



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis profesional

**“MATRICES CEMENTICIAS DENSIFICADAS CON ADICIONES ORGÁNICAS
PARA PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS EN TLALPUJAHUA, MÉXICO”**

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

LUIS COLÍN VELÁZQUEZ

Asesor:

DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA

Co-asesores:

M. I. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

M.I. CIPRIANO BERNABÉ REYES

M.I. JOSÉ ALBERTO GUZMÁN TORRES



Morelia, Michoacán. Diciembre de 2016



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
I. RESUMEN	xi
II. ABSTRACT	xii
III. JUSTIFICACIÓN	xiii
IV. OBJETIVO GENERAL	xxi
V. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	xxi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Cemento	5
2.1.1. Producción del cemento Portland.....	5
2.1.2. Clasificación del cemento.....	7
2.1.3. Propiedades del cemento.....	8
2.1.3.1. Propiedades Físicas.....	8
2.1.3.2. Propiedades Químicas.....	10
2.1.3.3. Propiedades Mecánicas.....	11
2.1.4. Cemento usado en la Investigación.....	12
2.2. Agregados	13
2.2.1. Origen de los agregados.....	14
2.2.2. Propiedades de los agregados.....	15
2.2.2.1. Propiedades físicas.....	16
2.2.2.2. Propiedades Químicas.....	17
2.2.2.3. Propiedades Mecánica.....	17
2.2.3. Agregados utilizados en la investigación.....	18
2.3. Agua	18
2.3.1. Especificaciones del agua en la construcción.....	19
2.3.2. El agua utilizada en la investigación.....	20
2.4. Morteros	21
2.4.1. Tipos de Morteros.....	21
2.5. Materiales en estudio como adición al mortero	23
2.5.1. Fibra de Nopal.....	23
2.5.1.1. Antecedentes.....	23
2.5.1.2. Tipos y usos.....	24
2.5.1.3. Fibra de nopal utilizada en la investigación.....	25
2.5.2. Almidón.....	26



2.5.2.1.	Antecedentes	26
2.5.2.2.	Almidón de maíz.....	27
2.5.2.3.	Características del almidón de maíz	27
2.5.2.4.	Almidón de maíz utilizado en la investigación	28
2.6.	Aditivos	29
2.6.1.	Tipos y usos.....	29
2.6.2.	Aditivo utilizado en la investigación	30
3.	METODOLOGÍA	31
3.1.	Características y propiedades de los materiales	31
3.1.1.	Cemento	31
3.1.1.1.	Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento.	31
3.1.1.2.	Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.	35
3.1.1.3.	Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.....	37
3.1.2.	Arena	40
3.1.2.1.	Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba (Cuarteo). 41	
3.1.2.2.	Método de prueba estándar para la humedad superficial y humedad de absorción en arenas.	45
3.1.2.3.	Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica suelta).....	48
3.1.2.4.	Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa compacta).	49
3.1.2.5.	Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos.....	50
3.1.2.6.	Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino.	56
3.1.2.7.	Sedimentación en arenas	58
3.1.2.8.	Método de prueba estándar para materiales que pasan la malla N°200 en agregados por lavado.....	60
3.1.2.9.	Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	62
3.1.2.10.	Método de prueba estándar para densidad relativa de la arena.	64
3.1.2.11.	Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos.....	67
3.1.3.	Agua.....	70
3.1.4.	Aditivo.....	70
3.2.	Pruebas realizadas al mortero fresco	71
3.2.1.	Fluidez.....	71
3.2.2.	Elaboración de especímenes.	74
3.2.2.1.	Elaboración de cubos	75
3.2.2.2.	Elaboración de prismas.	77
3.2.2.3.	Elaboración de cilindros.	78
3.2.2.4.	Elaboración de briquetas.	79
3.2.3.	Curado.	80
3.3.	Pruebas realizadas al mortero endurecido.	82
3.3.1.	Pruebas no destructivas.	82
3.3.1.1.	Método de prueba estándar para la velocidad de pulso ultrasónico (VPU).	82
3.3.1.2.	Resistividad Eléctrica.....	84
3.3.1.3.	Porosidad total.....	87



3.3.2.	Pruebas destructivas	90
3.3.2.1.	Resistencia a Compresión.	90
3.3.2.2.	Resistencia a flexión	92
3.3.2.3.	Resistencia a la tensión indirecta	95
3.3.2.4.	Resistencia tensión directa.	97
3.3.3.	Pruebas por durabilidad	99
3.3.3.1.	Efecto a ciclos de congelamiento y deshielo.....	100
3.3.3.2.	Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.....	103
3.3.3.3.	Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros.	106
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	110
4.1.	Caracterización del agregado fino:	110
4.2.	Pruebas realizadas al mortero fresco	111
4.2.1.	Fluidez.....	111
4.3.	Pruebas realizadas al mortero endurecido	112
4.3.1.	Pruebas no destructivas	112
4.3.1.1.	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	112
4.3.1.2.	Resistividad eléctrica.....	115
4.3.1.3.	Porosidad total	117
4.3.2.	Pruebas destructivas	120
4.3.2.1.	Resistencia a compresión.....	120
4.3.2.2.	Resistencia a la flexión	123
4.3.2.3.	Resistencia a tensión directa.....	126
4.3.2.4.	Resistencia a tensión indirecta.....	128
4.3.3.	Pruebas por durabilidad	132
4.3.3.1.	Efecto a ciclos de congelamiento y deshielo.....	132
4.3.3.2.	Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.....	134
4.3.3.3.	Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros	136
5.	CONCLUSIONES	138
6.	BIBLIOGRAFÍA	142



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción y consumo nacional de cemento. Fuente (CANACEM, 2014).	xiv
Tabla 2. Consumo promedio de energía ponderado por tonelada de cemento (gris y blanco) (Sistema GNR).	xvii
Tabla 3. Principales entidades productoras de maíz (Atlas agroalimentario 2016).	xx
Tabla 4. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)	7
Tabla 5. Clasificación de los cementos con la norma actual (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)	7
Tabla 6. Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).....	10
Tabla 7. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE, 2014).....	19
Tabla 8: Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero, (ASTM-C270, 2014)	22
Tabla 9. Normas nacionales e internacionales que rigen las prácticas de caracterización del agregado.	40
Tabla 10. Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría	53
Tabla 11. Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation ASTM	55
Tabla 12. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004).....	58
Tabla 13. Materiales finos que pasa por la criba 0.0075 mm (No 200)	62
Tabla 14. Propiedades típicas del Crisotán R-5.....	71
Tabla 15. Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).	84
Tabla 16. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).....	87
Tabla 17. Criterios de evaluación para % de porosidad ((RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).	89
Tabla 18. Tabla de registro para resistencia compresión simple	92
Tabla 19. Tipos de permeabilidad de acuerdo a ASTM C 1202.....	109
Tabla 20. Resultados de la caracterización de la arena	110
Tabla 21. Resultados de la prueba de fluidez para cada adición.....	111
Tabla 22. Resultados y comparaciones en las diferentes pruebas mecánicas.	131
Tabla 23. Resultados de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros (Mezcla control).	136
Tabla 24. Resultados de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros (Mezcla FN 2%).	136
Tabla 25. Resultados de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros (Mezcla MZ 2%)	136



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1. Desprendimiento total entre mortero y roca de río (Fotografía L. Colín).</i>	<i>xiii</i>
<i>Ilustración 2. Bache ocasionado por erosión del mortero (Fotografía L. Colín).</i>	<i>xiv</i>
<i>Ilustración 3. Producción total del clínker para el año de 2013 (Sistema GNR).</i>	<i>xvi</i>
<i>Ilustración 4. Producción total de cemento gris y cemento blanco para el año de 2013 (Sistema GNR).</i>	<i>xvi</i>
<i>Ilustración 5. 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).</i>	<i>xvii</i>
<i>Ilustración 6. Volumen de producción nacional de nopal en México (Atlas Agroalimentario 2016).</i>	<i>xviii</i>
<i>Ilustración 7. Principales entidades productoras de nopal (Atlas agroalimentario 2016).</i>	<i>xix</i>
<i>Ilustración 8. Volumen de producción nacional (Atlas agroalimentario 2016).</i>	<i>xx</i>
<i>Ilustración 9. Mapa del clima de Tlalpujahua Michoacán</i>	<i>1</i>
<i>Ilustración 10. Esquema del proceso de producción del cemento(Cámara Nacional del Cemento, 2016).</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 11. Fibra de nopal utilizada en la investigación, producto de la marca CU-CU. (Fotografía F. López Regalado).</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 12. Fibra de Nopal deshidrata utilizada en la investigación (Fotografía L. Colín)</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 13. Almidón de maíz utilizado en la investigación, marca Maizena (Fotografía L. Colín).</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 14. Vertido de agua en el centro del cráter (Fotografía L. Colín).</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 15. Mezclado de la pasta con las manos (Fotografía L. Colín).</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 16. Penetración de la aguja (Fotografía L. Colín)</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 17. Aparato de Guillmore (Fotografía L. Colín)</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 18. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento (Norma I.N.V. E-307-07).</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 19. Agregando el material al divisor de muestras mecánico (Fotografía L. Colín).</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 20. Colocación del agregado en una superficie limpia (Fotografía L. Colín).</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 21. Homogenización del material (Fotografía L. Colín).</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 22. Aplanado de la parte superior del material (Fotografía J. Méndez).</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 23. División de la muestra en 4 partes iguales (Fotografía J. Méndez).</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 24. Secado superficial del agregado con ayuda del cono troncocónico (Fotografía L. Colín).</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 25. Llenado y pesado de la muestra en M.V.S.S (Fotografía L. Colín).</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 26. Llenado y varillado de MVSV (Fotografía L. Colín).</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 27. Mallas ordenadas en orden decreciente (Fotografía L. Colín).</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 28. Agitado mecánico (Raf-tap) (Fotografía L. Colín).</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 29. Separación de los retenidos en cada malla (Fotografía L. Colín).</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 30. Límites de granulometría para morteros y concreto (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 31. Colorimetría en arenas (Fotografía L. Colín).</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 32. Tabla de colorimetría (Fotografía J. Méndez).</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 33. Llenado del recipiente con material y agua hasta las marcas establecidas (Fotografía L. Colín).</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 34. Se agita el frasco durante dos minutos (Fotografía L. Colín).</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 35. Se deja reposar el material duran 24 horas (Fotografía L. Colín).</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 36. Lavado del material (Fotografía F. López).</i>	<i>61</i>



Ilustración 37. Frascos y vidrios utilizados (Fotografía L. Colín).....	66
Ilustración 38. Llenado de capsula (Fotografía L. Colín).....	68
Ilustración 39. Se agita el material dentro de la probeta durante 30 segundos (Fotografía L. Colín).....	68
Ilustración 40. Se deja reposar el material en la probeta durante 20 minutos (Fotografía L. Colín).....	69
Ilustración 41. Equipo a utilizar en la prueba de fluidez (Fotografía L. Colín).....	72
Ilustración 42. Humectación de la mesa de fluidez (Fotografía F. López).....	73
Ilustración 43. Compactación de la pasta (Fotografía L. Colín).....	73
Ilustración 44. Expansión de la mezcla de forma manual haciendo girar la leva (Fotografía L. Colín).....	74
Ilustración 45. Toma de mediciones para determinar la fluidez (Fotografía L. Colín).....	74
Ilustración 46. Llenado de los moldes cúbicos (Fotografía L. Colín).....	75
Ilustración 47. Etapas de llenado de los cubos de 5x5x5 cm.....	76
Ilustración 48. Apisonado de las diferentes etapas de llenado (Fotografía L. Colín).....	76
Ilustración 49. Enrasado del cubo (Fotografía L. Colín).....	76
Ilustración 50. Desmoldando cubos (Fotografías J. D. Álvarez).....	77
Ilustración 51. Molde para la elaboración de briquetas (Fotografía L. Colín).....	79
Ilustración 52. Superficie sobre la cual se colocan las briquetas (Fotografía L. Colín).....	80
Ilustración 53. Briquetas terminadas (Fotografía F. López).....	80
Ilustración 54. Curado de especímenes (Fotografía L. Colín).....	81
Ilustración 55. Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Fotografía L. Colín).....	84
Ilustración 56. Equipo utilizado en la determinación de resistividad eléctrica (Fotografía L. Colín).....	85
Ilustración 57. Espécimen prismático para tomar la resistividad eléctrica (Fotografía L. Colín).....	86
Ilustración 58. Colocación del espécimen cubico sobre la base de la prensa hidráulica y al centro de la platina (Fotografía L. Colín).....	91
Ilustración 59. Falla de la muestra sometida a compresión simple (Fotografía L. Colín).....	91
Ilustración 60. Obtención de las medidas del prisma (Fotografía L. Colín).....	93
Ilustración 61. Falla a flexión en prismas (Fotografía L. Colín).....	93
Ilustración 62. Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.....	95
Ilustración 63. Prueba de tensión indirecta (Fotografía L. Colín).....	96
Ilustración 64. Falla de espécimen por tensión indirecta (Fotografía L. Colín).....	97
Ilustración 65. Vista de la matriz del cilindro después de la prueba de tensión indirecta (Fotografía L. Colín).....	97
Ilustración 66. Colocación de las municiones en la tolva de la máquina (Fotografía L. Colín).....	98
Ilustración 67. Falla de briqueta por prueba de tensión directa (Fotografía L. Colín).....	99
Ilustración 68. Obtención de la masa del espécimen al inicio de la prueba de congelamiento y deshielo (Fotografía L. Colín).....	102
Ilustración 69. Medición de las caras del espécimen después del primer ciclo (Fotografías L. Colín).....	102
Ilustración 70. Prueba a flexión después del 15° ciclo de congelamiento y deshielo (Fotografía L. Colín).....	103
Ilustración 71. Espécimen fracturado después del cuarto ciclo de sulfatos (Fotografía L. Colín).....	105
Ilustración 72. Afectaciones en el cubo de mortero en el quinto ciclo de la prueba de sulfatos (Fotografía L. Colín).....	106



<i>Ilustración 73. Distribución granulométrica de arena de Tlalpujahua y límites inferior y superior (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).</i>	111
<i>Ilustración 74. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 14 días</i>	113
<i>Ilustración 75. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 28 días</i>	113
<i>Ilustración 76. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 45 días</i>	114
<i>Ilustración 77. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 90 días</i>	114
<i>Ilustración 78. Resistividad Eléctrica a 14 días</i>	115
<i>Ilustración 79. Resistividad eléctrica a 28 días</i>	116
<i>Ilustración 80. Resistividad Eléctrica a 45 días</i>	116
<i>Ilustración 81. Resistividad Eléctrica a 90 días</i>	117
<i>Ilustración 82. % De porosidad a 14 días</i>	118
<i>Ilustración 83. % De porosidad a 28 días</i>	118
<i>Ilustración 84. % De porosidad a 45 días</i>	119
<i>Ilustración 85. % De porosidad a 90 días</i>	119
<i>Ilustración 86. Compresión simple a 14 días</i>	121
<i>Ilustración 87. Compresión simple a 28 días</i>	122
<i>Ilustración 88. Compresión simple a 45 días</i>	122
<i>Ilustración 89. Compresión simple a 90 días</i>	123
<i>Ilustración 90. Resistencia a flexión a 14 días</i>	124
<i>Ilustración 91. Resistencia a flexión a 28 días</i>	124
<i>Ilustración 92. Resistencia a flexión a 45 días</i>	125
<i>Ilustración 93. Resistencia a flexión a 90 días</i>	125
<i>Ilustración 94. Resistencia a tensión directa a 14 días</i>	126
<i>Ilustración 95. Resistencia a tensión directa a 28 días</i>	127
<i>Ilustración 96. Resistencia a tensión directa a 45 días</i>	127
<i>Ilustración 97. Resistencia a tensión directa a 90 días</i>	128
<i>Ilustración 98. Resistencia a tensión indirecta a 14 días</i>	129
<i>Ilustración 99. Resistencia a tensión indirecta a 28 días</i>	129
<i>Ilustración 100. Resistencia a tensión indirecta a 45 días</i>	130
<i>Ilustración 101. Resistencia a tensión indirecta a 90 días</i>	130
<i>Ilustración 102. Efectos a ciclos de congelamiento y deshielo, prueba de resistividad eléctrica.</i>	132
<i>Ilustración 103. Efectos a ciclos de congelamiento y deshielo, prueba de velocidad de pulso ultrasónico.</i>	133
<i>Ilustración 104. Resistividad eléctrica en la prueba de sulfatos.</i>	134
<i>Ilustración 105. Velocidad de pulso ultrasónico en prueba de sulfatos.</i>	135
<i>Ilustración 106. Pérdida de masa en prueba de sulfatos.</i>	135
<i>Ilustración 107. Comparación de las diferentes mezclas, permeabilidad rápida a la penetración de cloruros.</i>	137



DEDICATORIAS

A las maravillosas personas que me dieron la vida:

Luis Colín Soto. Gracias por cada esfuerzo, cada sacrificio, cada desvelo que hiciste por mí, hoy todo tu trabajo se ve reflejado en esta carrera, la cual representa mucho sacrificio de la familia, Gracias papá por todo tu apoyo durante toda mi vida de estudiante sin ti y sin tu apoyo nada de esto hubiera sucedido, gracias por confiar en mí, por creer que tenía la capacidad de salir adelante, que tenía las ganas de estudiar, antes de venir a estudiar la universidad me preguntaste que si era lo que quería y yo muy confiado te conteste que sí, hoy te confirmo aún más que esto era lo que quería. Has sido, eres y serás un gran ejemplo para mí, quiero que sepas hoy lo importante que eres para mí, TE ADMIRO PAPÁ! Y si no lo sabías hoy es un buen momento para que lo sepas, gracias por enseñarme tantas cosas, aún recuerdo esos domingos en que teníamos que levantarnos temprano a lavarle la ropa a mí mamá y dejarle la comida hecha para que nos dejara ir a jugar. Hoy ese niño ha crecido y hoy se podrá decir con mucho gusto que ese niño es INGENIERO!

