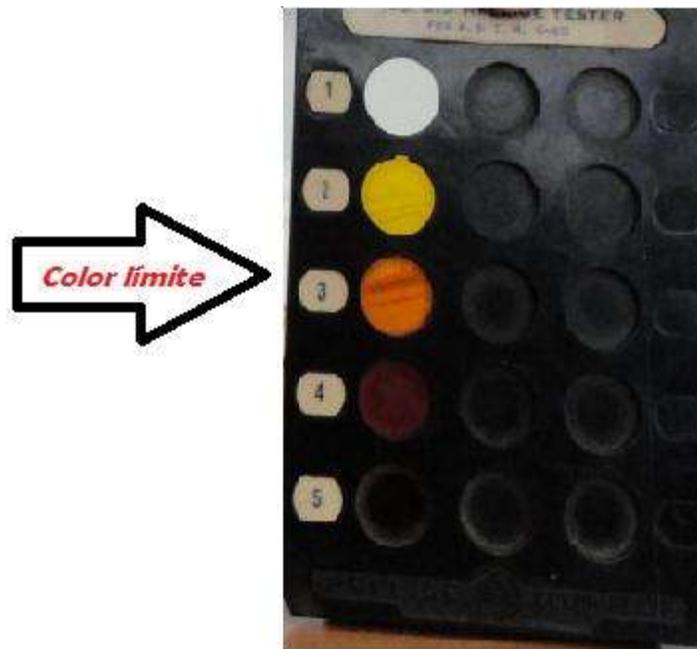


Figura 3. 20 . Tabla colorimétrica. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Recomendaciones respecto al resultado:

Si el color obtenido es más oscuro que el color normal, podemos sospechar de un exceso de materia orgánica en la arena. Para comprobarlo debemos hacer otra prueba de colorimetría con la misma arena pero lavada, ya que ocasionalmente se presentan materiales de origen inorgánico que reaccionan con la solución de sosa cáustica dando un color oscuro sin existir materia orgánica. Esta es la razón por la cual debe de repetirse la prueba, si esta vuelve a dar un color oscuro debemos completar la prueba de colorimetría con un análisis químico (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

3.1.2.8. Sedimentación en arenas.

El objetivo de este ensayo es el de determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto.

Equipo a emplear:

- Un frasco graduado con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444ml y la tercera a los 828 ml.
- Una muestra de arena seca de 2 kilogramos aproximadamente.
- Un litro de agua de preferencia destilada.



Procedimiento:

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml (figura 3.21), para enseguida llenar de agua el frasco hasta la marca de 828 ml.



Figura 3. 21. Incorporación del agregado al recipiente (V. H. Blancas Herrera, 2017).

2. Se tapa el frasco y se procede a agitarlo hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.
4. Se deja reposar el frasco durante 24 horas para determinar el nivel del material fino, esto se logra observando si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml (figura 3.22).



Figura 3. 22. Muestras en reposo (V. H. Blancas Herrera, 2017).

La prueba se realiza en tres frascos iguales, en el mismo lapso de tiempo, esto con la intención de verificar los resultados.



Interpretación de resultados:

- Si el nivel del material fino rebasa la marca de 444 ml se reporta el material con exceso de finos.
- Si el material fino no rebasa la marca de 444 ml, se reporta que el contenido de material fino es aceptable.

Esta prueba no está referenciada con alguna norma, por lo tanto es sólo una prueba complementaria para conocer el contenido de finos del agregado pétreo fino, esto como control de calidad (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

3.1.2.9. Material que pasa por la malla No. 200

La norma NMX-C-084-ONNCCE, 2006 especifica que el ensayo para determinar la cantidad de materia fina que contiene una arena, consiste en lavar por agitación la muestra, separando el agua que contienen los materiales disueltos y en suspensión por decantación, pasándola por la criba 0,075 mm (No. 200).

“La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como porcentaje de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje del material más fino que la criba 0,075 mm (No.200) obtenida por lavado” (NMX-C-084-ONNCCE, 2006).

Equipo a emplear:

- Malla N° 200.
- Malla N° 16.
- Charola de dimensiones adecuadas para contener el material con agua.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Espátula y parrilla eléctrica.
- Un cristal.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de 600 gramos de arena, se seca a una temperatura de $383 \text{ K} \pm 5 \text{ K}$ ($110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$).



2. La muestra una vez seca y fría se coloca en la balanza y se pesa, registrando su masa al décimo de gramo y considerando esta medición como masa seca inicial (M_i).
3. Se coloca el material en un recipiente y se le agrega agua hasta saturar.
4. Se agita enérgicamente la muestra con agua y se vierte inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).
5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua quede completamente clara (figura 3.23).



Figura 3. 23. Lavado del material (V.H. Blancas Herrera, 2017).

6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.
7. Se seca el material completamente con ayuda de la fuente de calor, se deja enfriar y se obtiene la masa; considerando esta lectura como la masa seca después de lavar o final (M_f).

Cálculos a realizar:

$$A = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100$$

Dónde:

A = porcentaje de material que pasa la malla N° 200.

M_i = masa seca inicial, gramos.

M_f = masa seca después de lavar (final) en gramos.



Recomendaciones y especificaciones respecto a la prueba:

Cuando la arena se emplea en la elaboración de concreto hidráulico y esta contiene exceso de partículas finas que pasan la malla N° 200, la cantidad de cemento necesario aumenta considerablemente, existiendo la posibilidad de que aparezcan grietas en las estructuras de concreto. Cuando la arena se encuentra fuera de las especificaciones, si económicamente es posible se recomienda lavarla o adoptar una solución que permita quitarle el material fino o desecharla totalmente.

El material fino de los agregados que pasa por la criba 0.075 mm (malla No. 200) debe cumplir con las condiciones establecidas en la tabla 3.5. La determinación se realiza de acuerdo con el método de ensayo que indica la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

Tabla 3.5. *Materiales finos que pasan por la criba 0.075 mm (malla No.200) (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).*

Concepto	Material Máximo permisible en Masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2014	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 ⁽¹⁾	3.00 ^(A)
En concretos presforzados	8.00 ⁽¹⁾	-
En otros concretos	15	5.00 ^(A)

⁽¹⁾ En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 6 % y 10 %, respectivamente. ^(A)

En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 5 % y 7 %, respectivamente.

3.1.2.10. Terrones de arcilla.

La arcilla puede estar presente en el agregado en forma de recubrimiento superficial que interfiere en la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. Puesto que es indispensable una buena adherencia para obtener una *resistencia* satisfactoria y buena *durabilidad* del concreto, es por ello que el problema de los recubrimientos de arcilla resulta muy importante (Neville & Brooks, 1999).

Las arcillas en los agregados son partículas de baja resistencia estructural, que en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando se encuentran en abundancia formando parte de la arena (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).



Cualquier partícula que pueda desmenuzarse con los dedos y convertirse en finos que puedan separarse por cribado por lavado se debe clasificar como terrones de arcilla o partículas deleznales (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).

La normativa menciona que el objetivo del ensayo de terrones de arcilla es el de conocer la cantidad aproximada de terrones de arcilla y partículas deleznales que contiene el agregado natural, conocido comúnmente como arena (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).

Equipo a emplear:

- Mallas N° 16 y N°30.
- Parrillas eléctricas.
- Charolas.
- Balanzas.
- Espátulas.
- Un cristal.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente un kilogramo, se seca a una temperatura no mayor de 110° C, teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla.
2. Se deja enfriar la muestra y se pasa por la malla N° 16, del retenido se toma una muestra de 100 gramos, anotando dicha masa como masa inicial (Mi), pesados al décimo de gramo. Para la prueba se registra un promedio de tres muestras.
3. Se colocan los 100 gramos de arena en una charola y se le adiciona agua hasta cubrir la muestra, dejándolo saturar en un tiempo de 24 horas.
4. Posteriormente se escurre el agua libre y se extiende la arena en una charola para desmenuzar las partículas deleznales que aún existan, frotándolas con presión entre las yemas de los dedos pulgar e índice (figura 3.24).



Figura 3. 24. Desintegración de los terrones de arcilla. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. A continuación se hace pasar el material por la malla N° 30, lavándola con mucha agua; el retenido en esta malla se recoge en una charola y se seca totalmente con ayuda de la parrilla eléctrica.
6. Una vez seco el material retenido en la malla N° 30, se deja enfriar y se pesa nuevamente al décimo de gramo, registrando esta nueva medida como masa seca sin terrones (Mf).

Cálculos a realizar:

$$\% \text{ terrones de arcilla} = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100$$

Dónde:

M_i = masa inicial, 100 gramos.

M_f = masa seca sin terrones en gramos.

Especificaciones y recomendaciones respecto a la prueba:

Las especificaciones de la ASTM establecen un porcentaje admisible de terrones de arcilla en la arena del 0.6 % y un máximo permisible del 1.2 %. En caso de que la arena esté contaminada en más del 1 % se hará un estudio económico tendiente a ver si es factible cambiar el material o proceder a lavar la arena contaminada para eliminar la arcilla (ASTM-C142/C142M, 2010).



3.1.2.11. Densidad de la arena.

Se sabe que la densidad de un material es numéricamente igual a su peso específico aunque, por supuesto, la última es una relación mientras que la densidad se expresa en kilogramos por metro cúbico (esto en la práctica del concreto).

La densidad absoluta, se refiere al volumen de las partículas individuales solamente, y naturalmente, no es posible acomodar estas partículas para que no haya huecos entre ellas. Cuando el agregado se va a dosificar realmente por volumen, es necesario saber la masa de agregado que llenaría un recipiente de volumen unitario. Ésta se conoce como la densidad aparente del agregado, y esta densidad se usa para convertir cantidades por masa a cantidades por volumen (Neville & Brooks, 1999).

El ensayo para conocer la densidad de una arena, no es otra cosa que, la obtención del volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra. Siendo tal resultado útil para cuando se realizan proporcionamientos de mezclas de concreto y mortero.

De acuerdo a lo establecido en la normativa (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) y (ASTM-C-128, 2015), y con ayuda del manual de Análisis de Materiales (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011) la prueba se desarrolla de la siguiente manera.

Equipo a emplear:

- Muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 gramos.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Molde troncocónico.
- Pisón.
- Probeta.
- Frasco.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.



Procedimiento:

Existen dos maneras para conocer la densidad de la arena, la primera de ellas es mediante el empleo de una probeta, en donde se conoce la densidad, por el aumento de volumen dentro de la probeta y la segunda de ellas por el incremento de masas utilizando un frasco.

- Utilizando la probeta.
 1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 ± 4 horas, al término de este tiempo se seca superficialmente la muestra, utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico (apartado 1.2.3 de este capítulo).
 2. En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial (V_i) en cm^3 .
 3. Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca, registrando este valor como masa de la arena saturada y superficialmente seca (M_a), que aproximadamente estará entre 200 y 300 gramos.
 4. Se coloca la arena ya seca y previamente pesada dentro de la probeta, procurando que no salpique agua para evitar un error en la prueba.
 5. Se agita un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, provocando un aumento en el volumen del agua, para posteriormente registrar este valor como volumen final (V_f).

Cálculos a realizar:

$$DA = \frac{M_a}{V_f - V_i}$$

Dónde:

DA = densidad de la arena en g/cm^3 .

Ma = masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

$V_f - V_i$ = volumen colocado dentro de la probeta en cm^3 .



- Utilizando un frasco.
 1. Se procede a pesar el frasco lleno de agua colocando el vidrio en la parte superior, registrando tal medida como masa inicial (M_i) en gramos.
 2. Enseguida se coloca un muestra de entre 200 y 300 gramos de arena saturada y superficialmente seca dentro del frasco, la cual se registrara su masa como M_h .
 3. Se llena el resto del volumen del frasco con agua, se coloca el cristal y se obtiene la masa, a esta masa la llamaremos M_2 .

Cálculos a realizar:

$$DA = \frac{M_h}{M_i + M_h - M_2}$$

Dónde:

DA = densidad de la arena en g/cm^3 .

M_h = masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

M_i = masa del frasco lleno de agua.

M_2 = masa total del frasco lleno de agua y la muestra de arena.

3.1.2.12. Equivalente de arena.

La normativa mexicana (NMX-C-480-ONNCCE, 2014) define al equivalente de arena como la proporción volumétrica de material no plástico (arena y limo) en una muestra de material que pase por la malla 4.75 mm (No. 4).

La prueba consiste en determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos. Es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como sub base, carpeta asfáltica y arena para concreto.



Equipo a emplear:

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule.
- Tubo irrigador.
- Un tramo de manguera.
- Un pisón metálico de 1000 ± 5 gramos.
- Cápsulas de 85 ± 5 mi (metálicas).
- Embudo.
- Cronómetro.
- Dos frascos de 3.875 litros.
- Malla N° 4.
- Papel filtro N° 12.

Para el ensayo se necesitará preparar previamente dos soluciones antes de efectuar la prueba, una solución de reserva y una de trabajo (figura 3.25).

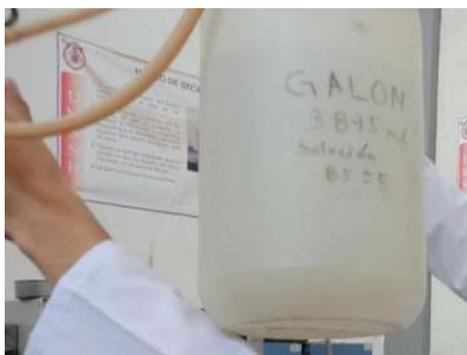


Figura 3. 25. Preparación de la solución de trabajo (V. H. Blancas Herrera, 2017).

***Preparación de la solución de reserva.**

En un frasco se disuelven 454 gramos de cloruro de calcio en 1.89 litros de agua destilada, se deja enfriar la solución y se hace pasar a través del papel filtro, se le agregan 47 gramos de formaldehído en solución volumétrica al 40 % y 2050 gramos de glicerina USP (normalizada), mezclando el total, finalmente se le agrega agua destilada hasta completar los 3.785 litros y agitando toda la solución para uniformizarla.

***Preparación de la solución de trabajo.**

En un frasco de 3.785 litros se colocan 85 ± 5 cm³ de la solución de reserva completando con agua destilada hasta el nivel de 3.785 litros.



Procedimiento:

1. Se toma una muestra de material de aproximadamente 500 gramos que pasa la malla N° 4, procurando que no se pierdan finos.
2. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa. La prueba se realiza por triplicado y se hace un promedio de los resultados.
3. Se vierte solución de trabajo en las probetas (figura 3.26) hasta una altura de $10.16 \text{ cm} \pm 0.25 \text{ cm}$ ($4'' \pm 0.1''$) y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material.



Figura 3. 26. Inyección de solución de trabajo a la probeta (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4. Se deja reposar 10 ± 1 minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo (figura 3.27).



Figura 3. 27. Reposo de las muestras (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Se coloca el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo, para posteriormente agitar, de forma manual, cada una de las probetas con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos.



6. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedó en las paredes de la probeta; se llena con solución de trabajo hasta la marca de 15 y se deja reposar 20 minutos, al término de este tiempo en la escala de la probeta se lee el nivel superior de la arcilla en suspensión la cual se denominará como LNS_{finos} .
7. Se introduce el pisón lentamente en la probeta ajustando hasta que el pisón se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará LNS_{arena} .

Cálculos a realizar:

Para determinar el equivalente de arena se aplica la siguiente fórmula:

$$E. DE ARENA = \frac{LNS_{arenas}}{LNS_{finos}} * 100$$

Donde:

E. DE ARENA = es el equivalente de arena, (%).

LNS_{arena} = es el nivel superior de la arena, (cm).

LNS_{finos} = es el nivel superior de los finos, (cm).

Causa de error que pueden presentarse durante la prueba:

- Agitar de forma inapropiada.
- Mover las probetas cuando se encuentran en reposo.
- Introducir el pisón en la probeta a velocidad excesiva.

3.1.3. Agua.

El estudio del agua potable que se emplea para la elaboración tanto de las distintas pruebas como del curado y hechura del concreto y el mortero, se realiza debido a la necesidad de conocer los valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas de las aguas naturales.

El agua utilizada en el presente trabajo es proveniente de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Dicha agua no fue sometida a tratamiento alguno antes de realizar los distintos ensayos del laboratorio, si no por el contrario se empleó tal cual como llega al Laboratorio, esto para realizar las mezclas lo más pegado posible a lo que se utiliza en la obra, en condiciones reales. Generalmente se utiliza el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).



El agua potable del laboratorio cuenta con un reporte de calidad del agua, realizado en el año 2014, por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes expidieron los resultados conforme a la normativa mexicana (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

3.1.4. Aditivo

De acuerdo a la ficha técnica emitida por la empresa Christianson, S.A. de C.V., la cual distribuye el aditivo como producto comercial en polvo, el Crisotan® R-5 es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que provocan la atracción entre ellas.

El Crisotan® R-5 provoca que la mezcla de concreto fluya más fácilmente que una mezcla convencional. Este efecto se llama plastificación.

Como superplastificante, el Crisotan® R-5 proporciona a la mezcla de concreto una óptima plastificación y permite que sea colocado con mayor facilidad. Además, el uso del Crisotan® R-5 permite reducir la relación agua-cemento sin pérdida en el revenimiento. Esto resulta directamente en un incremento de la resistencia inicial y final a la compresión del concreto.

El Crisotan® R-5 es un agente no tóxico que no provoca espuma. Y dado que es un producto sintético, presenta propiedades uniformes de un lote a otro, a diferencia de los lignosulfonatos.

Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150° C. Su temperatura de descomposición es a los 380° C. En dosificaciones normales (Tabla 3.6), el Crisotan® R-5 no afecta al calor de hidratación del concreto; no contribuye a la corrosión del acero, ni al crecimiento de microorganismos y la dosificación del Crisotan® R-5 se basa en el contenido de cemento de la mezcla de concreto.

Tabla 3. 6. *Dosificación del CRISOTAN R-5 en polvo para una mezcla de concreto (Christianson, S.A. de C.V.).*

Agregados	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³
Cemento	445	445	445	379
Arena	796	867	914	972
Grava	920	920	920	920
Agua	206	170	155	158
CRISOTAN R-5 (SÓLIDOS)	-	1.8	3.3	2.8
Revenimiento (cm)	11.5	10.2	12.7	10.8
% RH	-	18.18	25.3	24
% RC	-	-	-	14.8
Relación a/c	0.46	0.38	0.34	0.41



La plasticidad que imparte el Crisotan R-5 a una mezcla de concreto produce una fluidez en el llenado de moldes. Cuando los moldes se retiran, el concreto resulta de superficie más uniforme, sin accidentes.

El procedimiento empleado para la incorporación del aditivo plastificante a la mezcla de mortero fue el siguiente:

Equipo a emplear:

- CRISOTAN R-5 en polvo.
- Probetas graduadas.
- Agitador.
- Agua de mezclado.
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. Se pesó la cantidad requerida en gramos, para cada mezcla, de porcentaje de aditivo CRISOTAN R-5 sólido (en polvo). Figura 3.28.



Figura 3. 28. Medición de la cantidad de aditivo requerida (V.H. Blancas Herrera, 2017).

2. Se llenó de agua la probeta con la cantidad referida por el proporcionamiento de cada una de las mezclas a realizar.
3. Se incorporó a la probeta la cantidad de aditivo y con ayuda del agitador se mezcló hasta diluir el polvo en el agua, obteniendo un color café-oscuro. Figura 3.29.



Figura 3. 29. Incorporación del aditivo en el agua (V.H. Blancas Herrera, 2017).

4. Se dejó reposar el CRISOTAN R-5, ya diluido en el agua, durante un tiempo de 30 minutos. Pasado este tiempo se incorporó a la mezcla de mortero para así realizar el colado de los especímenes.

Especificaciones respecto a la incorporación del aditivo:

El porcentaje requerido para cada mezcla se definió antes de cada prueba, por medio de “tanteos” hasta llegar a obtener la fluidez de 110 ± 5 , sin utilizar cantidades mayores a las que especifica la ficha técnica.

Se llegó a la conclusión de que el aditivo reacciona de diferente manera dependiendo del tiempo que esté en contacto con el agua, por ello, en todas las mezclas, el aditivo se dejó reposar el mismo tiempo de 30 minutos.

3.2. Pruebas realizadas al mortero fresco.

Una vez caracterizados, tanto los materiales sustitutos, el cemento y agregados, y previo a la elaboración de los especímenes se realizaron pruebas al mortero fresco, teniendo como objetivo encontrar a través de “tanteos” la cantidad de agua y aditivo necesaria para tener una buena trabajabilidad en la mezcla.



3.2.1. Fluidez

El ensayo para determinar la cantidad de agua necesaria para que la pasta de mortero adquiriera la trabajabilidad adecuada, es conocido como prueba de fluidez, dicha prueba consiste en que la mezcla logre una fluidez de $110 \pm 5\%$ en la mesa de fluidez (ASTM C 109 M, I., 2002), (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), (NMX-C-144-ONNCCE, 2010).

Cuando se habla de trabajabilidad en la mezcla de mortero, se refiere a que la mezcla debe adquirir un buen comportamiento al momento de mezclarse, así como propiedades de manejabilidad, plasticidad y ductilidad; evitando fenómenos como la exudación y segregación.

La prueba de fluidez que se realizó, en esta investigación, dentro de los estándares de la normativa mexicana, fue con la metodología descrita a continuación.

Se hace mención al procedimiento del ensayo de fluidez que se llevó a cabo para cada mezcla tentativa de mortero. La mezcla óptima dada por este ensayo se le realizó un número repetitivo de prueba para constar que la fluidez en el mortero fuera la correcta.

Las relaciones agua/cemento para cada mezcla de mortero en estudio, se iniciaron con valores de experimentaciones anteriores, para los cuales la mezcla de testigo fue con una relación agua/cemento de 0.8.

Equipo a emplear:

- Mesa de fluidez manual.
- Aceite SAE-10 (lubricante).
- Moldes.
- Calibrador.
- Pisón para compactar de 5/8".

Procedimiento:

Antes de realizar la prueba de fluidez se tomaron en cuenta los siguientes aspectos de acuerdo a lo establecido en la norma vigente (NMX-C-144-ONNCCE, 2010), la cual establece las dimensiones y el acondicionamiento del equipo.

1. Lubricación de la mesa. El eje vertical se mantiene limpio y se lubrica con aceite SAE-10. No debe haber aceite entre las caras de apoyo de la saliente del eje y el soporte. El aceite sobre la cara de la leva disminuye el desgaste y facilita la uniformidad del funcionamiento, se recomienda levantar la mesa y dejarla caer doce veces.



2. El molde para colar el espécimen para el ensaye es de bronce o latón con diámetro de la boca superior de 70 mm, las superficies definidas por la base y el borde superior serán perpendiculares entre si y al eje del cono vertical.
3. El calibrador se usa para medir el diámetro del mortero después de que haya extendido, tiene una exactitud tal que la distancia entre las quijadas debe ser de 102 mm cuando el indicador se encuentre en cero.

Una vez que se tiene en condiciones de uso la mesa de fluidez se realizaron de forma adecuada los siguientes pasos:

- Se realiza una mezcla de mortero (figura 3.30) que contiene 1000 g de material cementante, 2750 g de arena y se empieza con una relación agua/cemento baja.



Figura 3. 30. Elaboración de mezcla de mortero, partiendo de una relación a/c baja (V.H. Blancas Herrera, 2017).

- Se humedece la superficie de la mesa de fluidez y se pone sobre la mesa el molde troncocónico.
- Se procede a llenar el molde troncocónico en dos capas, cada capa deberá de compactarse con la masa del pisón metálico (figura 3.31), 20 impactos repartidos de manera helicoidal en cada capa.



Figura 3. 31. Compactación de la mezcla (V. H. Blancas Herrera, 2017).



- Se enrasa la mezcla hasta el tope del molde troncocónico, con una espátula a un ángulo de 90°.
- Se retira el molde troncocónico de un tirón firme hacia arriba y se le proporcionan 25 giros a la manivela de la mesa a una velocidad constante (figura 3.32), para dar un impacto por cada giro, en 15 segundos.



Figura 3. 32. Expansión de la mezcla de forma manual, haciendo girar la manivela (V. H. Blancas Herrera, 2017).

- Se toman 4 lecturas de mediciones del diámetro de la expansión del mortero o diámetro extendido sobre la mesa con el Vernier (figura 3.33). Dicho diámetro del mortero extendido es el promedio de seis medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas a 0.5 cm. La cantidad de agua de mezclado debe ser la que produzca una fluidez de 110% ± 5% (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).



Figura 3. 33. Medición del diámetro de la mezcla (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Cálculos a realizar:

La fluidez se registra como el porcentaje en que se incrementa el diámetro del mortero extendido con respecto al diámetro original de la base del mortero moldeado, es decir:

$$\%Fluidez = \frac{\text{diámetro extendido} - 25\text{cm}}{25\text{cm}} * 100$$



3.2.2. pH.

El ensayo para la obtención del “potencial de Hidrógeno” (pH) en el mortero en estado fresco, se realizó con ayuda de tiras indicadoras de la marca CIVEQ, fabricada por la empresa Científica Vela Quin S.A. de C.V. (figura 3.34).



Figura 3. 34. Papel indicador de pH (V.H. Blancas Herrera, 2017).

El objetivo de colocar las tiras de papel en la mezcla fresca, es el de saber por medio de estas si la mezcla se encuentra en un estado alcalino, siendo este un característica más de la mezcla en estudio.

Procedimiento:

1. Se colocó una tira del papel indicador sobre el mortero fresco, haciendo que el lado que contiene los indicadores toque perfectamente al mortero (figura 3.35).



Figura 3. 35. Papel indicador puesto en contacto con el mortero (V.H. Blancas Herrera, 2017).

2. Se dejó el papel durante un tiempo de aproximadamente un minuto, con el propósito de que la tira indicadora nos arrojará valor más exacto del pH.



- Al retirar la tira de papel del mortero, se comparó el color obtenido con los valores que vienen en la tabla del producto (haciendo coincidir los 4 colores de la tabla de referencia) y se obtuvo un valor del pH para cada mezcla puesta en estudio.

3.2.3. Temperatura.

(NMX-C-159-ONNCCE, 2004) La temperatura de una mezcla en estado fresco debe aproximarse a la temperatura ambiente que se encuentra a la hora de realizar dicha mezcla. Para la obtención de datos precisos de las temperaturas en cada una de las mezclas en estudio se realizaron lecturas por medio de un termómetro infrarrojo, el cual arroja un valor de temperatura sin afectar la mezcla después de elaborarla.

3.2.4. Elaboración de especímenes.

Una vez determinada las cantidades de los materiales que constituyen a las mezclas de mortero, se procedió a la elaboración de las mismas. La relación agua/cementante resultante de la prueba de fluidez fue de 0.68; dicha relación se logró al realizar la mezcla testigo (solo cemento portland, agua y arena), a la cual se le agregó agua hasta que alcanzara la fluidez de $110 \pm 5\%$, ya lograda la fluidez se calculó la relación a/c de dicha mezcla y se fijó esta relación para todas las mezclas de los diferentes sustitutos a analizar.

Las mezclas que se realizaron a partir de la relación agua/cementante ya mencionada anteriormente fueron cuatro, con cantidades distintas tanto de sustitución de material orgánico como de aditivo según fue el caso, cumpliendo todas estas con la prueba de fluidez. La tabla 3.7 indica las mezclas que se realizaron en la investigación con sus respectivas cantidades de cementante, arena, agua y aditivo.

Tabla 3. 7. Dosificación de las mezclas en estudio (V. H. Blancas Herrera, 2017).

CONTENIDO DE LA MEZCLA	CANTIDAD POR MEZCLA			
	TESTIGO (T10)	FN 0.5%	FN 1.5%	MZ 2% FN 0.5%
Cemento (CPC 30R-RS)	1000 gr	995 gr	985 gr	975 gr
Arena	2750 gr	2750 gr	2750 gr	2750 gr
Agua	680 ml	680 ml	680 ml	680 ml
Aditivo	-	3 gr	5.5 gr	5.6 gr
Relación agua/cemento (A/C)	0.68	0.68	0.68	0.68
Fibra de cactus Opuntia (FN)	-	5 gr	15 gr	5 gr
Fécula de Maíz (MZ)	-	-	-	20 gr



Dichas proporciones de mezclas sirvieron de base para la elaboración de todos los especímenes de prueba para las 4 edades: 120, 150, 180 y 300 días.

El mezclado de las pastas de mortero se realizó dentro de una cubeta con capacidad de 19 litros aproximadamente (figura 3.36), esto debido a las proporciones de las mezclas, las cuales serían muy difícil de mezclarse en un recipiente de porcelana como se acostumbra usualmente.



Figura 3. 36. Mezclado en cubetas de 19 litros (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Una vez incorporados los materiales dentro de la cubeta se procedió a homogenizar el cementante con la arena, para posteriormente incorporarle el agua de mezclado, teniendo en cuenta el tiempo de reposo del aditivo dentro del agua. Para el mezclado de dichos materiales se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, usando como aditamento Aspas Mezcladoras (figura 3.37).



Figura 3. 37. Mezclado de la pasta de portero (V. H. Blancas Herrera).

A partir del momento en que se incorpora el agua a la mezcla se contaron 60 segundos para el mezclado, dividiendo este tiempo en dos periodos de 30 segundos cada uno, en donde el primer periodo consistió en mezclar con las aspas a una velocidad lenta con el objetivo de empapar todas las partículas con agua y el segundo periodo se realizó con una velocidad alta del taladro para así tener lista la mezcla de mortero. Si después de esto aún se notaban partículas sin mezclarse, se contaron otros 30 segundos extras para terminar con la elaboración de la mezcla.



Para la elaboración de las mezclas se usó la cantidad fija de 1000 gr de cementante, puesto que se cuantificó el volumen que se debía llenar en los especímenes para cada edad de prueba que se elaborarían posteriormente.

El cementante se constituye únicamente por el cemento CPC 30R-RS para el caso de la mezcla de mortero testigo (T10), mientras que para las otras tres mezclas, se constituye de un porcentaje de cemento CPC 30R-RS y de un porcentaje de material de sustitución orgánica correspondiente a la mezcla deseada. Estos dos materiales, previo a la incorporación del agregado y el agua, se homogenizaron manualmente utilizando un guante de látex para no perder la cantidad exacta cuantificada.

La norma correspondiente para la elaboración de especímenes menciona que “los moldes y los accesorios para elaborar los especímenes de concreto deben ser de acero, fierro fundido, o de cualquier otro material no absorbente y no reactivo con el cemento Portland u otros cementantes hidráulicos. Los moldes deben cumplir con las dimensiones y tolerancias que se especifican en la norma y deben mantener las dimensiones y sus formas bajo condiciones de trabajo severas. Deben ser no permeables durante su empleo y si es necesario se puede usar materia de sello por la parte externa con el fin de evitar fugas de agua por las juntas, tal como grasa, plastilina o parafina. Deben estar provistos de los elementos necesarios para fijarlos firmemente en sus bases. A los moldes de uso repetitivo se les debe aplicar un desmoldante que facilite sacar el espécimen del molde” (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

3.2.4.1. Cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm.

En la elaboración de los cubos de mortero, con y sin las distintas sustituciones, se optó por apearse a la normativa vigente. Dicha normativa hace mención en cuanto a las dimensiones especificadas de los moldes y para la elaboración de los mismos, mediante un procedimiento repetitivo por la cantidad de cubos que demandaba la experimentación hacia los mismos (ASTM C 109 M, I., 2002); (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

Los moldes que se utilizaron son de un material de acero inoxidable y bronce con dimensiones estándar de 5 cm de arista, fijados a la placa de base con soldadura y unidas las cuatro caras del cubo con una bisagra ubicada en una de las aristas del cubo y realizando el cerramiento con un clavo o tachuela para no permitir la salida de la mezcla al realizar el colado del mortero. Figura 3. 38.



Figura 3. 38. Molde para elaboración de cubo (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Procedimiento para la fabricación:

1. Se limpiaron los moldes con una estopa para tener una superficie libre de polvo.
2. Se cubrió la superficie de todo el molde, con un desmoldante o líquido denso como lo es el aceite para transmisión mezclado con diésel, esto con la finalidad de reducir la adherencia entre el mortero y las paredes del molde, y así facilitar el desmolde al día siguiente del espécimen de una manera más sencilla sin deteriorar las aristas.
3. Se elaboró la mezcla correspondiente con las cantidades y el procedimiento ya citado anteriormente.
4. Se realizó el llenado de los moldes (figura 3.39), apegado a lo que menciona la norma, en cuatro capas de igual espesor aproximadamente. En cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se le dieron 8 apisonadas en la superficie (con un pisón rectangular de aprox. 2.5cm x 1.25cm en su base), en sentido contrario en cada capa, como se observa en la figura 3.40.



Figura 3. 39. Llenado de los moldes (V. H. Blancas Herrera, 2017).

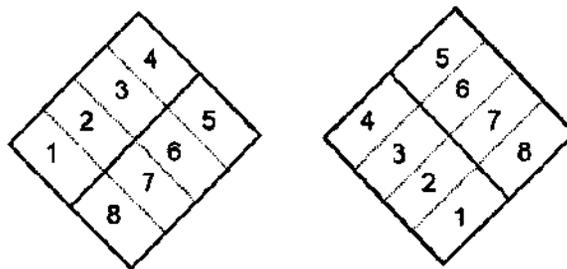


Figura 3. 40. Forma de apisonar el cubo por capa consecutiva (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

- Después del llenado de la última capa, se tuvo el cuidado de dejar un exceso de mezcla en la parte superior del molde, esto para posteriormente enrazar el cubo (figura 3.41) con la ayuda de una espátula y así tener un acabado uniforme liso en la cara de colado.



Figura 3. 41. Enraizado del cubo (V. H. Blancas Herrera, 2017).

- Una vez elaborados el total de cubos para las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se dejaron fraguar en sus moldes, y al haber transcurrido un tiempo de 24 horas aproximadamente, fueron desmoldados (Figura 3.42). En el caso de la mezcla de mortero con sustitución de fibra de cactus *Opuntia* (FN), se dejó el mortero en el molde de 24 a 48 horas, ya que la fibra de nopal actúa como un retardante para el fraguado de la mezcla.



Figura 3. 42. Desmolde del cubo (V.H. Blancas Herrera, 2017).



- Se etiquetó cada espécimen, en la cara de curado, colocando con ayuda de un marcador indeleble su nomenclatura correspondiente, dicha nomenclatura contiene la fecha de elaboración del cubo, la abreviatura de la sustitución con su respectivo porcentaje (figura 3.43).



Figura 3. 43. Etiketado del cubo (V. H. Blancas Herrera, 2017).

- Se sometieron los especímenes al curado. El curado al que fueron sometidos fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 515, 2003).

3.2.4.2. Briquetas.

El molde que se utilizó para la fabricación de las briquetas, cuya forma parece a la de un cacahuete, es de bronce, fijado en uno de sus extremos por una bisagra quedando del lado contrario una paloma de acero para realizar el cierre del molde (figura 3.44).



Figura 3. 44. Molde para la fabricación de briquetas (V.H. Blancas Herrera, 2017).

Para la fabricación de las briquetas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos. Debido a que no existe una norma específica para el llenado de los moldes de briquetas, el llenado fue apegado a lo que dice el Manual de Análisis de Materiales (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011), de la sección de Resistencia de Materiales del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil (UMSNH).



Procedimiento para la fabricación:

1. Se colocó un vidrio de aproximadamente 1 m² en una mesa plana y horizontal, esto con el objetivo de tener una superficie lisa al momento de realizar los especímenes y se cubrió con desmoldante el área del vidrio donde se colocó el molde para el colado de las briquetas.
2. Se elaboró la mezcla para la elaboración de las briquetas de mortero y se hizo el llenado de las briquetas comprimiendo la mezcla con los dedos índice de las manos (figura 3.45).



Figura 3. 45. Llenado del molde (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Posteriormente se enrazó la cara de colado del espécimen con la ayuda de una espátula.
4. Se retiró el molde, una vez enrazadas las briquetas, de forma rápida y con un movimiento hacia arriba (figura 3.46).



Figura 3. 46. Retiro del molde (V.H. Blancas Herrera, 2017).

5. Después de la elaboración del número correspondiente de briquetas para las edades de prueba especificadas, se dejaron fraguar durante 24 h aproximadamente (figura 3.47).



Figura 3. 47. Fraguado de la mezcla en forma de briquetas (V. H. Blancas Herrera, 2017).

6. Se etiquetó cada espécimen con la misma nomenclatura descrita anteriormente para los cubos y se sumergieron en agua para su curado hasta la fecha de prueba.

3.2.4.3. Cilindros de 5 cm Ø x 10 cm h.

En lo que respecta a la fabricación de especímenes cilíndricos, los moldes para adquirir la mezcla de mortero la forma de un cilindro, deben cumplir con las características que dicta la normativa (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), la cual señala que deben ser de lámina gruesa o cualquier material no absorbente, el plano definido por el borde del cilindro debe ser perpendicular a su eje; las dimensiones no deben variar en más de 1% de su diámetro y 1% de su altura de acuerdo a las dimensiones especificadas, respetando la relación 1:2 (diámetro: altura) (NMX-C-160-ONNCCE, 2004) deben estar provistos de una base maquinada metálica con planos lisos y con elementos para sujetarlas firmemente al molde con su plano perpendicular al eje del molde (figura 3.48).

Dado que existen ya moldes de acero inoxidable en el lugar de la experimentación, los cuales cumplen con la norma, se prosiguió a la elaboración de los cilindros de mortero, siendo sus dimensiones de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura. Su procedimiento conlleva a elaborarlo en dos capas y compactarlo, de igual manera que en la elaboración de cubos, solo con la diferencia que para su compactación se utiliza una barra de sección circular de aproximadamente ¼” de diámetro.

Procedimiento para la fabricación:

1. Se limpiaron los moldes con una estopa para tener una superficie libre de polvo.
2. Se engrasó la superficie de todo el molde, tanto dentro como fuera, con un desmoldante.
3. Se elaboró la mezcla correspondiente con las cantidades y el procedimiento ya citado anteriormente.



4. Se realizó el llenado de los moldes, apegado a lo que menciona la norma, en dos capas de igual espesor aproximadamente. En cada capa de mortero se le dieron 25 golpes con una varilla lisa punta de bala de $\frac{1}{4}$ ”.
5. Después de compactar la segunda capa se enrazaron con ayuda de una espátula, para darle forma a la cara de colado del espécimen (figura 3.48).



Figura 3. 48. Enrazado de los cilindros (V. H. Blancas Herrera, 2017).

6. Ya elaborados los cilindros se dejaron dentro del molde durante un tiempo de 24 h aproximadamente en lo que el mortero fraguaba, para posteriormente retirar el molde.
7. Se etiquetó cada cilindro con su nomenclatura correspondiente, para después llevarlos a curar por inmersión en agua hasta el día de la prueba.

3.2.4.4. Prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

La norma correspondiente para la fabricación de prismas de mortero menciona que los moldes deben ser de acero inoxidable y que sus dimensiones estándar serán de 4cm x 4cm x 16cm. Los moldes que se emplearon en la elaboración de los especímenes prismáticos se conformaban de dos primas por molde en donde los dividía una placa fija central (siendo esta la cara longitudinal del prisma) y que de igual manera se unían dos de sus caras por una bisagra, teniendo su cerramiento del lado contrario de esta.

Procedimiento para la fabricación:

1. Se limpiaron los moldes con una estopa para tener una superficie libre de polvo.



2. Se engrasó la superficie de todo el molde, tanto dentro como fuera, con un desmoldante.
3. Se elaboró la mezcla correspondiente con las cantidades y el procedimiento ya citado anteriormente.
4. Se realizó el llenado de los moldes, apegado a lo que menciona la norma, en dos capas de igual espesor aproximadamente, es decir, a la mitad de la altura del prisma; para posteriormente apisonar cada capa con 12 golpes, utilizando el mismo pisón que para cubos, pero realizando la apisonada en diferente sentido a cada capa (figura 3.49) y como se describió en el llenado de cubos.



Figura 3. 49. Llenado y apisonado de los prismas (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Se enrazaron cada molde con ayuda de una espátula, quedando la cara de colado de manera paralela a la de la base (figura 3.50).



Figura 3. 50. Enrazado de los prismas (V. H. Blancas Herrera, 2017).

6. Ya elaborados los prismas se dejaron dentro del molde durante un tiempo de 24 h aproximadamente en lo que el mortero fraguaba, para posteriormente retirar el molde.
7. Se etiquetó cada prima con su nomenclatura correspondiente, para después llevarlos a curar por inmersión en agua hasta el día de la prueba.



3.2.5. Losas de 1 m² x 7 cm para pruebas de adherencia.

Uno de los tantos usos que se le da a los morteros es el de revestir elementos estructurales, es así entonces que sus resistencias mecánicas deben atender fundamentalmente en su respuesta a las tensiones provocadas por pequeños movimientos diferenciales del soporte, tensiones generadas por cambios ambientales e impactos o agresiones externas.

Distinguimos dos tipos de resistencias relacionadas con las solicitaciones que deberá de soportar el mortero: compresión y tracción.

La resistencia a compresión que nos proporciona una idea de la cohesión interna del mortero, indicando así, su capacidad de soportar presiones sin disgregarse y la resistencia a tracción que nos proporciona información sobre la dificultad que oponen las partículas a separarse.

Estas resistencias mecánicas de los morteros de revestimiento no deben ser superiores a la de los soportes. El mortero debe ser lo suficientemente flexible para acompañar leves movimientos del soporte por causas térmicas o estructurales. Una excesiva rigidez provocaría la aparición de fisuras o agrietamientos (CONSTRUMÁTICA, 2017).

Es entonces que se conoce a la adherencia como una característica propia de los morteros de adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (concreto, piedra, ladrillos, acero, etc.), siendo una de las propiedades más importantes con la que debe cumplir los morteros (A. Cabrera, 1995).

Para esta investigación se realizó un estudio para determinar la resistencia a la adherencia que alcanzan los morteros base cemento a los 120 y 180 días. Para ello se prepararon las cuatro mezclas en estudio con la misma relación a/c utilizada para la elaboración de los especímenes de prueba descritos anteriormente.

El estudio para conocer dicha resistencia a la adherencia comenzó con la elaboración de dos losas de concreto de 1 m² por 7 cm de espesor aproximadamente, fabricadas con el fin de colocarles en la parte superior una capa de cada mezcla de mortero con sus diferentes sustituciones y realizar posteriormente sobre la capa de mortero y concreto la prueba de adherencia.



Procedimiento para la fabricación:

1. Usando el método del ACI, se realizó el cálculo para conocer la dosificación de la mezcla de concreto con una resistencia de diseño de 250 kg/cm^2 , en el cual se obtuvieron las siguientes cantidades de material para las dos losas requeridas.

Tabla 3. 8. Contenido de la mezcla de concreto.

CONTENIDO DE LA MEZCLA DE CONCRETO	CANTIDAD POR MEZCLA
Cemento (CPC 30R-RS)	58.72 kg
Grava	159.62 kg
Arena	106.08 kg
Agua	41.66 L
Relación agua/cemento (A/C)	0.61
Tamaño máximo de agregado	3/4"
f'c de diseño (kg/cm^2)	250
Revenimiento (cm)	15 ± 3.5

2. Se preparó la cimbra (figura 3.51), la cual fue hecha con tablas de madera con dimensiones aproximadas para realizar el colado de las losas.



Figura 3. 51. Preparación de la cimbra (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Se colocó una malla electrosoldada con una área igual de 1 m^2 aproximadamente, colocándole silletas con el propósito que esta quedara embebida en el concreto y con un recubrimiento aceptable (figura 3.52); esto para aumentar la resistencia a los esfuerzos de flexión en las losas y evitar posibles accidentes cuando se descimbraran o se movieran de lugar.



Figura 3. 52. Colocación de malla electrosoldada. (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4. Se elaboró la mezcla de concreto en una revolvedora para concreto de capacidad de 1 bulto de cemento, para posteriormente colocar la mezcla en una charola de dimensiones grandes y a partir de ahí colocar el concreto dentro de la cimbra.
5. Se realizó la prueba de revenimiento al concreto dando como resultado 15 cm, cumpliendo con el revenimiento de diseño.
6. Se vació el concreto dentro de la cimbra hasta alcanzar una altura aproximada de 7 cm (figura 3.53), marcada con una hilada previamente colocada. Cabe mencionar que a la superficie de la losa no se le dio ningún tipo de acabado (ASTM C 1583, 2004), es decir solo se tuvo el cuidado de que el espesor de la losa fuera uniforme a la altura correspondiente.



Figura 3. 53. Vaciado y enrazado del concreto (V. H. Blancas Herrera, 2017).

7. Al día siguiente de haber colado las losas se procedió a curar el concreto de estas, agregando agua en la superficie de las losas por un tiempo consecutivo de 28 días aproximadamente, hasta que las losas se descimbraron y se movieron a un lugar expuesto al ambiente, para posteriormente agregarles un revestimiento o capa de mortero de la sustitución correspondiente (figura 3.54).



Figura 3. 54. Colocación de capa de mortero (V. H. Blancas Herrera, 2017).



3.2.6. Colocación de pastas de mortero en estudio para la prueba de adherencia.

Pasados los 28 días de elaboración y curado de las losas de 1 m² se procedió a la elaboración de las pastas, con su respectiva sustitución de material orgánico, esto para colocarlas en la superficie de la losa como revestimiento (figura 3.55).



Figura 3. 55. Revestimiento en la losa de concreto (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Las pastas de mortero que se elaboraron para la realización de la prueba de adherencia (ASTM C 1583, 2004) fueron de volúmenes más pequeños que las mezclas descritas en el apartado 3.3 de este capítulo, es decir, se fabricaron mezclas con dosificaciones de material menor pero con iguales proporciones y características (relación A/C y fluidez) que las elaboradas para los especímenes de prueba marcadas en la normativa.

La colocación de las 4 pastas de mortero en estudio fue en una de las dos losas fabricadas, la cual se seccionó dentro de la superficie en 6 partes iguales, por lo que cada división quedó de aproximadamente 50 cm x 33 cm y dentro de cada una de ellas un volumen de mortero de aproximadamente 0.0013 m³.

3.2.7. Cuantificación de los especímenes elaborados.

Al terminar cada uno de los procesos descritos para la elaboración de los especímenes (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) que demandan las edades de prueba, así como las pastas y losas de concreto, se cuantificó el total de especímenes elaborados para cada edad de las pruebas de durabilidad y físico-mecánicas establecidas al principio de la investigación, para las cuales el resultado es el siguiente (tabla 3.9):



Tabla 3. 9. Cantidad de especímenes requeridos por cada tipo de mortero en estudio.

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

3.2.8. Curado de los especímenes.

De acuerdo a lo establecido en la normativa mexicana (NMX-C-148-ONNCCE, 2010); (ASTM C 515, 2003), “el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el mortero con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el espécimen fresco”.

Los especímenes elaborados y acabados en el lugar de estudio fueron puestos en superficies del lugar donde su temperatura habitual es húmeda, teniendo la seguridad que cada uno de los morteros realizados no perdieran agua durante su fraguado, observándose solo la pérdida de agua durante su elaboración.

“La remoción de los moldes debe efectuarse en no menos de 20 horas, ni más de 48 horas, luego de ser elaborado el elemento, procediendo a el almacenaje en un medio que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ desde el momento del desmolde hasta el día en que se le realizaran las pruebas correspondientes” (NMX-C-148-ONNCCE, 2010).

Para constar que todos los especímenes logran la temperatura marcada en la normativa para su curado, todos los especímenes fueron sumergidos en agua en recipientes limpios de 19 litros (figura 3.56), teniendo un monitoreo constante del tirante de agua y de la temperatura para cumplir con las especificaciones de la norma hasta el día de la prueba.



Figura 3. 56. Curado de especímenes (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3.3. Pruebas realizadas al mortero endurecido.

Para conocer las características particulares de los morteros en estado endurecido existen dos metodologías distintas de aplicación, por un lado se encuentran las pruebas no destructivas, las cuales arrojan resultados de cada mortero en estudio sin alterar su composición química ni física; mientras que también están las pruebas destructivas en donde su principal objetivo es destruir el espécimen con la intención de conocer parámetros que ayuden a tener resultados característicos del mortero endurecido.

Los 4 tipos de mortero en estudio, como lo son el mortero Testigo (T10) y los morteros con sustitución de fibra de nopal y almidón (FN 0.5%, FN 1.5% Y MZ 2% FN 0.5%) se les realizaron pruebas tanto destructivas como no destructivas a edades tardías como lo son a: 120, 150, 180 y 300 días.

3.3.1. Pruebas no destructivas.

Las pruebas no destructivas son todas aquellas que se realizan sobre el espécimen de forma directa teniendo un daño imperceptible o casi nulo en la muestra examinada, lo cual nos permite repetir de forma sencilla dichas pruebas con los mismos especímenes.

Los resultados que arrojan estas pruebas son de gran ayuda para conocer de forma aproximada la calidad de la mezcla de mortero, así como sus características físicas, mecánicas o químicas sin alterar de forma permanente sus propiedades; de tal forma que al final se tenga una idea clara de la composición y acomodo de los materiales en una muestra.



Las pruebas no destructivas que se realizaron en la presente investigación fueron densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica (RE) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

Todas las pruebas no destructivas se realizaron a los mismos especímenes requeridos por el ensayo correspondiente, teniendo en cuenta que durante todo el lapso de estas 5 pruebas los especímenes se encontraban en el agua de curado hasta la aplicación de dicho ensayo.

3.3.1.1. Densidad.

La prueba de densidad en morteros se realizó únicamente a 5 especímenes cúbicos por edad de prueba y por tipo de mezcla. La metodología empleada para realizar dicho ensayo fue guiada con ayuda del manual de “Análisis de Materiales”, tercera edición (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011), la cual se describe a continuación.

Equipo a emplear:

- 5 especímenes de la mezcla de mortero en estudio.
- Probeta graduada.
- Picnómetro.
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Cronómetro.
- Franela.
- Charola.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de los recipientes de almacenamiento los 5 especímenes en donde permanecían en proceso de curado, enumerando cada uno de ellos para su identificación.
2. Se secaron de manera superficial los especímenes con una franela para posteriormente pesarlos en la báscula, registrando el valor de cada espécimen como la masa de la muestra (M).
3. Se colocó el picnómetro sobre una superficie plana, se llenó de agua el picnómetro pasando el nivel de salida y se dejó durante un tiempo de 10 minutos aproximadamente para que el nivel se estabilizara y así no desalojara agua a la probeta graduada antes de la prueba.



4. Se colocó cada espécimen cúbico dentro del picnómetro con ayuda de un lazo, esto para evitar la caída brusca del cubo al ingresar al agua.
5. Se colocó al mismo tiempo de ingresar el cubo una probeta graduada para medir el agua desalojada durante un tiempo de 10 minutos aproximadamente, con la intención de que se establezca el nivel de agua en el picnómetro dejando de escurrir agua dentro de la probeta.
6. Pasados los 10 minutos se midió en la probeta la lectura del volumen de agua desalojado, registrando su valor como el volumen del espécimen (V).



Figura 3. 57. Determinación de la densidad (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Terminado el proceso de la prueba y con los datos arrojados por el ensayo se procedió a aplicar la siguiente fórmula para conocer la densidad de la mezcla en estudio, la cual se establece de la siguiente manera:

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

En donde:

D = densidad del espécimen, en g/cm³.

M = masa superficialmente seca del espécimen, en g.

V = volumen del espécimen (volumen desalojado), en ml (equivalente a cm³).



3.3.1.2. Gravedad específica (densidad relativa).

La definición de gravedad específica es la relación entre la densidad de una sustancia y la de la otra, para sólidos y líquidos la relación se hace con base al agua. El peso específico estará relacionado con la gravedad y el campo electromagnético en las distancias atómicas.

La gravedad específica es una medida relativa de la densidad de un elemento y dependerá de la concentración de masa por unidad de volumen de cada elemento. Dicha concentración de masa estará efectuada por la estructura tridimensional molecular y número másico de los átomos (Molina, Teoría de la Equivalencia Global, 2008).

El ensayo para conocer la gravedad específica en los morteros puestos en estudio se realizó a 5 especímenes cúbicos y a 5 especímenes cilíndricos, esto con ayuda del manual de “Análisis de Materiales”, tercera edición (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011) y de la normativa mexicana correspondiente (NMX-C-263-ONNCCE, 2010).

Equipo a emplear:

- 5 especímenes cúbicos y 5 especímenes cilíndricos.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Canastilla de metal.
- Bote de 19 litros aproximadamente.
- Horno de secado.
- Franela.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de los recipientes de almacenamiento los 5 especímenes en donde permanecían en proceso de curado, enumerando cada uno de ellos para su identificación.
2. Se secaron las muestras superficialmente con una franela y se determinó con ayuda de la báscula su masa superficial seca (M_{ss} = Masa superficialmente seca).
3. Se adaptó la canastilla a la balanza, sumergiéndola dentro del bote con agua, procurando que al momento de colocar el espécimen el nivel de agua este aproximadamente una pulgada por encima de este.



4. Se colocó la muestra dentro de la canastilla sumergida (figura 3. 58), registrando esta masa del espécimen como su masa sumergida más la canastilla ($M_s + M_c$). Por consiguiente se realizó el cálculo para conocer la masa sumergida del espécimen ($M_a =$ Masa sumergida) como:

$$M_a = (M_s + M_c) - M_c$$

Donde:

$(M_s + M_c)$ = Masa sumergida más la canastilla (g).

M_c = Masa de la canastilla sumergida (g).



Figura 3. 58. *Espécimen sumergido con ayuda de la canastilla (V. H. Blancas Herrera, 2017).*

5. Posteriormente las muestras se ingresaron al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas para su secado.
6. Pasado el tiempo de secado, se sacaron del horno las muestras y se dejaron enfriar a temperatura ambiente, para después determinar su masa seca con ayuda de la balanza; registrando este valor como masa seca del espécimen (M_s =Masa seca).

Para conocer los valores de gravedad específica para cada una de las mezclas y edades de prueba se aplicó la siguiente fórmula:

$$G.E. = \frac{M_s}{M_{ss} - M_a}$$



3.3.1.3. Resistividad eléctrica.

La Resistividad Eléctrica se define como una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad, su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

El ensayo de resistividad eléctrica realizado a los especímenes de la investigación (cubos, prismas y cilindros), fue posterior a los ensayos ya descritos, en donde tal procedimiento consta primeramente en mantenerlos húmedos durante todo el tiempo de las pruebas no destructivas, para posteriormente realizar el siguiente mecanismo de prueba.

Equipo a emplear:

- Equipo medidor de dimensiones (Vernier).
- Equipo “Resistómetro” marca Nilsson, capaz de medir resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012).
- Placas metálicas.
- Almohadillas absorbentes de agua.

Procedimiento:

1. Considerando que ya se encuentran enumerados los 5 especímenes de prueba (cubos, cilindros y prismas), se selecciona para cada espécimen la posición en la que se llevará a cabo la prueba. Para los cubos se marcó con una cruz la cara donde se aplicó la carga a compresión (cara más plana del espécimen, sin tomar en cuenta las de colado), que es donde se colocó una de las placas metálicas para la prueba (figura 3.59), mientras que para los cilindros y prismas, la prueba se realizó en los extremos de su longitud.



Figura 3. 59. Identificación de la cara más plana del espécimen cubico (V. H. Blancas Herrera, 2017).

2. Con ayuda del vernier se tomaron las dimensiones de la muestra, partiendo de la caras extremas donde se colocaron las placas metálicas (área de contacto) y posteriormente la parte longitudinal del espécimen. Teniendo entonces:
 - En cubos y prismas: lado 1 (L1), lado 2 (L2) y espesor.
 - En prismas: base de colado, espesor y longitud.
 - En cilindros: diámetro (D) y altura.
3. Se humedecieron las almohadillas para colocarlas encima de las placas metálicas.
4. Se realizó la conexión de las placas metálicas al miliamperímetro y voltímetro del equipo.
5. Se colocó la muestra correspondiente dentro de las placas metálicas (figura 3.60), considerando que dicha muestra debe estar húmeda, por considerarse la resistividad en función de la humedad.



Figura 3. 60. Muestra sometida al “Resistómetro” (V.H. Blancas Herrera, 2017).



- Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada (I) y registrando un voltaje (E), se obtuvo una resistencia eléctrica (Re). Realizando la operación de acuerdo a lo descrito en el manual de operación del “resistómetro”.
- Se registró la resistencia eléctrica dada en $k\Omega$ y se procedió a aplicar la siguiente fórmula para conocer la resistividad eléctrica, la cual está dada por los datos registrados anteriormente.

$$\rho = Re \left(\frac{A}{L} \right)$$

Donde:

ρ = resistividad eléctrica, en $k\Omega$ -cm (ohm-m).

Re = resistencia eléctrica, en $k\Omega$.

A = área transversal del espécimen, en cm^2 .

L = longitud del espécimen, en cm.

Especificaciones respecto a la prueba:

Para tomar a consideración los resultados de este ensaye existen criterios de evaluación o especificaciones que definen el estado de corrosión que pudiera presentar el material en estudio, dichos criterios generales son solo uno de los parámetros para determinar la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto y los cuales se presentan en la tabla 3.10:

Tabla 3. 10. *Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto (NMX-C-514-ONNCCE, 2016).*

Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100 - 200 $k\Omega$ -cm	Las velocidades de corrosión del acero son muy bajas.
50 a 100 $k\Omega$ -cm	Las velocidades de corrosión del acero son bajas.
10 a 50 $k\Omega$ -cm	Las velocidades de corrosión del acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<10 $k\Omega$ -cm	Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros.



3.3.1.4. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico es una prueba no destructiva conocida desde hace mucho tiempo y se considera 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. 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).

Este tipo de ensaye no destructivo que se lleva a cabo en las muestras de morteros, es aplicable para la verificación de la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa); para detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones y para el monitoreo de las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

Con respecto al empleo del valor de la velocidad de pulsación ultrasónica para determinar la resistencia del concreto, debe señalarse que no hay ninguna relación física entre las dos. Sin embargo, la velocidad de onda ultrasónica está relacionada con la densidad del concreto.

Existe una restricción adicional que surge del hecho de que la pulsación viaja más rápidamente a través de un hueco lleno de agua que a través de uno lleno de aire. En consecuencia, la condición de humedad del concreto afecta la velocidad de pulsación mientras que la resistencia en *in situ* no es afectada (figura 3.61) (Neville & Brooks, 1999).

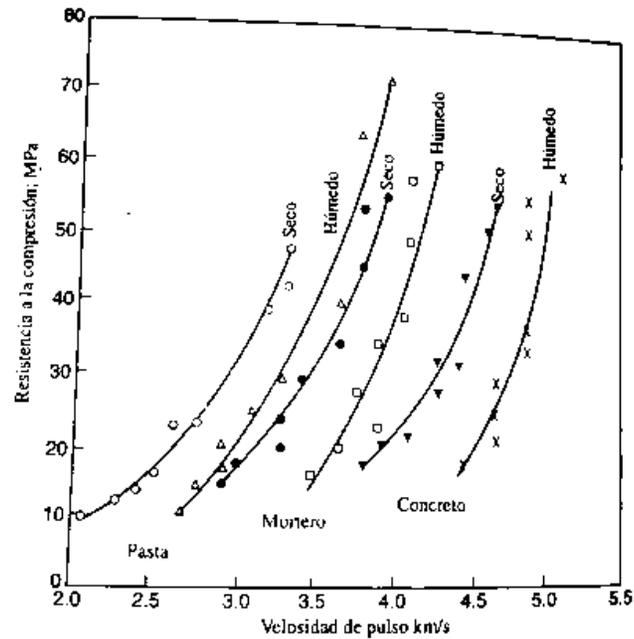


Figura 3. 61. Relación entre resistencia a compresión y velocidad de pulso ultrasónico para pasta de cemento endurecido, mortero y concreto, en condición seca y húmeda (Tecnología del concreto, A.M. Neville).

La prueba, para conocer la velocidad de propagación de una onda ultrasónica, se realizó a 5 especímenes de forma cúbica, cilíndrica y prismática al final de todas las pruebas no destructivas anteriormente descritas, debido a que los poros del material se llenan de gel, por lo que no es apto realizarle otra prueba de este tipo ya que puede ocasionar variaciones en sus resultados. El procedimiento del ensaye de VPU se presenta a continuación.

Equipo a emplear:

- Equipo comercial de ultrasonido¹.
- Agente de acoplamiento (gel comercial para cabello)².

Procedimiento:

1. Se conectan los transductores al aparato de pulso ultrasónico, mediante los cables coaxiales aptos para el equipo comercial (figura 3.62).



Figura 3. 62. Equipo comercial de ultrasonido (V. H. Blancas Herrera, 2017).

2. Se calibra el equipo de velocidad de pulso ultrasonico usando la barra de referencia.
3. Una vez listo el equipo de prueba, se extrajeron de los recipientes de curado las muestras, en las cuales se tuvo el cuidado de que la superficie donde se pretende hacer el ensayo (cara de prueba e inferior a ella), estuviera plana, lisa, exenta de suciedad y no carbonatada. Aquellas superficies que no sean suficientemente lisas, se deben regularizar a través de procesos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con espesor mínimo, a fin de posibilitar un buen acoplamiento con los transductores o sondas, pero sin que puedan interferir en la medida.
4. Se aplicó un adecuado agente de acoplamiento (gel para cabello), a la cara de los transductores y a las dos caras del espécimen a ensayar.
5. Se aplicó el modo de prueba (transmisión directa) con los transductores en las caras opuestas de cada espécimen (figura 3.63).

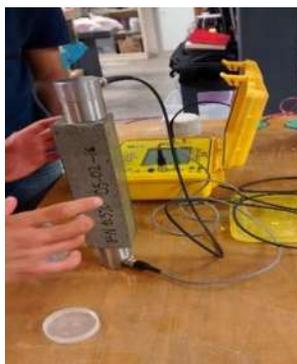


Figura 3. 63. Transmisión directa de prueba, para la obtención de la VPU (V.H. Blancas Herrera, 2017).

6. Se presionaron las caras de los transductores firmemente contra la superficie de mortero, hasta que se mostrara un tiempo estable o hasta obtener el valor estable que se consideraba adecuado.



7. Se introdujo en el equipo la distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores (espesor o longitud del espécimen previamente medido) y se registró el valor estable de la velocidad de pulso ultrasónico del espécimen según fuese el caso.

Cálculos a realizar:

Si fuera el caso en donde en vez de registrar directamente la velocidad de propagación de la onda ultrasónica que viaja por el mortero, se tomara solamente la lectura del tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, se aplicaría la siguiente formula en los modos de prueba de transmisiones directas e indirectas.

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

V = velocidad de pulso, en m/s.

L = longitud de paso, en m.

T = tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, en s.

Especificaciones respecto a la prueba y al equipo (1-2):

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas ya que el grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo. Además, la velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

Los criterios de evaluación para la calidad del concreto, respecto a los resultados de la prueba, se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3. 11. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 2000).

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



¹El ensayo se llevó a cabo mediante un equipo de sistema digital para ensayos ultrasónicos, modelo V-Meter MK IVTM marca *NDT - JAMES INSTRUMENTS* (Non Destructive Test Equipment), medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos (figura 3.62); con una escala de frecuencia de 24 a 500 kHz; impedancia de entrada del receptor de 100 k-Ohms; sensibilidad del receptor de 250 micro volts, entre 30 kHz y 100 kHz; salida del transmisor con un pulso de 1000/500V, 2 microsegundos; exactitud de la propagación de 0.1 microsegundos; funciona con una batería recargable interna de 14 Volt.

²El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar por lo cual se empleó un medio conductor o agente de acoplamiento, en este caso un gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel comercial estético, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, por lo que se decidió aceptar el empleo del gel estético para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que, el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones que se iban a llevar a cabo, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.

3.3.2. Pruebas destructivas.

Las pruebas destructivas que se realizan al concreto o mortero endurecido tienen como objetivo cumplir con las especificaciones de resistencia de las normas vigentes, dichas pruebas son aquellas que a partir del daño ocasionado por el ensayo no son aptas para realizar una segunda prueba de igual magnitud.

Los ensayos de esta índole son los que definirán de forma directa la resistencia mecánica del mortero o concreto en estudio, es decir, se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, la cual depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado así como de la integración que se genere entre ellos.

Los procesos que se llevan a cabo en las pruebas destructivas, deben llevar consigo un buen desarrollo constructivo de la muestra, siendo que a partir de esto los resultados que evalúan la resistencia mecánica del mortero adquirirán valores reales para su comparación con las especificaciones.

Todas las pruebas destructivas se realizaron a los mismos especímenes requeridos para las pruebas no destructivas, pasando un tiempo pequeño después de realizar dichos ensayos y procurando que cada



muestra de mortero se encontrara durante todo el tiempo de las pruebas de forma húmeda y/o sumergida en agua.

Las pruebas destructivas que se le realizaron a las diferentes mezclas de mortero endurecido fueron: resistencia a la compresión simple, resistencia a flexión, resistencias a tensión directa e indirecta y resistencia a tensión por adherencia.

3.3.2.1. Resistencia a la compresión simple.

La primera prueba destructiva que corresponde en esta investigación, es la de compresión simple en cubos de 5 cm de arista y cuyo valor arrojado puede ser considerado como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad como de la capacidad de resistencia mecánica.

Realizar la prueba para conocer la resistencia a compresión, es lo más común de todas las pruebas sobre concreto o mortero endurecido, esto porque es fácil de practicarse y porque muchas de las características deseables del concreto o mortero, aunque no todas, están relacionadas cualitativamente con su resistencia (Neville & Brooks, 1999).

La norma mexicana (NMX-C-403-ONNCCE, 1999), define a la resistencia a compresión como la capacidad de carga a compresión por unidad de área del concreto hidráulico o mortero en el caso de esta investigación, cuya medida se da en ensayos de especímenes cúbicos elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas, generalmente expresada en kg/cm^2 .

Para el análisis de la resistencia a carga axial de las mezclas en estado endurecido se siguió el procedimiento de las normas vigentes (ASTM C 109 M, I., 2002) y (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), las cuales especifican la elaboración de cubos de mortero de 5cm por lado constituidos por una parte del cementante y 2.75 de arena graduada.

De la prueba realizada para la presente investigación se utilizaron 5 especímenes por cada edad de prueba, es decir 20 cubos en total para las edades de 120, 150, 180 y 300 días; y para cada una de las mezclas que se elaboraron como lo son las dos sustituciones de fibra de nopal (FN 0.5% y FN 1.5%), la combinación de almidón con fibra de nopal (MZ 2% FN 0.5%) y el mortero testigo (T10) sin sustituciones.



Equipo a emplear:

- 5 especímenes cúbicos por edad y mezcla en estudio.
- Máquina Universal de Pruebas marca Forney.
- Franela.

Procedimiento:

1. Teniendo en cuenta que las pruebas destructivas son continuación de las no destructivas y tratándose de que se utilizaron los mismos especímenes, se consideró que para esta prueba las dimensiones de los cubos (lado 1 y lado 2) y la cara de aplicación de la carga, marcada con una cruz, son debidamente las mismas.
2. Se extrajeron de los recipientes de curado los especímenes, teniendo el cuidado de mantenerse a una temperatura húmeda pero sin escurrimiento de agua superficial.
3. Con ayuda de una franela se secaron los especímenes, para lograr que la superficie de cada espécimen se encontrara seca y así lograr que no se observara presencia de agua superficial.
4. Se llevó cada cubo a la máquina universal de pruebas, colocando cada uno de estos por encima de la base de la máquina universal, procurando que el espécimen quede en el centro de la platina móvil para así lograr que la carga se distribuya sobre toda el área del cubo.
5. Se procedió a la aplicación de la carga a una velocidad constante e igual para toda la prueba en el rango de 15000 kg con aproximación de 1 kg, hasta lograr la falla del cubo (figura 3.64).



Figura 3. 64. Aplicación de la carga axial en el espécimen (V. H. Blancas Herrera).



6. Se registró la carga máxima que soportó la muestra, esto con ayuda del sistema acoplado a dicha máquina. La muestra presentó fallas considerables en las aristas principalmente en un sentido longitudinal al llegar a la ruptura.

Cálculos a realizar:

La norma menciona que el número de especímenes para cada edad específica debe ser como mínimo 3. La prueba se realizó como ya se mencionó con 5 especímenes cúbicos teniendo como resultado 5 cargas últimas de falla y 5 resistencias o esfuerzos de compresión los cuales se calculan de la siguiente manera, obteniendo así un promedio final por cada edad y mezcla en estudio.

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

Donde:

R = Resistencia a la compresión, en kgf/cm².

W = Carga de ruptura de la muestra, en kgf.

A = Área de la cara de prueba de la muestra (L1xL2), en cm².

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

Según la norma correspondiente (NMX-C-303-ONNCCE, 2010) el ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto hidráulico, se realiza mediante el uso de una viga libremente apoyada con carga en el centro del claro.

Para conocer el comportamiento del mortero en estudio (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada), el ensayo se realizó de acuerdo a la norma (ASTM C 348, 1997); la cual establece que para conocer los esfuerzos de flexión se utilizaran prismas de 40 x 40 x 160 mm, elaborados de la forma establecida anteriormente.

Antes de realizar la prueba para determinar la resistencia a la flexión, se debe tener en cuenta la definición del módulo de ruptura, siendo este definido por la normativa (NMX-C-303-ONNCCE, 2010) como “el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensayo a la flexión de una viga”.



El número de prismas que se utilizó por edad de prueba y tipo de mezcla fue de 5 especímenes, siendo esto con la finalidad de encontrar un promedio final para el valor correspondiente a tal resistencia.

Equipo a emplear:

- 5 especímenes prismáticos por edad y mezcla en estudio.
- Máquina Universal de Pruebas marca Forney.
- Base de acero para asentar los apoyos.
- 3 barras de acero de un diámetro aproximado de ½”.
- Cinta adhesiva.
- Crayola.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de los recipientes de curado los 5 especímenes prismáticos, de acuerdo a las fechas establecidas para su prueba y a la mezcla en estudio.
2. Se consideró el registro de las dimensiones previas a esta prueba en los ensayos no destructivos, donde se midieron dimensiones de base, espesor y longitud de los 5 prismas.
3. Se marcó el prisma a 2 cm de sus extremos, con una crayola, alrededor de este para tener la referencia al realizar la flexión (figura 3.65). También se marcó con una línea al centro del claro del prisma.