Yesenia Velázquez Torres: Gracias mamá por tanto esfuerzo desde que era todo un bebé y no te dejaba dormir, por tu amor y por cada vez que te preocupaste por mí, por el apoyo que me dabas cada que empezaba algo nuevo, siempre me pediste que confiara en mí hoy confió más que nunca en mí y en todo lo que soy capaz de hacer. Gracias mamá por hacer de mí un hombre de bien, por enseñarme a ser humilde, sencillo y sobre todo agradecido, gracias por ser mamá y papá cuando no estaba con nosotros mi papá, hiciste un buen trabajo, tan bueno que somos personas de bien, trabajadores y que si algún día falta algo en casa salir a buscarlo para que a la familia no le falte nada. Debo decirte que siempre contarás conmigo, siempre cuidare de tí. ¡TE ADMIRO MAMÁ!

A mis hermanos **Marco Antonio, Rodrigo y Johanna Mavemi**, gracias por todo su apoyo, por su cariño y su amor, gracias por cada momento de alegría, por compartir cada momento especial conmigo, hoy es un día para festejar, espero ser un gran ejemplo a seguir, no quiero que sean como yo quiero que sean aún mejor, mi flaquita hermosa, mi princesa eres la alegría de mi vida y de la familia.

Este título es más de ustedes que mío, tal vez dirá mi nombre pero me gustaría que dijera el de todos y cada uno de ustedes.

Familia **Colín Velázquez** gracias por ser la fortaleza ante momento difíciles, gracias por ser el apoyo cuando las cosas no salían bien, gracias por TODO!

“De oficio carpintero, de profesión ingeniero civil y de corazón humilde”



AGRADECIMIENTOS

A dios por permitirme llegar hasta este momento y mantener la calma ante situaciones difíciles, ánimos para no desistir, por darme fuerzas de seguir adelante aun a pesar de las circunstancias.

A la virgen de Guadalupe, a la cual le tengo una enorme fé, por ser mi compañera en la soledad y por tantas cosas.

Agradezco enormemente a mis padres por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, a mis hermanos, quienes me han fortalecido con palabras de aliento y por ser mis amigos. ¡GRACIAS!

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por formarme como profesional. A la Facultad de Ingeniería Civil, la cual siempre llevare en mi corazón. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales, Corrosión y a todo su personal, por brindarme las instalaciones, material y equipo necesario para el desarrollo de la presente investigación.

A mi asesor, el Dr. Hugo Luis Chávez García, por todo su apoyo, su consejos y sus enseñanzas.

Al M.A. Wilfrido Martínez Molina, quien fue mi tutor, mi profesor y amigo, por las oportunidades que me dio, por confiar en mí, por sus consejos, a la Doctora Elia Mercedes Alonso Guzmán, por sus valiosas aportaciones, sus consejos, sus enseñanzas, por creer que estoy para grandes cosas, usted me dio confianza, me enseñó a creer en mí y a no conformarme con tan poquito.

A Sandy, Isaías y Berna, quienes me apoyaron desde que llegue al laboratorio, por ser un apoyo incondicional, por sus enormes consejos, por sus indicaciones, por explicarme con manzanitas en procedimientos que no entendía, Gracias por todo!

Al maestro Mauricio por su apoyo, sus pláticas y sus ánimos, Rosalía y Judy por su paciencia que siempre me tuvieron, Al maestro Alberto Guzmán por su apoyo para que yo pudiera entrar al Laboratorio, por sus consejos.

Un enorme agradecimiento a mis compañeros los que empezamos con este proyecto: Chuy, Itzel y Jorge sin ustedes tantos días de colado no hubieran sido posible, Gracias por esas playeras de #TesisColín las cuales hicieron que nos hiciéramos famosos, siempre les estaré muy agradecido.

A Job gracias por tu apoyo en las coladas, por explicarme cosas que tú ya sabias y que yo desconocía, gracias por siempre estar apoyándome, por esa desvelada en la prueba de congelamiento y deshielo.



A mis compañero tesisistas, Blancas, Fidel, Ariel, Bersain, Amirais, Tony, Josue.

Y no podían faltar “Los Mejillas Bonitas” (Jorge y Gerardo), Napo, Irving.

A todos los chavos de servicio social y los del verano Nicolaita.

A Emmanuel González Castro por ser compañero y amigo desde que el maestro Wilfrido era nuestro tutor, hasta compartir experiencias nuevas como haber ganado el concurso de las mejores investigaciones y la experiencia de ir al congreso nacional en Guanajuato.



I. RESUMEN

En México existen 111 pueblos mágicos, la mayoría con características arquitectónicas atractivas para el turismo, como museos, iglesias, parques, acueductos, etc. Estos pueblos, presentan una característica particular: sus calles son empedradas, tal es el caso de Tlalpujahua en el estado de Michoacán, México; sin embargo su topografía presenta desniveles y el clima es extremo. Por su ubicación geográfica, coinciden lluvia, nieve, granizo y sol, estos cambios repentinos provocan que las juntas de mortero entre las rocas se erosionen originando baches y desprendimientos.

Otra situación preocupante para la sociedad es la producción excesiva de cemento Portland (CP), ya que la producción de CP generó 546 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera en el año 2013, de acuerdo con cifras del Sistema GNR (Getting Numbers Right). Acorde a las cifras publicadas por la SAGARPA en el “Atlas Agroalimentario 2016” la producción de maíz en México fue de 24,694 miles de toneladas. Michoacán es el cuarto mayor productor de maíz con una producción total de 1,721 miles de toneladas para el año de 2015. La producción nacional de nopal alcanzó 813 miles de toneladas, donde Michoacán se encuentra en el octavo mejor productor con 10,821 de toneladas para el año de 2015.

Con el uso de adiciones naturales al mortero, se busca incrementar la adherencia con las rocas y su durabilidad.

Se adicionó al mortero un 2% de fibras de origen orgánico, fibra de nopal (FN) y almidón de maíz (MZ), en relación al peso del cemento, utilizando un 0.4% de aditivo fluidificante para obtener una relación agua/cemento (*a/c*) de 0.77.

Los resultados de la investigación muestran un incremento en el desempeño mecánico del mortero con el 2% de FN a edades tempranas, en donde la resistividad eléctrica fue de 5.39 kΩ-cm y la del testigo de 4.65 kΩ-cm, demostrándose la densificación de la matriz en un 16%.

Los resultados de la resistencia a compresión simple, del mortero con adición de MZ, mostraron incrementos del orden del 5% con respecto a la muestra testigo y de casi 700% con respecto a los parámetros del Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

Palabras Clave: durabilidad, empedrado, mortero, adición, tlalpujahua



II. ABSTRACT

In Mexico there are 111 magical towns, most of them with attractive architectural features for tourism, such as museums, churches, parks, aqueducts, etc. These towns have a particular characteristic: their streets are cobbled, such is the case of Tlalpujahua in the state of Michoacán, Mexico; However its topography is levelled and the climate is extreme. Due to its geographic location, there are rain, snow, hail and sun, these sudden changes cause the seals of mortar between the rocks erode, causing potholes and detachments.

Another worrying situation for the society is the excessive production of cement Portland (CP), since the production of CP generated 546 million tons of CO₂ into the atmosphere in the year 2013, according to figures of the System Getting Numbers Right (GNR). According to the figures published by the SAGARPA in the "Atlas Agroalimentario 2016" the production of corn in Mexico was of 24,694 thousands of tons. Michoacan is the fourth-biggest producer of corn with a total production of 1,721 thousand tons for the year of 2015. The national production of nopal reached 813 thousand tons, where Michoacán is in the eighth best producer with 10,821 tons for the year 2015.

With the use of natural additions to the mortar, it is sought to increase the adhesion with the rocks and their durability. It was added to the mortar 2% of fibers of organic origin, fiber of Cactus (FN) and starch of corn (MZ), in relation to the weight of the cement, using 0.4% of fluidizer additive to get a ratio water / cement (a / c) of 0.77.

The results of the research show an increase in the performance mechanical of the mortar with the 2% of FN at early ages, where the resistivity electric was of 5.39 kΩ-cm and the control of 4.65 kΩ-cm, showing the densification of the matrix in a 16%. The results of the simple compression strength of the mortar with addition of MZ showed increases of the order of 5% with respect to the control sample and of almost 700% with respect to the parameters of the Regulation of Constructions of the State of Michoacán.

Key words: durability, cobbled, mortars, additions.



III. JUSTIFICACIÓN

Periódicamente, entre 1 y 2 años, se rehabilitan y conservan las calles con empedrado en Tlalpujahua, Michoacán, México. Existen sitios donde solo se requiere un mantenimiento sencillo por ejemplo: colocar una lechada de mortero en los lugares donde la erosión ha sido mínima, otros sitios donde el mantenimiento debe ser mayor, erosión muy alta (Ilustración 1), llegando a existir desprendimientos totales entre el mortero y roca de río. El problema principal es la baja resistencia y adherencia del mortero a los cantos rodados y entre fases de construcción.



Ilustración 1. Desprendimiento total entre mortero y roca de río (Fotografía L. Colín).

Aunado a las pendientes debido a su topografía y al trazo no ortogonal se presenta un grave problema de erosión, lo cual genera que las rocas queden sueltas y ocasionando baches en el empedrado (Ilustración 2).

Un porcentaje del presupuesto municipal es destinado al mejoramiento, restauración y mantenimiento de las calles empedradas del municipio.



Ilustración 2. Bache ocasionado por erosión del mortero (Fotografía L. Colín).

Aunado a ello el alto consumo de cemento Portland, genera emisiones de CO₂ del orden de 0.6 a 0.8 por tonelada por tonelada de producción, los cuales comprometen el futuro empleo de este material de construcción, 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 1 que se presenta a continuación.

Tabla 1. Producción y consumo nacional de cemento. Fuente (CANACEM, 2014).

Año	Producción	Consumo nal. (Millones de tns)	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.

SISTEMA GNR

El sistema GNR (Getting the Numbers Right) es hasta la fecha la base de datos con la 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 (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 ilustración 3 se muestra una comparativa de la producción del clínker en varios años. Las siguientes ilustraciones fueron seleccionadas por su relevancia en la presente investigación.

En comparación con las Ilustraciones 3 y 4, 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.

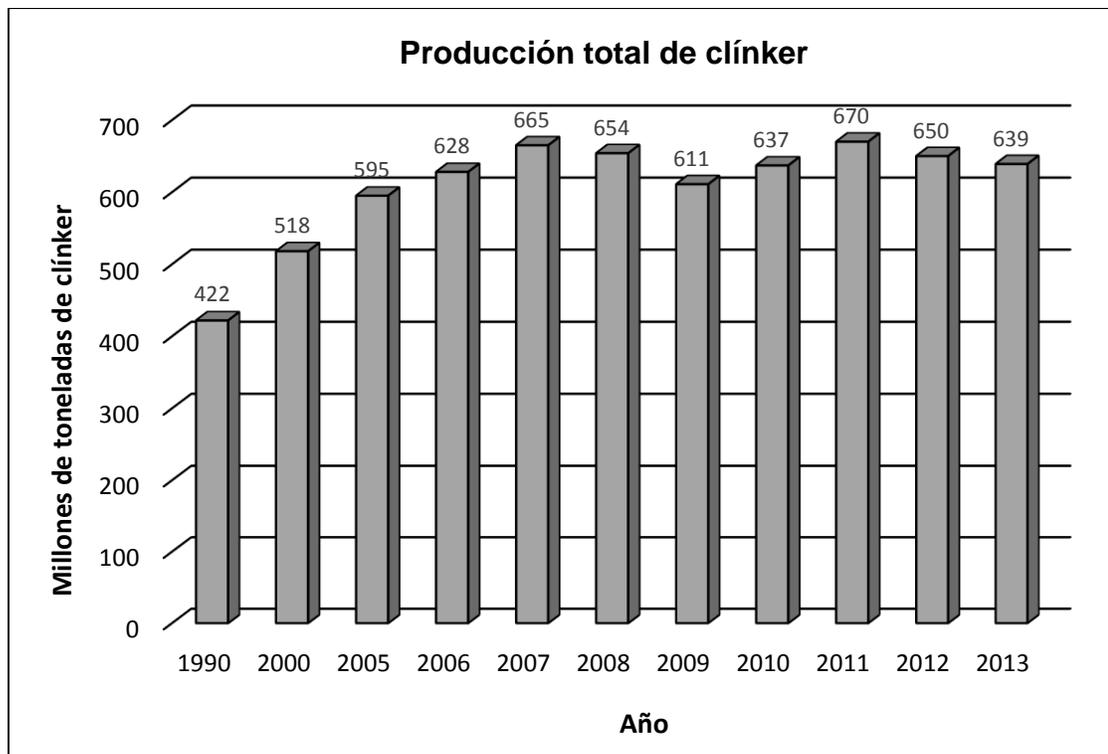


Ilustración 3. Producción total del clínker para el año de 2013 (Sistema GNR).