Figura 3. 65. Marca de crayola en los extremos del prisma para los apoyos (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Según la norma aplicable para flexión en vigas de concreto (NMX-C-303-ONNCCE, 2010), la distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de ± 2 %, mientras que la longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, etc.



4. Se colocó el espécimen en la máquina universal de pruebas (figura 3.66). Pevio a esto los apoyos o dos de las barras de acero son fijadas con cinta en la base de acero para funcionar como apoyos al aplicar la carga para conocer la resistencia a la flexión del mortero en estudio.



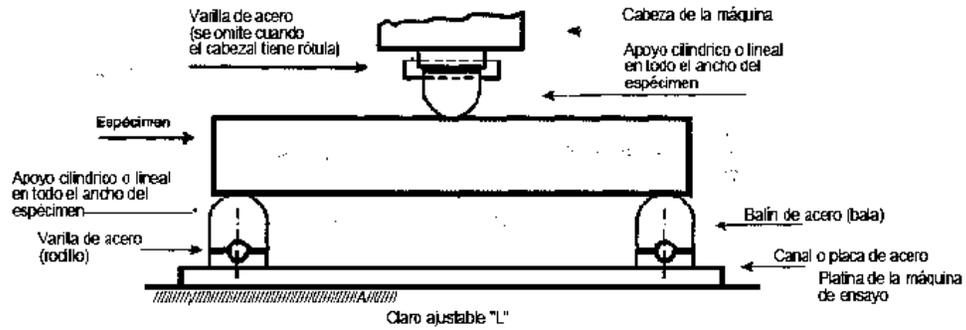
Figura 3. 66. Colocación del espécimen en la máquina universal de pruebas (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Se posicionó una tercer barra, en la parte superior del espécimen, en el centro del claro para posterior a esto aplicar la carga a una velocidad constante sobre el espécimen (figura 3.67), procurando no dañar el espécimen por impacto, debido a que el prisma por su forma se comporta como un material frágil (ASTM C 293, 2016).



Figura 3. 67. Aplicación de la carga sobre el espécimen (V. H. Blancas Herrera, 2017).

La norma (NMX-C-303-ONNCCE, 2010) indica que se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado, se centra en los bloques de apoyo y estos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada; el bloque de aplicación de carga se pone en contacto con la superficie del espécimen en el centro del claro (figura 3.68).



La presente figura es ilustrativa

Figura 3. 68. Representación gráfica de la prueba de flexión estática, mediante un solo punto de carga (NMX-C-303-ONNCCE-2010).

6. Se registró la carga de falla y la ubicación de la misma, ya que la ecuación para el Módulo de Ruptura es diferente si la falla se da en el tercio medio marcado o fuera de él.

Cálculos a realizar:

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

$$R = \frac{3WL}{2BD^2}$$

Donde:

R=Módulo de ruptura, kgf/cm².

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

L = Longitud entre apoyos de la muestra, cm

B = Ancho promedio de la muestra, cm

D = Espesor promedio de la muestra, cm

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

$$R = \frac{3Wa}{BD^2}$$

Donde:

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



Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en más de un 5% de la longitud del tramo, se deberán desechar los resultados de la prueba (figura 3.69).



Figura 3. 69. Resultados de la prueba de flexión estática. Tipo de ruptura al centro (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3.3.2.3. Resistencia a la tensión directa en briquetas.

Una tercera prueba no destructiva es mediante la máquina de prueba para tensión directa en morteros tipo Michaelis, dicha prueba para la resistencia a la tensión directa, se realizó en 5 especímenes en forma de “cacahuete” conocidas como briquetas, a la edad correspondiente por cada mezcla de estudio. El procedimiento para conocer la carga máxima para llegar a la falla de ruptura en un espécimen de mortero se presenta a continuación.

Equipo a emplear:

- 5 briquetas en forma de “cacahuete”, por edad y mezcla en estudio.
- Máquina de pruebas tipo Michaelis, con mordazas especiales para briquetas de mortero.
- Municiones o postas para aplicar la carga.
- Una balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de los recipientes de almacenamiento los 5 especímenes en donde permanecían en proceso de curado, de acuerdo a la edad de prueba y la mezcla en estudio correspondiente, enumerando cada uno de ellos para su identificación.

2. Se tomaron las medidas de la sección media (S_m) de la briketa.



3. Se llevó cada espécimen a la máquina de pruebas, sujetando la briqueta con las mordazas de la máquina (figura 3.70) y nivelando esta con ayuda de una referencia que se encuentra en la parte superior del equipo.



Figura 3. 70. Briqueta sujeta por las mordazas de la máquina de prueba (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4. Se aplicó la carga lentamente por medio de las municiones, colocándolas en la tolva adecuada para ello, hasta la falla de la muestra (figura 3.71).



Figura 3. 71. Aplicación de la carga hasta la falla de la muestra (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Se retiró la tolva de la máquina para realizar la medida de la masa, con ayuda de la báscula con aproximación al décimo de gramo. La masa de las municiones (M_m) es considerada como la carga que soportó la sección media de la briqueta.

Cálculos a realizar:

Para conocer la resistencia a tensión en los morteros se aplicó la siguiente fórmula.

$$R = \frac{M_m * 50}{S_m}$$



Donde:

R = resistencia a la tensión en kgf/cm^2 .

Mm = Masa de las municiones o carga de ruptura en kgf .

Sm = Sección media de la briqueta en cm^2 .

50 = constante de la máquina.

Observaciones respecto a la prueba elaborada:

Dado que las municiones no fueron suficientes para que las briquetas fallaran para las edades tardías de prueba, se colocaron cilindros metálicos, estos fueron previamente pesados y colocados uno a uno de forma uniforme sobre la tolva de la máquina para después continuar colocando municiones hasta la falla de la briqueta.



Figura 3. 72. Resultados de la prueba de tensión directa en morteros (V. H. Blancas Herrera, 2017).

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

Para conocer la carga máxima que soporta un mortero a tensión y así conocer su resistencia a la tensión de forma indirecta, existe una prueba la cual somete cilindros de mortero en su eje longitudinal, realizando una tensión indirecta en su estructura. El ensayo para estudiar cada tipo de mezcla en su día correspondiente de prueba se lleva a cabo en 5 especímenes cilíndricos de 5 cm de diámetro por 10 cm de largo y cuyo procedimiento se presenta a continuación (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

Equipo a emplear:

- 5 especímenes cilíndricos 5 x 10 cm, por edad y mezcla en estudio.



- Máquina Universal de pruebas marca Forney.
- Placa de acero de aproximadamente 0.5 cm de espesor.
- Tiras de cuero sin imperfecciones.
- Base de acero para asentar la muestra.
- Crayolas.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de los recipientes de curado los 5 cilindros de mortero, de acuerdo a las fechas establecidas para su prueba y a la mezcla en estudio.
2. Se consideró el registro de las dimensiones previas a esta prueba en los ensayos no destructivos, donde se midieron dimensiones de diámetro y longitud de las 5 muestras de cilindros.

Se tomó la dimensión del diámetro promediando las medidas de dos mediciones cerca de los extremos y una al centro. La longitud se obtuvo promediando las dos medidas de las líneas que unen los extremos de las dos caras del espécimen.
3. Se marcó la muestra, con una crayola, en la parte media del diámetro del cilindro y de manera longitudinal, rodeando el perímetro de todo el espécimen para tener la referencia al realizar la tensión indirecta.
4. Se colocó una de las tiras de cuero a lo largo del centro de la placa de apoyo inferior. El espécimen se posicionó sobre la tira de cuero y se acomodó de tal modo que las líneas marcadas en sus dos extremos fueran verticales y quedaran concentradas sobre la tira, para posteriormente colocar longitudinalmente la segunda tira de cuero sobre el cilindro, concentrándola sobre las líneas marcadas en los extremos del mismo (figura 3.73).

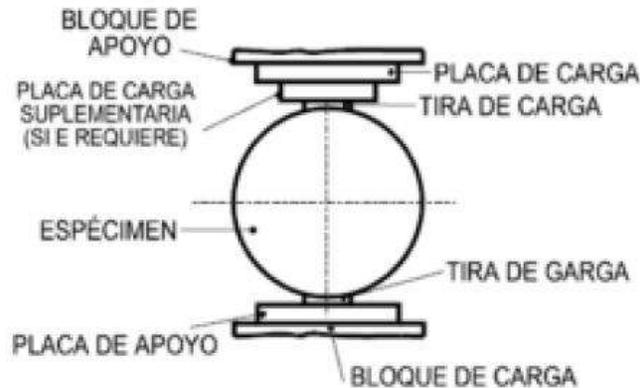


Figura 3. 73. *Espécimen en la máquina de prueba (NMX-C-163-ONNCCE, 1997).*

El conjunto debe de colocarse de tal manera que garantice las siguientes condiciones:

- Que la prolongación del plano que contenga las dos líneas marcadas en los extremos del espécimen pasen por el centro de la placa superior de apoyo.
 - Que la placa de acero suplementaria, cuando se use, y el centro del espécimen estén directamente debajo del centro de la placa con apoyo esférico.
5. Se montó la muestra sobre la máquina universal de pruebas y se aplicó la carga de forma gradual a una velocidad uniforme para todos los especímenes (figura 3.74), evitando así una falla por impacto.



Figura 3. 74. *Aplicación de la carga sobre el espécimen (V. H. Blancas Herrera, 2017).*

6. Una vez que se presenta la falla en el espécimen (figura 3.75), se registró la carga máxima para conocer posteriormente su resistencia por tensión indirecta del mortero (NMX-C-163-ONNCCE, 1997).



Figura 3. 75. Resultado de la prueba de tensión indirecta, donde se presenta la falla (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Cálculos a realizar:

La resistencia a la tensión indirecta del espécimen se calcula con la fórmula siguiente.

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

Donde:

T = resistencia a tensión indirecta en kgf/cm².

P = carga aplicada máxima en kgf.

L = longitud en cm.

d = diámetro en cm.

Observaciones respecto a la prueba elaborada:

Para cada espécimen se usaron dos tiras de apoyo, en este caso de cuero sin imperfecciones, con un ancho de 2.5 cm (1") aproximadamente, y una longitud igual al espécimen, se emplearon las tiras para cada cilindro. Los especímenes se mantuvieron húmedos hasta la realización de la prueba.

3.3.2.5. Resistencia a la tensión por adherencia.

La adherencia en materiales como el mortero, que se emplean para revestir cualquier tipo de estructura de mampostería, es una característica propia de los morteros cuya propiedad radica en adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (piedra, concreto, ladrillos, acero, etc.). Dentro del área de construcción es conocida como la propiedad fundamental que deben cumplir los morteros.



El estudio de una propiedad intangible como es la adherencia, requiere de una prueba física que pueda cuantificar un parámetro de resistencia de la unión e identificar un tipo de falla. Se han hecho numerosas investigaciones sobre la unión en sistemas cementicios y muchas de ellas se han preocupado por el desarrollo de una prueba adecuada.

La prueba física que se le realizó a los diferentes morteros en estudio, para conocer la resistencia a la tensión e identificar el tipo de falla, es conocida como la prueba Pull Off, la cual al paso del tiempo, se ha ido incrementando favorablemente y se ha convertido en una prueba in situ para el control de calidad (Arguello Hernández, 2012).

Las pruebas de adherencia se realizaron a partir de que se alcanzaron las diferentes edades de prueba de las pastas de mortero, siendo estas las que se colocaron una vez que las losas de concreto llegaron a su resistencia máxima a los 28 días. Se realizaron 5 perforaciones por cada mezcla en estudio y por cada edad correspondiente de prueba.

Equipo a emplear:

- Esmeril angular portátil marca Black & Decker.
- Broca circular con punta de diamante de 50 mm de espesor.
- Discos de acero inoxidable.
- Pegamento epóxico marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel.
- Instrumento de medición Pull Off.
- Perno con cabeza cilíndrica como aditamento del equipo de medición.

Procedimiento:

1. Con ayuda del esmeril angular (de una potencia de 750 w y 11000 rpm) y adicionada la broca circular, se realizaron las perforaciones a la superficie del revestimiento de cada mezcla en estudio y por cada edad de prueba. Dicha perforación se realizó a una profundidad de 1 cm por debajo del sustrato de concreto.
2. Posterior a las perforaciones del revestimiento, se pegaron discos de acero inoxidable sobre cada uno de estas, los cuales sirvieron para realizar la tensión en la prueba. Los discos se adhirieron al mortero mediante un epóxico (figura 3.76), dejando secar este aproximadamente 3 o 4 horas después de su aplicación, para después realizar la prueba correspondiente.



Figura 3. 76. Pegado de los discos de acero mediante el uso de epóxico (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Ya seco el epóxico, se insertó en cada disco de acero el perno con cabeza cilíndrica, el cual ayudó como aditamento para colocar el instrumento de medición Pull Off (figura 3.77), de manera que al tensionar ligeramente el perno, se comenzó a aplicar carga lenta y constante, con ayuda de la manivela del equipo, de acuerdo al rango que marca la norma, hasta obtener la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004), es decir hasta que se desprendió el revestimiento o el sustrato del concreto.



Figura 3. 77. Colocación del equipo Pull Off por encima del perno a tensionar (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Cuando la prueba se realiza en la superficie de una reparación o un material de revestimiento, se determina la fuerza de adherencia con el sustrato o la resistencia a la tensión de cualquiera, del recubrimiento o del sustrato, lo que sea más débil.

A continuación en la figura 3.78 se observa el tipo de falla que puede ocurrir o presentarse al momento de realizar la prueba física con el equipo Pull Off.

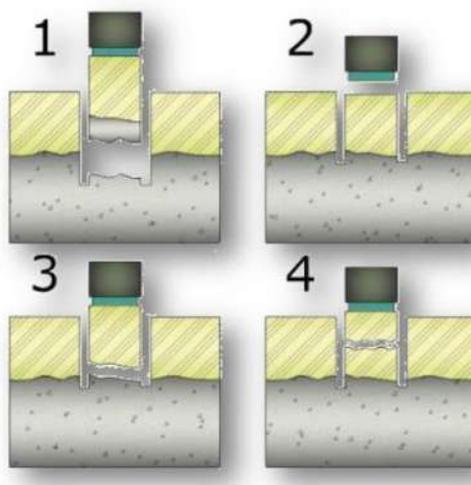


Figura 3. 78. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off (Arguello Hernández, 2012).

4. Posteriormente se tomó la lectura de carga necesaria para desprender el revestimiento y se registró como carga de ruptura, también se observó y registró el tipo de falla, el cual podrían ser:
- Falla 1. En el sustrato.
 - Falla 2. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero.
 - Falla 3. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
 - Falla 4. En el material de reparación o revestimiento.

Observaciones y especificaciones respecto a la prueba elaborada:

- De los resultados de la prueba. Cuando se presentó la falla entre el disco de acero y el epóxico, la prueba se tuvo que repetir (ASTM C 1583, 2004).

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



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



Figura 3. 79. Resultados de la prueba Pull Off (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3.3.3. Pruebas por durabilidad en el mortero.

Se define como durabilidad a la capacidad del concreto hidráulico o mortero para uso estructural de resistir durante un tiempo determinado (vida útil) la acción ambiental, ataque químico, abrasión, corrosión del acero de refuerzo o cualquier otro proceso de deterioro para mantener su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas.

“Las estructuras de concreto se deben diseñar y construir con el propósito de cumplir los requisitos de funcionalidad y durabilidad, es decir, sin causar gastos extraordinarios debidos a mantenimientos y reparaciones, considerando su integridad y capacidad durante su vida útil. La vida útil se incluye implícitamente en el diseño y en los diferentes reglamentos de construcción sin embargo, prácticamente en ningún caso se establece de manera explícita” (NMX-C-403-ONNCCE, 1999).

En el caso del mortero se dice que es durable cual este puede resistir en forma satisfactoria a las condiciones de servicio a que estará sujeto y para las cuales se ha proyectado. La falta de durabilidad puede deberse al medio al que está expuesto el mortero, o a causas internas del mismo. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; originadas por condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, abrasión, acción electrolítica, ataques por líquidos y gases de origen natural o industrial. El grado de deterioro producido por estos agentes dependerá principalmente de la calidad del mortero, aunque en condiciones extremas cualquier mortero mal protegido se daña. Las causas internas son: la reacción álcali-agregado, cambios de volumen debidos a diferencias entre las



propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento y sobre todo de la permeabilidad del mortero, este factor determina en gran medida la vulnerabilidad del mortero ante agentes externos y por ello un mortero durable debe ser relativamente impermeable (Rivera, 2016).

En la tabla 3.12 se presentan los distintos ensayos de durabilidad, de acuerdo a las distintas clases de exposición a las cuales pueden estar sujetos los morteros en estudio colocados en una estructura en ambientes agresivos.

Tabla 3. 12. Normativa correspondiente a los ensayos de durabilidad.

ENSAYE	REFERENCIA	
	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la solidez del mortero por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.	NMX-C-075-ONNCCE, 2006	ASTM-C-88, 2013
Método de prueba estándar para la determinación de absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.	[Red Durar, 2000]	
Método de prueba estándar para la determinación de la profundidad de carbonatación.	[Red Durar, 2000]	
Método de prueba estándar para la determinación de la porosidad total en el mortero.	NMX-C-263-ONNCCE,2010 [Red Durar, 2000]	-
Método de prueba estándar para la determinación de permeabilidad de cloruros.	ASTM-C-1202, 2012	-
Método de prueba estándar para la determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.	NMX-C-205-ONNCCE, 2005	-

3.3.3.1. Ataque por sulfatos.

Uno de los ensayos de durabilidad que se presentan en este apartado es cuando en presencia de soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, se realiza una metodología de prueba para determinar la sanidad del mortero en estudio. Dicha sanidad es la característica de los materiales para resistir la acción del medio ambiente (NMX-C-075-ONNCCE, 2006).



La prueba dentro del laboratorio simula, mediante solución preparada de sulfato de sodio, las condiciones de exposición a sales a las que se encuentran sometidos en la mayoría de los casos los elementos de revestimiento de concreto en ambientes marinos, los cuales sufren constantes cambios secado y humedecimiento provocando en primer instancia el deterioro prematuro del revestimiento y del concreto, para finalmente reducir la vida útil del elemento.

En todos estos ambientes agresivos y de climas extremos, algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto son los iones de sulfatos del suelo, del agua de mar o del agua freática. El sulfato reacciona primero con el aluminato tricálcico; una reacción subsecuente con la cal libre (CaO) produce una masa voluminosa que agrieta al concreto y fomenta un ataque extra. 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 (Bernabé Reyes, 2015).

El mortero atacado por sulfatos tiene un aspecto blanquecino y característico. El daño suele iniciarse en los bordes y los ángulos, va seguido por agrietamientos y descascaramientos progresivos que reducen el mortero a un estado frágil o incluso blando (Rivera, 2016).

La prueba de ataque por sulfatos se realizó aplicando el siguiente procedimiento a especímenes cúbicos de 5 cm de arista a dos edades de prueba como lo fueron a 90 y 180 días, y para cada una de las mezclas en estudio.

Equipo a emplear:

- 18 especímenes cúbicos de 5 cm de arista, por edad y mezcla en estudio.
- Máquina Universal de pruebas marca Forney.
- Recipiente de plástico grueso con tapa, con capacidad suficiente para que puedan alojar canastilla de inmersión.
- Charolas de acero inoxidable.
- Rejillas de plástico de una superficie aproximada de 20 x 40 cm.
- Taladro con la adición de Aspas Mezcladoras.
- 3 recipientes de 19 litros aproximadamente.
- Horno de secado.
- Parrilla eléctrica.



- Termómetro.
- Guantes de látex.
- Sulfato de sodio (sal anhidra) para la solución.
- Báscula o balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. Previo a la extracción de los especímenes cúbicos de los recipientes de almacenamiento para la prueba correspondiente, se realizó una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4), de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana (NMX-C-075-ONNCCE, 2006), con una concentración de 350 g de sulfato por cada litro de agua destilada. De acuerdo a lo que demandaba la experimentación para los 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes por edad y mezcla en estudio, se prepararon 20 litros de solución, suficientes para la cantidad total de los ciclos de prueba.

El proceso de preparación de la solución consistió en disolver el sulfato en el agua a una temperatura no mayor a 40°C , calentando previamente el agua con ayuda de la parrilla eléctrica y determinando su temperatura con el termómetro. Una vez esto se mezcló dicha solución, en los recipientes de plástico de 19 litros con ayuda del taladro como se muestra en la figura 3.80, por un tiempo mínimo de 1 hora, evitando que al final de este proceso quedara polvo o material contaminante en el recipiente del mismo. Antes de su empleo, se rompió la costra de sal que se formó en la superficie del líquido y se agitó completamente la solución.



Figura 3. 80. Preparación de la solución de sulfato de sodio (V. H. Blancas Herrera, 2017).

2. Se extrajeron los 18 cubos de los recipientes de curado, se enumeraron previamente y se ingresaron 15 de estos al horno de secado a una temperatura de $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ para de esta manera lograr la masa constante de los especímenes antes de iniciar con los ciclos de prueba.



3. Se pesaron los especímenes una vez adquirida su masa constante, para obtener la masa seca o masa inicial de cada uno de los cubos y se preparó un recipiente capaz de contener todas las muestras para cada mezcla, durante el tiempo de prueba, procurando mantener un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la superficie de los especímenes y también que estos estuvieran apoyados sobre una rejilla que evite su reposo directo sobre el fondo del recipiente y asegurando el contacto con la solución en todas sus caras (figura 3.81).



Figura 3. 81. Colocación de las muestras en los recipientes con solución (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4. Los especímenes permanecieron en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniéndose a una temperatura en promedio de 21 °C.
5. Concluidas las 16 horas se extrajeron de los recipientes las muestras, esto con ayuda de los guantes de látex y retirando los cristales adheridos a la superficie de los morteros, para posteriormente dejar escurrir durante 15 minutos y realizarle pruebas físico-mecánicas (figura 3.82) a 3 de los cubos (según su numeración), las cuales incluían pruebas como son: Resistividad Eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Gravedad específica, Densidad y Compresión.



Figura 3. 82. Extracción y aplicación de pruebas físico-mecánicas a las muestras (V. H. Blancas Herrera, 2017).

6. Los especímenes restantes se colocaron en el horno con temperatura constante de 50°C ± 5°C hasta conseguir masa constante nuevamente. Pasado el tiempo de secado se extrajeron las muestras del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para después obtener su masa seca.

7. Se comparan los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos que se aplicaron a los cubos, con las 3 muestras restantes que no se sometieron a los ciclos de humedecimiento y secado. Cada uno de los pasos del 3 al 6 se repite hasta completar 5 ciclos de prueba.

Observaciones y especificaciones respecto a la prueba elaborada:

Al realizar los ciclos de prueba, cuando la masa de los especímenes sea inferior al 5% se informa como pérdida de masa crítica y en ese entonces el material es insuficiente y se registra como su ciclo de falla (NMX-C-075-ONNCCE, 2006).

Respecto a la prueba elaborada, las muestras se sometieron a secado solamente durante 24 horas, siendo este un tiempo razonable para que la muestra se encontrara seca según investigaciones anteriores y por la practicidad de la prueba.

Como recomendación debe tenerse el debido cuidado de no mezclar los recipientes en los que se contengan las muestras probadas, estas deben sumergirse siempre en su correspondiente recipiente y nunca en otro aunque contenga solución preparada bajo las mismas condiciones.



Figura 3. 83. Resultados de la prueba de ataque por sulfatos (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Como se muestra en la figura 3.83, la pérdida de masa es progresiva y va afectando las caras de las muestras y su forma, degradando sus aristas, permitiendo ver todo esto a partir del tercer ciclo de prueba, específicamente en el caso de la prueba llevada a cabo en el laboratorio.



3.3.3.2. Determinación de la permeabilidad rápida de cloruros.

El ataque por cloruros en una estructura de concreto reforzado se distingue por la corrosión del acero de refuerzo, y es solo como consecuencia de esta corrosión que se daña el concreto circundante (Neville & Brooks, 1999).

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

Los iones cloruros una vez penetran el concreto se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente al reaccionar con el aluminato tricálcico (C_3A) presente en la pasta para así formar cloroaluminatos cálcicos, compuesto conocido como “Sal de Friedel”, que a diferencia de la etringita, no resulta ser expansiva (Mejía & Rodríguez, 1999) (Otieno, Alexander, & Beushausen, 2010). Por el contrario, los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo, donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo (Bernabé Reyes, 2015).

La movilidad de los iones cloruro dentro del concreto está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. La presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando igualmente la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

Una prueba rápida para la permeabilidad de los iones cloruro en el concreto es prescrita por la norma extranjera (ASTM-C-1202, 2012), la cual determina la conductancia eléctrica, expresada como la carga eléctrica total en coulombios (amperio-segundos) pasada durante un cierto intervalo de tiempo (6 horas) a través de un disco de mortero, en el caso de la presente investigación, entre soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio cuando se mantiene una diferencia de potencial 60 V de c.d., polarizando las dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruros a penetrar en el mortero.



Desde su lanzamiento, la prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido usada frecuentemente en la evaluación de la durabilidad en las estructuras de concreto, ya que se puede establecer, en un tiempo relativamente corto, la determinación de la permeabilidad del material, dentro de un nivel de calidad que permite comparar concretos en cuanto a esta característica.

La edad de prueba es un factor fundamental en los resultados de la prueba, las normas para pruebas de permeabilidad no indican una edad de manera estricta, pero es recomendable que se hagan a edades tardías de 90 días o más; debido a que en este periodo la reacción del Ca(OH)_2 con los cementantes, ha alcanzado un desarrollo óptimo, sobre todo cuando se contemplan adiciones minerales. Cuando son probados en especímenes de edades menores a los 28 días, se pueden producir incrementos súbitos en el amperaje y, con ellos, en la temperatura de las soluciones, modificando la velocidad de hidratación de los C-H-S y la naturaleza de la estructura porosa” (Martínez Sánchez, Flores Martínez, Uribe Afif, & Medina Hernández, 2003).

Dado lo anterior en la presente investigación se contemplaron dos edades de prueba para las distintas mezclas en estudio, las cuales fueron a 90 y 180 días de edad, aplicando el siguiente procedimiento regido por la norma (ASTM-C-1202, 2012). La prueba fue de manera repetitiva para las distintas muestras de mortero, bajo las mismas condiciones de secado, temperatura y saturación para cada espécimen.

Equipo a emplear:

- 3 discos de mortero de una altura de 5 cm, extraídos de la parte central de 3 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura, para la edad especificada y por mezcla en estudio.
- Equipo automatizado “Proove IT”.
- Desecador.
- Recipiente para calentar agua.
- Vaselina.
- Brocha pequeña de cerdas suaves.
- Bomba de vacío.
- Báscula o balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Probeta graduada.
- Embudo pequeño.



Procedimiento:

- Preparación de las muestras (discos de mortero):
 1. Se extrajeron de la pila de curado 3 especímenes cilíndricos con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, por cada mezcla en estudio y una vez alcanzada la edad de prueba. Dichos especímenes elaborados con las mismas proporciones de cada una de las mezclas en estudio.
 2. Se cortaron cada uno de los cilindros en 3 rodajas con ayuda de la cortadora de roca, teniendo como resultado 9 discos de mortero por mezcla y edad de prueba con dimensiones de 5 cm de espesor y 10 cm de diámetro (figura 3.84). Solo se utilizaron las partes centrales de cada espécimen para la prueba.



Figura 3. 84. *Discos de mortero para la prueba (V. H. Blancas Herrera, 2017).*

3. Se procedió a colocar uno de los discos de mortero dentro del desecador y al mismo tiempo se hirvió la cantidad de agua necesaria para la prueba, dejándola enfriar a un lado del desecador, con el objetivo que esté libre de aire. Se pudieron haber colocado 6 discos dentro del desecador pero dado que solo se encuentra una pastilla para realizar la prueba, se optó por realizar el ensayo de manera individual con cada uno de ellos.
4. Se limpió el sello o empaque del desecador y se procedió a humedecerlo completamente con vaselina, para después colocarle la tapa al desecador. En seguida se conectó una manguera con un extremo conectado a una bomba de vacío y el otro a una de las válvulas del desecador.



5. Se conectó a la fuente eléctrica y se puso a funcionar la bomba de vacío, abriendo la válvula del desecador conectada a la manguera, manteniendo el vacío durante 3 horas, para posteriormente cerrar la válvula y apagar la bomba de vacío (figura 3.85).



Figura 3. 85. Obtención de vacío dentro del desecador (V. H. Blancas Herrera, 2017).

6. Transcurrido el tiempo de vacío dentro del desecador, se conectó una segunda manguera a la válvula opuesta del desecador y colocando el otro extremo de la manguera dentro del recipiente que contiene el agua fría libre de aire.
 7. Se procedió 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.
 8. Se revisó que estén cerradas ambas válvulas antes de prender la bomba nuevamente, 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 una hora.
 9. Se desconectó la bomba y se desprendieron las mangueras de los extremos del desecador, para inmediatamente después abrir una de las válvulas lentamente para que entre aire al desecador y así dejar los especímenes en reposo durante un tiempo de 18 horas antes de realizar la prueba correspondiente en el equipo automatizado “Proove IT”.
- Colocación de los especímenes en las celdas:
10. Pevio a la extracción del disco de mortero se prepararon dos soluciones para la prueba de penetración de cloruros, las cuales fueron: hidróxido de sodio al cero punto tres normal (NaOH 0.3N) y cloruro de sodio al 3% (NaCL 3%) ambas con un 100% de pureza.



11. Una vez transcurridas las 18 horas se extrajeron 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 sujetaron con tornillos que están en las cuatro orillas para confinar el espécimen (figura 3.86).



Figura 3. 86. Colocación del disco de mortero en las celdas de cloruros (V. H. Blancas Herrera, 2017).

12. Con ayuda de un embudo, para no derramar líquido se llenaron completamente las celdas las cuales en cada extremo tienen un orificio para la introducción de cada solución marcada en cada una de estas.
13. Se conectaron las terminales (positivo y negativo) a la fuente de carga, además, de conectar un cable que sirvió como medidor de temperatura, en donde está contenido el Hidróxido de Sodio (NaOH).
14. Se conectó la fuente de carga y se encendió el equipo, posteriormente se inició el programa en el ordenador para tomar los resultados del espécimen (figura 3.87). El proceso requiere de 6 horas para llevarse a cabo y transcurrido este tiempo se apagó el programa y se desconectó la fuente de carga.

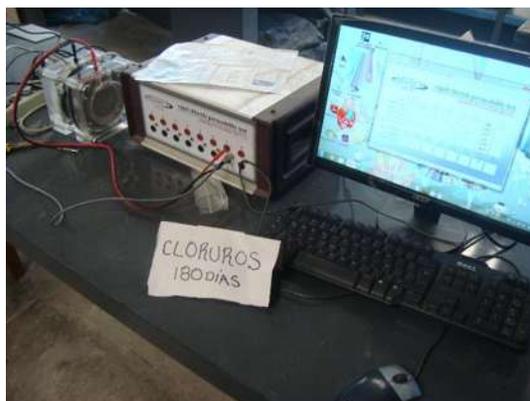


Figura 3. 87. Funcionamiento del equipo automatizado “Proove IT” (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Observaciones y especificaciones respecto a la prueba elaborada:

Dado que no se pudieron ensayar los tres discos de mortero para cada mezcla en estudio, se tomó a consideración que una vez cortadas todas las rodajas se mantuvieron en los recipientes de curado hasta el día de su prueba, teniendo para cada mezcla en estudio y edad de prueba 3 resultados, conforme a lo especificado en la tabla 3.13.

Tabla 3. 13. Tipo de permeabilidad por ataque de cloruros (ASTM C 1202,2012).

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	Concretos con Látex
< 100	Despreciable	Concretos con Polímeros

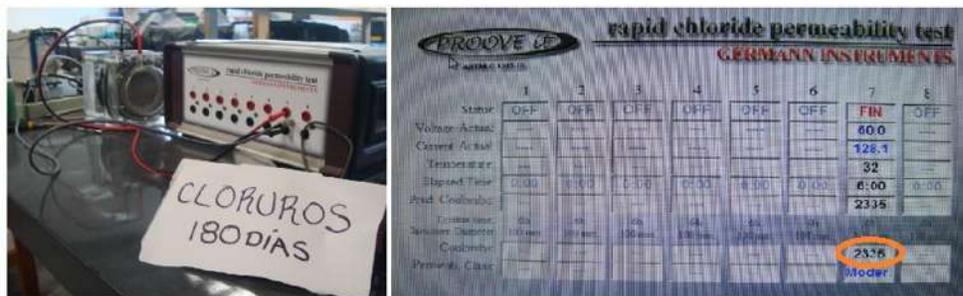


Figura 3. 88. Resultados de la permeabilidad rápida de cloruros (V. H. Blancas Herrera, 2017).

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

Los efectos adversos producidos por congelamiento y deshielo son unos de los problemas principales de la durabilidad. El deterioro puede ser producido por la dilatación del agua de la pasta, la dilatación de algunas partículas del agregado o la combinación de ambas (Rivera, 2016).

Constituyen una condición de servicio durante la vida útil del mortero, por la repetición de ciclos de congelamiento y posterior deshielo, estando saturado el mortero. En ambos casos, la causa básica del deterioro puede asociarse con la expansión de volumen que sufre el agua al congelarse, pero los mecanismos de prevención del deterioro y las consecuencias del daño son diferentes.

La acción de las bajas temperaturas debe considerarse en dos situaciones que pueden o no coexistir: a) el mortero fresco o muy joven se congela con temperaturas cercanas a 0°C, no hay mecanismo



alguno para proteger al mortero joven del deterioro por congelamiento, algunos recursos prácticos son la prevención de la pérdida de calor, utilizando mayores contenidos de cemento y evitando secciones muy delgadas; b) es más interesante el deterioro, puede asociarse el daño a la aparición de tensiones provocadas por la formación y expansión de hielo dentro de la matriz cementicia, surge así la primera de las condiciones de ocurrencia de daño: que la temperatura sea lo suficientemente baja como para provocar el congelamiento del agua ubicada en los capilares.

Dado que el agua no está a la presión atmosférica sino que está sometida a diferentes grados de tensión en función del diámetro capilar que ocupa, las temperaturas para provocar su congelamiento son inferiores a 0°C y los cristales de hielo no se forman simultáneamente en todo el volumen, como dato práctico podemos preocuparnos por temperaturas inferiores a -5°C.

Las tensiones son provocadas por el aumento de volumen del agua al congelarse, este aumento de volumen es de aproximadamente el 10%, por lo que si el mortero tuviera un 10% de poros capilares con aire (saturación menor al 10%), al congelarse el agua ocuparía el vacío disponible, sin introducir tensiones perjudiciales en el material (Colín Velázquez, 2016).

Para determinar la resistencia de la mezcla de mortero a ciclos de congelamiento y deshielo, el procedimiento de la prueba consiste en un congelamiento y deshielo rápido en agua, el cual no intenta proveer una medida cuantitativa de la vida de servicio que puede esperarse en un tipo de concreto en específico. Sin embargo, si intenta determinar los efectos de variaciones en ambas propiedades y condiciones del concreto en la resistencia al congelamiento y deshielo” (ASTM-C-666, 2015).