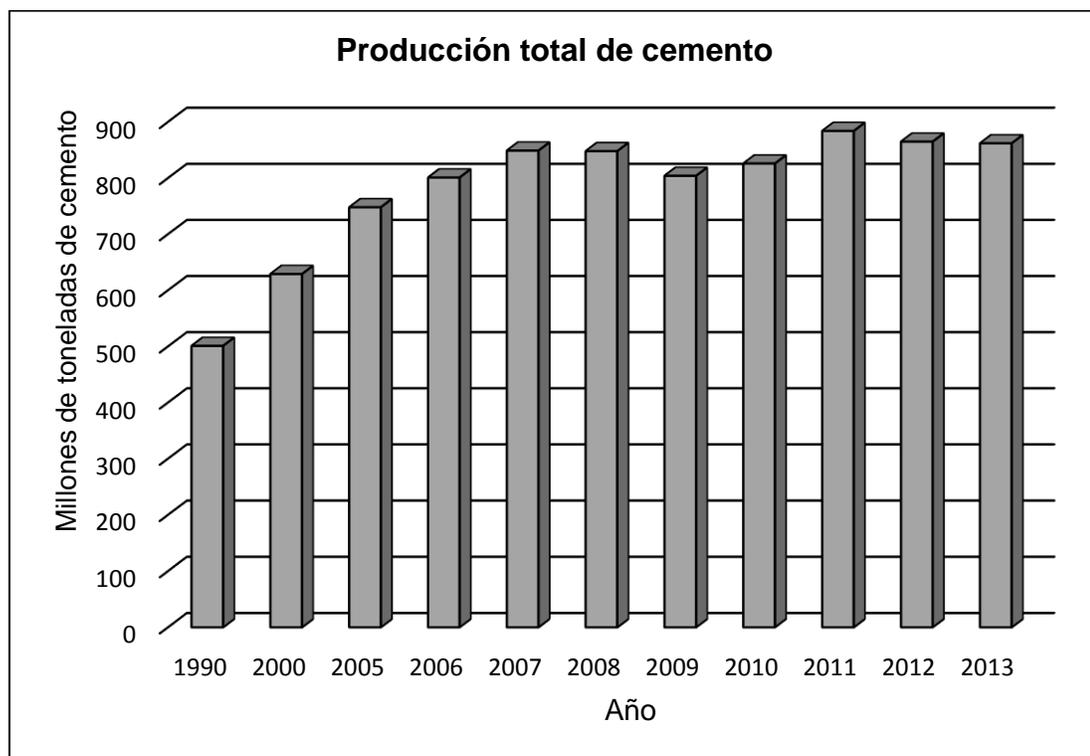


Ilustración 4. Producción total de cemento gris y cemento blanco para el año de 2013 (Sistema GNR).



En la ilustración 5 se presenta las emisiones de CO₂ producidas durante los procesos de producción:

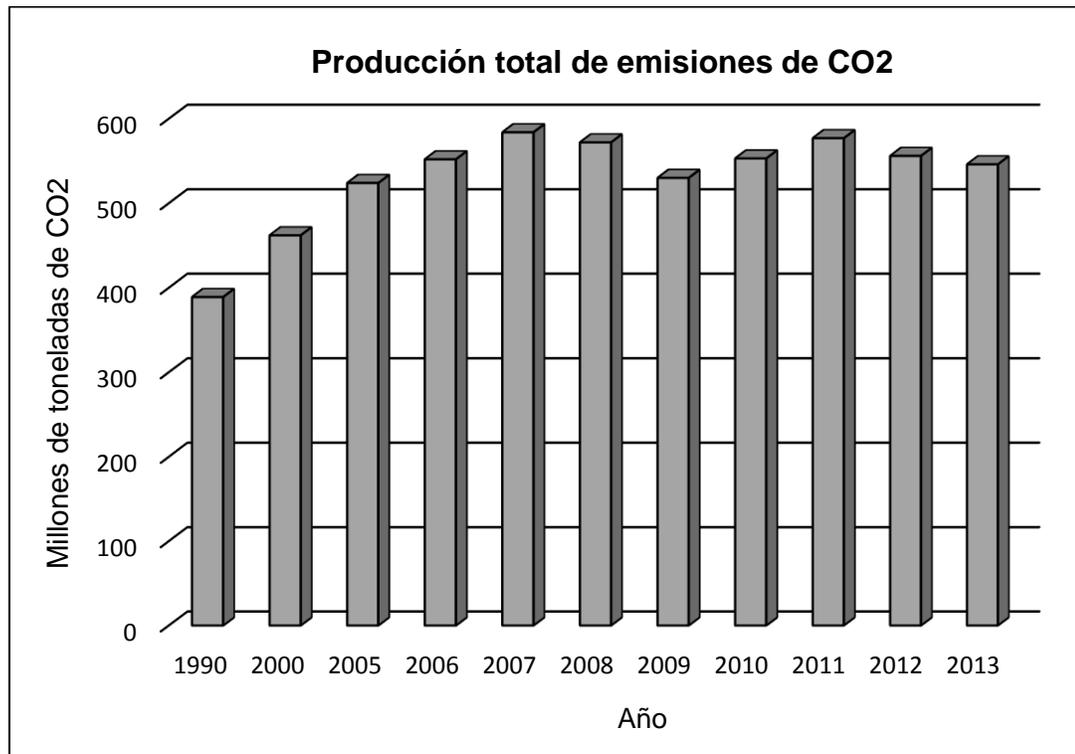


Ilustración 5. Total bruto de emisiones de CO₂ excluyendo el CO₂ de la generación de energía in.situ correspondientes a cemento gris y blanco, para el año 2013 (Sistema GNR).

La Tabla 2 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.

Tabla 2. Consumo promedio de energía ponderado por tonelada de cemento (gris y blanco) (Sistema GNR).

Consumo de energía promedio por tonelada de cemento (kWh/ton de cemento)									
2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
114	111	110	109	109	107	108	105	103	104



PRODUCCIÓN DE NOPAL

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 miles de toneladas, mostrando una disminución de acuerdo a la producción de años anteriores (Ilustración 6). En el año 2012 la producción alcanzó las 857 mil toneladas de nopal en todo el país.

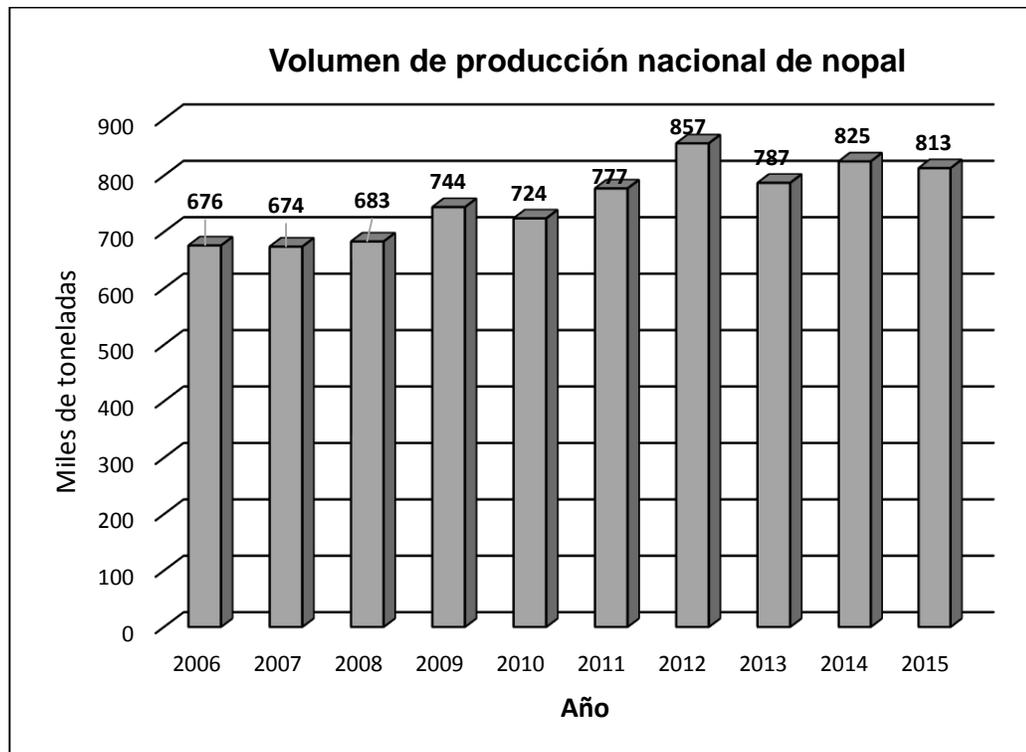


Ilustración 6. Volumen de producción nacional de nopal en México (Atlas Agroalimentario 2016).

En la Ilustración 7 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.

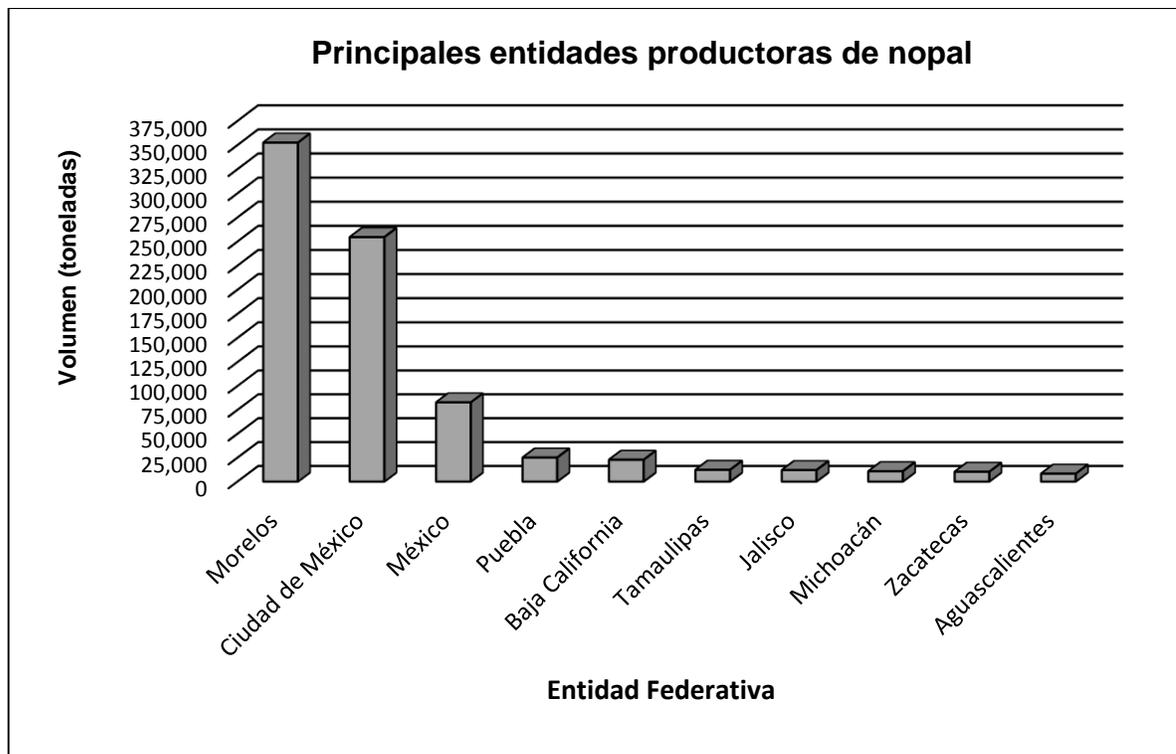


Ilustración 7. Principales entidades productoras de nopal (Atlas agroalimentario 2016).

PRODUCCIÓN DE MAÍZ

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 (Ilustración 8). 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 3), con un volumen de producción de 1,721,658 toneladas de maíz para el año de 2015.

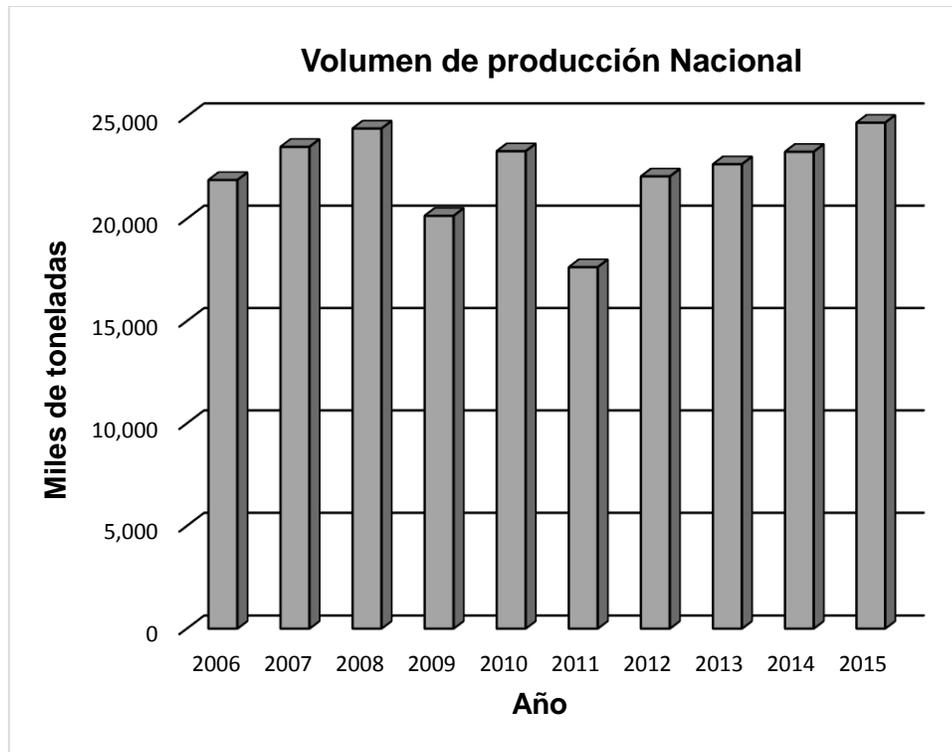


Ilustración 8. Volumen de producción nacional (Atlas agroalimentario 2016).

Tabla 3. Principales entidades productoras de maíz (Atlas agroalimentario 2016).

Rank	Entidad federativa	Volumen (Toneladas)
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



IV. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, elaborar y evaluar en una mezcla de mortero incorporando adiciones parciales al cemento portland, con la finalidad de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y su desempeño por durabilidad. La finalidad es construir obras durables, reducir el consumo del cemento portland y por ende la contaminación causada por la producción del mismo.

V. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar de manera detallada, las propiedades físicas y mecánicas del mortero convencional; el cual nos servirá de base para evaluar comparativamente el mortero adicionado parcialmente con materiales orgánicos como la fibra de nopal y el almidón.

Proponer el uso de un aditivo que sea capaz de tener una respuesta más favorable que un mortero convencional y pruebas destructivas tales como; esto con la finalidad de disminuir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Diseñar y elaborar un mortero capaz de resistir sollicitaciones físicas: como procesos de erosión, cambios bruscos de temperatura, entre otras. A través de pruebas no destructivas como son densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico.

Evaluar en las mezclas de mortero sollicitaciones mecánicas: resistencia a la compresión simple, tensión directa e indirecta y flexión.

Proponer el diseño de una mezcla que sea capaz de incrementar el desempeño por durabilidad, esto se llevará a cabo mediante una simulación acelerada.



1. INTRODUCCIÓN

Tlalpujahua es un pueblo de origen prehispánico, cuyas raíces en nahuatl son: “Tlalli” tierra y “Poxohuac”, cosa esponjosa o fofa; por lo que se traduce como “tierra esponjosa o fofa”. Hermosa y rica región en las montañas. Puerta de lujo de Michoacán. Antiguo centro minero de gran influencia en amplia región del centro del país.

Se localiza al noroeste del Estado de Michoacán, entre las coordenadas 19°42´ y 19°52´ de latitud norte y 100°08´ y 100°17´ de longitud oeste. Limita al este con el Estado de México, al oeste con los Municipios, de Maravatío y Senguio, al norte con el Municipio de Contepec y al sur con el Municipio de Senguio y el Estado de México, cuenta con una superficie de 271.49 Km².

De clima fresco y agradable, frío en invierno, lluvia abundante en la estación y un sol espléndido todo el año. De azul intenso el cielo, negro de noche y blanco de estrellas. Temperaturas que oscilan de 6.1 a 22.7° centígrados, a una altura de 2,580 metros sobre nivel del mar.

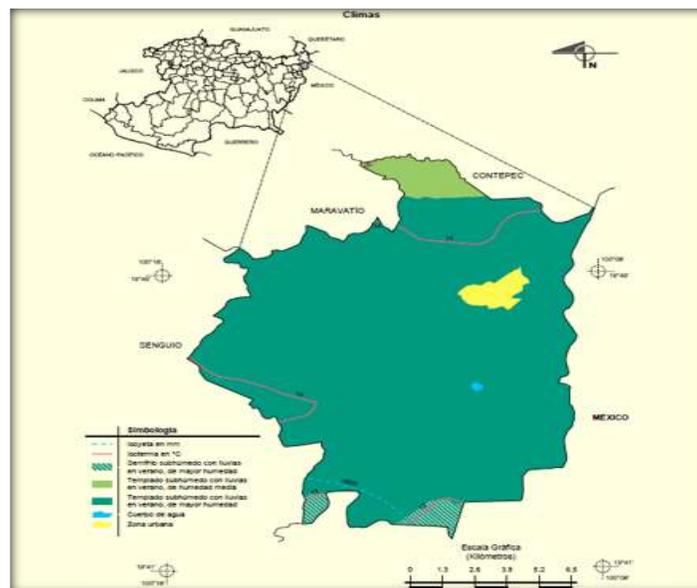


Ilustración 9. Mapa del clima de Tlalpujahua Michoacán



La economía del municipio se basa principalmente en la elaboración y venta de las esferas navideñas, para este año se elaboraron más de 65 millones de esferas fueron producidas en el Pueblo Mágico para la presente temporada, de las cuales 25 por ciento es para el mercado nacional y 10 millones de piezas son ofertadas durante la VXII edición de la Feria de la Esfera.

En el municipio se encuentra la fábrica más grande de América Latina, misma que exportará 30 por ciento de su producción.

Abel Castillo Martínez, presidente del Consejo Michoacano de Marcas Colectivas, señaló que derivado de la economía que priva en el país, “al inicio de la feria las ventas no fueron tan buenas como se esperaba; sin embargo, han mejorado” y hasta el 16 de diciembre esperan vender 10 millones de piezas, con lo que duplicarían la venta del año pasado.

La feria inició con 10 productores, “como un mercadito con cartones de esferas a la intemperie sin que nadie lo notara, simplemente se vendía porque tradicionalmente llega turismo al municipio”. En esta edición cuenta con 94 expositores al interior del auditorio municipal, 60 en una calle aledaña y con los locales en el centro del poblado se cuentan más de 250 expositores.

Tlalpujahua cuenta con más de 150 talleres familiares, la producción de esferas inició hace más de 50 años y el pionero fue Joaquín Muñoz Orta, quien después de viajar a Estados Unidos creó un taller en el pueblo, que ahora es la fábrica Adornos Navideños, misma que internacionalizó la esfera y posiciona al municipio como principal productor con la empresa más grande de Latinoamérica.

José Daniel Muñoz Ruiz, administrador de la Casa de Santa Claus, relata que a finales de la década de los 50 “mis papás comenzaron la producción de esferas en un taller pequeño y en 1965 formaron la empresa Adornos Navideños, que actualmente es la fábrica más importante de México y América Latina en cuanto a producción, calidad y precio”.



La familia Muñoz, como se les conoce en el pueblo, fue el origen de la tradición en la producción de esferas, “es un orgullo que la iniciativa y el trabajo de mis papás haya dado como fruto el oficio de Tlalpujahua, que es el pilar de la economía y la oportunidad de sustento de las familias”.

Un total de 27587 habitantes serán beneficiados ya que al tener una mejora en el municipio el turismo aumentara y por ende la economía del municipio crecerá en un 2%, con lo que se puede entender que el dinero que llegara al municipio se quedara en el municipio ya que más personas serán contratadas para desempeñar algún puesto en una tienda, o mejor aún, el dueño de la tienda se le ofrece una cama y con lo que vendió un fin de semana se la compra al carpintero, y el carpintero ya tiene para comprarle un pantalón a su hijo con la señora del tianguis y así de esa manera de beneficia todos los habitantes del municipio.

Las adiciones al cemento se han utilizado desde tiempos remotos para diferentes fines, ya sean para construcciones o para la naturaleza, de allí surge la necesidad de investigar adiciones naturales y obtener mejores resultados de su adición con el cemento.

En la actualidad hay gran variedad de investigaciones sobre adiciones al cemento, que buscan mejorar sus características físicas, mecánicas y por durabilidad, capaces de resistir ataques agresivos de la naturaleza, con bajo índice de permeabilidad, alta adherencia y resistencia mecánica.

Las investigaciones sobre adiciones naturales son importantes ya que se pueden implementar por un sinnúmero de razones, como son: la necesidad de disminuir emisiones de CO₂ y calor a la atmosfera, la posibilidad de usar subproductos de otras industrias y disminuir la producción de cemento Portland (CP).

Los cementos adicionados traen consigo un número considerable de ventajas, tales como, altas o muy altas resistencias finales, a 28 días o más, se consigue mayor durabilidad debido a la formación de una matriz cementicia más densa, alta



resistencia a los sulfatos y al ion cloruro, siempre que se realice la elaboración y el curado adecuado.

Comienza a darse prioridad al cuidado del ambiente de forma que el menor uso de combustibles deviene en menor contaminación, así pues con los cementos adicionados se logra la disminución de la huella de carbono atribuida a la fabricación del cemento, además del uso de pasivos industriales que también atentan contra el ambiente.

Ante estas ventajas, el mundo usa actualmente los cementos adicionados de manera muy extendida (alrededor del 85 %) (Shaw, 2000).

En el presente trabajo se hace un estudio sobre el desempeño y la durabilidad de los morteros con adiciones de almidón de maíz y fibra de nopal.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Portland, debido a que es el más común. El cemento Portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. (Instituto del Concreto, 1997).

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión, durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones de construcción.

2.1.1. Producción del cemento Portland

El cemento Portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos, también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final. Los materiales utilizados en la fabricación del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro.

Cada planta de cemento es diferente, no hay instalaciones típicas para la producción del cemento, tiene diferencias significantes en disposición, equipos o apariencia general, se considera el siguiente proceso de obtención del cemento Portland(Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

1. La roca se reduce hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) para después reducirla a 20 mm (3/4 pulg.) y después se almacena.
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan polvo y se mezclan con el agua para formar una lechada.
3. Se transforma químicamente las materias primas mediante la calcinación para obtener el clínker de cemento.
4. Se mezcla el clínker con el yeso para convertirlos en cemento Portland y se almacena para después envasarlo.

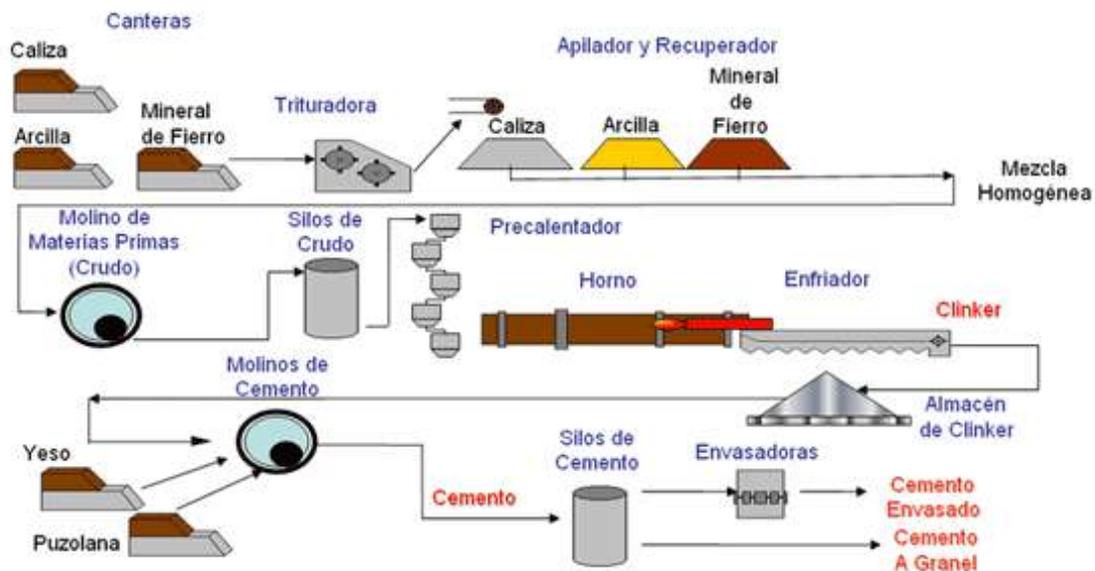


Ilustración 10. Esquema del proceso de producción del cemento(Cámara Nacional del Cemento, 2016).



2.1.2. Clasificación del cemento

Anteriormente los cementos estaban clasificados de acuerdo a las normas mexicanas NMX-C-001, NMX-C-002 y NMX-C-175, como se muestra en la Tabla 4, por diversas circunstancias de calidad la normativa cambio para una mejor resistencia en el concreto y es la que se indica en la Tabla 5. Esta nomenclatura solo se utiliza en México, la nomenclatura a nivel mundial sigue utilizando los números romanos.

Tabla 4. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

NMX-C-414-ONNCCE (Vigente)	NMX-C-001 (Cancelada) NORMA ASTM C-150
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 ó CPC que cumpla con la característica especial B	Blanco
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA	Especial, bajo álcali; todos los tipos

Tabla 5. Clasificación de los cementos con la norma actual (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS (Resistente a los Sulfatos)
CPP	Cemento Portland	30	BRA (Baja Reactividad)



	Puzolánico		Álcali Agregado
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R= Resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B (Blanco)
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	-
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

2.1.3. Propiedades del cemento

Conocer las propiedades del cemento es importante para tener en cuenta algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter químico, físico y mecánico; las cuales dependen del estado en el cual se encuentren. Estudiar el cemento a fondo ayudara a saber su comportamiento con otras materias primas y su comportamiento al mezclarse con otros elementos.

2.1.3.1. Propiedades Físicas

Como todos los materiales, el cemento cuentan con propiedades físicas de las cuales las más importantes son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión. Estas dan una evaluación del cemento y del concreto, las cuales dependen del tipo de cemento que se utiliza.

- **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 gr/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(Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **Consistencia normal:** Se refiere a la movilidad relativa de la mezcla fresca de pasta o mortero de cemento. 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 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.
 - ❖ **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 ya esta dura.
 - ❖ **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. Internamente



ocurre que una gran cantidad de sulfatos se deshidrata y de esta manera se forma el yeso. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

- **Expansión:** Se refiere a la habilidad de la pasta de cemento en mantener su volumen. La falta de sanidad o la expansión destructiva retardada se puede causar por la cantidad excesiva de cal libre o magnesia supercalcinadas. La mayoría de las especificaciones para cemento Portland limitan el contenido de magnesia (periclasa) y la expansión máxima (ASTM-C-151-00, 2014).

2.1.3.2. Propiedades Químicas

En el proceso de producción del cemento se produce una transformación de las materias primas a productos con mejores características, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF



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 cemento.

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).

2.1.3.3. Propiedades Mecánicas

- **Resistencia a la compresión:** Es aquella obtenida por la prueba de cubos o cilindros de mortero de acuerdo con las normas (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), (ASTM-C-109-M, 2002) y (AASHTO-T-106, 2002) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **Resistencia a la flexión:** Prueba en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) cuando es sometido a esfuerzos de flexión en prismas de



40x40x160 mm, siguiendo el procedimiento establecido en la norma (ASTM-C-348, 1997).

2.1.4. Cemento usado 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 a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C_3A) la norma inglesa para este cemento, (BS-4027:1980, 2000), estipula un contenido de C_3A , del 3.5%. La finura mínima es $250 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Ha sido diseñado para estructuras que necesiten moderada resistencia a los sulfatos o bajo calor de hidratación. Se recomienda en edificios y construcciones industriales, puentes, estructuras expuestas a suelos, al agua con concentración moderada de sulfatos o al agua de mar o estructuras con gran volumen de concreto, en estos cementos el contenido de C_3A se limita a 8% (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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 $Al_2O_3:Fe_2O_3$.

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).

2.2. Agregados

Los agregados finos y gruesos constituyen entre el 60 y el 75% de una mezcla de concreto. Debido a que los agregados ocupan un porcentaje tan alto del volumen de una mezcla de concreto y pueden afectar de gran manera las propiedades del concreto en estado fresco como endurecido, es importante que los agregados sean muestreados y ensayados adecuadamente para garantizar que sean idóneos para usarse en la mezcla diseñada (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A,C, 2015).

Los agregados no solo pueden limitar la resistencia del concreto, pues sus propiedades pueden afectar en gran medida la durabilidad y el rendimiento estructural del concreto.

En un principio, al agregado se le considero como material inerte, no costoso, disperso en la pasta de cemento para producir un gran volumen de concreto. En realidad, el agregado no es inerte, pues sus propiedades físicas, térmicas y en ocasiones, químicas, pueden influir en el desempeño del concreto, por ejemplo, mejorando su durabilidad y estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento (Neville & Brooks, 2010).



2.2.1. Origen de los agregados

Los agregados naturales para concreto por lo general con una mezcla de rocas y minerales. El mineral es una sustancia sólida natural con una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de los límites estrechos. Las rocas se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen con varios minerales. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de piedra, grava, arena, limo y arcilla (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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.

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.



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.

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 (Neville & Brooks, 2010).

2.2.2. Propiedades de los agregados

Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el mortero debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos o poros que este deje.

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el mortero y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Neville & Brooks, 2010).

Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm (Neville & Brooks, 2010).

Algunas otras propiedades físicas del agregado son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia y de suma importancia la granulometría del agregado así como el módulo de finura.



2.2.2.1. Propiedades físicas

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

- **Granulometría.** Es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas).

Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que las arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

- **Porosidad.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad. Se requieren agregados que cumplan con esta propiedad física y así garantizar una buena resistencia mecánica.
- **Densidad suelta.** Es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen unitario es el ocupado por los agregados y los vacíos que se generan entre las partículas de los agregados (NMX-C-073-ONNCCE, 2014).
- **Forma y Textura.** Influye en las propiedades del concreto fresco más que en las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o alargadas requieren más cantidad de agua para producir concreto trabajable que los agregados lisos, redondeados y compactos. Además requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. 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.

2.2.2.2. Propiedades Químicas

Lo más importante en las propiedades químicas es revisar que los agregados no presenten sustancias y componentes geológicos agresivos que puedan afectar la reacción entre la masa del concreto y así afectar su comportamiento mecánico en estado endurecido.

- **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).

2.2.2.3. Propiedades Mecánica

- **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 endurezca. 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.
- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado 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.

- **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 (Neville & Brooks, 2010).

2.2.3. Agregados utilizados en la investigación

Los agregados utilizados en la investigación fueron obtenidos de una casa de materiales en el municipio de Tlalpujahua Michoacán, lugar que se encuentra al noroeste del Estado, un lugar que por su ubicación geográfica presenta un clima extremo (granizo, lluvia, nieve, sol) y en su topografía presenta desniveles, el municipio no cuenta con un banco de material propio por lo que se tuvo que obtener el agregado de la casa de material.

Dicho agregado es el que se utiliza para todas las construcciones que se realizan en el municipio ya que no hay otro lugar de donde obtener agregados para la construcción.

2.3. Agua

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del concreto. Sin embargo también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables. Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para la



preparación del concreto con menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para verificar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

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 ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla.

2.3.1. Especificaciones del agua en la construcción

Las aguas a las que se refiere la norma (NMX-C-122-ONNCCE-2004), que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la Tabla 7. El agua de mar no es apropiada para la preparación de concreto reforzado con acero y no se debe usar en concreto pretensado, debido al riesgo de la corrosión de la armadura, principalmente en ambientes cálidos y húmedos.