Se elaboraron 3 especímenes prismáticos de 6 cm x 6 cm x 26 cm en las cuatro mezclas distintas en estudio; una mezcla control, otra con 1.5% de sustitución de cactus opuntia blanco, otra con una sustitución de FN 0.5% y una más de 2% de almidón con FN 0.5%, todas con respecto a la masa del cemento (figura 3.89). Dichos prismas no cumplen con las características que cita la norma para concreto (NMX-C-205-ONNCCE, 2005), más sin embargo teniendo moldes de estas dimensiones para morteros, fue que se optó por elaborar prismas de este tamaño en el laboratorio.



Figura 3. 89. Elaboración de especímenes prismáticos para la prueba de congelamiento y deshielo (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Transcurridos 180 días de edad se realizó la prueba de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y frecuencia de resonancia. Además de determinar la masa superficialmente seca y dimensiones reales de cada espécimen, registrándolas en el ciclo cero. Los especímenes de cada mezcla se colocaron en charolas con agua para introducirlas en el aparato congelador. La duración del espécimen de prueba dentro del aparato fue de 4 horas aproximadamente, duración a la que alcanzó la temperatura de -2°C . La medición de la temperatura se realizó con una pistola con aproximación al décimo de grado. Después de sacar las muestras del aparato congelador se realizaron las distintas pruebas y mediciones ya mencionadas. Se introdujeron de nuevo al aparato congelador dentro de la charola terminando así el primer ciclo con una duración mayor a 4 horas. Se repitió este procedimiento 14 veces, para finalmente aplicarle flexión a cada una de los prismas de mortero para conocer el efecto en cuanto a su resistencia.

Equipo a emplear:

- 3 especímenes prismáticos de 6 x 6 x 26 cm, por edad y mezcla en estudio.
- Recipiente de plástico con capacidad para alojar los 3 prismas.
- Medidor de temperatura.
- Equipo de Velocidad de Pulso Ultrasónico.
- Resistómetro.
- Equipo de Frecuencia de Resonancia.
- Aparato enfriador.
- Máquina Universal de pruebas marca Forney.
- Báscula o balanza con aproximación al décimo de gramo.



Procedimiento:

1. Previo a la prueba, dos días antes se preparó el aparato enfriador que se utilizó para la prueba, monitoreando su temperatura para que este cumpliera -18°C .
2. Una vez cumplida la edad de prueba especificada se extrajeron los especímenes de los recipientes de curado, se enumeraron, se pesaron, se tomaron dimensiones, además de realizarse las pruebas de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y frecuencia de resonancia, registrando todos estos valores en el ciclo cero (figura 3.90).

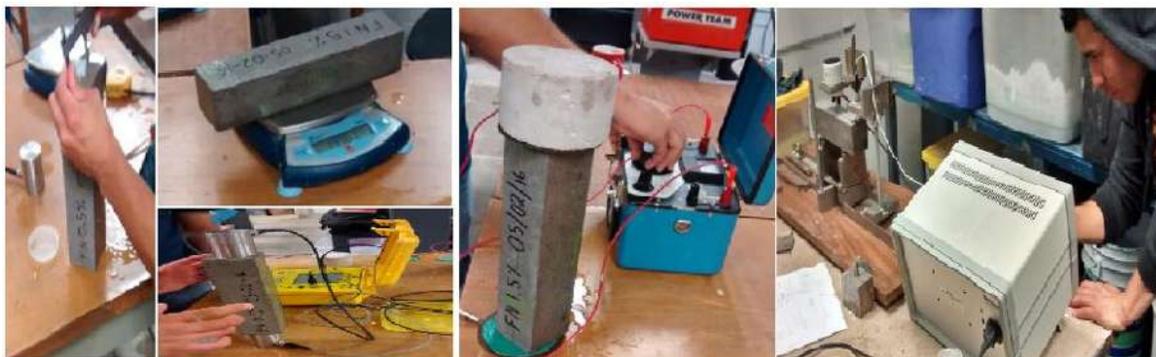


Figura 3. 90. Registro de pruebas realizadas al espécimen (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Secuencialmente se introdujeron en el recipiente de plástico los tres especímenes (figura 3.91) para después llenar con agua hasta tener un tirante de 2 cm por encima del espécimen.

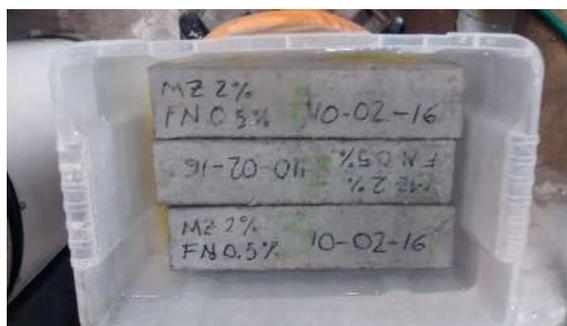


Figura 3. 91. Introducción de los especímenes en el recipiente con agua (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4. Se ingresó cada recipiente con las muestras al refrigerador durante 4 horas, transcurrido este tiempo se sacaron los especímenes del refrigerador (figura 3.92) y se tomó nuevamente su temperatura, sus dimensiones, se obtuvo su masa, se les realizó resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y frecuencia de resonancia. Se registraron los valores obtenidos en el ciclo uno.



Figura 3. 92. Proceso de deshielo, después de sacar los especímenes del enfriador (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Después de realizarle las pruebas se ingresaron nuevamente en el recipiente, se tomó su temperatura, se cuidó que su tirante de agua fuera el debido y se introdujeron en el refrigerador durante otras 4 horas.
6. Durante toda la prueba se repitieron los pasos 4 y 5, hasta alcanzar 15 ciclos, cuidando en todo momento que los especímenes que se ingresaban dentro del refrigerador no estuvieran con un exceso de hielo. Si esto ocurría se retiraba el exceso de hielo y se llenaba de agua de nuevo el recipiente hasta la altura adecuada.
7. Después de los 15 ciclos sometidos a congelamiento y deshielo se procedió a realizar la prueba de flexión a cada espécimen para conocer el efecto en cuanto a su resistencia.

Cálculos a realizar:

El módulo de elasticidad dinámico se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$P_c = \frac{n_{12}}{n_1} \times 100$$

Donde:

P_c : es el módulo dinámico relativo de elasticidad después de “c” ciclos de congelación y deshielo, en porciento.

n_{12} : es la frecuencia transversal fundamental, a cero ciclos de congelación y deshielo.

n_1 : es la frecuencia transversal después de “c” ciclos de congelación y deshielo.



Para cuantificar el daño que sufren los especímenes expuestos a esta prueba se busca un *factor de durabilidad* el cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$FD = \frac{PN}{M}$$

Donde:

FD: es el factor de durabilidad de la probeta en estudio.

P: es el módulo dinámico de elasticidad relativo a N ciclos (último ciclo), en %.

N: es el número de ciclos a los cuales estuvo expuesta la probeta.

M: es el número de ciclos especificados a los cuales se termina la prueba.

Para obtener el valor de P, se requiere calcular el módulo de elasticidad dinámico relativo en el primer y último ciclo para obtener dicha relación, se aplica la siguiente fórmula:

$$P = \left(\frac{n_f^2}{n_i^2} \right) \times 100$$

Donde:

P: es el módulo de elasticidad dinámico relativo al ciclo “n” (último ciclo), en %

n_f: es la frecuencia transversal en el último ciclo de prueba, en Hz.

n_i: es la frecuencia transversal en el primer ciclo de prueba, en Hz.

3.3.3.4. Estimación de la profundidad de carbonatación.

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal (pH entre 12-14) del concreto por efecto del CO₂ que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO₂ reacciona con los álcalis (usualmente hidróxidos de calcio, sodio y potasio), neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10 (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

La prueba para la estimación de la carbonatación en elementos de concreto tiene como objetivo principal determinar el avance de la carbonatación en el concreto por el método de vía húmeda con solución de indicador ácido-base.

El contenido de humedad relativa del ambiente es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50%–70% aproximadamente ya que a bajas humedades no



hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso.

Los especímenes utilizados para la prueba fueron 5 especímenes en forma de prisma, los cuales se colocaron a la intemperie en dirección de los vientos dominantes de la ciudad de Morelia que son Suroeste (en el nivel de azotea del laboratorio) después de haber sido fallados en la prueba de flexión y probadas 3 mitades de las 10 existentes por cada edad de prueba, las cuales fueron a 90, 135 y 180 días.

Equipo a emplear:

- Instrumentos de medición: escala de pH, vernier.
- Herramientas para extracción de muestras: cincel y martillo.
- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína (2g fenolftaleína + 48 g alcohol + 50 g Agua).
- Atomizador.

Procedimiento:

1. Los prismas fracturados en dos partes o dos mitades se colocaron a la intemperie en la dirección Suroeste de acuerdo a la dirección de los vientos dominantes en la ciudad de Morelia, y por lo tanto la dirección más favorable para que sufrieran carbonatación.
2. Una vez alcanzada la edad de prueba de cada mezcla en estudio, se cortaron 3 de las mitades de manera transversal. En el caso de la investigación el corte se llevó a cabo por medio de un cincel y un martillo sin dañar las caras exteriores de la muestra (figura 3.93).
3. Después de que se realiza el corte transversal se limpió inmediatamente la cara interna de la muestra de forma que la cara de prueba quedara libre de polvo.
4. Se le aplicó con un atomizador de manera uniforme a cada una de las caras del corte la solución de fenolftaleína.



Figura 3. 93. Corte en la cara transversal de la muestra y colocación del indicador ácido-base (V. H. Blancas Herrera, 2017).

5. Ya presentado el color característico del indicador de pH, se tomó la profundidad de la carbonatación midiendo en cada lado del corte con ayuda del vernier (figura 3.94), obteniendo así un valor promedio de la profundidad de carbonatación de cada lado para cada espécimen. La profundidad de carbonatación es la longitud en mm que no se pigmenta de color morado.



Figura 3. 94. Medición de la profundidad de carbonatación (V. H. Blancas Herrera, 2017).

Cálculos a realizar:

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:

$$X_{CARB} = \frac{Prof_{CARB}}{\sqrt{T_{cte}}}$$

Donde:

X_{CARB} : proyección de carbonatación promedio, en mm/año.

$Prof_{CARB}$: promedio de las lecturas de la profundidad 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_{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 fórmula:

$$C_n = X_{CARB} * T_n$$

Donde:

C_n : carbonatación proyectada al año “n”, en mm.

X_{CARB} : proyección de carbonatación promedio, en mm/año.

T_n : edad “n”, en años.

3.3.3.5. Determinación de la absorción capilar en especímenes cúbicos de mortero.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Gören Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de concretos y morteros a través de tres coeficientes:

m = Resistencia a la penetración del agua.

k = Coeficiente de absorción capilar.

ξ_0 =Porosidad efectiva.

La prueba se realizó en especímenes cúbicos 5 cm x 5 cm x 5 cm, por cada mezcla en estudio y a la edad de 90 y 180 días. El procedimiento efectuado aún no se encuentra normado pero se partió de la referencia emitida por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo “Red DURAR”, 2000; el cual establece el siguiente procedimiento de prueba.

Equipo a emplear:

- 5 especímenes cúbicos, por edad y mezcla en estudio.



- Parrilla eléctrica.
- Recipiente de fondo plano y con tapa.
- Esponja.
- Resina epoxi o Parafina.
- Brocha pequeña de cerdas suaves.
- Báscula o balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. El ensayo se realizó en 5 especímenes cúbicos de 5 cm de arista, extraídos de los recipientes de curado de acuerdo a la edad de prueba indicada.
2. Los especímenes se pre-acondicionaron mediante un secado hasta masa constante y teniendo una diferencia de 0.5% entre sus masas en un intervalo de 24 horas.
3. Posteriormente se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
4. A cada uno de los especímenes se les colocó resina o parafina en las caras laterales para garantizar que el agua solo se absorba por la cara inferior, y con ayuda de la báscula se obtuvo la masa registrándola como masa inicial (W_0).
5. El espécimen se colocó sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, con un tirante de agua de sólo 3 mm por encima de la parte inferior del espécimen. El recipiente se mantuvo cerrado durante la prueba para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.
6. Después de haber colocado los cubos dentro del tirante de agua, se extrajeron cada uno en intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48...horas y se registró su masa, hasta lograr masa constante.
7. Una vez que se obtuvo masa constante en la absorción capilar de los 5 especímenes, se procedió a realizar el cálculo de los coeficientes de Fagerlund.



Cálculos a realizar:

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones:

- Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (m).

$$m = \frac{t}{z^2}, \left(\frac{s}{m^2} \right)$$

Donde:

z = representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo “t”.

- Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(W_t - W_o)/A}{\sqrt{t}}, \left(\frac{kg}{m^2 s^{1/2}} \right)$$

Donde:

W_o = Masa inicial de la probeta (Kg o g).

W_t = Masa final de la probeta (Kg o g).

A = Área expuesta de la probeta (m o cm).

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

Especificaciones respecto a la prueba:

Para espesor de recubrimiento de 30 mm en ambientes severos se recomiendan concretos con sorción capilar $S \leq 3 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$); en medios menos severos puede ser hasta de $6 \text{ mm/h}^{1/2}$ ($10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$). Si el espesor de la cubierta se incrementa, la sorción capilar puede modificarse proporcionalmente (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

3.3.3.6. Porosidad Total (determinación de la masa específica, absorción y vacíos).

Para complementar las pruebas que se realizaron al mortero en estudio respecto a la durabilidad, existe un ensayo de porosidad o porosidad total, el cual presenta criterios para conocer la calidad y durabilidad del concreto y del mortero, ya que en medida en que esta sea mayor o menor, los iones y agentes que degradan la matriz de cemento pueden avanzar más rápida o lentamente. El ensayo de porosidad determina la absorción capilar y la porosidad total en morteros y concretos como una medida de su compacidad.



Como porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de hormigones y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

- **Poros de gel:** Son de menor tamaño ($< 15 - 25 \text{ \AA}$) y pertenecen a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros solo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades $< 20\%$.
- **Poros capilares:** Son de forma variable y tamaño del orden de 2 nm a $1 \mu\text{m}$. Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad.
- **Poros de aire:** Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de 0.05 mm . Aunque afectan la resistencia mecánica, en cuanto a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos beneficiosos (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

El ensayo aplicable para conocer la porosidad total de los morteros en estudio, fue continuación de la prueba para conocer la absorción capilar en las muestras, teniendo como punto inicial la inmersión de las muestras desde la elaboración de estas hasta el día de prueba.

La Red DURAR en su manual relacionado a la durabilidad del concreto menciona en su segunda parte del libro, que para el ensayo de porosidad total el espécimen, luego de un pre-acondicionamiento de secado a 105°C por 72 horas (o menos, hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador durante 24 horas, (aunque es más conveniente usar un secado a 50°C con el fin de no dañar el gel de cemento), se sumerge en agua totalmente durante 24 horas mínimo, al cabo de las cuales se registra su masa fuera (saturado de agua) y dentro de agua (sumergido en agua). Esta última masa se registra con ayuda de una balanza hidrostática. Finalmente el espécimen se seca a 105°C hasta masa constante (que es cuando la variación entre dos ponderaciones sucesivas es menor de 0.05%) y se registra dicha masa. La porosidad total se expresa en porcentaje de la manera siguiente (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000):



$$\% \text{ Porosidad Total} = \left(\frac{M_{\text{saturada}} - M_{105^{\circ}\text{C}}}{M_{\text{saturada}} - M_{\text{sumergida}}} \right) \times 100$$

Donde:

M_{saturada} = es la masa de la muestra completamente saturada, gramos.

$M_{105^{\circ}\text{C}}$ = la masa de la muestra seca, gramos.

$M_{\text{sumergida}}$ = masa de la muestra sumergida, gramos.

En el estudio de las muestras dentro del laboratorio, no se llevó a cabo esta metodología debido a los tiempos y volúmenes de especímenes a analizar, por lo que se decidió utilizar las muestras ya saturadas bajo inmersión pero con presión atmosférica, esto quiere decir, que siendo que los especímenes cumplían ya con una edad considerable dentro del agua de curado, se asumió que los poros de las muestras de mortero ya se encontraban totalmente saturados; por lo que el procedimiento a seguir se presenta a continuación (NMX-C-263-ONNCCE, 2010).

Se debe tomar en cuenta que el secado de las muestras se realizó en un horno con una temperatura de aproximadamente $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, asumiendo por investigaciones anteriores dentro del laboratorio, que la muestra a este tiempo puede considerarse como una masa ya seca.

Equipo a emplear:

- 3 muestras cúbicas de mortero en estudio.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Canastilla de metal.
- Bote de 19 litros aproximadamente.
- Horno de secado.
- Franela.
- Parrilla eléctrica.
- Recipiente para calentar agua.

Procedimiento:

1. Se extrajeron de los recipientes de almacenamiento los 3 especímenes cúbicos de 5 x 5 cm, en donde permanecían en proceso de curado, enumerando cada uno de ellos para su identificación.



2. Obtención de la masa saturada por inmersión. Se secaron las muestras superficialmente con una franela quitando la humedad superficial y se determinó con ayuda de la báscula su masa superficial seca (M_{ss} = Masa superficialmente seca).

Dado que los especímenes se mantuvieron en agua durante 90 días o más, se asumió que las muestras contaban ya con todos sus poros saturados, lo que quiere decir, que su masa se encontraba ya constante con aumento de masa menor de 0.5% respecto al de la masa mayor, en un lapso de 24 horas.

Obtención de la masa saturada por ebullición. Obtener el valor de la porosidad solo por inmersión, se debe saber que este no contiene más que una mínima parte de los poros de aire. Por lo que para conocer el valor real de la porosidad total se debe saturar de agua totalmente el espécimen, hervir varias horas y luego proceder a enfriarlo hasta registrar su masa “saturada”.

La norma mexicana NMX-C-263-ONNCCE-2010, indica que antes de la ebullición debe secarse la muestra a una temperatura de 100 °C a 110 °C (figura 3.95), hasta lograr la masa constante de cada una de las muestras y teniendo una diferencia de 0.5% entre sus masas en un intervalo de 24 horas.



Figura 3. 95. Secado de los especímenes hasta masa constante (V. H. Blancas Herrera, 2017).

3. Una vez que se obtuvo la masa seca (M_s) de las muestras, con ayuda de la balanza, se colocaron los especímenes cúbicos en un recipiente con agua, agregando agua hasta cubrir totalmente los cubos.
4. Con ayuda de la parrilla eléctrica, se realizó la ebullición de los cubos durante un tiempo de 5 horas cuidando que los especímenes se mantuvieran sumergidos en su totalidad todo este tiempo.



5. Se dejó enfriar en forma natural, pasado el tiempo de ebullición, hasta una temperatura final de 20 °C a 25 °C para después retirar cada espécimen del recipiente, quitar la humedad superficial con la franela y determinar su masa con ayuda de la balanza. Se registra esta medida de masa como la masa saturada por ebullición y superficialmente seca (M_e).
7. Pasado el punto anterior, se procedió a colocar cada una de las muestra dentro de la canastilla sumergida, registrando esta masa del espécimen como su masa sumergida más la canastilla ($M_s + M_c$). Para conocer la masa sumergida (M_a) de cada espécimen se restó la masa de la canastilla sumergida.

Cálculos a realizar:

Dado que se conocen las masas determinadas por el procedimiento anterior, los cálculos son los siguientes para conocer el porcentaje de volumen de poros permeables en las muestras de mortero (vacíos):

Porcentaje de absorción después de la inmersión:

$$\frac{M_{ss} - M_s}{M_s} \times 100$$

Porcentaje de absorción después de la ebullición:

$$\frac{M_e - M_s}{M_s} \times 100$$

Masa específica seca:

$$g_1 = \frac{M_s}{M_e - M_a}$$

Masa específica, después de la inmersión:

$$\frac{M_{ss}}{M_e - M_a}$$

Masa específica, después de la ebullición:

$$\frac{M_e}{M_e - M_a}$$



Masa específica aparente:

$$g_2 = \frac{M_s}{M_s - M_a}$$

Porcentaje de volumen de poros permeables (vacíos):

$$\frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100 \text{ ó bien } \frac{M_e - M_s}{M_e - M_a} \times 100$$

Especificaciones de la prueba:

De igual manera, la Red DURAR da a conocer un criterio de evaluación (tabla 3.13), el cual especifica la calidad de mortero de acuerdo al porcentaje de porosidad de los especímenes ensayados.

Tabla 3. 14. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la porosidad total (CYTED-DURAR, 1998).

Valor	Criterio
<10%	Concreto de buena calidad y compacidad
10% -15%	Concreto de moderada calidad
>15%	Concreto de durabilidad inadecuada

4. Resultados y discusiones.

En el presente capítulo se complementa la información presentada en el apartado anterior, cuyo contenido fue el de desarrollar la metodología de los distintas pruebas para conocer las propiedades de los materiales que constituyen al mortero, así como sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad en el mortero endurecido. Ahora bien, de cada ensaye se presentan resultados significativos de la actual investigación, realizando finalmente una comparación con las especificaciones marcadas por las normas vigentes de morteros y de concretos.

Para cada prueba se relacionaron los resultados de los morteros con sustituciones orgánicas (Fibra de Nopal y Almidón) con los morteros testigo para determinar la eficiencia de este tipo de sustituciones al volumen total de los morteros convencionales de cemento.



Se consideró en toda esta investigación el estudio de 4 mezclas de morteros distintas incluyendo el mortero control y para su reporte cada una de estas mezclas se denotará de la siguiente manera para su identificación, de acuerdo a la sustitución parcial de material orgánico por cemento.

T10 = Mortero testigo o control con 100% de cemento.

FN 0.5% = 0.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.

FN 1.5% = 1.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.

MZ 2% - FN 0.5% = 2% de Almidón o fécula de maíz y 0.5% de Fibra de Nopal como material de sustitución.

4.1. Caracterización de materiales y propiedades físico-mecánicas de los morteros.

4.1.1. Material cementante: Cemento y sustituciones de material orgánico.

4.1.1.1. Densidad del cemento.

El valor de la densidad del cemento obtenido en esta investigación se encuentra dentro del rango de valores que establece la norma (NMX-C-152-ONNCCE, 2010).

Tabla 4. 1. Resultado de la densidad del cemento utilizado.

Cemento utilizado	Densidad obtenida (g/cm ²)	Densidad por norma
CPC 30R RS	3.05	2.90 - 3.15 Límites de aceptación



4.1.1.2. Consistencia del material cementante.

Los resultados de la prueba de consistencia normal para cada mezcla del material cementante se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Resultados de la consistencia normal del material cementante.

Mezcla de material cementante		Consistencia Normal (%)	Valores frecuentes de Consistencia normal (%)
Testigo (T10)		31	26 - 33
Fibra de Nopal (FN)	0.5%	32	
	1.5%	31.5	
Almidón o fécula de maíz (MZ) + Fibra de Nopal (FN)	MZ 2% - FN 0.5%	31.5	

De acuerdo a lo resultados, la tabla 4.2 anterior presenta el cumplimiento de la consistencia normal de las 3 mezclas con sustitución orgánica así como de la mezcla testigo de acuerdo a valores frecuentes que la bibliografía citada presenta, en donde todas las mezclas en estudio rebasaron el 30% de consistencia normal, encontrándose en el límite inferior de estos valores comparativos. El almidón y la fibra de nopal como sustitutos del cemento son absorbentes de agua, los valores de las 3 mezclas con porcentaje de sustitución superaron a la mezcla testigo en su consistencia normal.

4.1.1.3. Fraguado del material cementante.

Los resultados de los tiempos de fraguado para cada mezcla del material cementante se muestran en la Tabla 4.3:

Tabla 4. 3. Resultados de tiempo de fraguado.

Mezcla de material cementante	Tiempos de fraguado		Límite por norma	
	Inicial (min)	Final (min)	Inicial (min)	Final (min)
T10	150	390	90 mín.	1080 máx.
FN 0.5%	120	1260		
FN 1.5%	210	1515		
MZ - FN 2% - 0.5%	135	1174		

La norma (NMX-C-177-ONNCCE, 1997) especifica las condiciones permisibles para los tiempos de fraguado y sus límites de acuerdo al tiempo inicial y final de fraguado teniendo así el cumplimiento del fraguado inicial en las 4 mezclas correspondientes en estudio, mientras que para el fraguado final



solo la mezcla testigo está dentro del límite permisible. Cabe hacer mención que los materiales orgánicos utilizados para la investigación funcionan como retardantes del fraguado, es por ello la situación de que se rebase el límite de fraguado final que la norma vigente especifica.

4.1.2. Material pétreo: Arena.

Los resultados de las pruebas para caracterizar la arena de “Joyitas” fueron obtenidas en el laboratorio dentro de los primeros días de la presente investigación y se presentan a continuación.

4.1.2.1. Cuarteo del agregado pétreo.

El cuarteo se realizó combinando dos métodos, revolviendo la arena con las palas para posteriormente obtener muestras representativas de la arena de “Joyitas” utilizando el divisor de muestras para arenas.

4.1.2.2. Humedad actual en arenas.

De acuerdo a lo establecido en las normas NMX-C-166-ONNCCE-2006 y ASTM-C-566, 2013; y lo aplicado en esta investigación, se tiene como el porcentaje de humedad actual lo marcado en la tabla 4.4:

Tabla 4. 4. Resultados del contenido total de Humedad actual evaporado por secado.

Muestra de material	% Humedad actual			
	Masa Húmeda (g)	Masa seca (g)	% Humedad actual	% Humedad actual PROMEDIO
1	300	296.4	1.21	1.40
2	300	295.8	1.42	
3	300	295.4	1.56	

El porcentaje de humedad actual en la arena en estudio es de 1.4%.

4.1.2.3. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.

Se realizaron tres pruebas para obtener un promedio de la humedad de absorción en la arena. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5.



Tabla 4. 5. Resultados del por ciento de humedad de absorción en la arena.

% de Humedad de Absorción			
Muestra	Mh (g)	Ms (g)	% de Absorción
1	300.0	292.3	2.63
2	300.0	292.2	2.67
3	297.3	290.6	2.31
PROMEDIO			2.65

El resultado de la muestra 3 se consideró inapropiada, ya que la cantidad de material no fue la correcta y dicho agregado presentó muchos finos, quedando fuera de lo representativo. Por lo tanto se consideran las dos primeras muestras y su porcentaje promedio de humedad de absorción resulto de 2.65%.

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

La prueba para determinar la masa volumétrica seca y suelta se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004) y utilizando 3 muestras representativas de arena, los resultados son los siguientes:

Tabla 4. 6. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de la arena.

Determinación de la masa volumétrica seca y suelta					
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm³)	MVSS (g/cm³)
1	1945	6100	4155	2783	1.49
2	1945	5980	4035	2783	1.45
3	1945	5970	4025	2783	1.45
PROMEDIO					1.46

La masa volumétrica seca y suelta (MVSS) de la arena es de 1.46 g/cm³.

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

La prueba para determinar la masa volumétrica seca y varillada se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004) y se obtuvieron los siguientes resultados:



Tabla 4. 7. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de la arena.

Determinación de la masa volumétrica seca y varillada					
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSV (g/cm ³)
1	1945	6270	4325	2783	1.55
2	1945	6250	4305	2783	1.55
3	1945	6200	4255	2783	1.53
PROMEDIO					1.54

La masa volumétrica seca y varillada (MVSV) de la arena es de 1.54 g/cm³.

4.1.2.6. Granulometría en el agregado fino (arena).

Para conocer la distribución granulométrica de la arena de “Joyitas”, fueron separadas 3 muestras representativas, teniendo por consiguiente 3 resultados distintos y un promedio del módulo de finura. Los resultados de la granulometría se presentan a continuación:

- Muestra No. 1.

Tabla 4. 8. Módulo de Finura de la muestra 1.

Granulometría en arenas - Muestra 1				
MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	1	0.25	0.25	99.75
8	20.7	5.175	5.425	94.575
16	88	22	27.425	72.575
30	129.2	32.3	59.725	40.275
50	72.5	18.125	77.85	22.15
100	33.3	8.325	86.175	13.825
200	18.7	4.675	90.85	9.15
CHAROLA	36.6	9.15	100	0
SUMA	400	100	447.7	352.3
Módulo de Finura (MF)	2.57			

- Muestra No. 2.

Tabla 4. 9. Módulo de Finura de la muestra 2.

Granulometría en arenas - Muestra 1				
MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA



4	2	0.5	0.5	99.5
8	22.6	5.65	6.15	93.85
16	73.4	18.35	24.5	75.5
30	124.9	31.225	55.725	44.275
50	76.9	19.225	74.95	25.05
100	37.9	9.475	84.425	15.575
200	20.6	5.15	89.575	10.425
CHAROLA	41.7	10.425	100	0
SUMA	400	100	435.83	364.175
Módulo de Finura (MF)	2.46			

- Muestra No. 3.

Tabla 4. 10. Módulo de Finura de la muestra 3.

Granulometría en arenas - Muestra 1				
MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	0.7	0.175	0.175	99.825
8	30.4	7.6	7.775	92.225
16	84.7	21.175	28.95	71.05
30	123.2	30.8	59.75	40.25
50	69.2	17.3	77.05	22.95
100	35.4	8.85	85.9	14.1
200	19.4	4.85	90.75	9.25
CHAROLA	37	9.25	100	0
SUMA	400	100	450.35	349.65
Módulo de Finura (MF)	2.60			

Del promedio de las tres muestras se obtuvo el módulo de finura igual a 2.54 (Tabla 4.11), el cual, según la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) y de acuerdo a parámetros de calidad, está dentro de los rangos recomendables entre 2.5 y 3.

Tabla 4. 11. Módulo de Finura promedio.

Módulo de Finura (MF) de la arena				
MALLA	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4	1.23	0.31	0.31	99.69
8	24.57	6.14	6.45	93.55



16	82.03	20.51	26.96	73.04
30	125.77	31.44	58.40	41.60
50	72.87	18.22	76.62	23.38
100	35.53	8.88	85.50	14.50
200	19.57	4.89	90.39	9.61
CHAROLA	38.43	9.61	100.00	0.00
SUMA	400.00	100.00	444.63	355.38
Módulo de Finura (MF)	2.54			

La distribución granulométrica se presenta en la figura 4.1 junto con los límites superior e inferior establecidos por la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

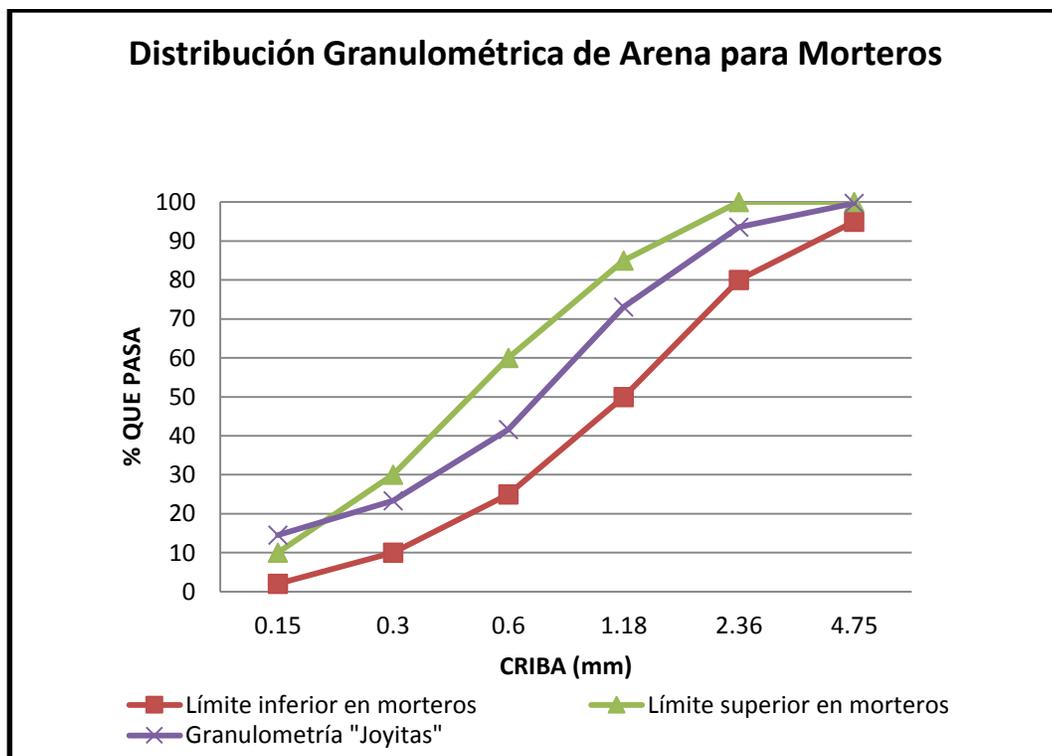


Figura 4. 1. Gráfica de composición granulométrica de la arena de "Joyitas".

En la figura 4.1 anterior, se observa que la arena de Joyitas utilizada en la investigación se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) para la elaboración de los morteros, ya que el comportamiento de la línea granulométrica se encuentra a 2/3 por dentro y similar al de los límites para morteros.



4.1.2.7. Colorimetría en arenas.

Se tomaron 3 muestras de arena a las cuales se les efectuó la prueba de colorimetría, tales resultados son presentados en la tabla 4.12:

Tabla 4. 12. Resultados de la prueba de colorimetría.

Prueba de Colorimetría	
No. Muestra	No. de Tabla Colorimétrica
1	2
2	2
3	2



Figura 4. 2. Comparación del color de las muestras con la tabla colorimétrica (V. H. Blancas Herrera, 2017).

El color observado en las 3 muestras (figura 4.2) es similar al color número 2 de la tabla colorimétrica, por lo que podemos decir que el material cumple con las especificaciones de la prueba y por lo tanto es aceptable, debido a que no contiene exceso de materia orgánica.

4.1.2.8. Sedimentación en arenas.

Se realizó la prueba a tres muestras representativas de arena como se muestra en la figura 4.3, cumpliendo dos de ellas (muestra 2 y 3) con lo establecido en las especificaciones marcadas por el manual de prácticas del Laboratorio de Materiales (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011), en donde el material fino no rebasa la marca de 444 ml por lo cual podemos concluir que el contenido de material fino es aceptable.



Figura 4. 3. Resultados de la prueba de sedimentación (V. H. Blancas Herrera, 2017).

4.1.2.9. Material que pasa por la malla No. 200.

Una vez realizada la prueba para conocer el material que pasa por la malla No. 200 se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 4.13:

Tabla 4. 13. Porcentaje de material fino que contiene la arena.

Material que pasa por la malla No. 200			
Muestra	Masa inicial (Mi, g)	Masa final (Mf, g)	A (%)
1	597.7	553.8	7.34
2	597.7	552.5	7.56
3	598.45	561.6	6.16

De acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014), los valores están dentro de límite permisible para elaborar concretos presforzados, en nuestro caso, para un mortero sometido a compresión, el valor límite es de un 8%. Por lo tanto, el contenido de material fino es aceptable.

4.1.2.10. Terrones de arcilla.

Es de suma importancia conocer el contenido de terrones de arcilla que contiene una arena ya que estos son partículas de baja resistencia estructural que en contacto con agua se convierten en lodos que son perjudiciales para el concreto y mortero.



Tabla 4. 14. *Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena.*

% de Terrones de arcilla en la arena			
Muestra	Mi (g)	Mf (g)	% Terrones de arcilla
1	100	99.4	0.6
2	100	99.3	0.7
3	100	98.8	1.2
PROMEDIO			0.65

Como se observa en la tabla 4.14, se calculó el promedio, con solo las muestras 1 y 2 dado que la muestra 3 no cumplía con lo establecido por el procedimiento de prueba, es decir contenía un exceso de terrones de arcilla.

Por lo tanto se obtuvo al final un resultado de porcentaje de terrones de arcilla de 0.65%. Lo que indica un bajo y aceptable contenido de terrones de arcilla en la arena. Este valor está dentro de los rangos que indica la norma extranjera (ASTM-C142/C142M, 2010), los cuales son 0.6 y 1.2 % y la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE-2014) la cual especifica un valor máximo permisible de 3% en la masa total de la muestra que de igual manera cumple con el resultado de la prueba.

4.1.2.11. Densidad de la arena.

Los resultados de la prueba de densidad se muestran en la tabla 4.15:

Tabla 4. 15. *Resultados de la densidad de la arena.*

Densidad de la arena				
Muestra	Ma (g)	Vf (cm³)	Vi (cm³)	Densidad (DA) g/cm³
1	300	450	328.3	2.47
2	300	450	329.1	2.48
3	300	450	328.6	2.47
PROMEDIO				2.47

El promedio indica que la densidad del material es alta, es decir, es de buena calidad.

4.1.2.12. Equivalente de arena.

En esta prueba determinamos las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene la arena, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de dichos materiales finos (NMX-C-480-ONNCCE, 2014).



Tabla 4. 16. Resultados de equivalente de arena.

% Equivalente de arena			
Muestra	Lectura de Finos	Lectura de Arena	% Equivalente de arena
1	10.9	10.1	92.66
2	10.5	9.7	92.38
3	11.4	10.4	91.23
		PROMEDIO	92.09

La desviación estándar para un solo operador es de 1.5 para equivalentes de arena mayores a 80 % y 2.9 para valores menores que 80 % (NMX-C-480-ONNCCE, 2014).

Según el Reglamento de construcción del Estado de Michoacán menciona que es aceptable un equivalente de arena con un valor mayor a 85%, por lo que el valor obtenido de las 3 muestras, referidos en la tabla 4.16 anterior, cumple con lo establecido en la especificación del reglamento.

4.1.2.13. Resumen de resultados de la caracterización de la arena “Joyitas”.

A continuación la tabla 4.17 muestra un resumen de los resultados obtenidos en las distintas pruebas para la caracterización de la arena de “Joyitas”, así como cada una de las especificaciones marcadas por su norma correspondiente.

Tabla 4. 17. Resumen de resultados de la caracterización de la arena “Joyitas”.

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

De manera general se concluye que la arena “Joyitas” utilizada en la investigación cumple con la mayoría de los parámetros de calidad especificados por las normas y reglamentos vigentes, por consiguiente fue apta para utilizarse en la presente investigación.

4.1.3. Estudio del agua utilizada en la investigación.

Como ya se hizo mención en el apartado 3.1.3 de esta investigación, existe un reporte de calidad del agua que abastece al “Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas”. Dicho reporte fue emitido por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el año de 2014, el cual es presentado en la tabla 4.18.

Tabla 4. 18. Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero.

Muestra: Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo				
Sitio de muestreo:	Laboratorio de Materiales			
Fecha de muestreo:	18 de mayo de 2014			
Norma de referencia:	NMX-C-122-ONNCCE-2004			
Parámetro	Resultado	Límite Permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	> 6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	3.37	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálctica	21	-----	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico



De acuerdo a lo marcado en la tabla 4.18, los resultados están por debajo de los límites que establece la normativa mexicana vigente (NMX-C-122-ONNCCE, 2004), por lo cual el empleo para la elaboración de las mezclas en estudio es adecuado.

4.2. Pruebas realizadas al mortero fresco.

4.2.1. Fluidéz.

Los resultados obtenidos de fluidéz se describen a continuación en la tabla 4.19.

Tabla 4. 19. Resultados de la prueba de fluidéz para las distintas mezclas en estudio.

Mezcla	Cantidades de material para la mezcla					Relación a/c	Aditivo (%)	Fluidéz (%)
	Cemento (g)	FN (g)	MZ (g)	Arena (g)	Agua (ml)			
Testigo (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

Se tomó un rango de 90 a 115 %, debido a que la arena se utilizó con todos los tamaños para elaborar concreto y la absorción de dicha arena es de 2.54 %, la cual no se corrigió. Es importante tomar la muestra de manera que sea homogénea para obtener la misma trabajabilidad.

4.2.2. pH.

De acuerdo al método que se utilizó para esta medición, el resultado del pH se mantuvo entre 12 y 14, lo cual indica que las mezclas tienen carácter alcalino. Figura 4.4.



Figura 4. 4. Resultados del pH en el mortero fresco (V. H. Blancas Herrera, 2017).



4.2.3. Elaboración de especímenes.

Todos los especímenes se realizaron de acuerdo a las normas que rigen la elaboración de cada tipo de estos, en el caso de los cubos, se elaboraron conforme a la norma NMX-C-061-ONNCCE, 2015. El llenado de los moldes, el apisonado y el desmoldado se realizaron correctamente, no hubo problemas significativos de exudación o a la hora de desmoldar.

4.2.4. Curado de los especímenes.

Como ya se mencionó, en el apartado 3.2.8, los especímenes fueron curados por inmersión utilizando recipientes de plástico, permaneciendo en esa condición hasta la edad de prueba.

La fibra de nopal retarda el fraguado, por lo cual el curado se comenzó después de 48 horas de haberse colado, aproximadamente; de igual manera, para la combinación de FN y MZ, el curado se comenzó 48 horas después de su elaboración.

4.3. Pruebas realizadas al mortero endurecido.

4.3.1. Pruebas no destructivas.

4.3.1.1. Densidad.

El peso específico o densidad de un mortero de cemento convencional de buena calidad es de 2.1 g/cm³ aproximadamente. A continuación, en las figuras 4.5 y 4.6, se presentan los resultados de la densidad para cada mezcla en las distintas edades de prueba, considerando que estas son edades tardías.

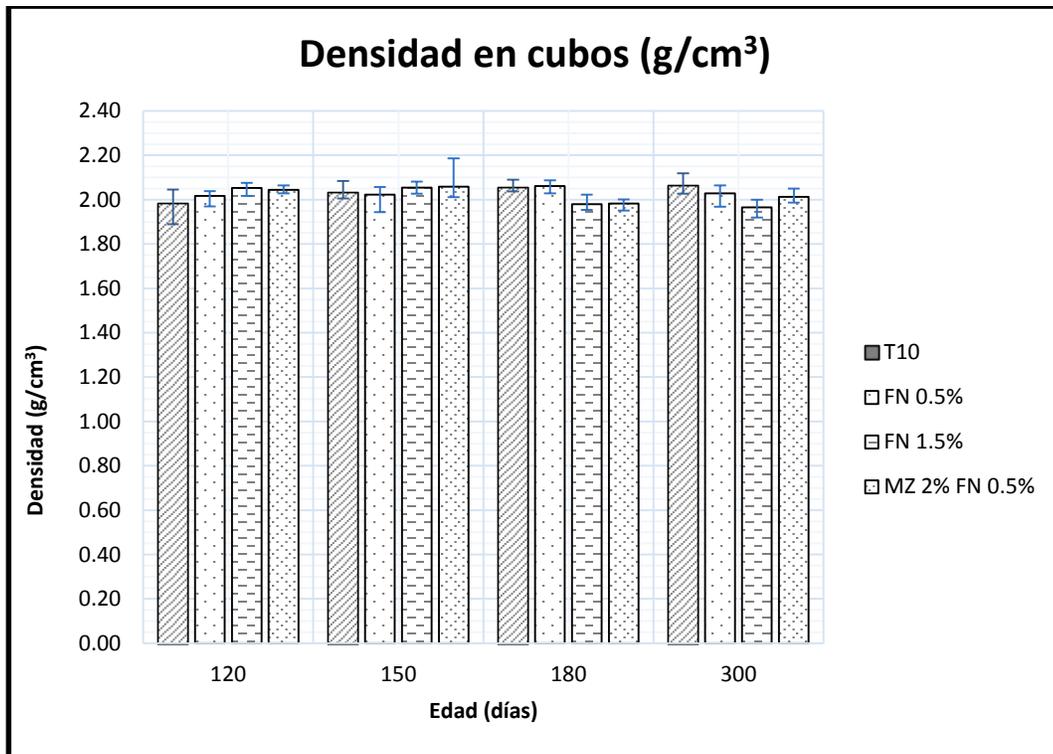


Figura 4. 5. Resultados de densidad a edades tardías.

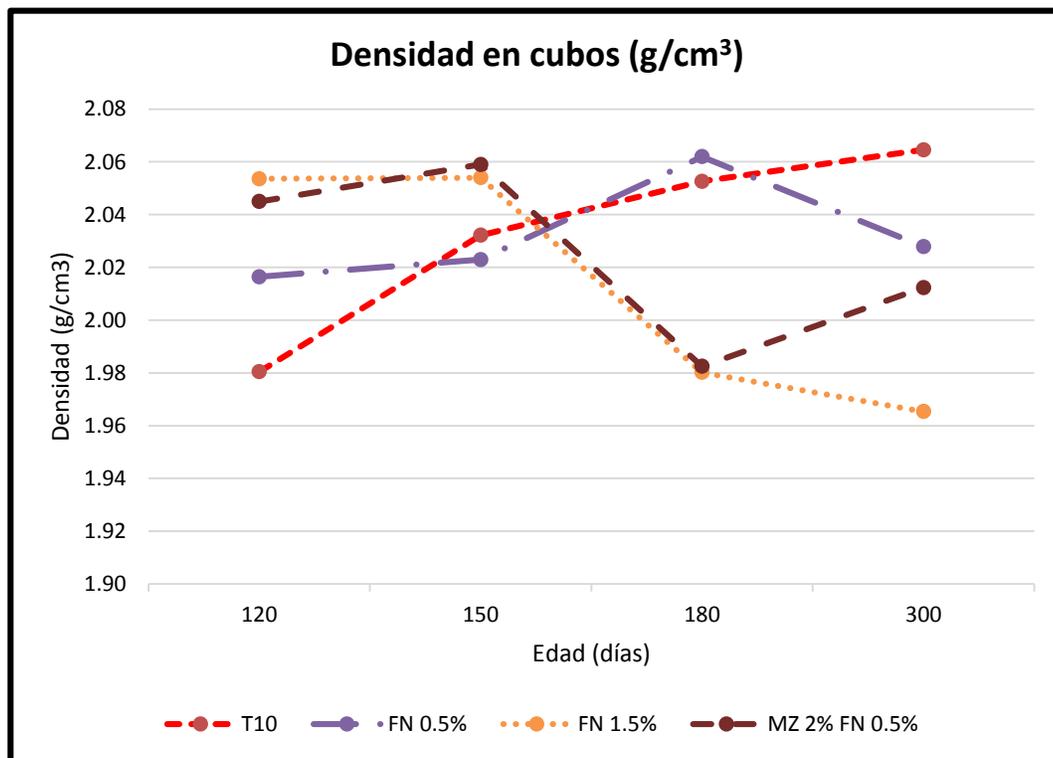


Figura 4. 6. Tendencia de resultados de densidad, por su edad de prueba.



Como se observa en la figuras 4.5 y 4.6, las mezclas en estudio logran una densidad a los 300 días menor a la mezcla control o testigo, siendo este un valor aproximado a los 2000 kg/m³.

Teniendo en cuenta que los morteros tradicionales alcanzan una densidad de hasta 2100 kg/m³, se puede concluir que la matriz de los morteros con sustituciones orgánicas se encuentra en buenas condiciones y son considerados de una calidad aceptable.

De manera general, observando la figura 4.5, la densidad de los cubos a edades tardías de las tres diferentes mezclas, están por debajo de la densidad que presenta la mezcla testigo al cabo de los 300 días, ya que al estar totalmente saturado cada espécimen considerado como masa constante, su volumen va incrementándose gradualmente.

4.3.1.2. Gravedad específica (densidad relativa).

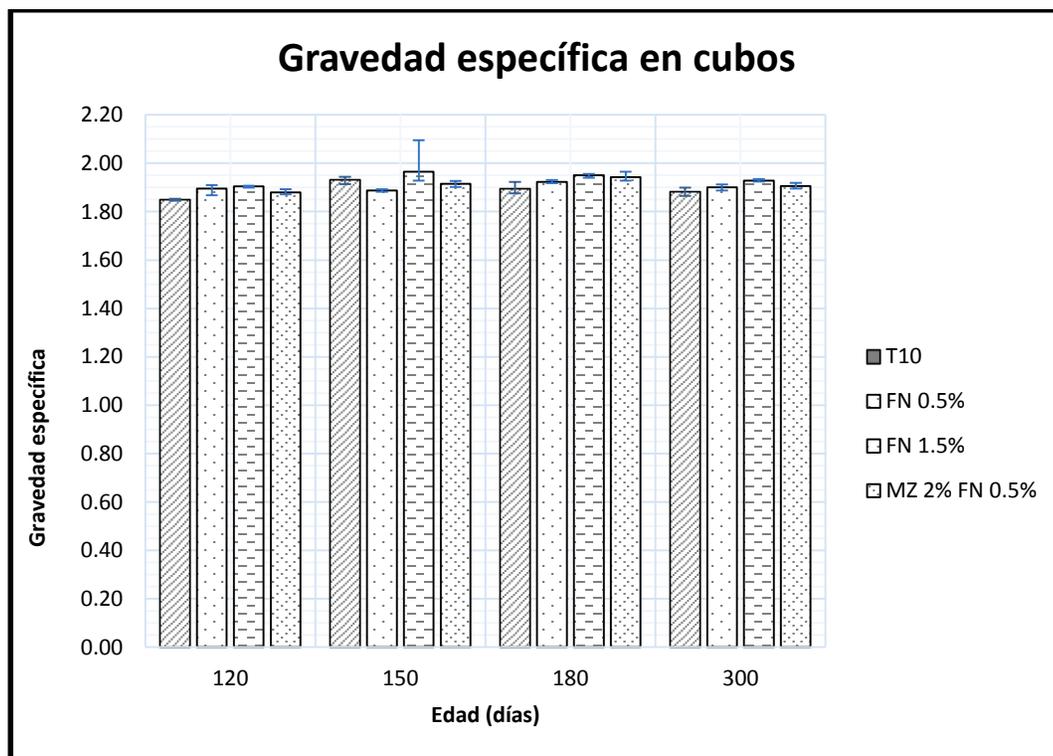


Figura 4. 7. Resultados de gravedad específica a edades tardías.

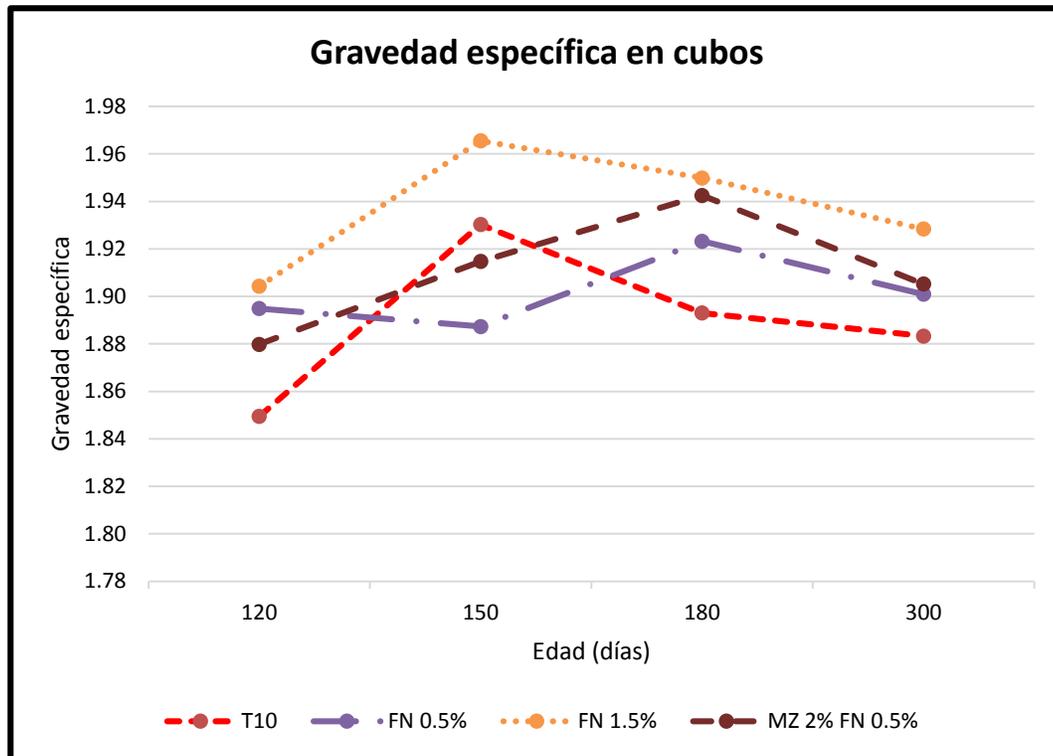


Figura 4. 8. Tendencia de la gravedad específica, por su edad de prueba.

Observando las figuras 4.7 y 4.8 anteriores, se logró identificar que las tres mezclas orgánicas en comparación con la mezcla testigo, tienen valores promedio más altos a lo largo de todas las edades en estudio. Tomando en consideración que tanto para edades tempranas (López Regalado, 2016) como para edades tardías, la mezcla con sustitución del 1.5% de fibra de nopal (FN) presentó mejores resultados en la prueba. Esto indica que las sustituciones densifican la matriz cementicia del mortero.

4.3.1.3. Resistividad eléctrica.

En cuanto a resistividad eléctrica, como ya se dijo en el apartado 3.3.1.3 de esta investigación, 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 testigo.

La práctica ha demostrado que los valores de resistividad eléctrica (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 4.9 a 4.14 siguientes, cuyos resultados fueron morteros con velocidades de corrosión moderada o alta.

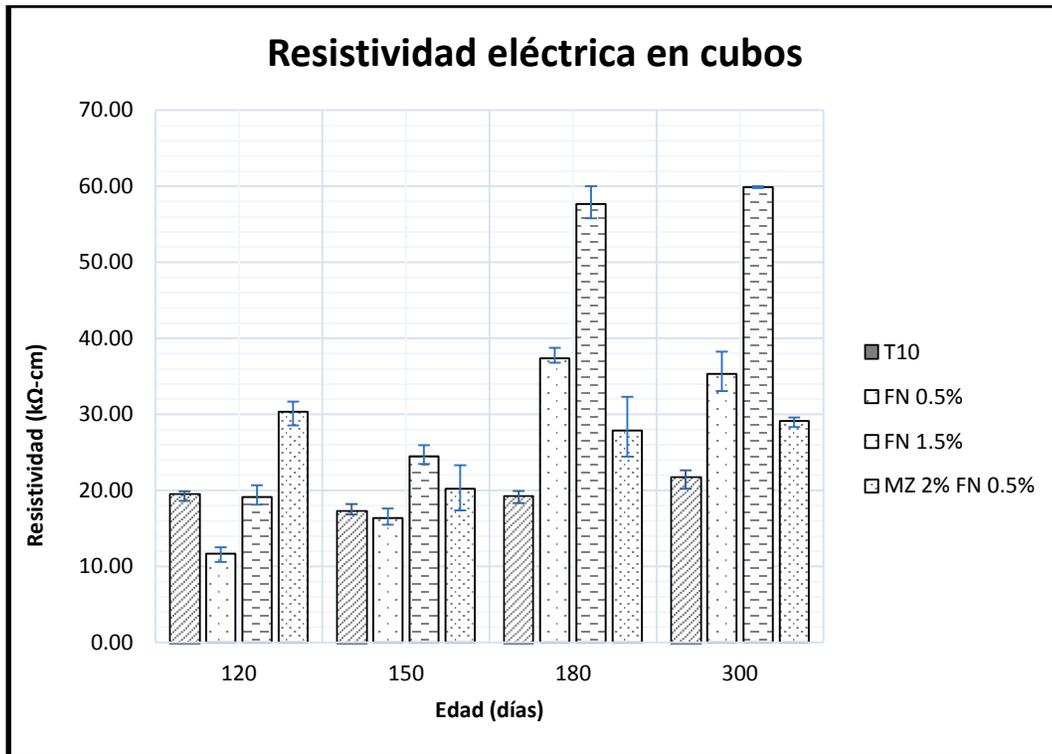


Figura 4. 9. Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cubos, a edades tardías.

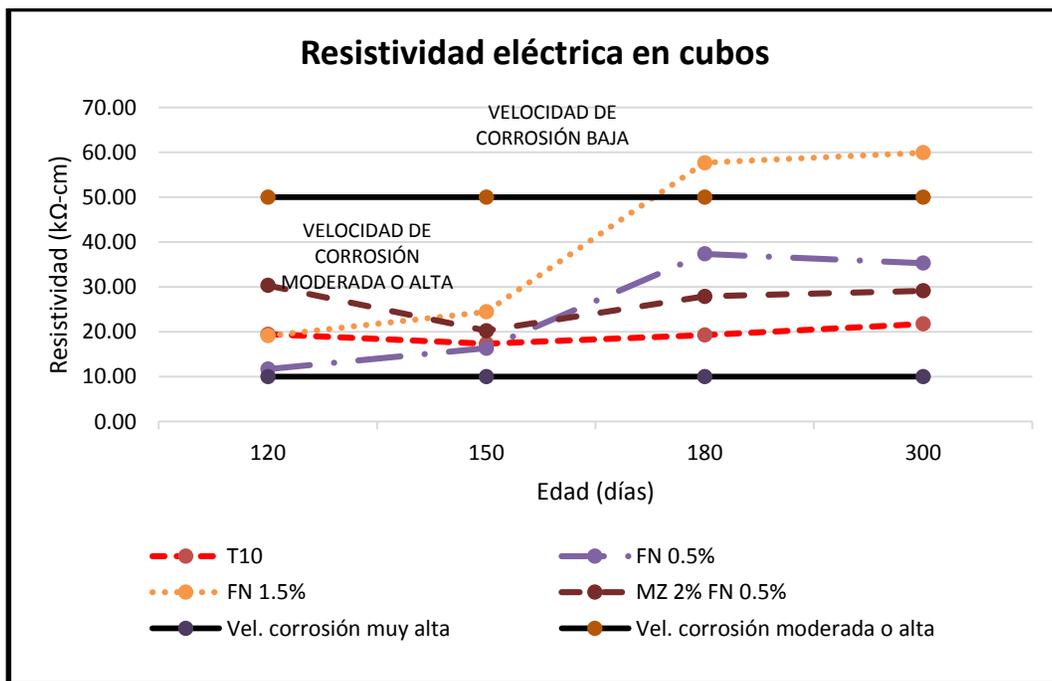


Figura 4. 10. Tendencia de resistividad eléctrica en cubos, por su edad de prueba.

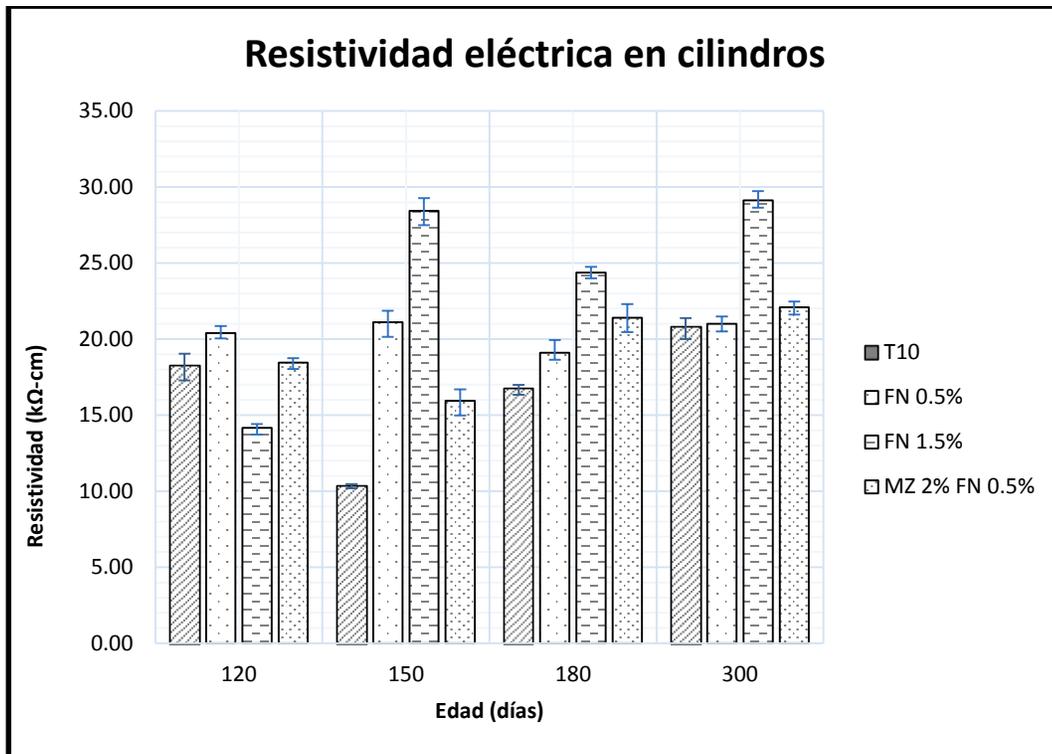


Figura 4. 11. Resultados de resistividad eléctrica (RE) en cilindros, a edades tardías.

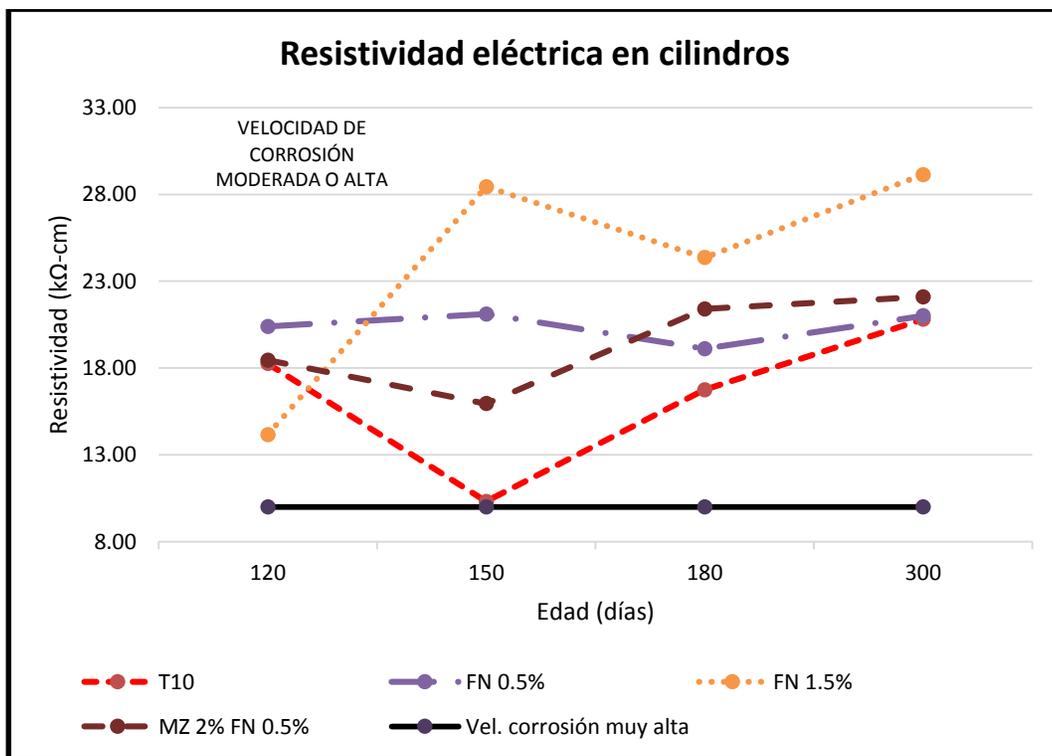


Figura 4. 12. Tendencia de resistividad eléctrica en cilindros, por su edad de prueba.

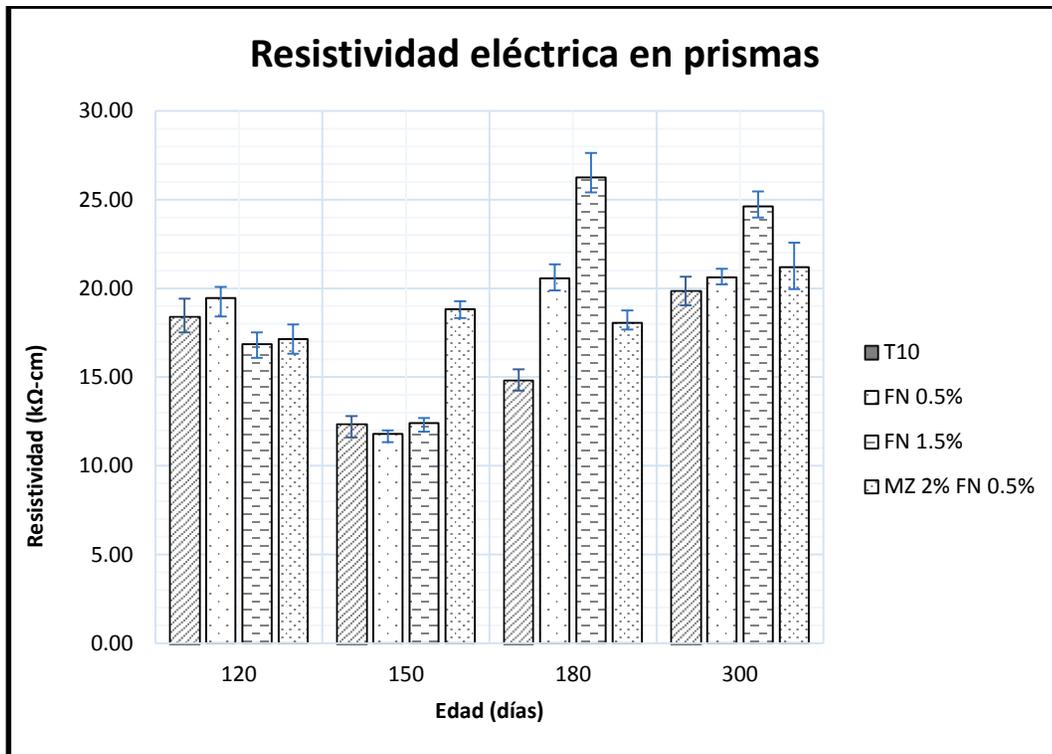


Figura 4. 13. Resultados de resistividad eléctrica (RE) en prismas, a edades tardías.

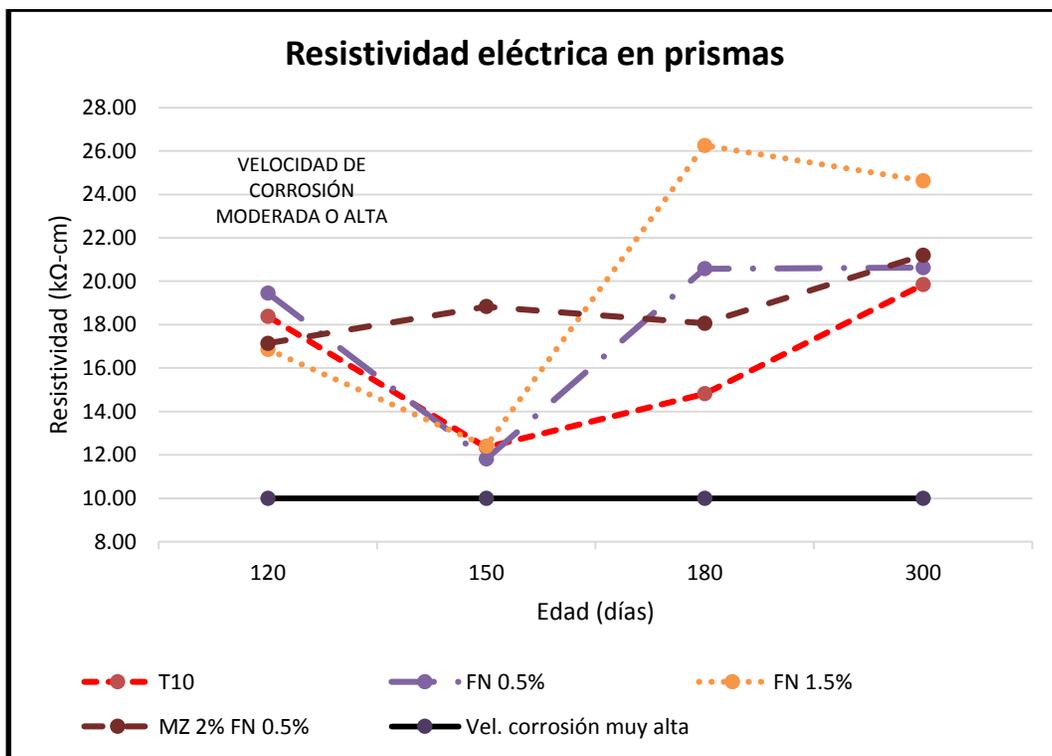


Figura 4. 14. Tendencia de resistividad eléctrica en prismas, por su edad de prueba.



En este ensayo de resistividad eléctrica, el 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 4.10, 4.12 y 4.14; 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 testigo.

4.3.1.4. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

En las figuras 4.15 a 4.20 de este apartado 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 testigo (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 especificados en la tabla 3.10.

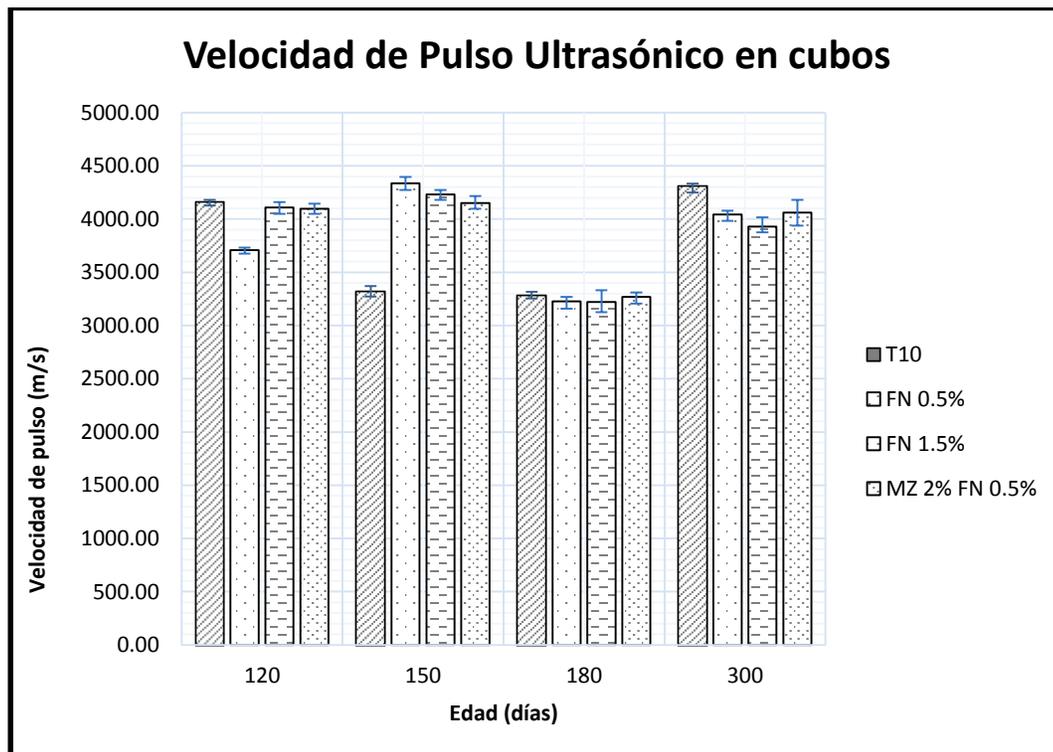


Figura 4. 15. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cubos, a edades tardías.