Tabla 7. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE, 2014)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulfioresistentes 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	400 (c)	600 (c)



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

2.3.2. El agua utilizada en la investigación

El agua utilizada 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 se utilizó tal y como llega al laboratorio, esto con el fin de usarla lo más apegado a la realidad.



Se sabe que en la construcción no toman en cuenta la calidad del agua, la utilizan tal y como se la suministran y no importa si está contaminada, aquí se quiso asemejar a la realidad por lo que se decidió utilizar así el agua.

2.4. Morteros

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

El mortero puede considerarse como un microconcreto, razón por la cual muchas de sus características son comunes a las del concreto normal. Es una mezcla que no incluye agregado grueso sino solamente pasta de cemento, agregado fino y agua. La calidad apropiada de un mortero, especialmente si su uso es estructural (mampostería etc.) se obtiene proporcionando no solo cemento, agua y arena, sino también en mucho de los casos incluyendo aditivos para conseguir características especiales del mortero (Correa, 1984).

2.4.1. Tipos de Morteros

La clasificación de los morteros es muy amplia e implica una gran cantidad de variables, en este caso solo nos enfocaremos en los morteros según su tiempo o tipo de fraguado así como su composición química o física dependiendo el uso para el cual se diseñe:

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 entres 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, Brito Benitez, & Arenas Alatorre, 2004). La norma ASTM C270 ((ASTM-C270, 2014), establece los diferentes tipos de morteros así como parámetros de resistencia y contenido de aire que deben cumplir; describe también la combinación entre ellos y algunas de las propiedades Tabla 8.

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

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



para albañilería	S	1800 (12.4)	75	18
	N	750 (5.2)	75	20d
	O	350 (2.4)	75	20d

ESPECIFICACIONES:

Todas las especificaciones de la tabla deben ser obtenidas en laboratorio

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

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

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

2.5. Materiales en estudio como adición al mortero

Se busca adiciones al mortero para mejorar sus propiedades químicas, físicas y mecánicas del mortero, las adiciones son con materiales orgánicos con el fin de evitar una mayor contaminación en la producción del cemento Portland ordinario y así generar que el costo económico baje considerablemente ya que los morteros con adiciones serán más durables que los morteros convencionales.

2.5.1. Fibra de Nopal

El nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de México. Este país produce 874,000 toneladas al año, con un rendimiento promedio de 67 ton/ha. Además, el uso del nopal en materiales basados en cemento puede tener un impacto social, proporcionando un valor agregado a la producción de esta planta y se mejoraría su rentabilidad.

Debe mencionarse que no todas las especies de nopal se utilizan como alimento, de tal forma que se pueden utilizar para aplicaciones industriales aquellas que no sean aprovechadas para consumo humano o animal.

2.5.1.1. Antecedentes

El nopal es una planta originaria de México, donde es conocida desde tiempos prehispánicos, pertenece al género *Opuntia*, de la familia de las cetáceas. El



cultivo del nopal contribuye a la alimentación, nutrición y salud de los seres humanos. Además se utiliza en la agroindustria alimentaria; complementa la alimentación animal; es fuente potencial de bioenergía; y ayuda a un mejor manejo del medio ambiente. Esta cactácea del género *Opuntia* y de la cual se conocen más de 300 especies, es originaria de Mesoamérica y hoy está difundida en todo el mundo. Al ser una planta muy noble, el nopal puede desarrollarse fácilmente; sin embargo, su crecimiento óptimo se da en las zonas áridas y semiáridas; se adapta a casi cualquier tipo de clima mientras cumpla con ciertas características básicas, tales como: buena insolación, cierta disponibilidad de agua, y que el suelo no sea salino o muy arenoso (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).

2.5.1.2. Tipos y usos

El nopal pertenece al género *Opuntia*, del grupo *cacti*, que contiene cerca de 300 variedades (algunos con espinas otros sin ellas) un tipo común del cactus espinoso también conocido como higo indio.

El OFI (*Opuntia Ficus-indica*) se ha utilizado en todo el mundo con éxito por siglos de varias maneras. Los aztecas ya cultivaban la planta en México antes de que los españoles llegaran en el siglo dieciséis. También lo utilizaban con propósitos medicinales según lo descrito en el herbario azteca de 1552 (Bishop y Funhauser, 1998; Torres-Montes, 2005). Su nombre genérico fue *nohpalli* y actualmente se sigue llamando comúnmente nopal. Ellos extrajeron el jugo lechoso de la planta y lo mezclaron con miel y yema de huevo para crear una pomada para las quemaduras.

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. A continuación se mencionan (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 mucílago; 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, y otros, 2015)

2.5.1.3. Fibra de nopal utilizada en la investigación

La fibra de nopal, utilizada en la investigación, se consiguió con una empresa de productos comerciales, la marca de este producto es CU-CU (Ilustración 11).

El porcentaje utilizado como adición al cemento fue 2%. Se utilizó en estado deshidratado en forma de polvo (Ilustración 12).



Ilustración 11. Fibra de nopal utilizada en la investigación, producto de la marca CU-CU. (Fotografía F. López Regalado).



Ilustración 12. Fibra de Nopal deshidrata utilizada en la investigación (Fotografía L. Colín)

2.5.2. Almidón

2.5.2.1. Antecedentes

Un almidón es un polisacárido que se encuentra en las plantas en forma de reserva alimenticia, éste se encuentra constituido por amilosa y amilopectina, 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.

Los seres humanos al consumir dichas plantas adquieren las propiedades de éstos, por lo tanto, los almidones como la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos digeribles de la dieta habitual, proporcionando así entre el 70 y 80% de las calorías consumidas y necesarias por los seres humanos (QuimiNet, 2016).



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 (Antigua, 2016):

- Almidón de maíz
- Almidón de papa
- Almidón de trigo
- Almidón de arroz
- Almidón de centeno, cebada y avena
- Almidón de legumbres

2.5.2.2. Almidón de maíz

Uno de los almidones más conocidos es el almidón de maíz, proviene de los cereales, granos y harinas.

El almidón de maíz es un alimento 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.

2.5.2.3. Características del almidón de maíz

El almidón de maíz cuenta con diversas características como son:

– Gelatinización

Durante la gelatinización 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 grandes 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

La gelificación es la formación de un gel y no se produce hasta que se enfría el almidón gelatinizado (en otras palabras, la gelatinización debe proceder a la gelificación). Si la pasta de almidón se deja enfriar se forman enlaces de hidrogeno intermoleculares entre las moléculas de amilosa. Cuenta con excelente gelificación debido a que tiene una baja viscosidad y es opaca (QuimiNet, 2016).

2.5.2.4. Almidón de maíz utilizado en la investigación

El almidón de maíz que se utilizó en la investigación se consiguió en un centro comercial, la marca del producto es Maizena (Ilustración 13), el porcentaje que se utilizó de almidón es de 2% en adición al cementante.

En investigaciones previas (Jacobo, 2014) se diseñaron mezclas para elaborar concreto con el 2 % de adición con respecto al cementante, se obtuvieron los resultados más favorables con respecto la mezcla testigo, en pruebas como resistencia a la compresión y resistividad eléctrica. En esta investigación se trabajó con mortero para estudiar el comportamiento entre un mortero y un concreto con la misma cantidad de adición.



Ilustración 13. Almidón de maíz utilizado en la investigación, marca Maizena (Fotografía L. Colín).



2.6. Aditivos

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. Se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir ó mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto.

Los aditivos son químicos que se agregan al concreto en la etapa de mezclado para modificar algunas de sus propiedades de la mezcla que nunca deben ser considerados un sustituto de un buen diseño de mezcla, de mano de obra o del usos de buenos materiales(IMCYC, 2016).

2.6.1. Tipos y usos

Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue:

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.



El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, fuerte, durable, estando y resistente al desgaste. Estas calidades se les pueden obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados preferiblemente al uso de aditivos.

Las razones principales para el uso de aditivos son:

1. Reducción del costo de la construcción del concreto.
2. Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
3. Manutención de la calidad del concreto durante las etapas del mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.
4. Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

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.

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).

2.6.2. Aditivo utilizado en la investigación

El aditivo que se utilizó en esta investigación fue el Crisotan R-5, producido por la empresa Christianson, S.A. de C.V., está clasificado como un aditivo plastificante (fluidificante). La presentación que se utilizó es en polvo, tiene un color café oscuro.



3. METODOLOGÍA

3.1. Características y propiedades de los materiales

3.1.1. Cemento

El cemento utilizado para la experimentación fue un CPC 30R RS Tolteca de la marca CEMEX. Sus características se describen a continuación:

El cemento CPC 30R RS Extra está especialmente formulado para reducir la aparición de grietas por contracción plástica en el concreto expuesto a condiciones ambientales extremas, mejorar la consistencia de la mezcla, producir una mezcla más fácil de manejar y evitar el proceso de curado.

Ventajas:

- Reduce la aparición de grietas generadas por contracción plástica que se promueven en condiciones ambientales extremas de alta temperatura y velocidad del viento.
- Le brinda a las mezclas de concreto mayor cohesión, adherencia y trabajabilidad, aún con agregados problemáticos.
- Reduce el riesgo y la segregación de las mezclas de concreto.
- Sustituye el uso de membranas de curado, al promover por sí mismo el proceso de curado, lo que representa ahorros significativos en las obras.

3.1.1.1. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento.

Es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato de Vicat, penetre dentro de la pasta de cemento elaborada con dicha



agua, $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ bajo la superficie libre, durante 30 segundos después de haber iniciado la prueba.

El objetivo es obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con 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.

Procedimiento.

Debido a lo laborioso de la explicación del desarrollo, lo desglosaremos en los siguientes incisos.

- a) Obtención de la muestra representativa de cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.
 1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.
 2. Se fija una cantidad de agua expresada en por ciento. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento), (Ilustración 14).



Ilustración 14. Vertido de agua en el centro del cráter (Fotografía L. Colín).



3. Con la espátula se lleva el material de la orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
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 a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
 - a. 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 (Ilustración 15).



Ilustración 15. Mezclado de la pasta con las manos (Fotografía L. Colín)

- b. 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.



- c. 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).
 - d. 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 embolo se pone en contacto con la superficie de la pasta y se aprieta el tornillo sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial (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).
 7. 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 $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (Ilustración 16), 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 visto hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento).



Ilustración 16. Penetración de la aguja (Fotografía L. Colín)

Referencia.

(NMX-C-057-0NCCE, 2015);(ASTM-C-187-04, 2004).

Se siguió el mismo procedimiento para las diferentes mezclas, agregando la sustitución correspondiente para cada una.

3.1.1.2. Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.

Este ensayo permite la determinación de los tiempos de fraguado inicial y final de la pasta de cemento mediante la penetración de las agujas del aparato de Gillmore. El tiempo de fraguado es una característica de la pasta de cemento en la cual intervienen factores como la cantidad de agua obtenida en la prueba de consistencia normal, de la temperatura y humedad del ambiente. Este ensaye debe ser realizado inmediatamente después de concluir el ensaye de consistencia normal, con la pasta de cemento adicionada con la cantidad óptima de agua.

Definiciones:

Tiempo de fraguado inicial: Es el tiempo que transcurre, a partir del momento de contacto inicial del cemento con el agua, hasta que el mortero obtenido por el



cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 3.4 MPa (35 kgf/cm²).

Tiempo de fraguado final: es el tiempo que transcurre, a partir del momento que el cemento entra contacto con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 27.5 MPa (280 kgf/cm²).

Temperatura y humedad.

La temperatura del laboratorio, material y equipo deben mantenerse entre 20° y 27° C. La del agua de mezclado y la cámara de humedad no varía de 23° C en más de $\pm 2^\circ$ C. la humedad relativa del laboratorio no será inferior a 50.

Preparación de la pasta de cemento.

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

Moldeado del espécimen.

2. 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 aplanado primero la pasta de cemento sobre el vidrio y forme después moviendo la cuchara desde los bordes hacia el centro, aplanado a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo y se deja ahí, salvo cuando vaya efectuarse determinaciones del tiempo de fraguado.

Determinación de los tiempos de fraguado.

3. 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 menos pesada), sin que marque huellas apreciables. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin que marque huella apreciable (ASTM-C-266, 2015).

Recomendaciones.

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



Ilustración 17. Aparato de Guillmore (Fotografía L. Colín)

3.1.1.3. Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.

Para efectos de este ensaye, se entiende por densidad del cemento hidráulico, la relación de la masa de cemento en gramos, entre el volumen en milímetros que desplaza este al introducirse en un líquido, con el cual no efectuó reacción química alguna.

Procedimiento:

1. Se llena el matraz Le Chatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre cero y un mililitro. La parte interior del matraz arriba del nivel del líquido, se debe secar en caso necesario. Se registra la primera



lectura después de haber sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio.

2. Se debe tener la preocupación de que la temperatura del baño sea constante durante la prueba de modo que a variación de la temperatura del líquido en el matraz al momento de tomar la lectura inicial y final, no tenga una variación mayor de 0.2°C.
3. Se pesa aproximadamente 60 g de cementante con una aproximación de 0.05 g y se introduce en pequeñas porciones dentro del matraz.
4. Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.
5. Se coloca el tapón al matraz y se desaloja el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada, o se hace rodar en posición inclinada sobre una superficie plana que conviene cubrir con una material que proteja al matraz de una posible ruptura.
6. La segunda lectura se debe tomar estando el líquido en la parte graduada superior y después de sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura.

Cálculo:

La diferencia entre lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa de cementante empleado en la prueba. Se utiliza la ecuación mostrada a continuación.

$$D = \frac{M}{V} = \frac{60 \text{ g}}{L_f - L_i} \quad (1)$$

Donde:

D = densidad del cementante hidráulico, en g/cm^3 .

M = masa del cementante hidráulico, en g.

V = volumen del líquido desalojado, en cm^3 .

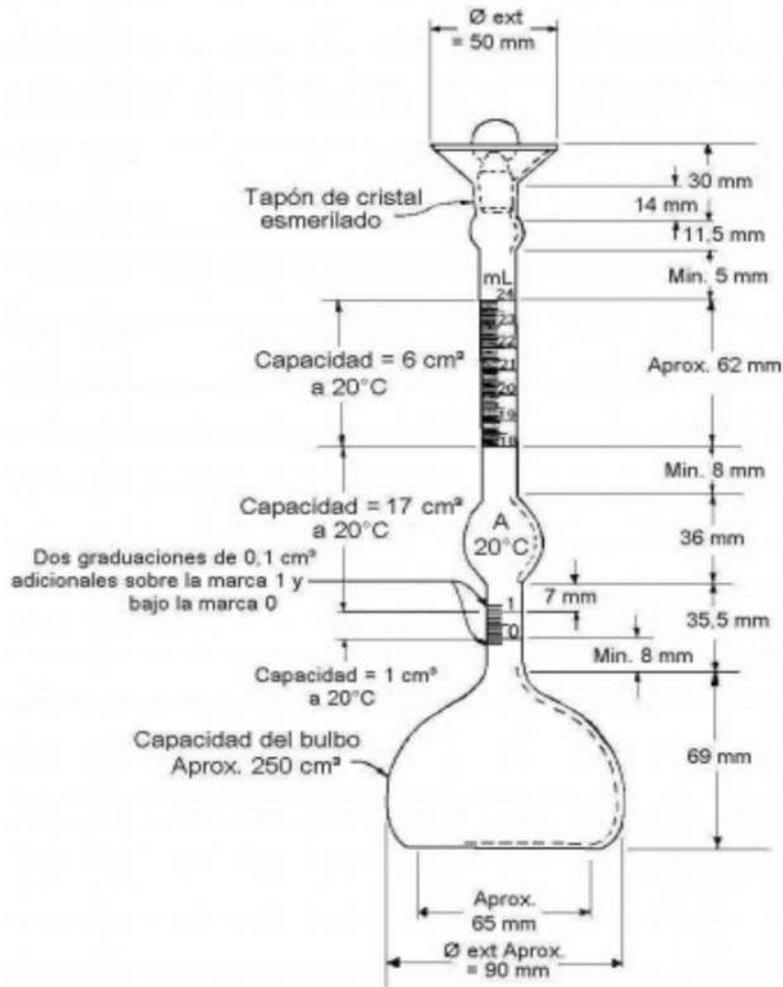


Ilustración 18. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento (Norma I.N.V. E-307-07).