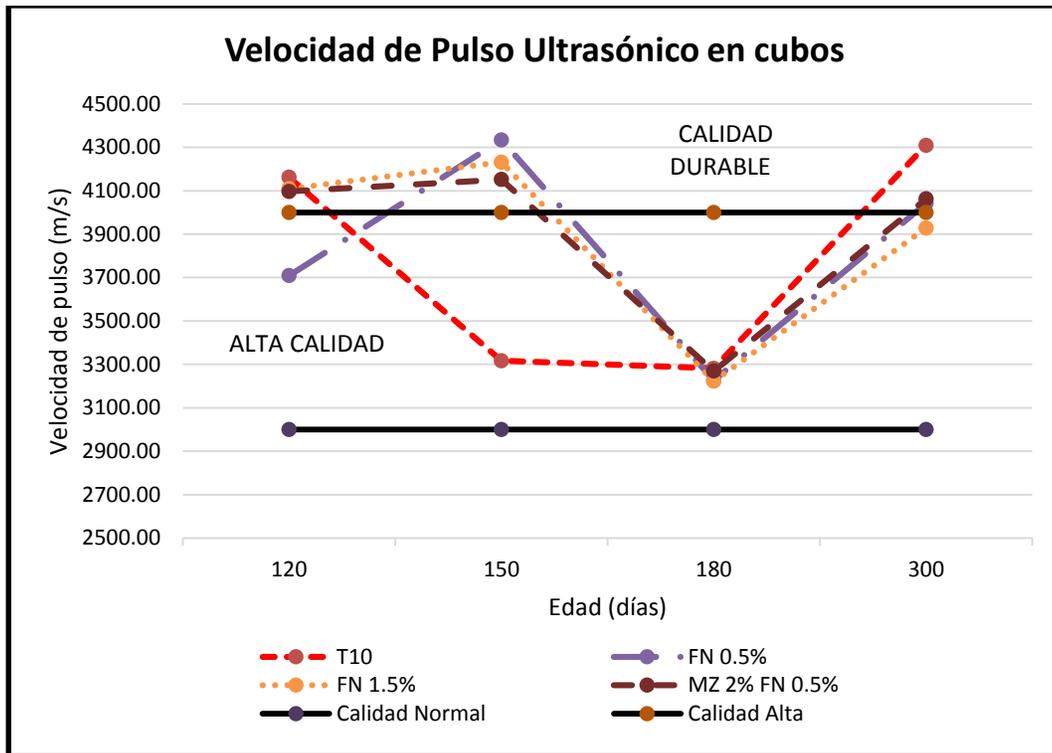


Figura 4. 16. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos, por su edad de prueba.

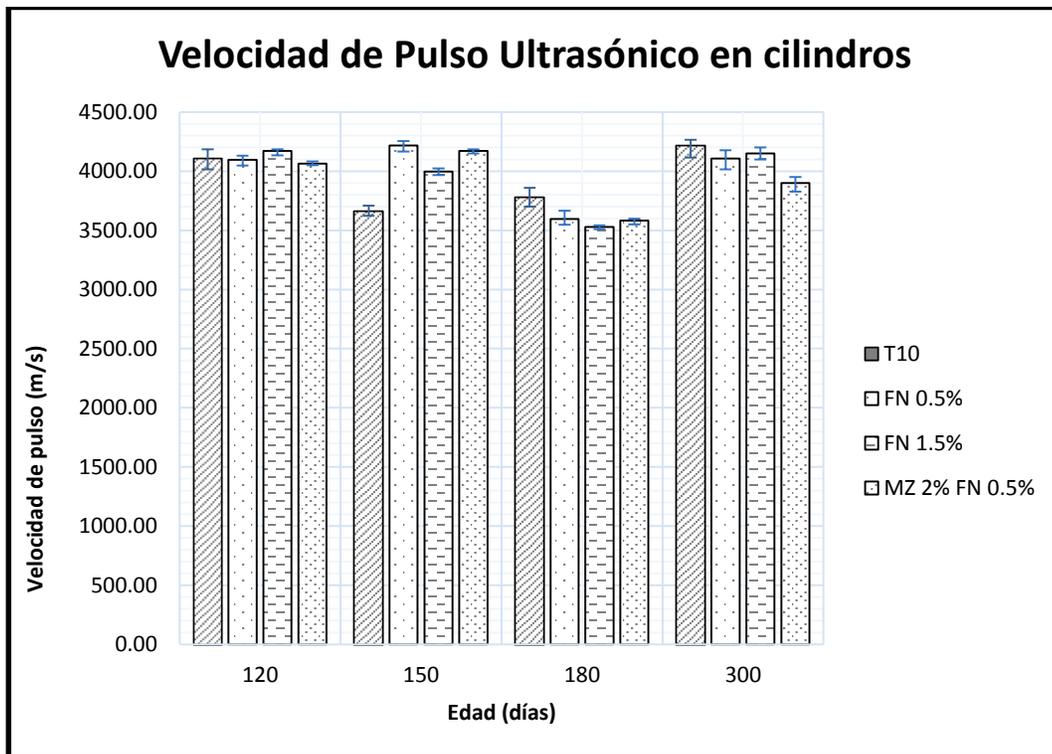


Figura 4. 17. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en cilindros, a edades tardías.

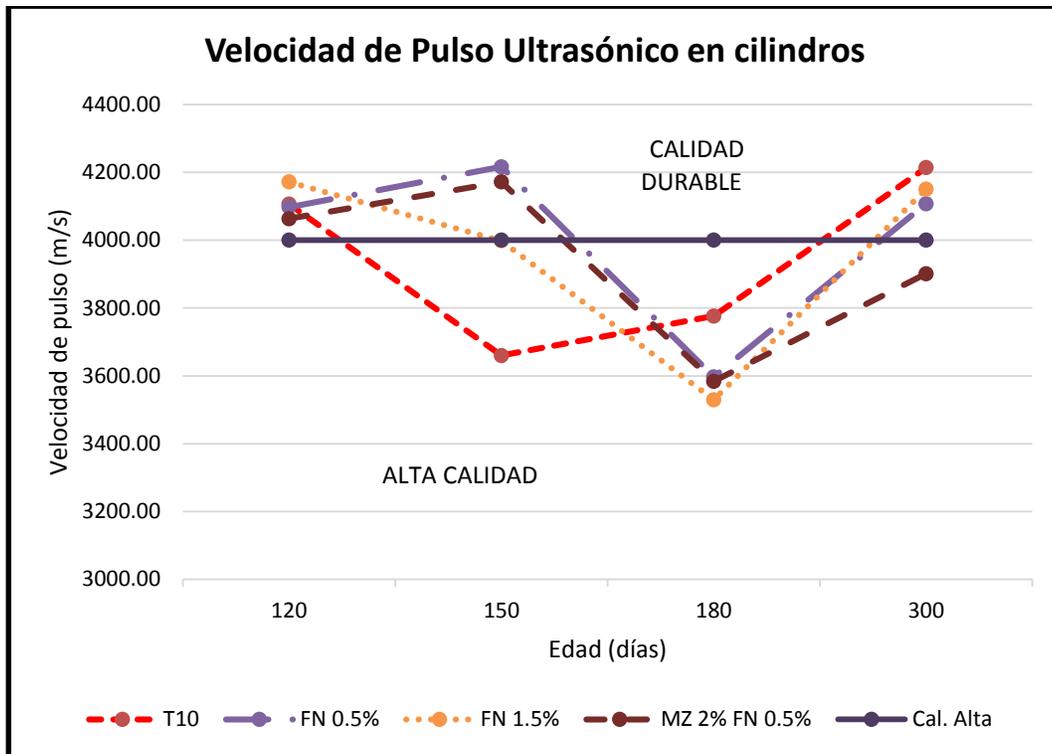


Figura 4. 18. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros, por su edad de prueba.

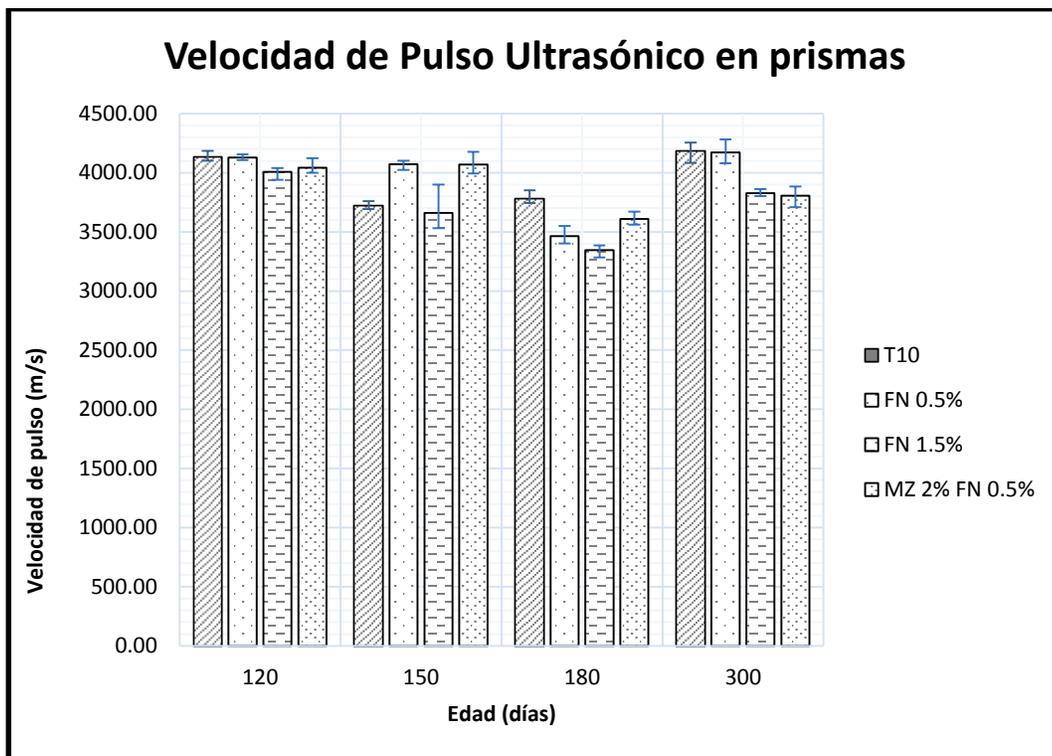


Figura 4. 19. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en prismas, a edades tardías.

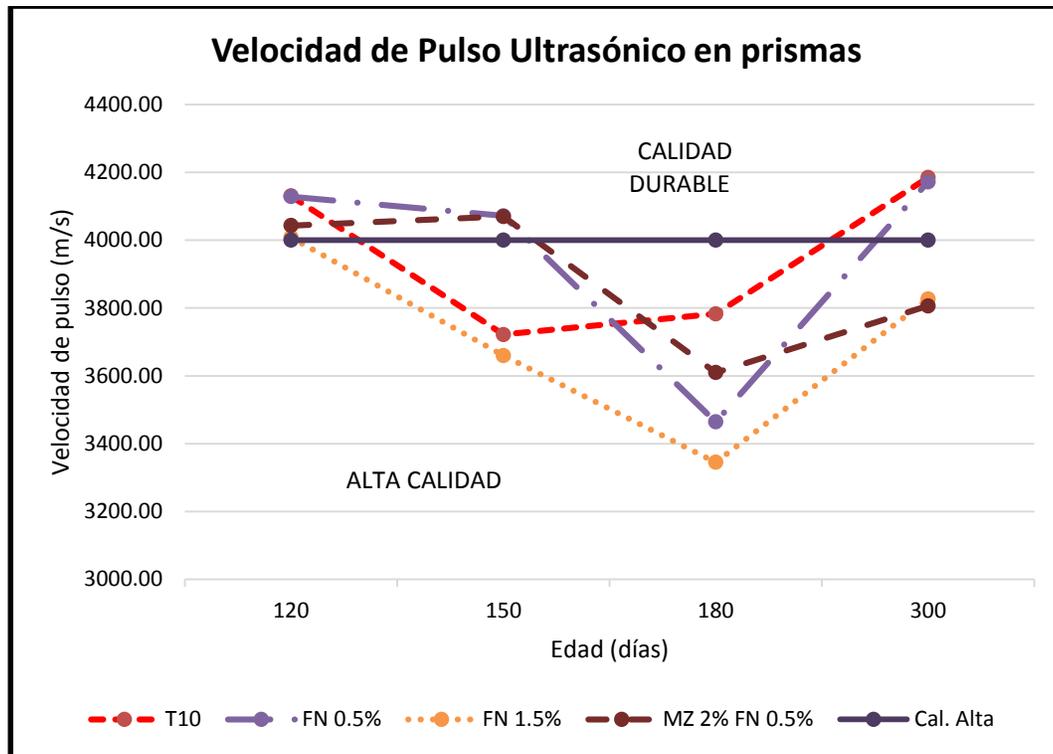


Figura 4. 20. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en prismas, por su edad de prueba.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en los distintos especímenes de prueba, como se observa en las figuras 4.16, 4.18 y 4.20 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 testigo y la FN 0.5%, obteniendo parámetros de alta calidad y calidad durable en los diferentes especímenes ensayados.

4.3.2. Pruebas destructivas.

4.3.2.1. Resistencia a la compresión simple.

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 las figuras 4.21 y 4.22 siguientes, la resistencia a la compresión simple de las diferentes mezclas de mortero respecto al mortero testigo, 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 testigo (T10).

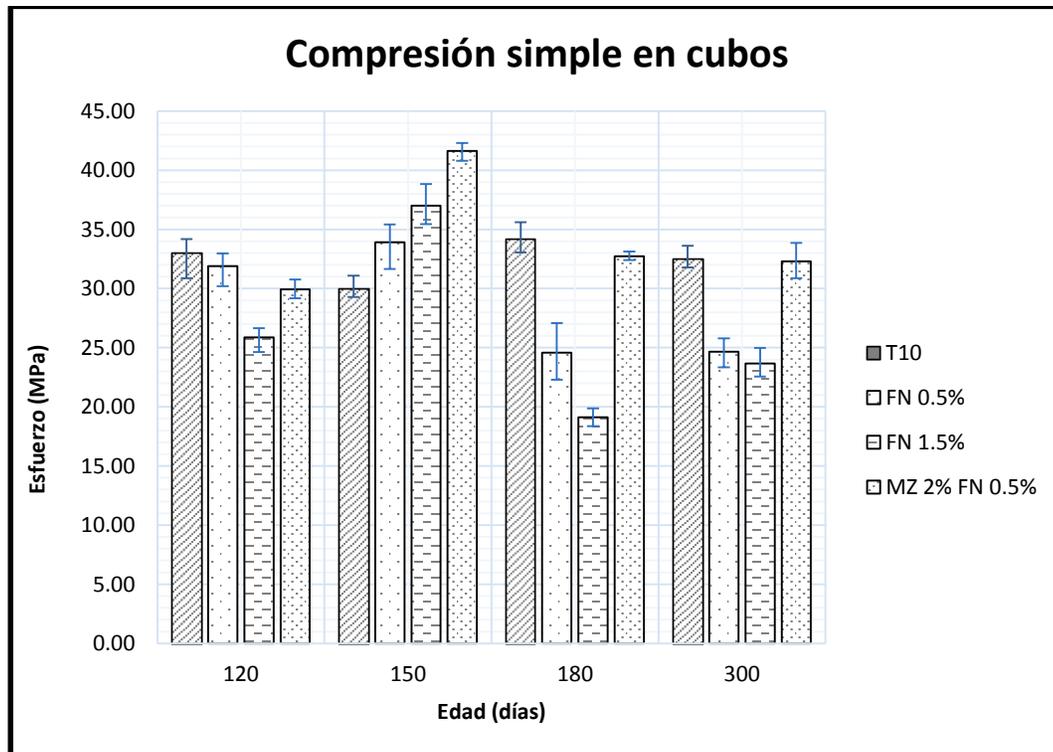


Figura 4. 21. Resultados de compresión simple en cubos, a edades tardías.

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 testigo (T10), y como se observa en la figura 4.22 a la edad de 150 días el valor incrementó considerablemente hasta 41.63 MPa, superando al 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 testigo 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.

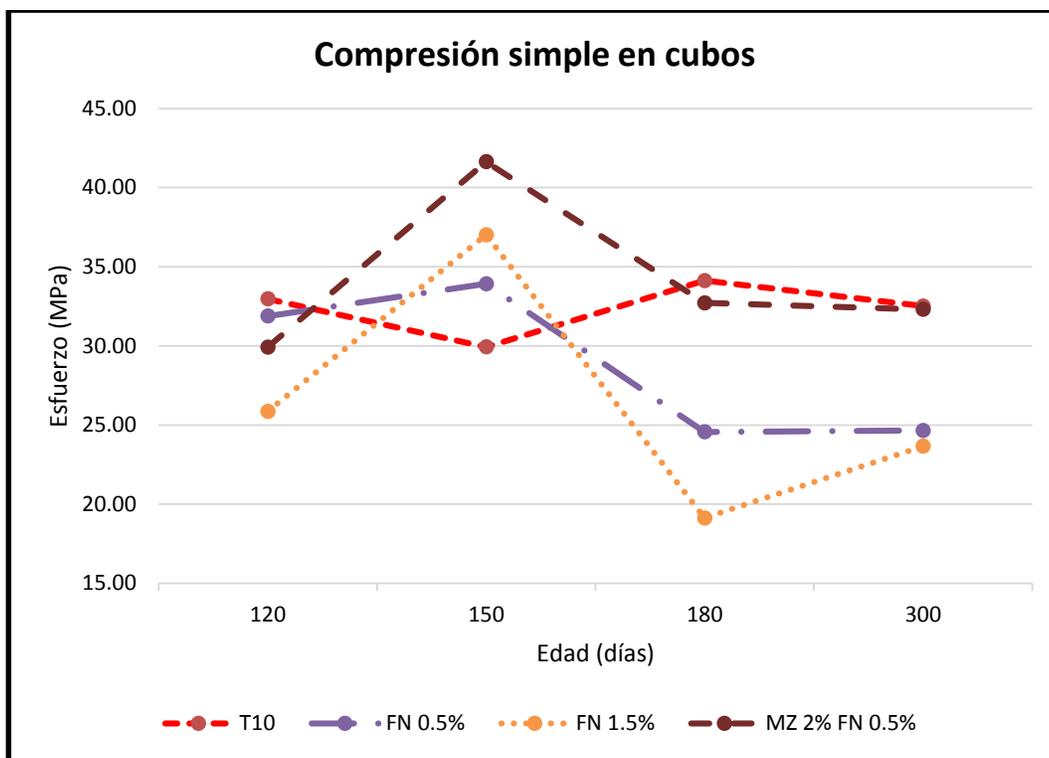


Figura 4. 22. Tendencia de compresión simple en cubos, por su edad de prueba.

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 testigo, se encuentran muy por encima de las especificaciones que establece la normativa, según lo observado en la figura 4.21.

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 4.21 se determina que los morteros en estudio se encuentran con una durabilidad y resistencia moderada y por encima de los 20 MPa especificados.



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

Según bibliografía existente para concreto, se especifica que 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, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). En el caso del ensayo que se realizó para esta investigación de acuerdo a lo observado en la figura 4.23 siguiente, 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%.

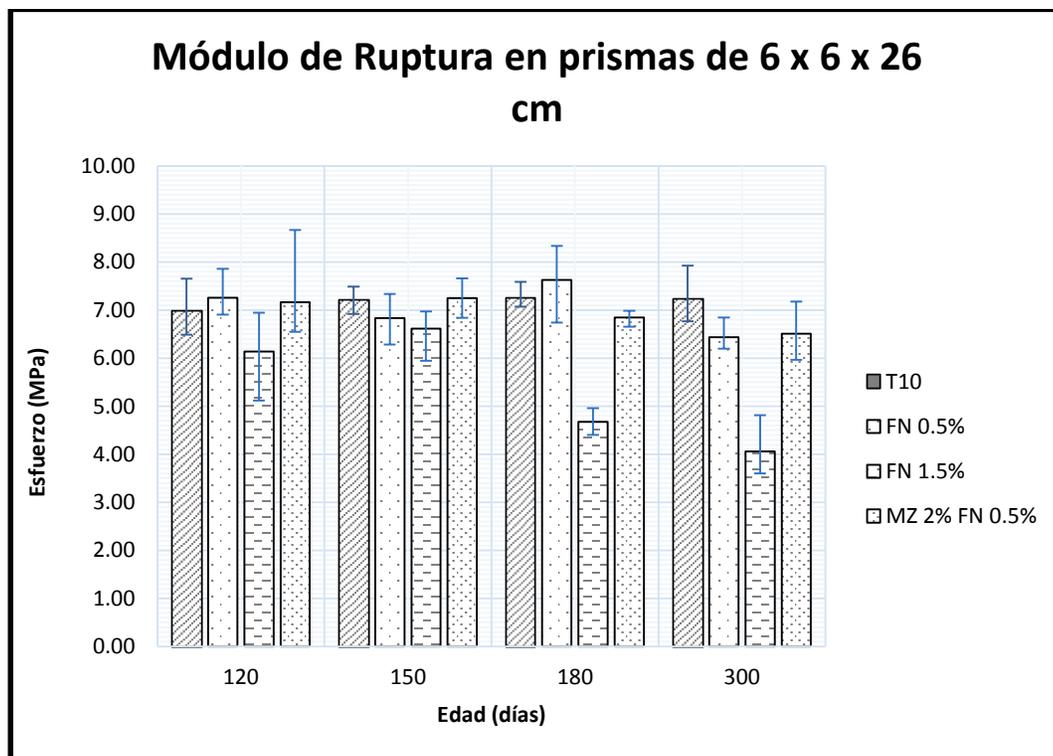


Figura 4. 23. Resultados de resistencia a la flexión en prismas, a edades tardías.

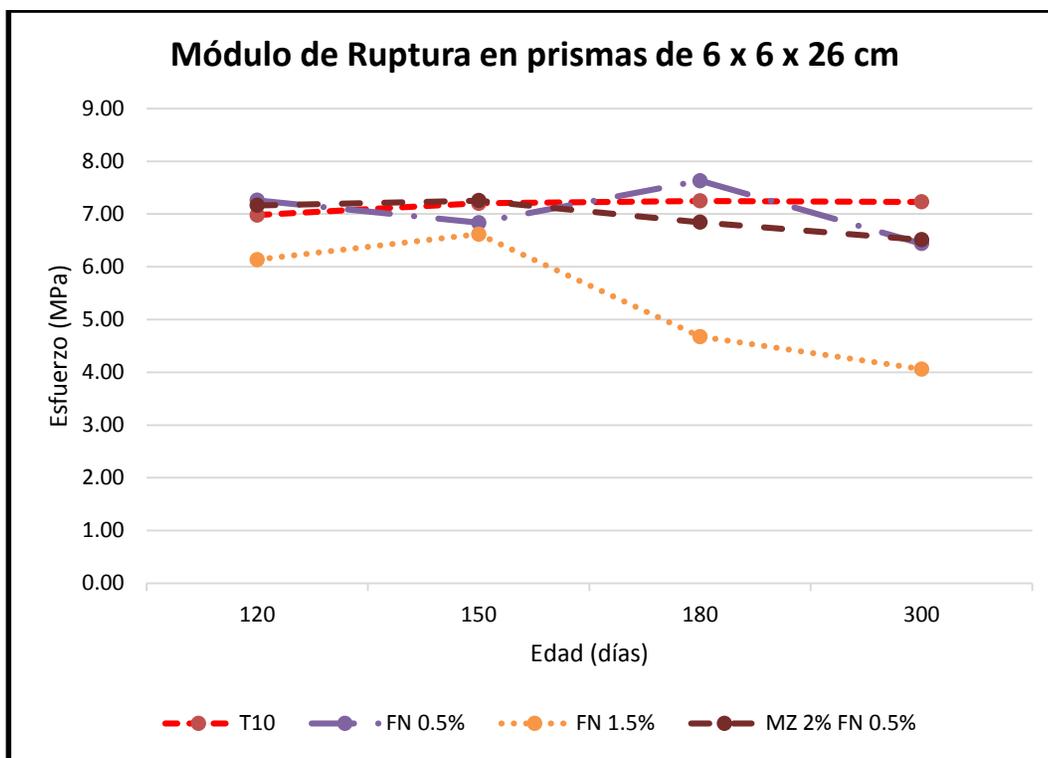


Figura 4. 24. Tendencia de resistencia a la flexión en prismas, por su edad de prueba.

En la figura 4.24 se puede observar que el mortero testigo (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 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.

4.3.2.3. Resistencia a la tensión directa en briquetas.

Bien es sabido que el mortero resiste bajas cargas a tensión, por lo cual los valores obtenidos por este tipo de ensayos no tiene mayor trascendencia 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, aunque adquiere importancia en el agrietamiento de las mezclas luego del proceso de secado. 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 testigo (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.

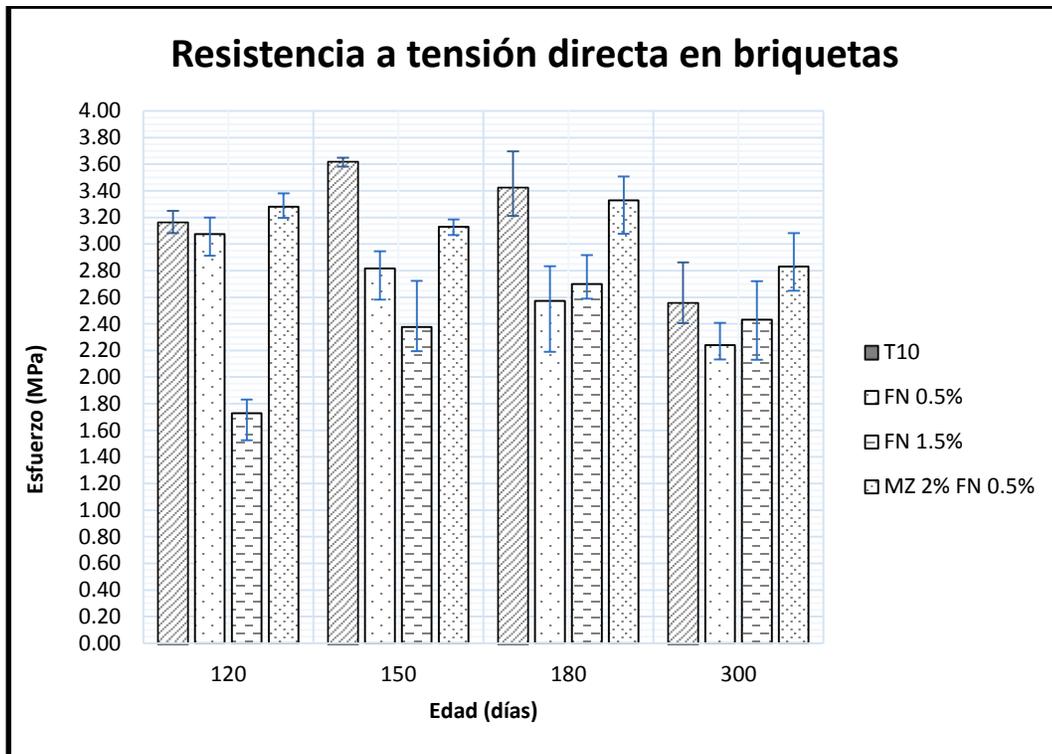


Figura 4. 25. Resultados de resistencia a tensión directa en briquetas, a edades tardías.

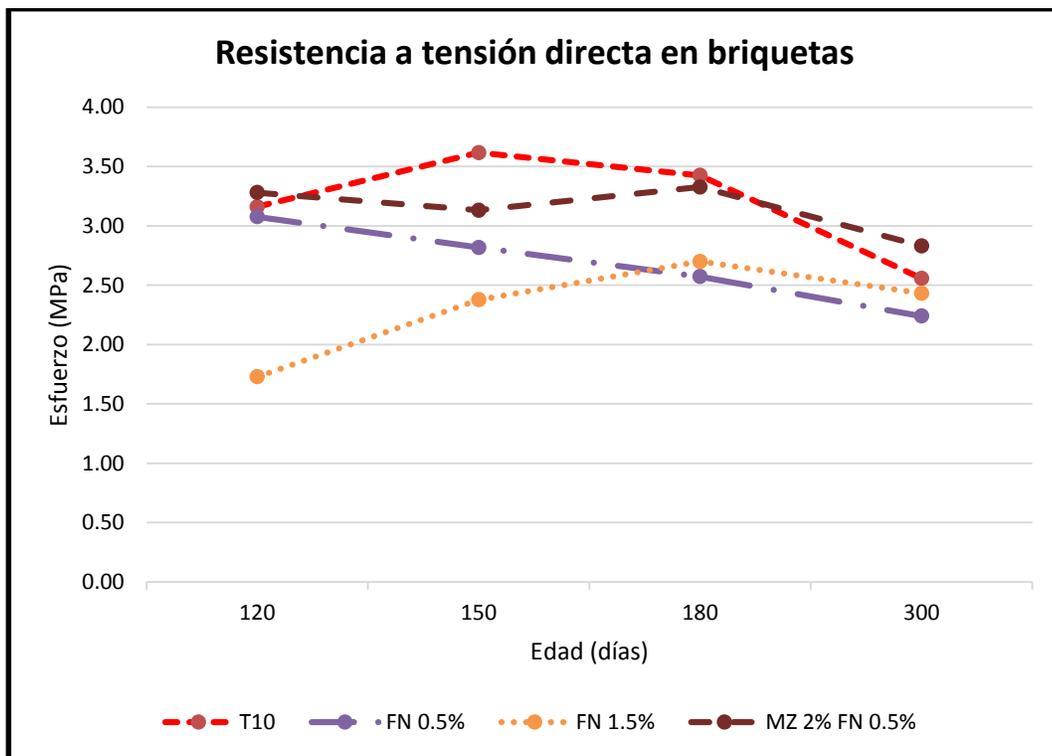


Figura 4. 26. Tendencia de resistencia a tensión directa en briquetas, por su edad de prueba.

De acuerdo a lo observado en las figuras 4.25 y 4.26, 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 T10. 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 testigo, 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 para concreto (Neville & Brooks, 1999), especifica que el esfuerzo a tensión se encuentra entre 0.4 a 0.7 por la raíz del esfuerzo a compresión, aunque es un parámetro que no se encuentra normalizado como tal. Los resultados obtenidos en las cuatro edades de prueba y para las cuatro diferentes mezclas son favorables, ya que se encuentran dentro de estos rangos y en muchos casos con resistencias superiores.

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

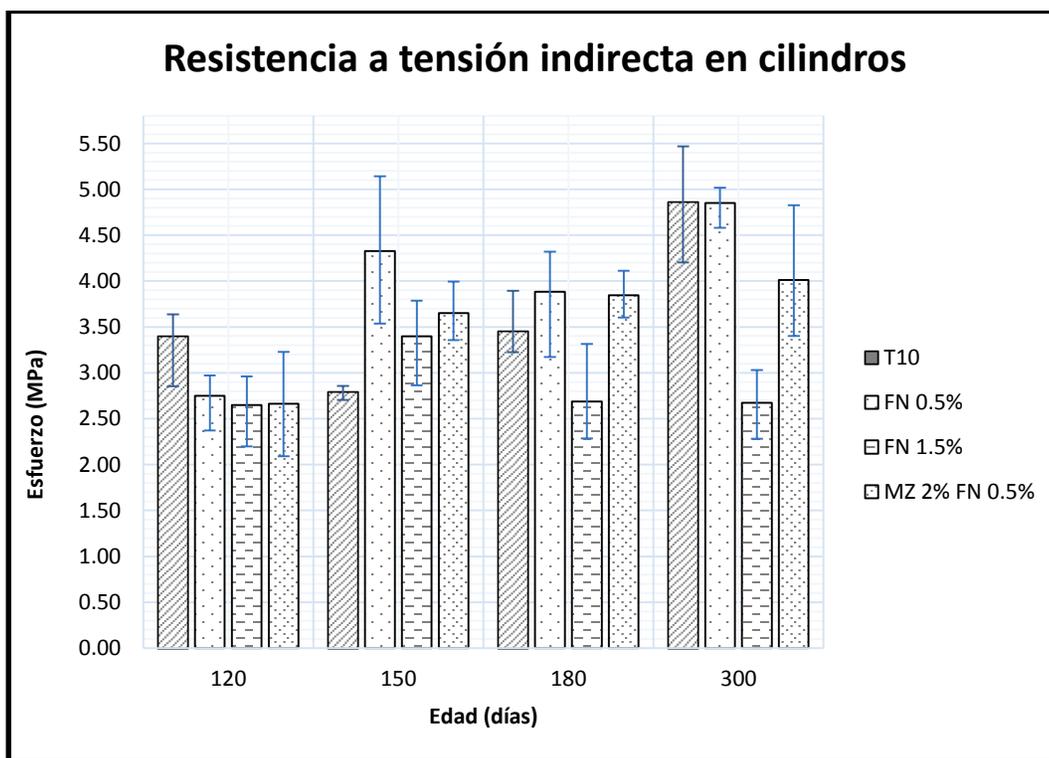


Figura 4. 27. Resultados de resistencia a tensión indirecta en cilindros, a edades tardías.

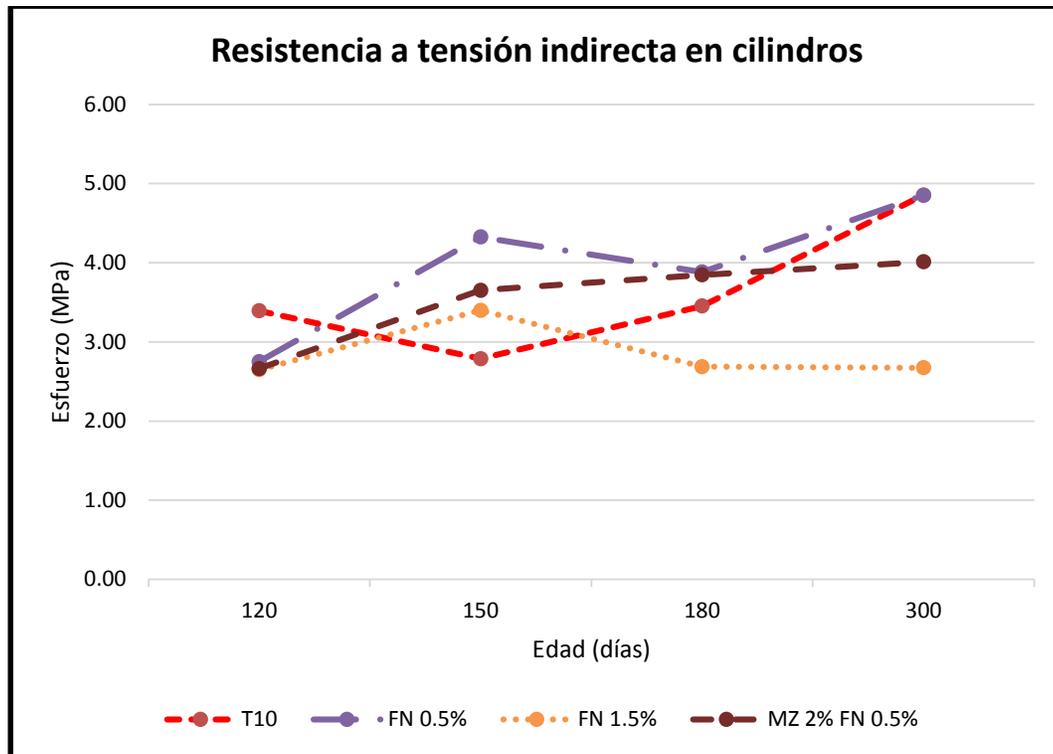


Figura 4. 28. Tendencia de resistencia a tensión indirecta en cilindros, por su edad de prueba.

Es la tensión indirecta un parámetro que sirve cuando no se tienen los elementos necesarios para calcular una tensión directa. Observando las figuras 4.27 y 4.28 se tiene que la mezcla MZ 2%-FN 0.5% incrementa su resistencia a tensión indirecta hasta un valor de 4 MPa, quedando este por debajo de la mezcla testigo. 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 T10.

4.3.2.5. Correlación de resultados de resistencias mecánicas de los especímenes elaborados.

A continuación, en la tabla 4.20, se presentan los resultados obtenidos de las resistencias mecánicas de las diferentes pruebas ya mencionadas, esto en forma de correlaciones que permitan establecer porcentajes óptimos de sustitución para lograr una resistencia específica.



Tabla 4. 20. Correlación de resultados de resistencias mecánicas de los especímenes elaborados.

Mezcla	Edad (días)	Compresión (Mpa)	0.7 v Compresión (Mpa)	Flexión (Mpa)	0.8 v Compresión (Mpa)	0.4 v Compresión (Mpa)	Tensión directa (Mpa)	Tensión indirecta (Mpa)	0.7 v Compresión (Mpa)
T10	120	32.97	4.02	6.98	4.59	2.30	3.16	3.39	4.02
	150	29.93	3.83	7.20	4.38	2.19	3.62	2.79	3.83
	180	34.12	4.09	7.25	4.67	2.34	3.42	3.45	4.09
	300	32.51	3.99	7.23	4.56	2.28	2.56	4.86	3.99
FN 0.5%	120	31.89	3.95	7.26	4.52	2.26	3.08	2.75	3.95
	150	33.92	4.08	6.84	4.66	2.33	2.82	4.33	4.08
	180	24.57	3.47	7.63	3.97	1.98	2.57	3.88	3.47
	300	24.66	3.48	6.44	3.97	1.99	2.24	4.85	3.48
FN 1.5%	120	25.86	3.56	6.14	4.07	2.03	1.73	2.65	3.56
	150	37.02	4.26	6.62	4.87	2.43	2.38	3.40	4.26
	180	19.13	3.06	4.68	3.50	1.75	2.70	2.69	3.06
	300	23.66	3.41	4.06	3.89	1.95	2.43	2.67	3.41
MZ 2% FN 0.5%	120	29.92	3.83	7.16	4.38	2.19	3.28	2.66	3.83
	150	41.63	4.52	7.25	5.16	2.58	3.13	3.65	4.52
	180	32.72	4.00	6.84	4.58	2.29	3.33	3.85	4.00
	300	32.30	3.98	6.51	4.55	2.27	2.83	4.01	3.98

4.3.2.6. Resistencia a la tensión por adherencia.

La prueba de adherencia arrojó resultados cualitativos de acuerdo a su número y tipo de falla al momento de realizar la prueba con el equipo de Pull Off, siendo en la mayoría de las situaciones de prueba una falla por su resistencia a la tensión en las mezclas de mortero según lo establecido en el apartado 3.3.2.5 de esta investigación, lo que quiere decir que las distintas mezclas tuvieron una buena adherencia como material de reparación o revestimiento con el sustrato de concreto. En la tabla 4.21 siguiente se muestra el tipo y número de falla que se presenta al momento de realizar la prueba, y en la figura 4. 29 el esfuerzo de tensión por adherencia calculado por el equipo de prueba.

Tabla 4. 21. Resultados cualitativos de la resistencia a la tensión por adherencia.

Resistencia a la adherencia por su tipo de Falla								
Edad \ Mezcla	T10		FN 0.5%		FN 1.5%		MZ 2% FN 0.5%	
	No. de Falla	Nombre de Falla	No. de Falla	Nombre de Falla	No. de Falla	Nombre de Falla	No. de Falla	Nombre de Falla
120	4	Resistencia a la tensión	2	Por adhesivo epóxico	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión



	4	Resistencia a la tensión						
	4	Resistencia a la tensión						
	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	3	Fuerza de adherencia	4	Resistencia a la tensión
180	3	Fuerza de adherencia	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión	3	Fuerza de adherencia
	4	Resistencia a la tensión	3	Fuerza de adherencia	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	-	-	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión
	4	Resistencia a la tensión	-	-	4	Resistencia a la tensión	4	Resistencia a la tensión

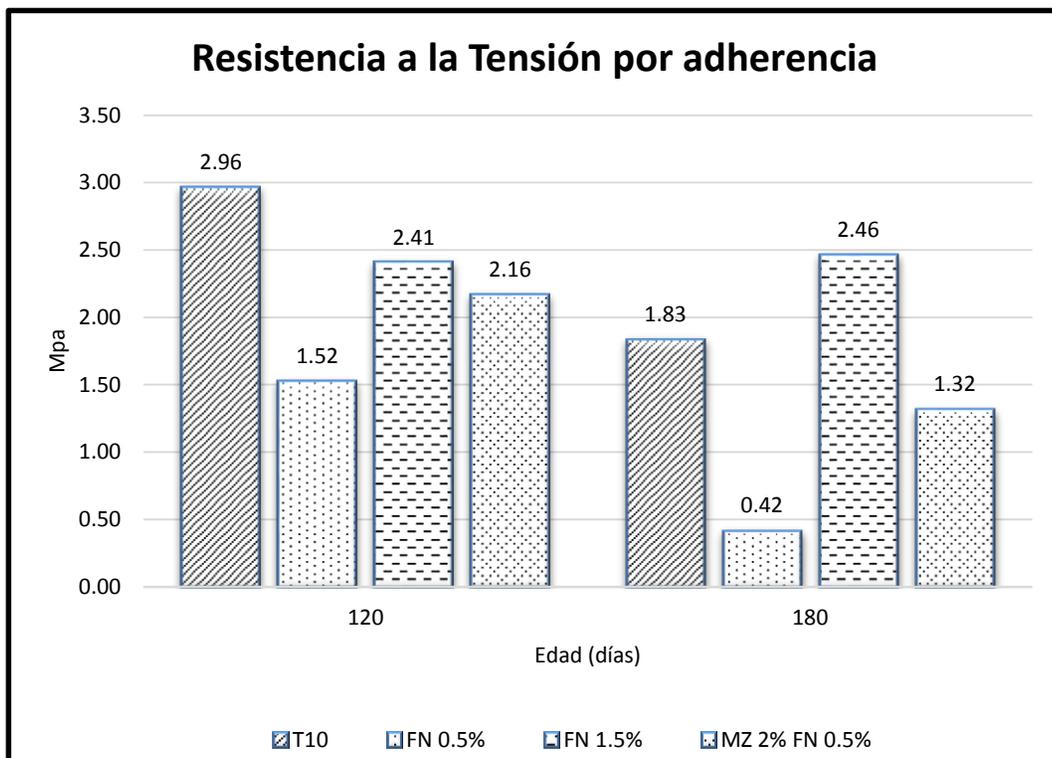


Figura 4. 29. Resultados de resistencia a la tensión por adherencia a la edad de 120 y 180 días.



4.3.3. Pruebas por durabilidad.

4.3.3.1. 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.

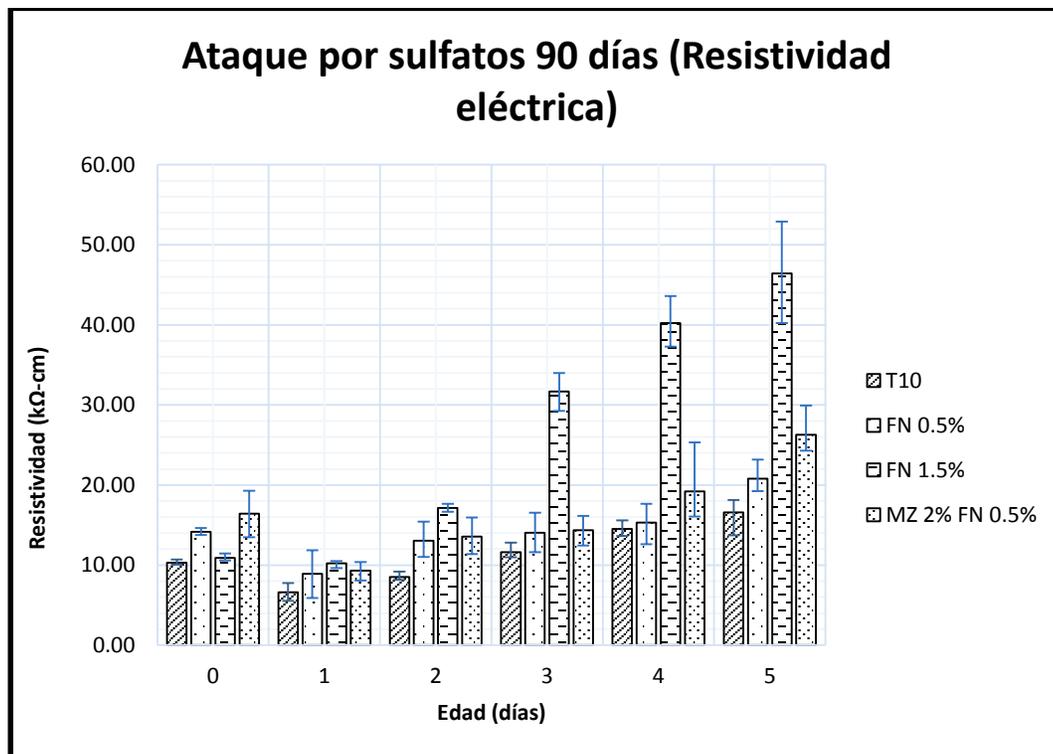


Figura 4. 30. Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.

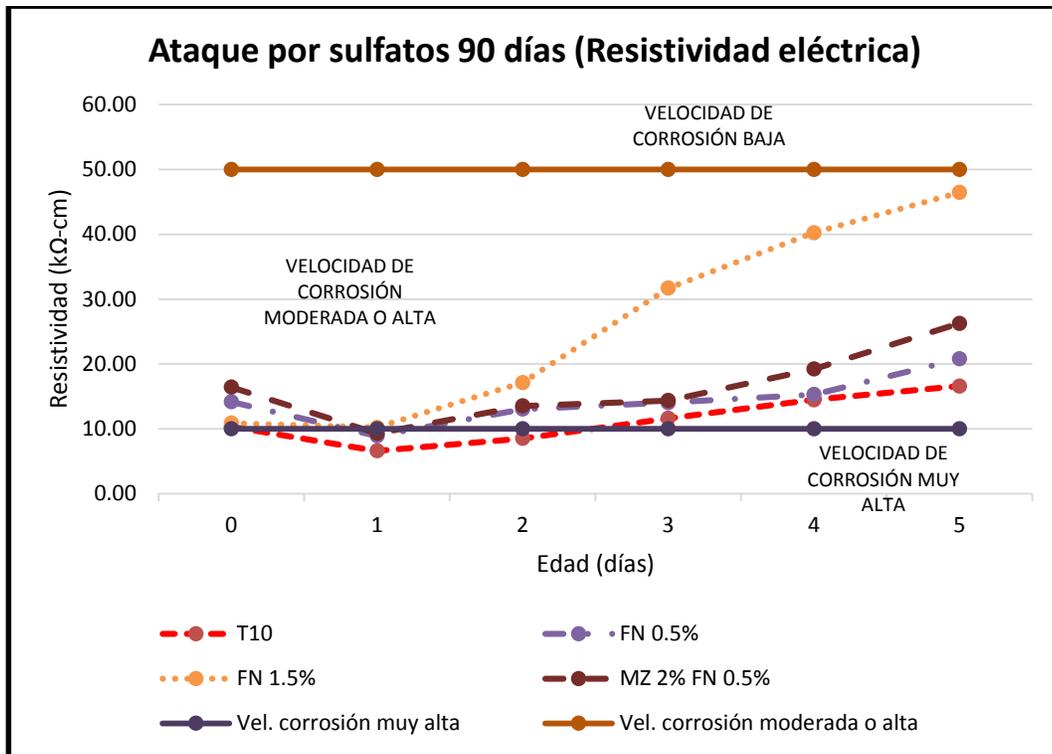


Figura 4. 31. Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.

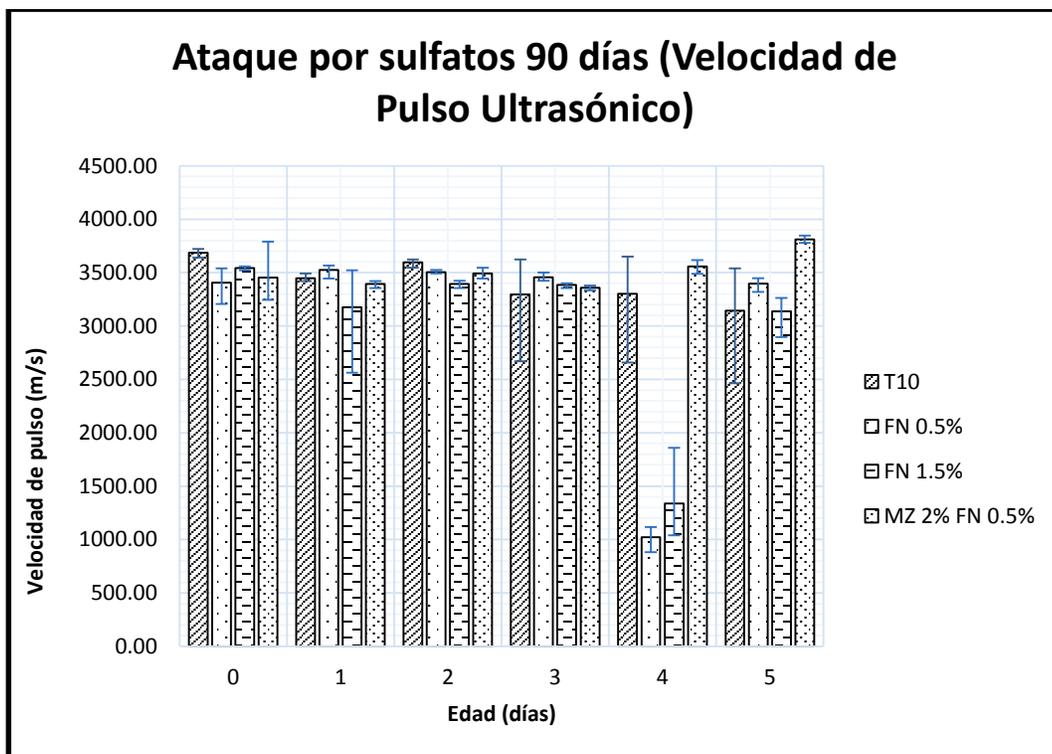


Figura 4. 32. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.

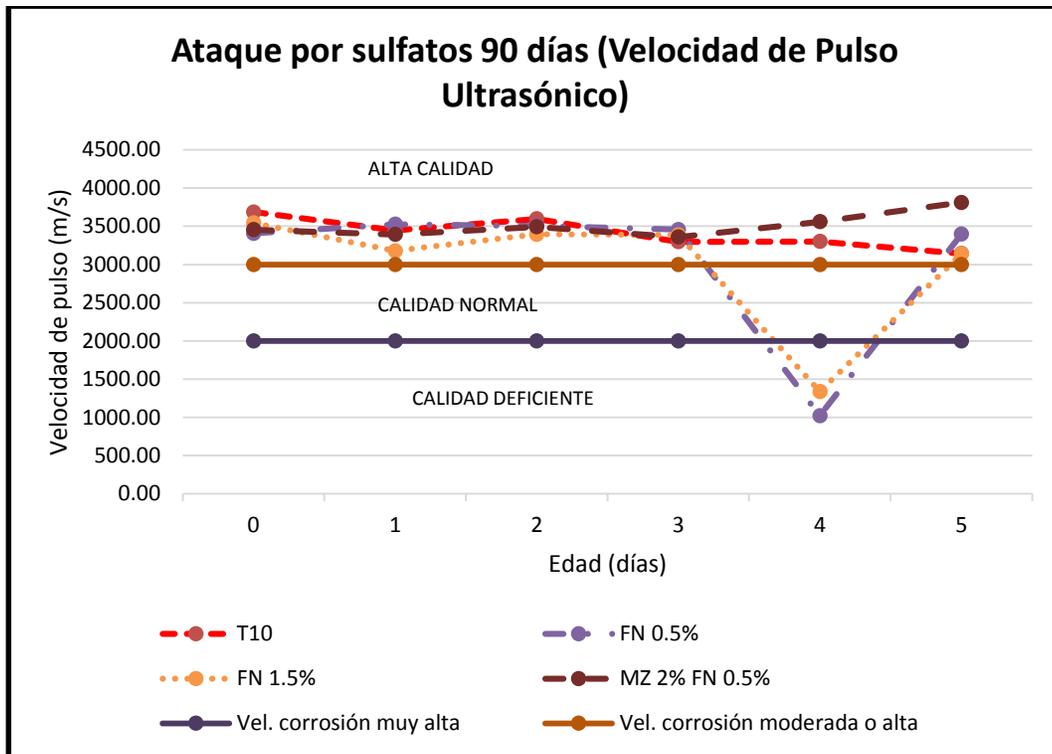


Figura 4. 33. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.

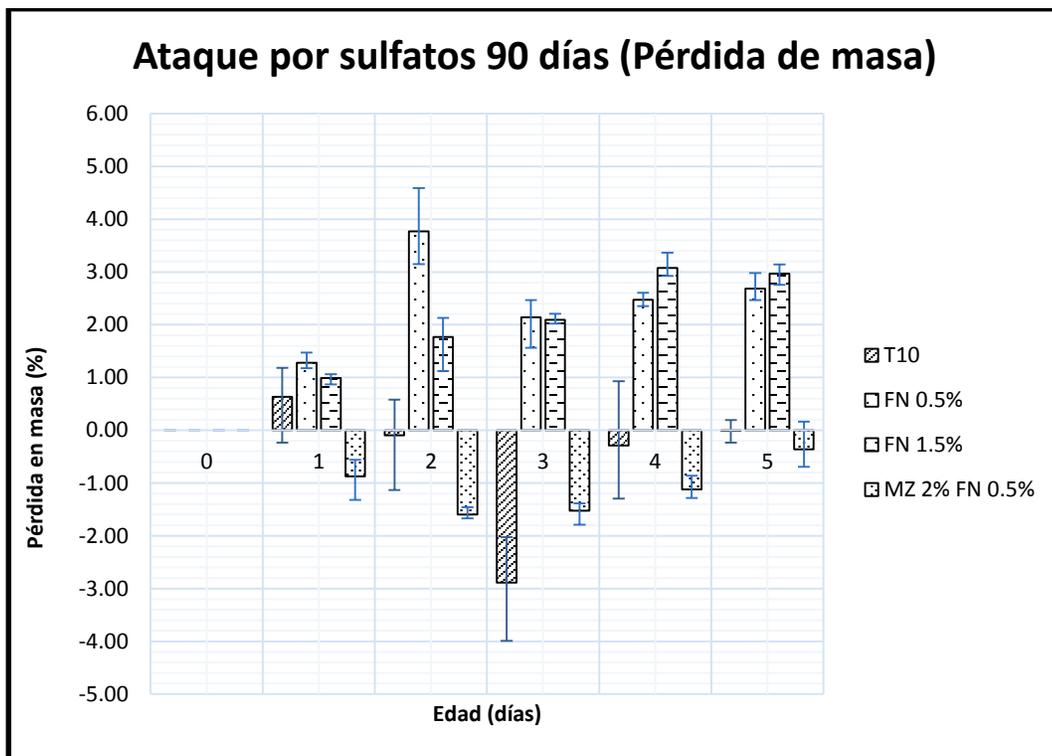


Figura 4. 34. Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 90 días.



Observando las figuras 4.30 y 4.31, 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 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 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 (figuras 4.32 y 4.33). Como se puede observar en las dos gráficas correspondientes (figuras 4.32 y 4.33) 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 observamos la figura 4.34 nos podremos dar cuenta 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.

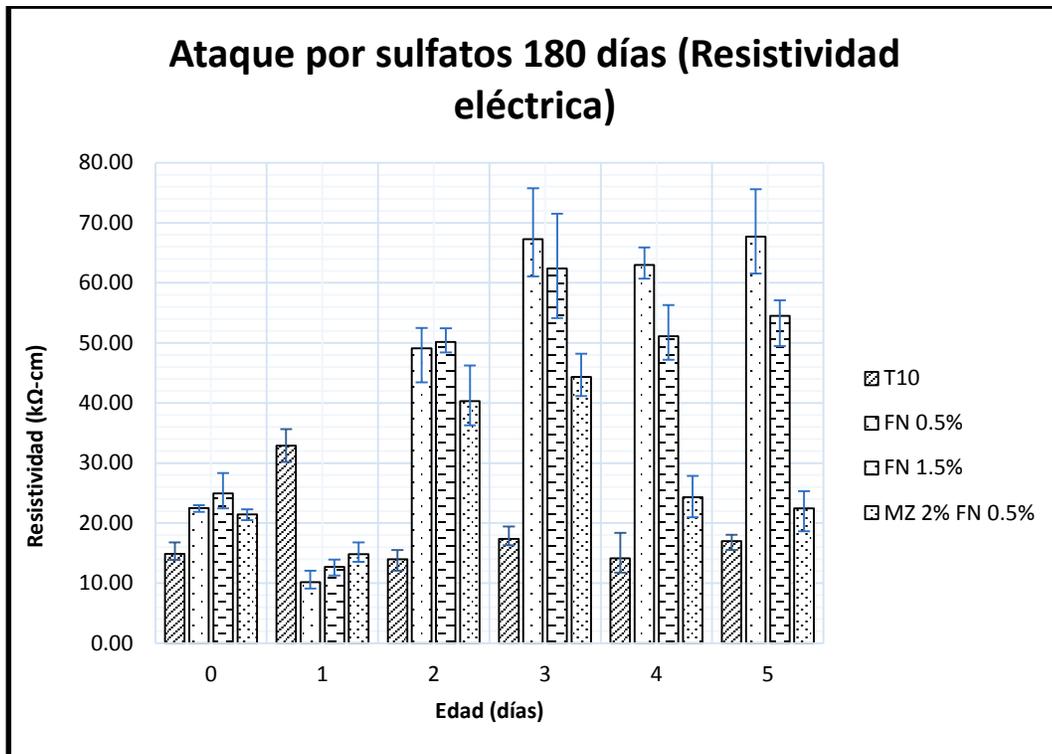


Figura 4. 35. Resultados de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.

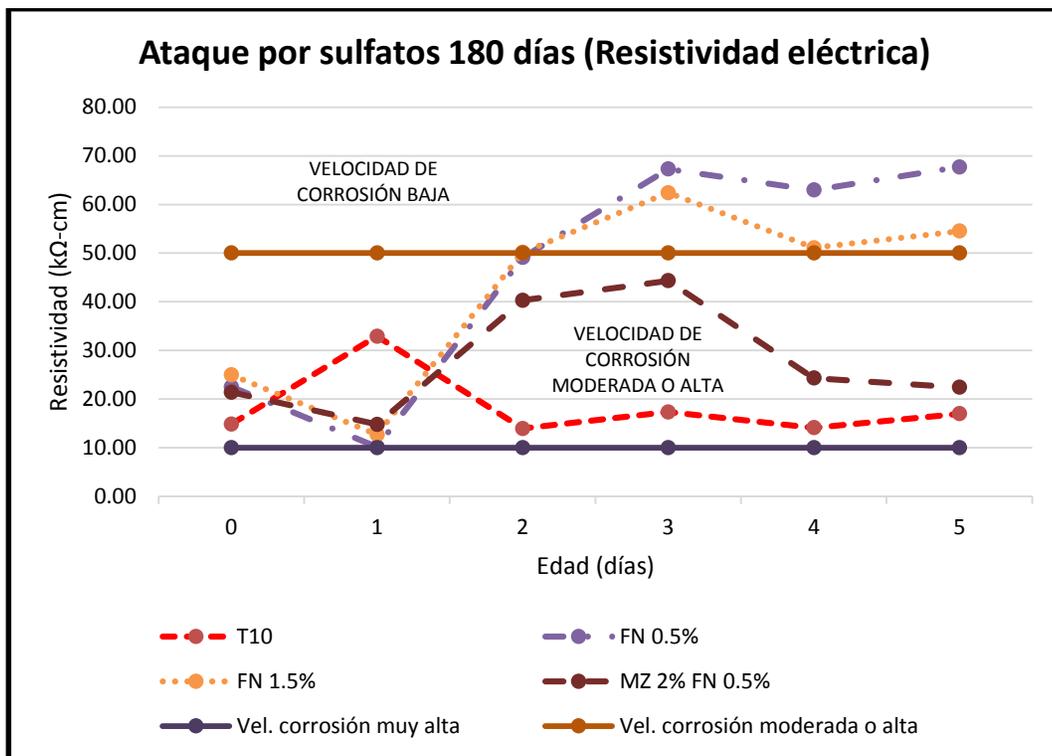


Figura 4. 36. Tendencia de resistividad eléctrica en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.

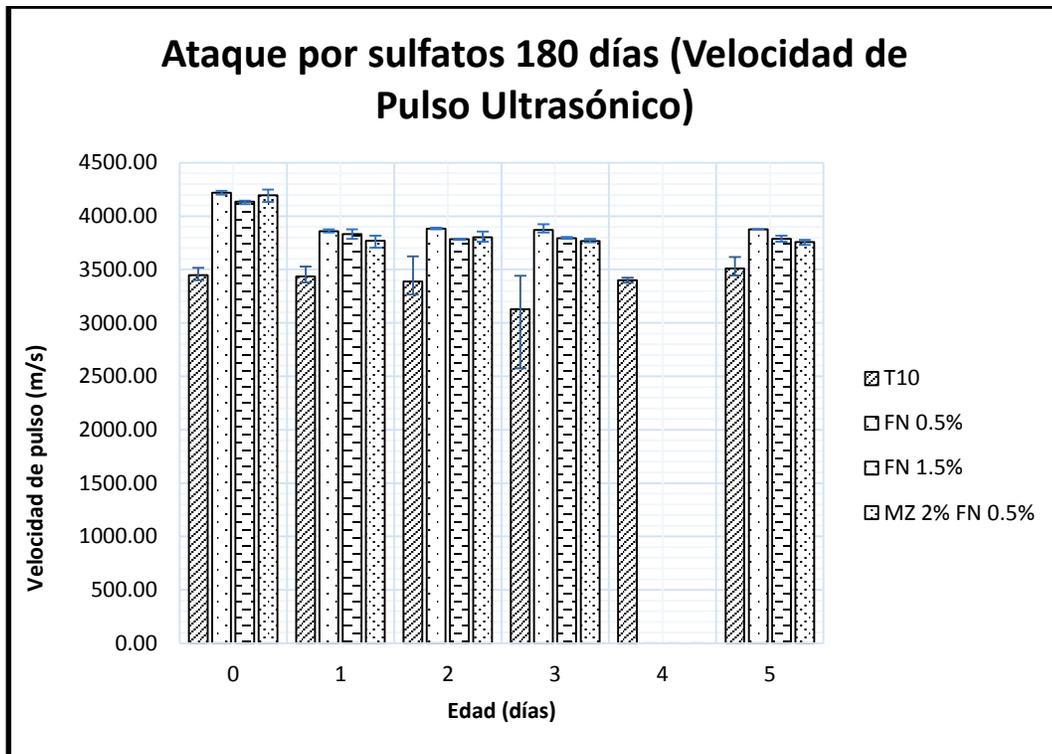


Figura 4. 37. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.

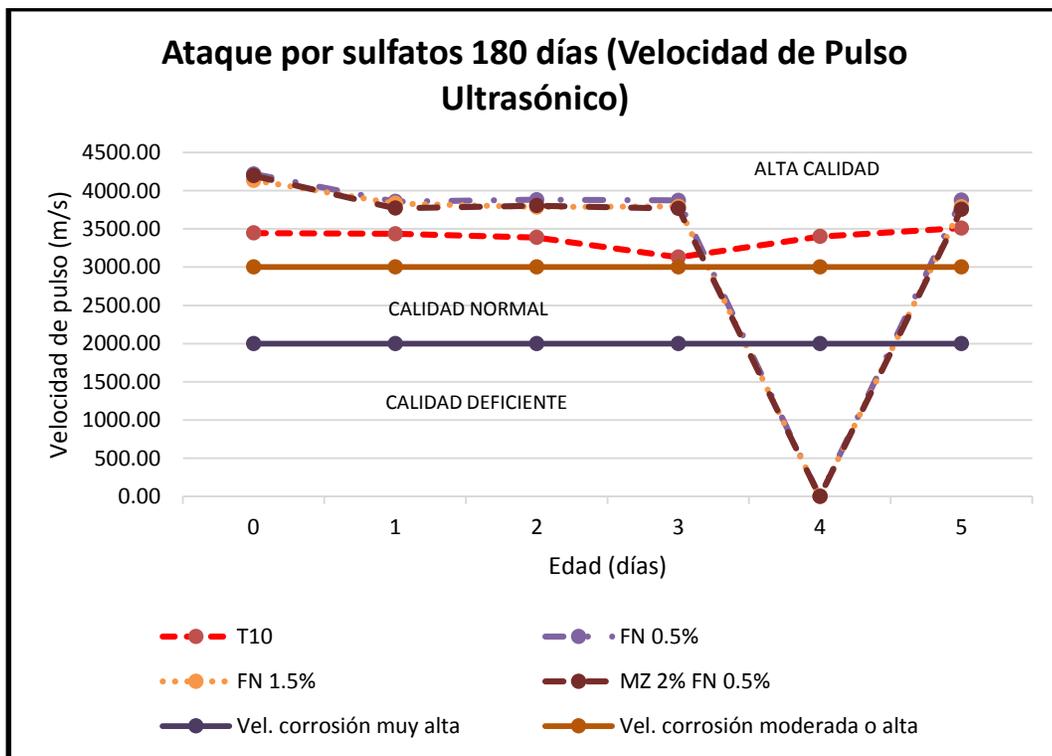


Figura 4. 38. Tendencia de velocidad de pulso ultrasónico en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.

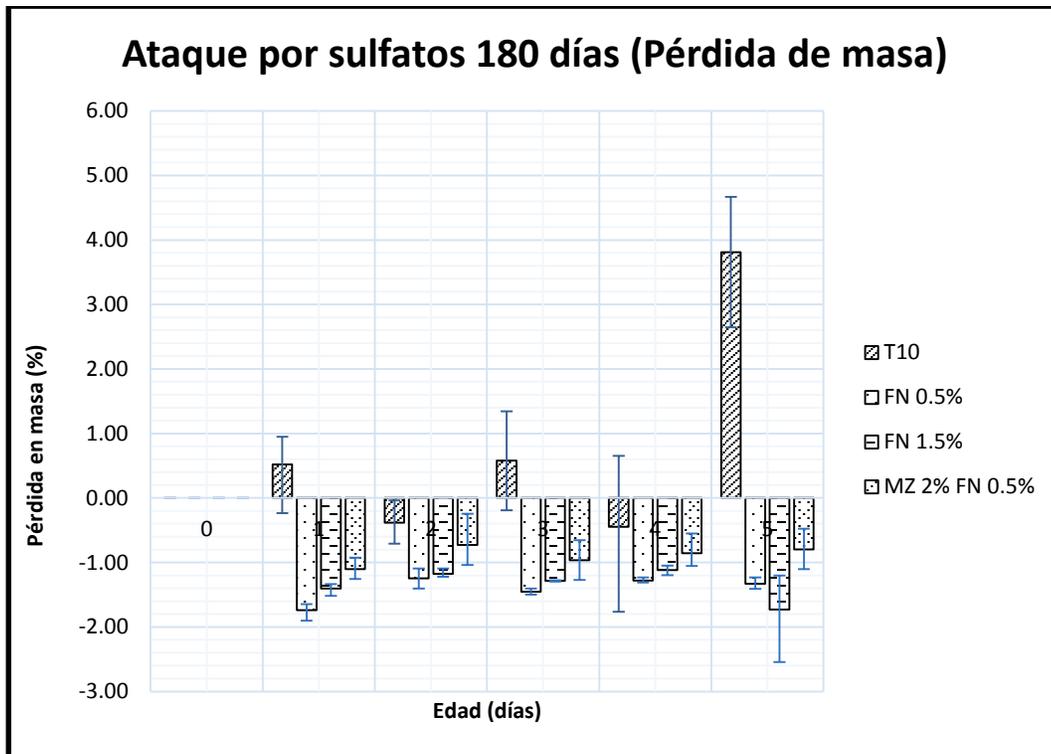


Figura 4. 39. Resultados de la pérdida de masa en cubos sometidos a sulfatos a la edad de 180 días.

Como se observa en las figuras 4.35 y 4.36, los valores de resistividad eléctrica van aumentando en las distintas mezclas hasta llegar al tercer ciclo de prueba y a partir de este ciclo los valores decrecen, esto quiere decir que en los últimos dos ciclos de ataque por sulfatos la velocidad de corrosión disminuye, sin embargo el material no logra reponerse a tal efecto de corrosión si existiera. La FN 0.5% y FN 1.5% alcanzan un bajo riesgo de velocidad de corrosión al quinto ciclo de prueba, mientras que la mezcla T10 es la más desfavorable con un riesgo de velocidad de corrosión alta, de acuerdo a las especificaciones de la RED DURAR.

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 T10 y adquirieron un criterio de calidad alta durante los 5 ciclos de ataque por sulfatos a los 180 días (figuras 4.37 y 4.38). 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.



La figura 4.39 nos presenta la pérdida de masa de los distintos tipos de mortero en estudio en donde podemos observar que la mezcla T10 fue la única que presentó pérdida de masa, alcanzando cerca de un 3.81%, el máximo porcentaje obtenido en esta prueba. Por el contrario las mezclas de FN 0.5%, FN 1.5% y MZ 2%-FN 0.5% ganaron masa a los largo de toda la prueba.