Precisión:

Las pruebas se efectuarán por duplicado para no tener errores de más de 0.01 g/ml.



3.1.2. Arena

En la Tabla 9 se pueden observar las normas, tanto las mexicanas como las internacionales, que rigen a cada prueba que se les realiza a los materiales pétreos, en este caso, a la arena.

Tabla 9. Normas nacionales e internacionales que rigen las prácticas de caracterización del agregado.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	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-ONNCCE	ASTM-C-40-99



Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02

3.1.2.1. Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba (Cuarteo).

El objetivo es obtener una muestra que represente al conjunto total del agregado fino e todas sus propiedades para obtener resultados confiables de los análisis a realiza en la caracterización del agregado. Para que la muestra sea representativa debe elegirse la técnica de muestreo más adecuada.

Procedimiento.

Existen tres procedimientos usuales para efectuar el cuarteo de las muestras.

Método “A”. Cuarteo Mecánico.

- Procedimiento para divisor de muestras.
 1. Se tomó la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vació sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor (Ilustración 19).
 2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.



Ilustración 19. Agregando el material al divisor de muestras mecánico (Fotografía L. Colín).

Método “B”. Cuarteo Manual.

- Procedimiento por cuarteo con palas.
 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 (Ilustración 20).
 2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto (Ilustración 21).
 3. En el último cambio se traslapa la muestra entera dentro de una pila cónica depositando cada palada sobre la punta superior de la pila.
 4. Se aplanar la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala (Ilustración 22).



Ilustración 20. Colocación del agregado en una superficie limpia (Fotografía L. Colín).



Ilustración 21. Homogenización del material (Fotografía L. Colín).



Ilustración 22. Aplanado de la parte superior del material (Fotografía J. Méndez).

5. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con la pala, trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie del material, removiendo y eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona (Ilustración 23).
6. Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.



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



Ilustración 23. División de la muestra en 4 partes iguales (Fotografía J. Méndez).

- Procedimiento con el trozo de plástico.

Cuando el material del piso pueda contaminar la muestra de campo.

1. Se coloca el trozo de plástico sobre la superficie de una mesa, posteriormente se coloca el material en la parte central del plástico.
2. Se levantan los dos extremos opuesto del plástico y se une a continuación, se regresa a la posición original del trozo de plástico. Enseguida se levantan los otros dos extremos opuestos y se unen, posteriormente se regresa a su posición original. Este proceso se repite varias veces hasta obtener una muestra homogénea.
3. Se elimina la mitad del material ya revuelto, para lo cual se lleva el trozo de plástico con el material, hasta el borde de la mesa, de tal manera que la mitad del plástico quede sobre la muestra y la otra mitad en el aire sujeta con una de las manos, cogiendo el extremo que esta sobre la mesa, se suelta el extremo que está en el aire con lo cual se elimina la mitad del material. Este deberá ser recibido en un recipiente.



Cuando se utilice este último método para una mayor cantidad de material se utiliza una lona de aproximadamente 2.0 m x 2.5 m. El procedimiento es el mismo.

Especificaciones.

Las muestras de campo de agregado fino se encuentran superficialmente secas se deben reducir 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 y después deben ser remezcladas.

Referencia.

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

3.1.2.2. Método de prueba estándar para la humedad superficial y humedad de absorción en arenas.

La absorción es la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del mortero, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen adsorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla como su forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez.

Procedimiento de la prueba.

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.



2. Al término de este tiempo, se seca superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico como se describe a continuación.

- Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.
- Para saber cuándo la arena está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, 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 (Ilustración 24). Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse, quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que la arena todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir 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.



Ilustración 24. Secado superficial del agregado con ayuda del cono troncocónico (Fotografía L. Colín).



3. Cuando la arena esta seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrándola como masa saturada y superficialmente seca (Mh).
4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta masa 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 registrar la masa como masa seca del material (Ms), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente.

Cálculos.

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (2)$$

Donde:

Mh = Masa saturada y superficialmente seca. (Gramos).

Ms = Masa seca del material. (Gramos).

Referencia.

(NMX-C-165-ONNCCE, 2014);(ASTM-C-128, 2004).



3.1.2.3. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica suelta).

El objetivo es determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

Procedimiento de la prueba.

1. Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono (Ilustración 25)
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 (Ilustración 25).
3. La masa obtenida anteriormente se le resta la masa del recipiente para obtener la masa de la arena.



Ilustración 25. Llenado y pesado de la muestra en M.V.S.S (Fotografía L. Colín).



Cálculos.

$$MVSS = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Referencia.

(NMX-C-073-ONNCCE, 2014).

3.1.2.4. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa compacta).

El objetivo es obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Procedimiento de la prueba.

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 (Ilustración 26).
2. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.



- Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta la masa del recipiente para así obtener la masa neta del material.



Ilustración 26. Llenado y varillado de MVSV (Fotografía L. Colín)

Cálculos a realizar.

$$MVSV = \frac{M}{V} \quad (4)$$

Dónde:

MVSV= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Referencia.

(NMX-C-073-ONNCCE, 2014).

3.1.2.5. Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos.

La granulometría afecta las porciones relativas del agregado, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del



mortero. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no solo poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del mortero fresco (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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.

Si consideramos el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables; la primera que el módulo de finura es mayor de 3.5 (arena gruesa), lo cual puede generar mezclas muy poco trabajables, poca cohesión entre sus componentes y un consumo mayor de cemento para mejorar su trabajabilidad, lo cual impacta en el costo de producción, la segunda es cuando el módulo de finura es menor a 1.9 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada y una mayor probabilidad de que se generen agrietamientos de tipo contracción por secado.

El módulo de finura es de máxima importancia ya que afecta directamente en la resistencia, en la trabajabilidad de la mezcla, en la cohesión de sus agregados y sobre todo requiere una mayor cantidad de cemento y lo cual impactaría directamente en el costo de producción.

Procedimiento de la prueba.

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta masa constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.



3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa (Ilustración 27).



Ilustración 27. Mallas ordenadas en orden decreciente (Fotografía L. Colín).

5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap) (Ilustración 28).



Ilustración 28. Agitado mecánico (Raf-tap) (Fotografía L. Colín).

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 (Ilustración 29). Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para



desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.



Ilustración 29. Separación de los retenidos en cada malla (Fotografía L. Colín).

7. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error (Ilustración 29).

El registro debe hacerse en una tabla como la siguiente.

Tabla 10. Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MALLA	MASA RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4				
8				
16				
30				



50				
100				
200				
CHAROLA				
SUMA				

1. Se anotan las masas en las respectivas mallas en la columna (1).
2. El retenido de la columna (2) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{suma de la masa retenida}} * 100 \quad (5)$$

3. El % acumulativo se calcula a partir de los datos de la columna (2) como sigue:

$$\% \text{ acumulativo de la malla} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior} \quad (6)$$

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

$$\% \text{ Que pasa de la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla} \quad (7)$$

5. Módulo de finura:

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de malla \#8 hasta \#100}}{100} \quad (8)$$

Recomendaciones y especificaciones.

Para fines de calidad se recomienda que el Modulo de finura este entre 1.9 y 3.5, de acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).



Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation A.S.T.M.

Tabla 11. Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation ASTM

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

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

Graficas de los límites para concreto y morteros

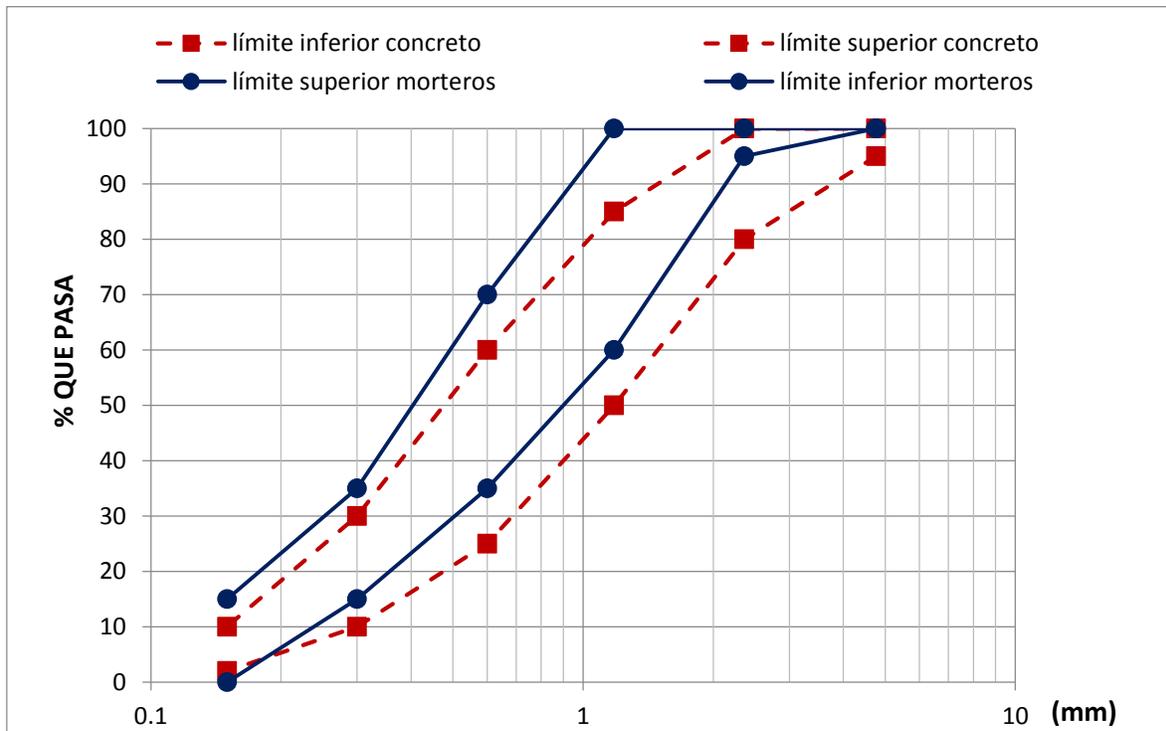


Ilustración 30. Límites de granulometría para morteros y concreto (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).



3.1.2.6. Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino.

En los agregados finos naturales a veces se presentan impurezas orgánicas (debido a su origen o ubicación), las cuales disminuyen la hidratación del cemento y el desarrollo durable del mortero.

El objetivo de este ensaye es determinar si el agregado fino presenta impurezas por la presencia de materia orgánica dañina. Los resultados de este ensaye es un gran parámetro de advertencia al usar este material en conjunto con los ensayes aquí mencionados para la producción de morteros.

Procedimiento de la prueba.

1. 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.
 - 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.
2. 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).
3. Después de 24 horas se comparan los colores.
 - Se toma una muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
 - Se seca hasta masa constante a una temperatura no mayor a 110 ° C.

4. Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 133 cm^3 adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 206 cm^3 .



Ilustración 31. Colorimetría en arenas (Fotografía L. Colín)

5. Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo posteriormente se dejará reposar 24 horas.
6. Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica. Si no se tiene esta, se compara con el color de la solución normal que se haya hecho en la otra botella idéntica.



Ilustración 32. Tabla de colorimetría (Fotografía J. Méndez).



Tabla 12. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004)

Carta Colorimétrica				
1	2	3 (Color Límite)	4	5

Recomendaciones a seguir.

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 y si esta vuelve a dar un color oscuro debemos completar la prueba de colorimetría con un análisis químico.

3.1.2.7. Sedimentación en arenas

El objetivo es determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para reportar si se acepta o no en la elaboración de concreto.

Procedimiento de la prueba.

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca agua hasta la marca de 828 ml. (Ilustración 33).
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 (Ilustración 34).



Ilustración 33. Llenado del recipiente con material y agua hasta las marcas establecidas (Fotografía L. Colín).



Ilustración 34. Se agita el frasco durante dos minutos (Fotografía L. Colín).

3. Se deja reposar el frasco durante 24 horas para determinar el nivel del material fino, esto es que durante el tiempo de reposo el material se va sedimentar y hay que observar si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml (Ilustración 35).



Ilustración 35. Se deja reposar el material duran 24 horas (Fotografía L. Colín).

Reporte.

- 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 reportará que el contenido de material fino es aceptable.

3.1.2.8. Método de prueba estándar para materiales que pasan la malla N°200 en agregados por lavado.

Las arcillas y los limos por su finura en algunas ocasiones se encuentran adheridas a las partículas más grandes del agregado fino. Estas partículas más pequeñas que 75 micras pueden ser separadas de una manera eficiente y por completo mediante el cribado en estado húmedo y comparando con un cribado en estado seco.

Procedimiento de la prueba.

1. Se toma una muestra representativa de 600 gramos de arena, se seca a una temperatura no mayor de 110°C.
2. La muestra seca y fría se coloca en la balanza y se pesa al décimo de gramo (Mi).
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.
6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.



7. Se seca el material completamente, se deja enfriar y se obtiene la masa (Mf).



Ilustración 36. Lavado del material (Fotografía F. López).

Cálculo.

$$\%A = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (9)$$

Dónde:

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

M_i = masa seca inicial, gramos.

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

Recomendaciones y especificaciones a seguir.

Cuando la arena se va a emplear 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 cae fuera de las especificaciones, si económicamente es posible se recomienda lavarla o adoptar una solución que permita quitarle el material fino o desecharla totalmente.



Tabla 13. Materiales finos que pasa por la criba 0.0075 mm (No 200)

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	15.00	5.00 ^(A)
<p>⁽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.</p> <p>^(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.</p>		

3.1.2.9. Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.

El objetivo es conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando se encuentran en abundancia formando parte de la arena.

La arcilla tiene una característica en especial; que en contacto con el agua se expande y en ausencia de ella se contrae, por lo tanto si el agregado fino tiene un alto porcentaje de terrones de arcilla es otro parámetro de advertencia al usar este material en una mezcla.

Procedimiento de la prueba.



1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente un kilogramo, se seca 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 y se anota como M_i pesados al décimo de gramo. En este caso, se utilizaron tres muestras a las cuales se les hizo la prueba y se tomó un promedio.
3. Se colocan los 100 gramos de arena en una charola y se le adiciona agua hasta cubrir la muestra, se deja durante 24 horas.
4. Posteriormente se escurre el agua libre y se extiende la arena en el fondo de una charola para romper, con los dedos, los terrones de arcilla que aún existan.
5. A continuación se hace pasar el material por la malla N° 30, lavándola con mucho agua, el retenido en esta malla se recoge en una charola y se seca totalmente, se deja enfriar y se pesa nuevamente al décimo de gramo anotándose como M_f .
6. Cálculo del porcentaje de terrones de arcilla:

$$\% \text{ terrones} = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (10)$$

Dónde:

% Terrones = porcentaje de terrones de arcilla, en %

M_i = masa inicial del material seco retenido en la malla No. 16, en g.

M_f = masa final del material seco retenido en la malla No. 30, en g.



Especificaciones y recomendaciones a seguir.

Las especificaciones de la ASTM dan 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 está 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-C-142, 1997).

3.1.2.10. Método de prueba estándar para densidad relativa de la arena.

La densidad relativa es la propiedad de los agregados utilizada para calcular el volumen que ocupan los agregados una vez que forman parte de la mezcla de concreto

El objetivo es determinar el 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.

Procedimiento de la prueba.

- Utilizando la probeta.
 1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.
 2. En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial V_i en cm^3 . Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como masa de la arena (M_a) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.



3. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua porque esto no ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua y vamos a registrar este valor como volumen final Vf.

Cálculos a realizar.

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:

$$DA = \frac{Ma}{Vf - Vi} \quad (11)$$

Dónde:

DA = densidad de la arena en gr/cm³.

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

Vf-Vi = volumen colocado dentro de la probeta en cm³.

➤ Utilizando un frasco.

3. Una vez que la muestra del agregado este seco mediante el método descrito en la prueba de absorción.
4. Se introduce agua en el frasco hasta su máxima capacidad y se determina su masa, se registra su valor como B.
5. Se introduce agua al frasco hasta la primera marca (Ilustración 37).
6. Se pesan 500±10 gramos de la muestra superficialmente seca, registrando este valor como S.



7. Con ayuda de un embudo, e introduce la muestra en el frasco y se le adiciona agua hasta la segunda marca.
8. Se agita el frasco con el fin de expulsar el aire atrapado en la muestra.
9. Se determina la masa del frasco con agua y material y se registra como C.



Ilustración 37. Frascos y vidrios utilizados (Fotografía L. Colín).

Cálculos a realizar.

$$Dr = \frac{A}{B + S - C} \quad (12)$$

Donde:

Dr = densidad relativa o gravedad específica, adimensional.

A = masa del material seco en el horno o parilla, en g.

B = Masa del matraz lleno de agua, en g.

S = masa del material superficialmente seco, en g.

C = masa total del matraz más la muestra y el agua, en g.



3.1.2.11. Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos.

El objetivo es 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. Este es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como: sub base, base, carpeta asfáltica y arena para concreto.

El método cuantifica el volumen total de material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominando su proporción volumétrica como equivalente de arena. Las partículas de agregado, con un recubrimiento de arcilla pueden disminuir la adherencia con la pasta de cemento.

La contracción y expansión de estas sustancias causaran agrietamiento perjudicial en el mortero.

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 3.875 litros se colocan $85 \pm 5 \text{ cm}^3$ de la solución de reserva completando con agua destilada hasta el nivel de 3.785 litros.

Procedimiento de la prueba.

Se toma una muestra de material de aproximadamente 500 gramos que pasa la malla N° 4, procurando que no se pierdan finos.



1. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa.



Ilustración 38. Llenado de capsula (Fotografía L. Colín).

2. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de 4 ± 0.1 de pulgada y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material. Déjese reposar 10 ± 1 minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.
3. A continuación se coloca el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo y agítase con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos (Ilustración 39).



Ilustración 39. Se agita el material dentro de la probeta durante 30 segundos (Fotografía L. Colín).



4. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedo 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 lectura de arcilla (Ilustración 40).
5. 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 lectura de arena.

Procedimiento para calcular el equivalente de arena:

$$Eq. de arena = \frac{Lectura de arena}{Lectura de arcilla} * 100 \quad (13)$$



Ilustración 40. Se deja reposar el material en la probeta durante 20 minutos (Fotografía L. Colín).

La prueba se realiza por triplicado y se hace un promedio de los resultados.

Causa de error.

- 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 agua utilizada en la investigación no fue sometida a ninguna prueba, se usó tal cual como llega al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, esto para hacer la experimentación lo más apegado a la realidad.

3.1.4. Aditivo.

El Crisotan R-5 es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras.

Esta acción del Crisotan R-5 sobre el cemento causa que la mezcla de concreto fluya más fácilmente que una mezcla convencional. Este efecto se llama plastificación.

Como superplastificante, el Crisotan R-5 da 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, el Crisotan R-5 no afecta al calor de hidratación del concreto. No contribuye a la corrosión del acero, ni al crecimiento de microorganismos.



Tabla 14. Propiedades típicas del Crisotan R-5

Crisotan R-5	
Apariencia	Polvo fino
% Ingrediente activo	90%
Solubilidad en solución al 10%	Clara

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.

La dosificación del Crisotan R-5 se basa en el contenido de cemento de la mezcla de concreto(Christianson, S.A. de C.V., 2014).

La forma en la cual se utilizó el aditivo fue mezclando el porcentaje requerido en el agua que se utilizó para el colado (cabe mencionar que 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), ahí se dejó reposar durante 30 minutos para después agregar el agua a la mezcla y realizar el colado de los especímenes, se llegó a la conclusión de que el aditivo reaccionaba de diferente manera dependiendo del tiempo que estuviera en contacto con el agua, por eso, en todas las coladas, el aditivo se dejó reposar el mismo tiempo.

3.2. Pruebas realizadas al mortero fresco

3.2.1. Fluidez

El objetivo es determinar el contenido de agua necesaria para que el mortero sea manejable, plástico y dúctil.

Prueba que puede variar de acuerdo al laboratorista que la realice y a la temperatura que exista al momento de la prueba, incluso los resultados pueden



ser variados de un día para otro por diversas circunstancias (Temperatura, agua etc.)



Ilustración 41. Equipo a utilizar en la prueba de fluidez (Fotografía L. Colín).

Procedimiento de la prueba.

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.
4. Se debe de humedecer la parte superior de la mesa, se limpia del material arenoso, y se elimina el exceso de agua con una franela



húmeda (Ilustración 42), todo para poder realizar el ensaye, se centra el molde en la mesa, después se ajusta y se llena, en dos capas que en total den el volumen del molde, se compacta cada una de las capas con 20 golpes (Ilustración 43), las cuales se distribuyen en la sección transversal, teniendo cuidado de no penetrar la capa subyacente, al finalizar se enrasa con una llana el exceso de mortero se retira, limpiando el área de la mesa que se encuentra al molde, el molde se remueve con un tirón firme hacia arriba. La mesa se eleva y se deja caer 1.3 cm, 25 veces durante 15 segundos, haciendo girar la leva a una velocidad uniforme (Ilustración 44), el diámetro del mortero extendido es el promedio de seis medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas al 0.5 cm (Ilustración 45).



Ilustración 42. Humectación de la mesa de fluidez (Fotografía F. López).



Ilustración 43. Compactación de la pasta (Fotografía L. Colín).



Ilustración 44. Expansión de la mezcla de forma manual haciendo girar la leva (Fotografía L. Colín).



Ilustración 45. Toma de mediciones para determinar la fluidez (Fotografía L. Colín).

Cálculos a realizar.

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, ósea:

$$\text{Fluidez (\%)} = \frac{\text{Diámetro extendido} - 25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} * 100 \quad (14)$$

Referencia.

(NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

3.2.2. Elaboración de especímenes.

Según la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), los moldes para la elaboración de los especímenes deben cumplir ciertas características, entre ellas están que los moldes deber ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material que no sea absorbente y que no sea reactivo con el cemento Portland, dichos moldes deben tener las dimensiones que la misma norma nos cita y deben mantenerlas bajo condiciones severas de trabajo, deben ser no permeables durante su empleo y si



es necesario se les puede agregar algún material de sello por la parte externa, tales como grasa, plastilina o parafina. Deben tener los elementos necesarios para la fijación correcta a la base. Si el molde es de uso repetitivo, se le puede agregar algún desmoldante que facilite la extracción del espécimen del molde.

3.2.2.1. Elaboración de cubos

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

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes con un desmoldante, esto con la finalidad de que al día siguiente cuando se descimbraran, el mortero no se adhiriera a las paredes del molde y fuera sencillo el retirarlos del mismo sin que se desmoronaran, para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diesel en una parte más pequeña que el aceite para la mezcla no fuera tan líquida pero tampoco muy viscosa.

Después de que los moldes se engrasaron y que estaba preparada la mezcla para la elaboración de los cubos, es decir una vez que se determinó la fluidez y se verificó que estuviese dentro del rango, se procedió al llenado de los mismos.



Ilustración 46. Llenado de los moldes cúbicos (Fotografía L. Colín).

El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM-C-109 M, I., 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente,

se le dieron 8 golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, lo cual se muestra en la Ilustración 47, el pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5cm x 1.25cm, después del llenado de la última capa, se tenía el cuidado de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula o similar (Ilustración 49).

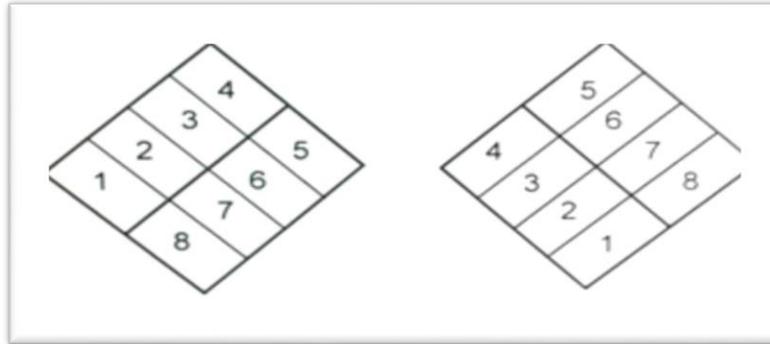


Ilustración 47. Etapas de llenado de los cubos de 5x5x5 cm.



Ilustración 48. Apisonado de las diferentes etapas de llenado (Fotografía L. Colín).



Ilustración 49. Enrasado del cubo (Fotografía L. Colín).

Una vez fabricados el número de cubos correspondientes a las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se dejan fraguar en sus moldes, al transcurso de 24 horas aproximadamente, los cubos se desmoldan



(Ilustración 50). En el caso de la fibra de nopal (FN), se deja fraguar 48 horas ya que actúa como retardante de fraguado.

En la superficie de cada cubo se les puso con ayuda de un marcador indeleble su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura que se le puso a todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue la misma), en dicha nomenclatura llevaba la fecha de elaboración del cubo, la sustitución, el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró y el material de dicha sustitución.



Ilustración 50. Desmoldando cubos (Fotografías J. D. Álvarez).

Una vez realizado lo anterior, se procedió a curar los cubos de mortero (el curado para todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue el mismo) el curado que se dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM-C-515, 2003).

3.2.2.2. Elaboración de prismas.

Los moldes prismáticos para las pruebas de flexión deben ser rectangulares a menos de que se especifiquen de otra forma y de las dimensiones que estipule el método de prueba, además deben cumplir con las características mencionadas en la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), la cual señala que las dimensiones interiores deben ser lisas y libres de imperfecciones, los lados y el fondo deben formar ángulos rectos entre sí. La máxima variación que se permite en cualquiera



de las dimensiones de su sección transversal nominal es de ± 3 mm en moldes de 150 mm o más de profundidad, y de ± 1.5 mm en moldes de menor profundidad. Los moldes no deben variar de la longitud especificada en ± 1.5 mm, excepto para los especímenes por flexión.

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

También se elaboraron prismas (Vigas) de 6cm x 6cm x 26cm, para la prueba de congelamiento y deshielo, se elaboraron de la misma manera que los prismas más pequeños.

Transcurridas 24 horas de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes y se etiquetaron de la misma forma descrita en la elaboración de cubos para iniciar el proceso de curado por inmersión.

3.2.2.3. Elaboración de cilindros.

Los moldes cilíndricos verticales, deben cumplir con las características mencionadas en la norma (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), 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.

Se deben de llenar en 3 capas de igual espesor, en cada capa se varilla con una pequeña varilla que cumpla con lo establecido en la norma, aparte de esa varilla se le adicionan algunos golpes con el mazo hasta que las burbujas de aire atrapadas desaparezcan por completo.



3.2.2.4. Elaboración de briquetas.

Para la elaboración de briquetas se utilizaron moldes de bronce y se siguió el mismo procedimiento que para los demás especímenes, es decir, se limpiaron los moldes, se engrasaron para evitar que el material se adhiriera a las paredes y se procedió a llenarlos.



Ilustración 51. Molde para la elaboración de briquetas (Fotografía L. Colín).

La elaboración de briquetas no tiene una reglamentación por norma, para su elaboración se procedió conforme el manual del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011), el cual consiste en llenar los moldes con mezcla y comprimirla con el dedo índice para después de eso, engrasar con una espátula y retirar el molde para continuar con la elaboración de las briquetas, esto debido a que el molde solo tiene capacidad para tres especímenes.

Como los moldes no tienen una base en la cual quede la mezcla, las briquetas se colocaron sobre una superficie de vidrio, la cual, estaba previamente engrasada para evitar que la mezcla se adhiriera a esta.



Ilustración 52. Superficie sobre la cual se colocan las briquetas (Fotografía L. Colín).



Ilustración 53. Briquetas terminadas (Fotografía F. López).

3.2.3. Curado.

Las normas (NMX-C-148-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-515, 2003), definen 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.

La remoción de los moldes debe efectuarse en no menos de 20 horas, ni después de 48, luego de 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.

Todos los especímenes fueron curados sumergiéndolos en agua dentro de botes de plástico, a la cual se le monitoreo la temperatura para poder cumplir con la normatividad.



Ilustración 54. Curado de especímenes (Fotografía L. Colín).



3.3. Pruebas realizadas al mortero endurecido.

Las pruebas realizadas al mortero se pueden clasificar en:

- ❖ Físico-Mecánicas
 - Destructivas
 - No destructivas

- ❖ Por durabilidad

3.3.1. Pruebas no destructivas.

Una definición general de prueba no destructiva es una revisión, prueba, o evaluación realizada en algún tipo de objeto sin cambiar o alterar dicho objeto en alguna forma, para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener un efecto en la utilidad del objeto, el cual pueda ser dañino. Las pruebas no destructivas también pueden realizarse para medir otras características de prueba del objeto como tamaño, dimensión, configuración, estructura, incluyendo contenido de aleación, dureza, tamaño de grano, etc. (Charles, 2001).

La ventaja de algunas de estas pruebas es que se pueden realizar *“in situ”*, sin necesidad de tener que elaborar una probeta para su traslado al sitio de prueba.

3.3.1.1. Método de prueba estándar para la velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

Esta prueba no destructiva tiene como principales objetivos los siguientes:

- Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) en este caso del mortero.
- Detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones.
- Monitorear las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.



La velocidad de pulso ultrasónico 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).

Para poder comenzar con las pruebas se obtuvieron las masas y dimensiones de los especímenes.

La normativa (ASTM-C-597, 2009), rige la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, ilustración 61-a; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie de prueba y para tal fin se emplea un gel, (Ilustración 55).

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



Ilustración 55. Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Fotografía L. Colín).

De acuerdo con (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000), se establece los criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico y así determinar la calidad del mortero de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación (Tabla 15).

Tabla 15. Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).

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

3.3.1.2. Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es 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 mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las



adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras.

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cúbicos y prismáticos, los especímenes se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012) (Ilustración 56).

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:

Cubos: lado 1, lado2 y espesor.

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



Ilustración 56. Equipo utilizado en la determinación de resistividad eléctrica (Fotografía L. Colín).

2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas.



5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

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

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente fórmula (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (15)$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en K Ω -cm (ohm-m)

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

A = Área transversal del espécimen en cm²

L = Longitud del espécimen en cm



Ilustración 57. Especimen prismático para tomar la resistividad eléctrica (Fotografía L. Colín).

Especificaciones



Tabla 16. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000)

Resistividad Eléctrica (kΩ-cm)	Riesgo de Corrosión
< 10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo

3.3.1.3. Porosidad total

La porosidad es uno de los principales factores que determinan la durabilidad del concreto y el 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. También se explicó que la porosidad depende de la relación agua/cementante y del grado de hidratación del cementante.

Para la determinación de la porosidad total se utilizó un método de gravedad(Gouygou, Lafhaj, & Soltani, 2009). El cual consiste en saturar una muestra de mortero bajo vacío. Una vez que está completamente saturada, es pesado con precisión centígramo y su volumen está determinado por el peso hidrostático. Entonces, la muestra es secada al horno a una temperatura de $60\pm 2^{\circ}\text{C}$. El secado se detiene cuando la masa de la muestra permanece constante, que es cuando la variación entre dos ponderaciones sucesivas es menor de 0.05%. La porosidad se determina como:

$$\% \text{ de Porosidad Total} = \left(\frac{M_{sat} - M_{seco}}{M_{sat} - M_{sumergido}} \right) \times 100 \quad (16)$$

Dónde:

M_{sat} es la masa de la muestra completamente saturado, gramos

M_{seco} la masa de la muestra seca, gramos

$M_{sumergido}$ masa de la muestra sumergida, gramos.