4.3.3.2. 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 4.22):

Tabla 4. 22. Resultados de la prueba de permeabilidad rápida de cloruros a la edad de 180 días.

Permeabilidad rápida de cloruros (180 días)			
Mezcla	No. de espécimen (parte central)	Coulombs	Tipo de permeabilidad
T10	1	2465	Moderada
	2	2169	Moderada
	3	2091	Moderada
FN 0.5%	1	1835	Baja
	2	2335	Moderada
	3	1627	Baja
FN 1.5%	1	1797	Baja
	2	1443	Baja
	3	1483	Baja
MZ 2%-FN 0.5%	1	1583	Baja
	2	1510	Baja
	3	1521	Baja

Como se puede observar en la tabla 4.22 la prueba de permeabilidad a 180 días arrojó resultados similares en las distintas mezclas, teniendo en la mezcla testigo (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.



4.3.3.3. 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 a continuación en las figuras 4.40 y 4.41.

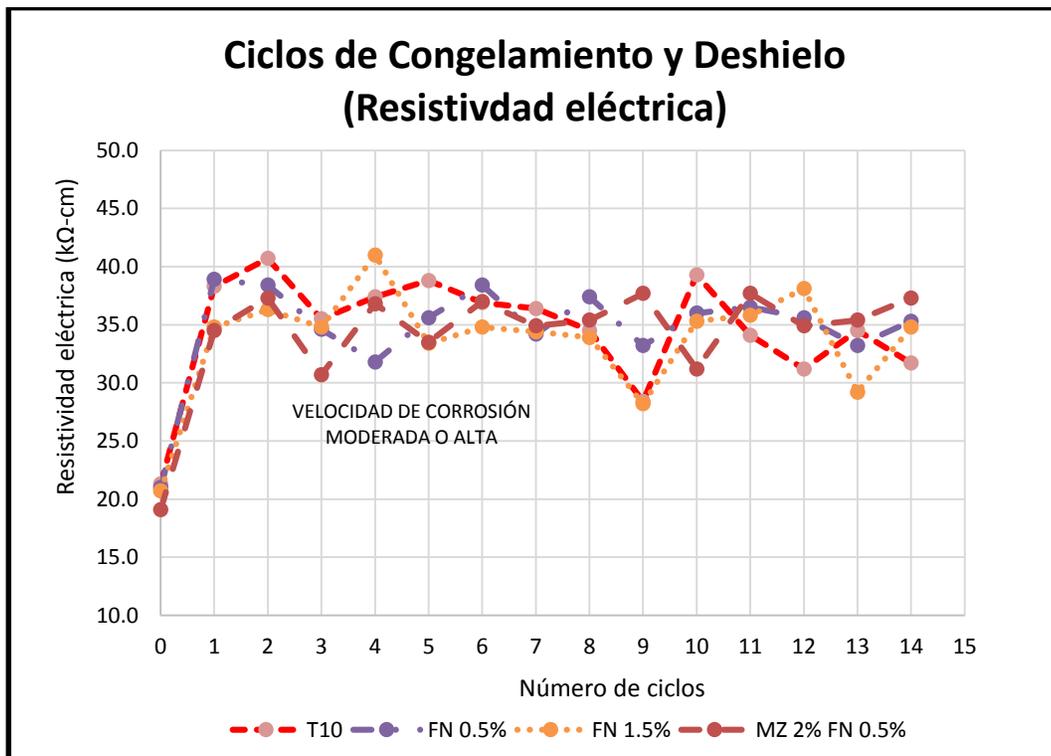


Figura 4. 40. Resultados de Resistividad Eléctrica (RE) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados.

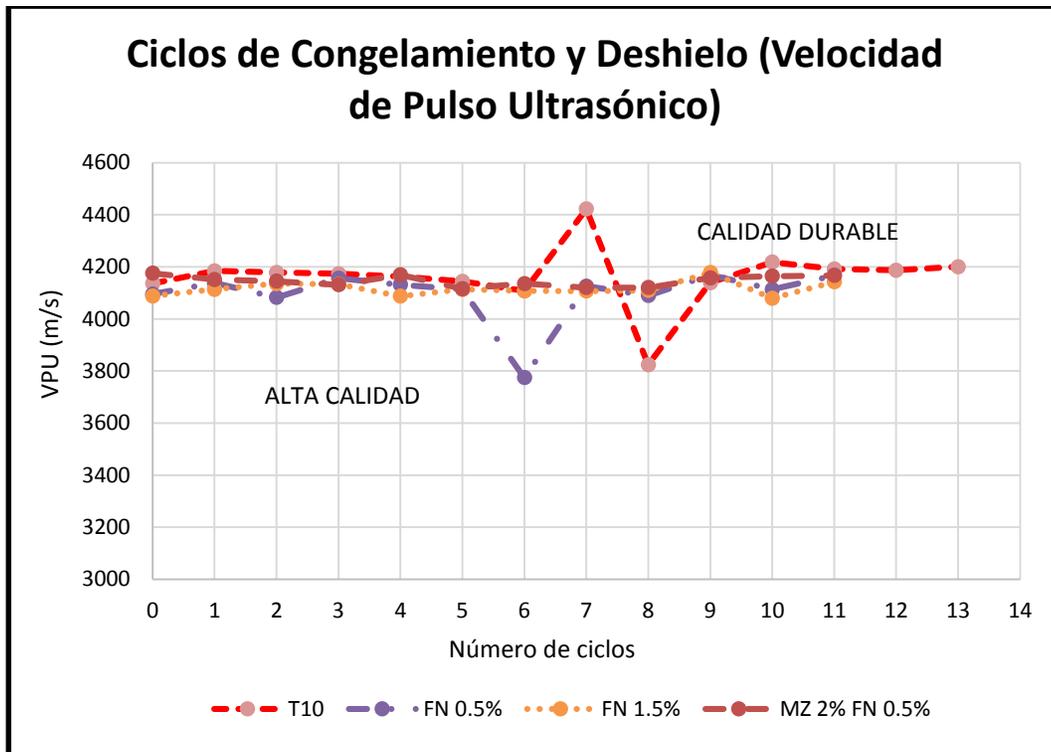


Figura 4. 41. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) en prismas sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo acelerados.

De los resultados de resistividad eléctrica se observa en la figura 4.40 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”.

Con respecto a los resultados de VPU (figura 4.41), 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 4.23), extrapolando la tendencia del comportamiento de cada mezcla de mortero, para que la RE llegue a una lectura de 0 kΩ-cm y considerando así la falla total del material.



Tabla 4. 23. Resultados de extrapolación para determinar el número de ciclos cuando $RE=0$.

Mezclas	N° de ciclos para $RE = 0 \text{ K}\Omega\text{-cm}$
T10	75
FN 0.5%	231
FN 1.5%	172
MZ 2% FN 0.5%	309

Considerando los resultados de la tabla 4.23 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.

4.3.3.4. 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 4.42.

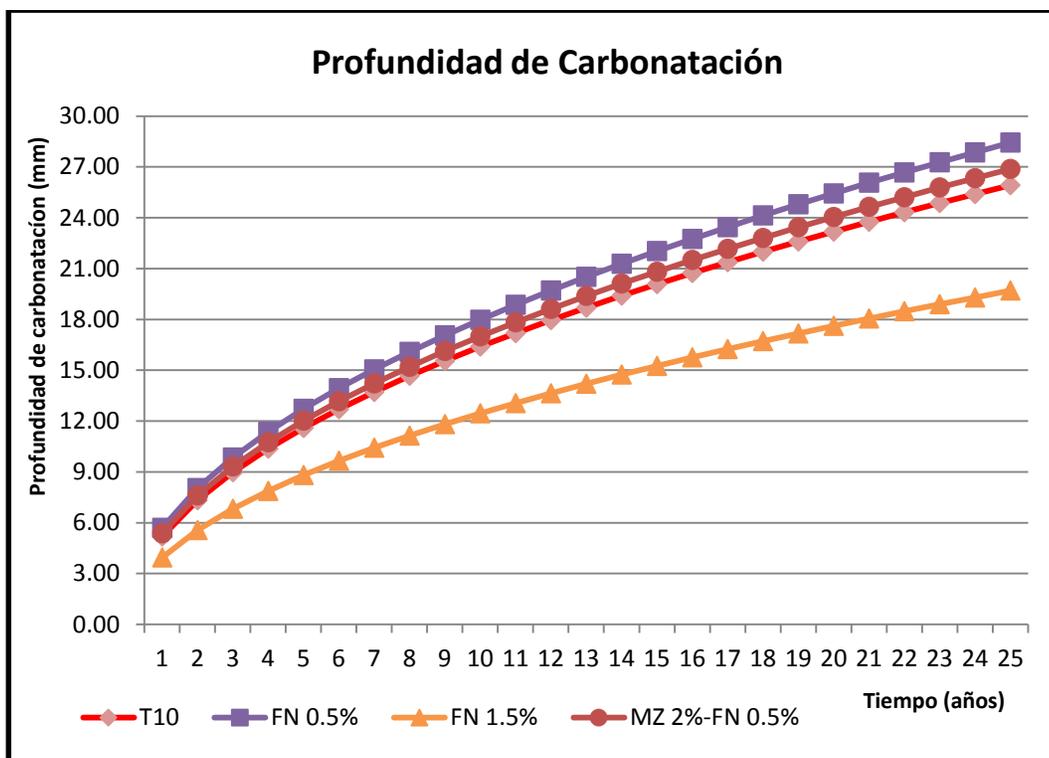


Figura 4. 42. Resultados de la profundidad de carbonatación en una proyección a 25 años.

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 testigo 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 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 según los valores iniciales observados en la gráfica 4.42..



4.3.3.5. 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 4.24 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 (figuras 4.44 a 4.47).

Tabla 4. 24. Serie de datos para el primer espécimen cubico de la mezcla FN 0.5%.

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 4.24 se procede a realizar una gráfica (figura 4.43) 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. En la figura 4.43 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.

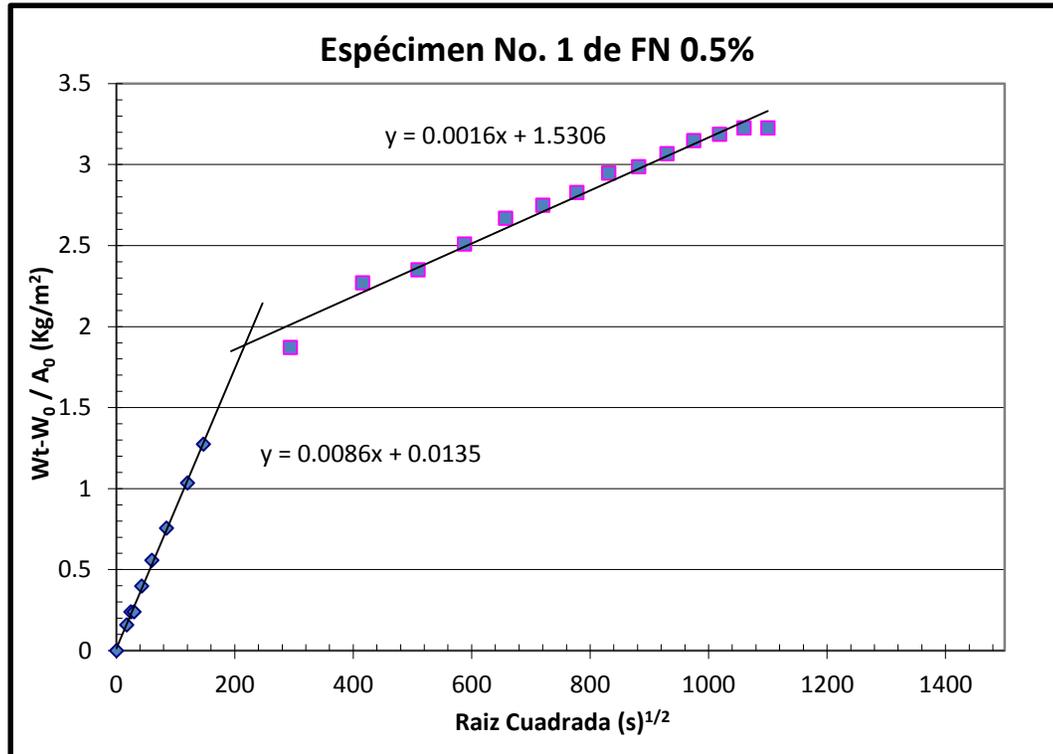


Figura 4. 43. Prueba de absorción capilar para un espécimen cúbico de la mezcla FN 0.5%.

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”:

$$0.007x = 1.5171$$

$$x = 1.5171/0.007$$

$$x = 216.73$$

$$(\sqrt{t} = \mathbf{216.73 \text{ s}^{1/2}})$$

Entonces, sustituyendo “x” en una de las dos ecuaciones originales:

$$y = 0.0086 (216.72) + 0.0135$$

$$y = 1.88$$

$$((\mathbf{Wt-W_0})/A_0 = \mathbf{1.88 \text{ kg/m}^2})$$

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 4.43 se da a conocer la sorción capilar obtenida en las dos edades de prueba.

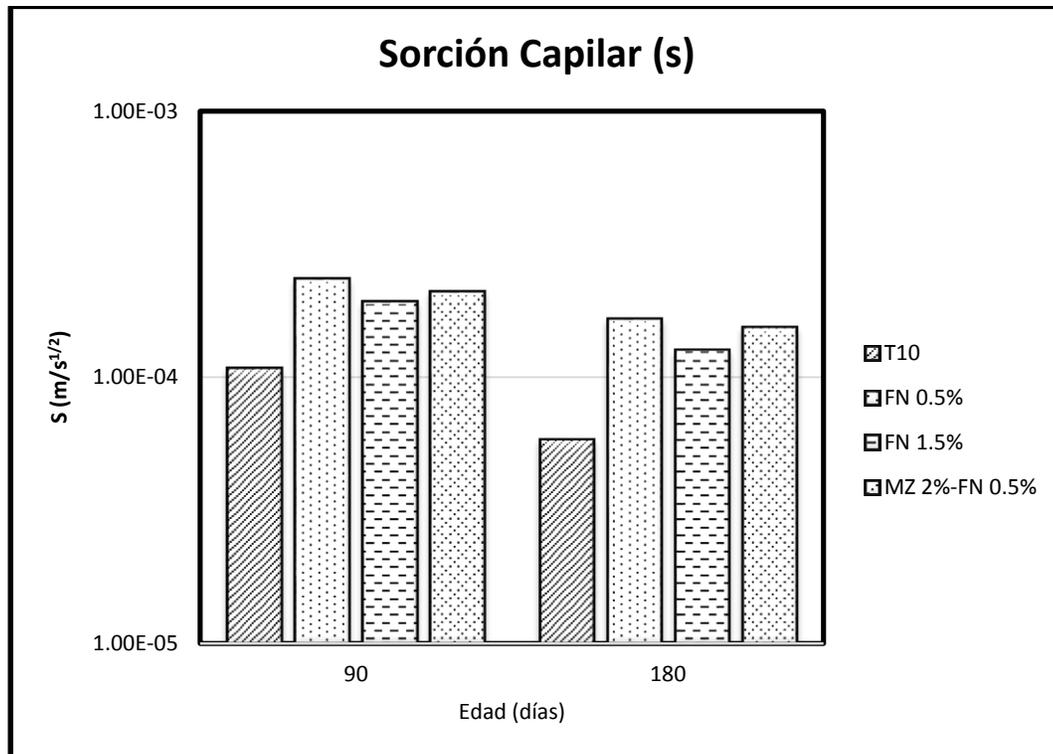


Figura 4. 44. Resultados de Sorción Capilar (s) a la edad de 90 y 180 días.

Realizando una comparación entre las mezclas, podemos observar en la figura 4.43 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 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 4.45 a 4.47 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).

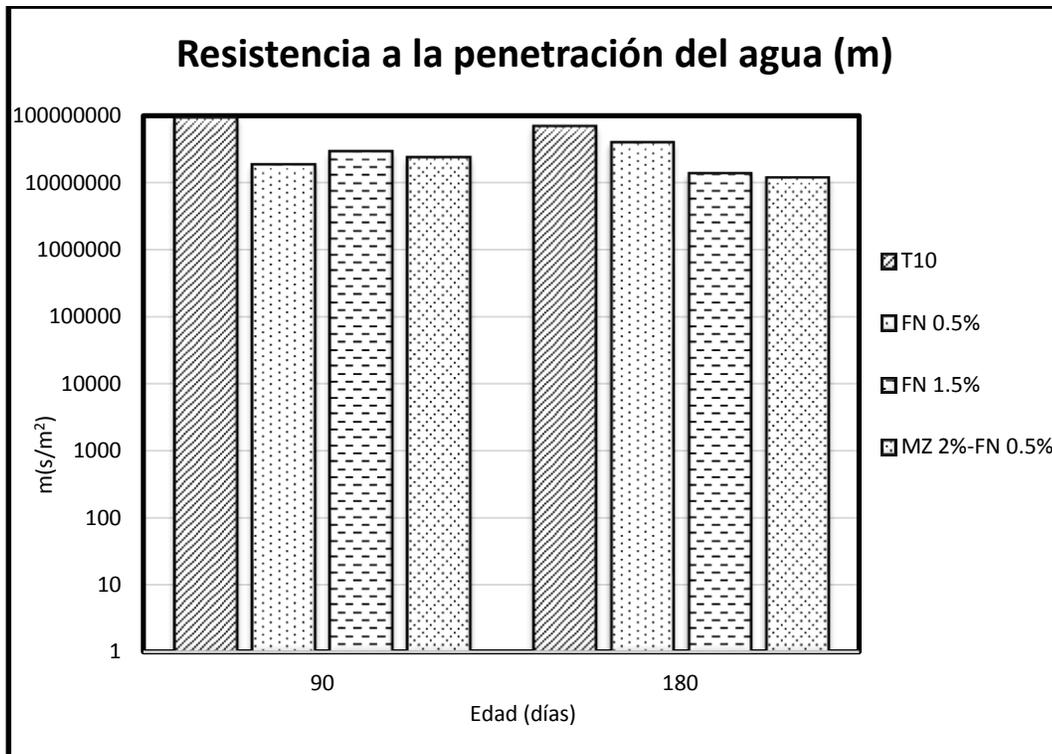


Figura 4. 45. Resultados de la resistencia a la penetración del agua (m) a la edad de 90 y 180 días.

Observando la figura 4.44, la resistencia a la penetración del agua es superior en la mezcla 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 T10. Es la mezcla MZ 2%-FN 0.5% la de valor promedio más bajo, reflejando más porosidad y sorción en su estructura.

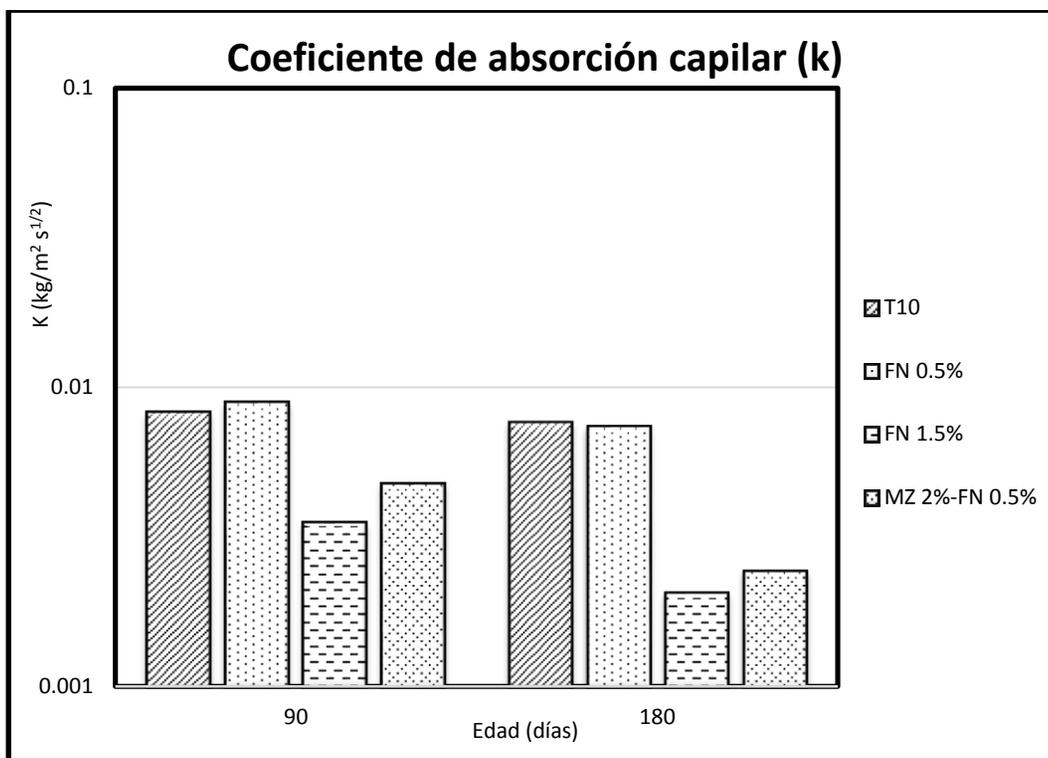


Figura 4. 46. Resultados de absorción capilar (k) a la edad de 90 y 180 días.

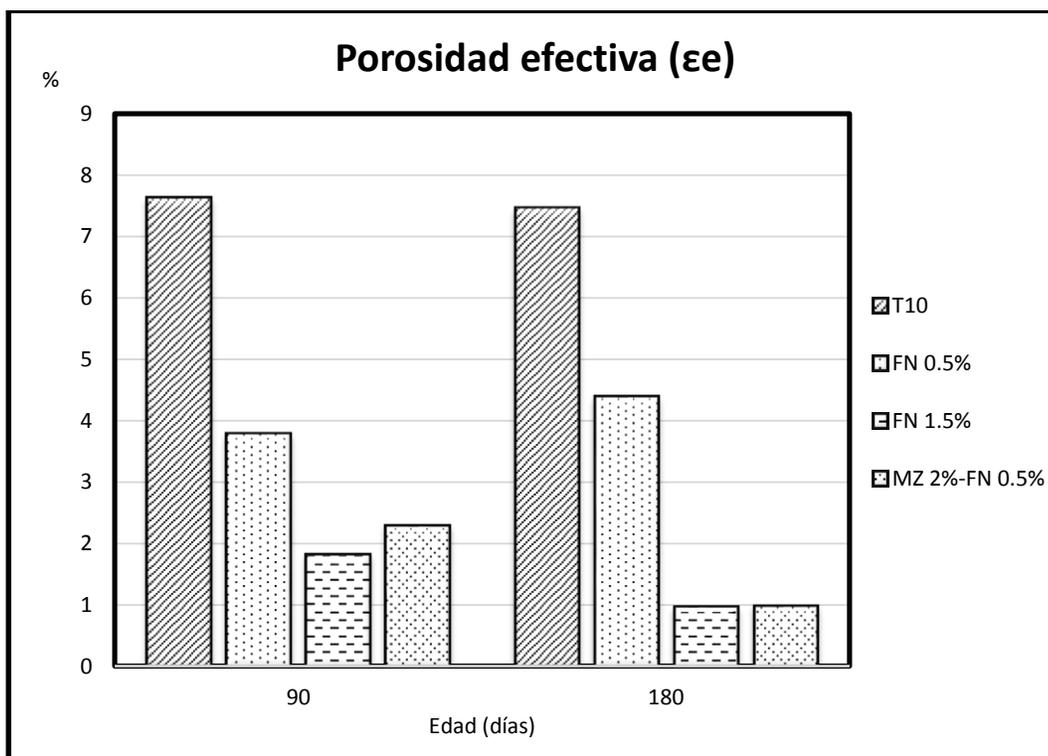


Figura 4. 47. Resultados de Porosidad efectiva (ϵ_e) a la edad de 90 y 180 días.

Teniendo como base los valores del coeficiente de absorción capilar se obtienen los valores de la figura 4.47, la cual contiene resultados promedio obtenidos para la porosidad efectiva de las 4 mezclas.



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 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.

4.3.3.6. 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 4.25:

Tabla 4. 25. Resultados de Porosidad Total en cubos a la edad de 90 y 180 días.

Mezcla	% Porosidad total	
	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 4.25 nos 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 3.13 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 T10, siendo esta la más desfavorable con mayor porcentaje de poros en su estructura y con una durabilidad inadecuada.



4.4. Resumen de resultados.

Recopilando los resultados de las diferentes pruebas que se realizaron a las distintas mezclas en estudio se tienen las tablas siguientes (tabla 4.26 a 4.29):

- Pruebas realizadas al mortero fresco:

Tabla 4. 26. Resumen de resultados de pruebas realizadas al mortero fresco.

Prueba elaborada	Mezcla			
	T10	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 4. 27. 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-ONNCCCE-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 4. 28. 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 testigo 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 √ Compresión (MPa)	Resistencia similar al testigo a los 300 días (MR = 6.44 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 √ Compresión (MPa)	Resistencia menor a los 300 días (MR = 4.06 MPa) - Supera los límites de 0.7 a 0.8 √ Compresión (MPa)	Resistencia similar al testigo 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 √ 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 √ Compresión (MPa)	3.08 MPa (120 días) - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 √ Compresión (MPa)	Resistencia menor de 2.70 MPa (180 días) - En el límite inferior de 0.4 √ Compresión (MPa)	Resistencia similar al testigo = 3.33 MPa (180 días) - Supera los límites de 0.4 a 0.7 √ 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 √ Compresión (MPa)	Resistencia a los 300 días (4.85 MPa) - Superando los límites de 0.4 a 0.7 √ 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 √ Compresión (MPa)	Resistencia a los 300 días de 4.01 MPa - Dentro de los límites de 0.4 a 0.7 √ 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)
---	--	---	--	--

▪ Pruebas por durabilidad en el concreto endurecido:

Tabla 4. 29. Resumen de resultados de pruebas por durabilidad.

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 Rapida 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	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.69$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 3.94$) - Estimación de profundidad de	Morteros de resistencia media ($X_{CARB} = 5.38$) - Estimación de profundidad de carbonatación a los



	carbonatación a los 25 años = 25.92 mm	25 años = 28.43 mm	carbonatación a los 25 años = 19.69 mm	25 años = 26.88 mm
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 $10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$] - 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) = $1.65 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - 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) = $1.27 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - 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) = $1.53 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$] - 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%)

5. Conclusiones.

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 nos llevan a realizar investigación 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 si 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 testigo 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 o 10 horas).

Respecto a la elaboración de los especímenes de las distintas mezclas en estudio, el llenado de los moldes, el apisonado y el desmoldado se realizaron correctamente, no hubo problemas significativos de sangrado (exudación) o a la hora de desmoldar.

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 testigo (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 testigo (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 testigo (T10) es quien 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 testigo, 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 esta 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 testigo (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 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 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 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 prevalcientes 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, teniendo en consideración que se pudiera controlar de una manera más precisa la fabricación de los especímenes, y así disminuir la cantidad de variables durante la experimentación y con ello garantizar un mejor comportamiento en las pruebas mecánicas y de durabilidad.

A 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.



6. Bibliografía

- A. Cabrera, J. L. (1995). *La adherencia en los morteros de albañilería*. Cuba: MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, Vol. 45.
- Águila, I. y. (2008). Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Universidad Central de Venezuela : Revista de la Facultad de Ingeniería*, 51-62.
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de construcción*, 7-38.
- 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 10cm x 20cm"*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil. U.M.S.N.H.
- Álvarez Galindo, J. I. (1995). *Historia de los Morteros*. En F. d. Departamento de Química y Edafología, Materiales y Técnicas (págs. 52-59). Universidad de Navarra.
- Arguello Hernández, S. d. (2012). *Análisis comparativo entre Técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil.
- ARQHYS, 2. (2017). *Análisis granulométrico de la arena*. Revista ARQHYS.com. Obtenido de <http://www.arqhys.com/construcciones/analisis-granulometrico-arena.html>.
- ARQHYS, 2. (2017). *Propiedades del cemento*. Revista ARQHYS.com. Obtenido de obtenido de: <http://www.arqhys.com/propiedades-quimicas-del-cemento.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.
- 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 1583. (2004). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. EE.UU.: ASTM.
- ASTM C 293. (2016). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. EE.UU.: ASTM.
- ASTM C 348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. EE.UU.: ASTM.



ASTM C 494/C494M - 08a. (s.f.). *s.f. s.l.:s.n.*

ASTM C 515. (2003). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.* EE. UU.

ASTM-C-1202. (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C-128. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C-136. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C142/C142M. (2010). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C142/C142M. (2010). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C-150. (2016). *Standard Specification for Portland Cement.* ASTM.

ASTM-C-151. (2015). *Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement.* ASTM.

ASTM-C-187-04. (2004). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement.*

ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C-40. (2004). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete.*

ASTM-C-566. (2013). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C-597. (2009). *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.*

ASTM-C-666. (2015). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.* EE.UU.: ASTM.

ASTM-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate.*

Bernabé Reyes, C. (2015). *Evaluación de Morteros de Cemento Sustituídos con Cenizas Puzolánicas para mitigar el fenómeno de Corrosión en Estructuras de Concreto en Rehabilitación.* Morelia, Michoacán: Maestría en vías terrestres, UMSNH.

Biodiversidad mexicana. (2012). Obtenido de Biodiversidad mexicana:
<http://www.biodiversidad.gob.mx/usuarios/nopales/nopales.html>

Blancas Herrera, V. H. (2017).



- Calvo, M. (s.f.). Recuperado el 5 de Agosto de 2016, de <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>
- Christianson, S.A. de C.V. (s.f.). *Crisotan R-5*. Boletín Técnico.
- Colín Velázquez, L. (2016). *MATRICES CEMENTICIAS DENSIFICADAS CON ADICIONES ORGÁNICAS PARA PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS EN TLALPUJAHUA, MÉXICO*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Concretos, N. d. (Obtenido en 2017). *Peso Esécífico y Densidad Relativa del Concreto*. Obtenido de <http://notasdeconcretos.blogspot.mx/2011/04/peso-especifico-densidad-y-densidad.html>.
- Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible. (2014-2015).
- CONSTRUMÁTICA. (2017). *Propiedades de los Morteros de Revestimiento*. Obtenido de http://www.construmatica.com/construpedia/Propiedades_de_los_Morteros_de_Revestimiento.
- CYTED, P. I. (1998). *MANUAL DE INSPECCION, EVALUACION Y DIAGNOSTICO DE CORROSION EN ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO*.
- del Valle Moreno, A. d. (2015). *Solicitaciones mecánicas y estáticas a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adicionados con fibras deshidratadas de cactus opuntia*. Querétaro: s.n.
- Diccionario. (2017). Obtenido de https://www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&ei=iFAxVqjpO-en8we0_4DoAw#q=agua.
- documents.mx. (07 de Diciembre de 2015). *CUARTEO DE AGREGADOS*. Obtenido de <http://documents.mx/documents/cuarteo-de-agregados.html>.
- Gonzáles 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: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil.
- Ingeniería y Construcción, c. (Obtenido en 2017). *Tipos de aditivos para concreto*. Obtenido de <http://civilgeeks.com/2011/12/11/tipos-de-aditivos-para-concreto/>.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Jacobo Jacobo, S. (2014). *Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil.
- Kosmatha, S., & Panarese, W. (1992). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (Primera ed.). México: Instituto del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).



- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association.
- López Regalado, F. (2016). *Densificación de matrices cementicias a base de adiciones orgánicas*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Martínez Sánchez, B., Flores Martínez, J., Uribe Afif, R., & Medina Hernández, O. (2003). *La prueba de permeabilidad rápida a cloruros como índice de la durabilidad de las estructuras de hormigón*. CDMX.: Centro de Tecnología, Cemento y Concreto, CEMEX.
- Mejía, R., & Rodríguez, P. (1999). *Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios*. CYTED.
- Mendoza-Anaya, D. B.-B.-A. (2004). *La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología*.
- Molina, M. J. (2008). *Teoría de la Equivalencia Global* (Volumen III ed.). Molwick.
- Molina, M. J. (2008). *Teoría de la Equivalencia Global*. Molwik, Vol. III.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. A. (2011). *Análisis de Materiales* (Tercera Edición ed.). Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Civil.
- Neville, A. (1998). *Tecnología del Concreto* (Primera ed.). México: Trillas; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).
- Neville, A., & Brooks, J. (1999). *“Tecnología del concreto”*. México: Pearson.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2015). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTO PARA ALBAÑILERÍA (MORTERO)-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados - Muestreo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-057-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- 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-062-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Cementos hidráulicos - Determinación de la sanidad de cementantes hidráulicos*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-071-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*. 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*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico - Método de prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). *Industria de la construcción - Agregados para concreto - Partículas más finas que la criba 0,075 mm (No. 200) por medio de lavado - Método de prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-089-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de las frecuencias fundamentales, transversal, longitudinal y torcional de especímenes de concreto*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-. Especificaciones y métodos de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción -Agua para Concreto- Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-144-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-148-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-152-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Cemento hidráulico - Determinación de la densidad*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-160-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-163-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.



- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). *Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo, al Tamaño Requerido para las Pruebas*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-177-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Concreto - Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración*. CDMX: 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: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-205-ONNCCE. (2005). *Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-251-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Concreto - Terminología*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-263-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - .* CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-303-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-concreto hidráulico - determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-403-ONNCCE. (1999). *Industria de la construcción – concreto- hidráulico para uso estructural*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción -cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-480-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Geotecnia - Equivalente de arena de agregados finos - Método de ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción - Resistividad eléctrica del concreto hidráulico - especificaciones y métodos de ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- oficemen. (2016). Obtenido de https://www.oficemen.com/reportajePag.asp?id_rep=23.
- Otieno, M., Alexander, M., & Beushausen, H. (2010). *Transport mechanisms in concrete. Corrosion of steel in concrete (initiation, propagation & factors affecting)*. University of Cape Town.
- Propiedades de los cementos*. (2017). Obtenido de Obtenido de:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.PropiedadesCEMENTOS.pdf>.
- QuimiNet. (2016). *QuimiNet*. Recuperado el 5 de Agosto de 2016, de
<http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-la-fecula-de-maiz->



2653824.htm?mkt_medium=2552671&mkt_term=&mkt_content=&mkt_campaign=1&mkt_source=174: http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-la-fecula-de-maiz-2653824.htm?mkt_medium=2552671&mkt_term=&mkt_content=&mkt_campaign=1&mkt_source=174

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.

Rivera, G. (2016). *Durabilidad del concreto*. Obtenido de del concreto: <ftp://ftp.unicauca.edu.co>.

Sánchez de Guzmán, D. (2006). *Concretos y morteros*. Colombia: Instituto del Concreto.

Shetty, M. (2005). *Concrete Technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand and Companu LTD.

SIAP. (2016). http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016. Obtenido de Atlas Agroalimentario 2016.

Tomorrow's, C. T.—D. (2017). *La Densidad del Cemento*. Obtenido de Characterizing Today's Materials — Discovering Tomorrow's - See more at: http://www.quantachrome.com/materials_applications/Cement_density_spanish.htm#sthash.DpljwE29.dpuf.

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. A., Martínez Molina, W., Lomelí González, M. G., & Pérez Gallardo, A. (2010). Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto. *IMT*.