Es preciso mencionar que en la presente investigación no se siguió el procedimiento como lo dicta el método. Por cuestiones de tiempo y volumen de especímenes a analizar, se decidió utilizar las muestras saturadas bajo inmersión a presión atmosférica, es decir, dado que las muestras estuvieron en agua de curado desde su elaboración hasta el momento de la prueba se asumió que estaban completamente saturadas. Y el secado se realizó en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.

También se puede seguir el siguiente método:

PROCEDIMIENTO

- Se secan las muestras superficialmente con una franela y se determina su masa superficial seca (M_{ss} = Masa superficialmente seca).
- Se adapta una canastilla a la balanza y se sumerge en agua para determinar su masa.
- Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla.
- Se determina la masa sumergida del espécimen (M_a = Masa sumergida).
- Se secan las muestras en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
- Se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa seca con ayuda de una balanza (M_s =Masa seca).
- Se colocan las muestras en un recipiente adecuado, se le agrega agua hasta cubrir totalmente la muestra y posteriormente mantener en ebullición durante 5 horas, cuidando que el espécimen se mantenga sumergido en su totalidad durante todo el tiempo.



- Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla. Se determina la masa sumergida del espécimen ($Maebu = \text{Masa sumergida por ebullición}$).

CÁLCULOS

Masa especifica seca

$$\frac{Ms}{Mss - Maebu} = g1 \quad (17)$$

Masa especifica después de la inmersión

$$\frac{Ma}{Mss - Maebu} \quad (18)$$

Masa especifica después de la ebullición

$$\frac{Mss}{Mss - Maebu} \quad (19)$$

Masa especifica aparente

$$\frac{Ms}{Ms - Maebu} = g2 \quad (20)$$

Porcentaje de volumen de poros permeables (vacíos)

$$\frac{g2-g1}{g2} \times 100 \text{ ó bien } \frac{Mss-Ms}{Mss-Maebu} \times 100 \quad (21)$$

Criterios de evaluación de acuerdo al porcentaje de porosidad total:

Tabla 17. Criterios de evaluación para % de porosidad ((RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).

% De porosidad	Calidad del mortero
< 10%	Buena calidad y compacidad
10% - 15%	Moderada calidad
>15%	Durabilidad inadecuada



3.3.2. Pruebas destructivas

Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, esta capacidad depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado así como de la integración que se genere entre ellos.

Los especímenes elaborados son sometidos a varias pruebas, las cuales definirán la resistencia que el mortero tiene ante ciertos esfuerzos, para asemejar a lo que pasa en la vida real.

3.3.2.1. Resistencia a Compresión.

La prueba se le realiza a especímenes cúbicos de 5 cm por lado utilizando una prensa hidráulica. Se le realizó a 5 especímenes de cada mezcla a diferentes edades, las edades fueron 14, 28, 45 y 90 días. Se tomó un promedio de los resultados de los 5 cubos el cual se tomó como resistencia a la compresión simple de dicha mezcla, la prueba se le realizó a 5 especímenes de cada mezcla es decir a 5 cubos de almidón, 5 cubos de fibra de nopal y 5 cubos testigo.

- 1) Una vez que las muestras hayan cumplido la edad correspondiente, se sacan del lugar en donde han llevado el proceso de curado.
- 2) Se seca cada espécimen hasta que su superficie quede superficialmente seca.
- 3) Se miden las dimensiones de cada cubo para así calcular su área que servirá para el cálculo de esfuerzo (cabe mencionar que a todos los especímenes, previo a realizar esta prueba, se les realizó todas las pruebas no destructivas, por lo que los cubos ya estaban marcados en la cara por la cual serían probados).
- 4) Se llevan las muestras a la prensa hidráulica, se coloca el cubo sobre la base y al centro de la platina con la finalidad de que la carga se distribuya sobre toda el área del cubo. (Ilustración 58).



Ilustración 58. Colocación del espécimen cubico sobre la base de la prensa hidráulica y al centro de la platina (Fotografía L. Colín).

- 5) Se comienza a aplicar la carga a una velocidad constante esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del cubo registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen.



Ilustración 59. Falla de la muestra sometida a compresión simple (Fotografía L. Colín).

- 6) La carga máxima que soporta el espécimen cubico se sabe cuándo la carga registrada en la pantalla es la misma o empieza a bajar y el cubo presenta falla considerables en alguna de sus caras. (Ilustración 59).
- 7) La prueba se realiza a 5 especímenes para obtener un promedio y un mejor resultado del comportamiento físico-mecánico de los especímenes.

Cálculos.



$$R = \frac{W}{A} \quad (22)$$

Donde:

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

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

A = Área de la muestra, en cm².

Tabla de registro.

Tabla 18. Tabla de registro para resistencia compresión simple

No. de espécimen	Lado 1 cm	Lado 2 cm	Área cm ²	Carga kg	Resistencia Kgf/cm ²

Referencia.

(NMX-C-083-ONNCCE, 2014).

3.3.2.2. Resistencia a flexión

Los especímenes deben cumplir con lo establecido en la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

De acuerdo a lo establecido en la norma mexicana (NMX-C-191-ONNCCE, 2015) la longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de ± 2 %. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes hendiduras, etc.



- 1) Se midió y marcó el prisma a 2 centímetros de cada extremo, también se marcó con una línea el centro del claro del prisma el cual fue donde se le aplicó la carga (Ilustración 60).
- 2) Se colocaron en los soportes adecuados para esta prueba y se colocan los apoyos con cinta para evitar que se muevan durante la prueba.



Ilustración 60. Obtención de las medidas del prisma (Fotografía L. Colín)

- 3) Se aplicó carga sin impacto y a una velocidad constante hasta que el espécimen falle. (Ilustración 61).
- 4) Se registra la carga obtenida, se realizó la a 5 especímenes.



Ilustración 61. Falla a flexión en prismas (Fotografía L. Colín)



Cálculos.

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

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad (23)$$

Donde:

MR = Módulo de ruptura, en kPa (kgf/cm²).

P = Carga máxima aplicada, en N (kgf).

L = Distancia entre apoyos, en cm.

b = Ancho promedio del espécimen, en cm.

d = Peralte promedio del espécimen, en cm.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en liornas del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará:

$$R = \frac{Pa}{bd^2} \quad (24)$$

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm².

P = Carga de ruptura en kg.

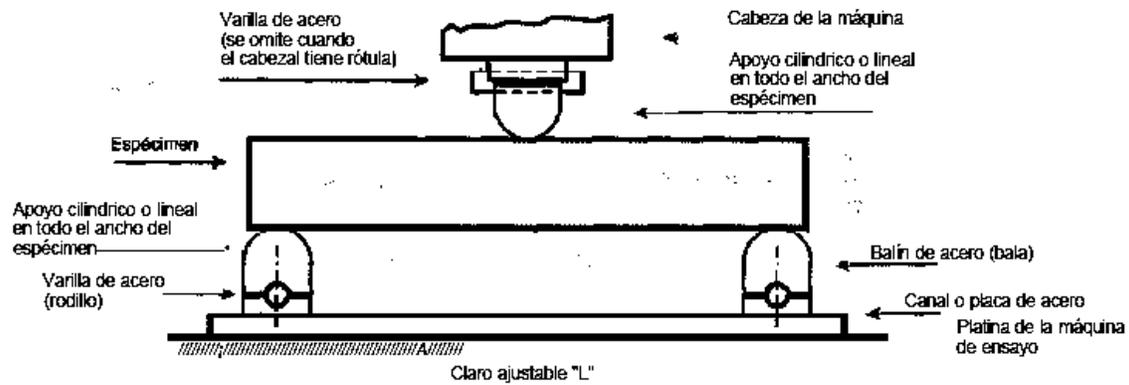
L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

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

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



La presente figura es ilustrativa

Ilustración 62. Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.

3.3.2.3. Resistencia a la tensión indirecta

El objetivo es conocer el procedimiento para determinar la resistencia a la tensión indirecta de cilindros de concreto y/o mortero.

- 1) Marcado de los especímenes. En cada extremo de los especímenes se trazan líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure estén en el mismo plano axial.
- 2) Se toman las dimensiones del diámetro promediando las medidas dos cerca de los extremos y una al centro siguiendo el plano de los diámetros marcados en los extremos. La longitud se obtiene promediando las dos medidas de las líneas que unen los extremos de cada línea que marca el diámetro en las dos caras del espécimen.
- 3) Se colocó una de las tiras de cuero a lo largo del centro de la placa de apoyo inferior. El espécimen se coloca sobre la tira de cuero y se acomoda de tal modo que las líneas marcadas en sus dos extremos sean verticales y queden concentradas sobre la tira se coloca longitudinalmente la segunda tira de cuero sobre el cilindro,



concentrándola sobre las líneas marcadas sobre las líneas en los extremos del mismo. 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 suplementaria cuando se use y el centro del espécimen esté directamente debajo del centro de la placa con apoyo esférico.
- 4) Aplicación de carga. La carga se aplica continuamente y sin impacto a una velocidad uniforme debe de anotarse la carga máxima aplicada que indique la máquina de ensaye en la falla, el tipo de falla y la apariencia del mortero.



Ilustración 63. Prueba de tensión indirecta (Fotografía L. Colín)



Ilustración 64. Falla de espécimen por tensión indirecta (Fotografía L. Colín)



Ilustración 65. Vista de la matriz del cilindro después de la prueba de tensión indirecta (Fotografía L. Colín).

Cálculos a realizar.

La resistencia a la tensión indirecta del espécimen se calcula con:

$$T = \frac{2P}{dL\pi} \quad (25)$$

Dónde:

T = resistencia a tensión indirecta en kg/cm².

P = carga aplicada máxima en kg.

L = longitud en cm.

d = diámetro en cm.

3.3.2.4. Resistencia tensión directa.

El objetivo es determinar la resistencia a la tensión en un mortero.

Para la determinación de la resistencia a tensión en briquetas se utilizó la máquina de prueba para tensión directa en morteros tipo Michaellis (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

- 1) En la fecha señalada se sacan las muestras y se seca superficialmente.
- 2) Se toman las medidas de la sección media (S_m) de la briqueta y se anotan para calcular el área de la briqueta.
- 3) Se lleva a la máquina la cual se nivela previamente.
- 4) Se aplica la carga lentamente por medio de municiones hasta la falla de la muestra, las municiones son colocadas en la tolva de la máquina.



Ilustración 66. Colocación de las municiones en la tolva de la máquina (Fotografía L. Colín)

- 5) Después de la falla de la muestra se retiran las municiones pesándolas al décimo de gramo. La masa de las municiones (M_m) es considerado como la carga que soportó la sección media de la briqueta.

Nota: Como las municiones no fueron suficientes para que las briquetas fallaran, se colocaron discos de acero, 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.



Ilustración 67. Falla de briqueta por prueba de tensión directa (Fotografía L. Colín)

Cálculos a realizar.

$$R = \frac{Mm * 50}{Sm} \quad (26)$$

Dónde:

R = resistencia a la tensión en kgf/cm².

Mm = Masa de las municiones o carga de ruptura en Kg.

Sm = Sección media de la briqueta en cm².

50 = constante de la máquina.

3.3.3. Pruebas por durabilidad

La durabilidad del mortero se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los agentes químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un mortero durable es aquel que puede resistir en forma satisfactoria las condiciones de servicio a que estará sujeto.



Es indispensable que el mortero resista, sin deteriorarse con el tiempo, las condiciones 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).

3.3.3.1. Efecto a ciclos de congelamiento y deshielo

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 es previniendo la perdida de calor, utilizando mayores contenidos de cemento, 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 cementicias, surge así la primera 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 congelamientos son inferiores a 0°C y los cristales de hielo no se forman simultáneamente en todo el volumen, como dato practico 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.

En distintas experiencias de laboratorio se ha demostrado que ese nivel crítico es de aproximadamente el 92% para morteros.

Procedimiento:

1. Dos días antes se prepara el refrigerador industrial que se utilizara para la prueba, se monitorea la tempera para que cumpla a -18°C
2. Se sacan los especímenes de curado, se enumeran, se pesan (Ilustración 68), se toman sus medidas y se registran en la bitácora, además se les hacen las pruebas de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia y resonancia.
3. Se introducen en un recipiente los tres especímenes y se llena con agua hasta tener un tirante de 2 cm por encima del espécimen.
4. Se introduce el recipiente al refrigerador durante 4 horas, transcurrido este tiempo se sacan los especímenes del refrigerador y se toma su temperatura, se tomaran de nuevo sus medidas (Ilustración 69), se obtiene



su masa, se les realiza resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia y resonancia y estos valores se registran como el ciclo uno.



Ilustración 68. Obtención de la masa del espécimen al inicio de la prueba de congelamiento y deshielo (Fotografía L. Colín).

5. Después de realizarle las pruebas se vuelven a introducir en el recipiente y toma su temperatura, se introducen en el refrigerador nuevamente durante 4 horas.
6. Se sigue el mismo procedimiento durante 15 ciclos.



Ilustración 69. Medición de las caras del espécimen después del primer ciclo (Fotografías L. Colín)



7. Si en algunos de los ciclos los recipientes tienen mucho hielo hay que retirarlo y llenarlo de agua.
8. Después de los 15 ciclos sometidos a congelamiento y deshielo se procede a hacerle la prueba de flexión para conocer el efecto en cuanto a su resistencia.



Ilustración 70. Prueba a flexión después del 15° ciclo de congelamiento y deshielo (Fotografía L. Colín)

3.3.3.2. Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Las sales en estado sólido no atacan al mortero, pero cuando se encuentran en solución puede reaccionar con la pasta del mortero endurecido. Algunas arcillas contienen, por ejemplo álcalis y sulfatos de calcio y de magnesio, y las aguas freáticas con este tipo de arcilla son una solución de sulfatos. Por lo tanto puede haber un ataque a la matriz de cemento, al reaccionar el sulfato con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y con el C_3A . 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).



Procedimiento:

1. Como primer paso debe realizarse una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) con una concentración de 350 g de sulfato por cada litro de agua destilada. La cantidad debe ser suficiente para llevar a cabo 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes. En la experimentación se preparan 20 litros de solución. El proceso de preparación de la solución consiste en disolver el sulfato en el agua a una temperatura no mayor a 40°C y mezclar dicha solución por un tiempo mínimo de 1 hora. Se debe evitar que quede polvo al final del proceso o material contaminante en el recipiente del mismo.
2. Los especímenes deberán de secarse hasta masa constante antes de iniciar la prueba. Para esto se utilizaron cubos de 5x5, los cuales fueron secados a una temperatura de 50°C hasta masa constante.
3. Se pesan los especímenes para obtener la masa seca o masa inicial de cada uno y se prepara 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, estos deberán ir apoyados sobre una rejilla que evite su reposo directo sobre el fondo del recipiente y asegure el contacto con la solución en todas sus caras, por lo que deben estar separados 2 cm entre sí.
4. Los especímenes deberán de permanecer 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 sacan y se dejan escurrir durante 15 minutos para después hacerle pruebas físico-mecánicas a 3 cubos, las cuales



incluyen: Resistividad Eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Gravedad específica, Densidad y compresión.



Ilustración 71. Especimen fracturado después del cuarto ciclo de sulfatos (Fotografía L. Colín)

6. después colocarlos en un horno previamente calentado a una temperatura constante de 50°C hasta conseguir masa constante nuevamente.
7. Pasado el tiempo de secado se sacan las muestras del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener masa seca.
8. Se ensayan las muestras a compresión y se comparan con los resultados de aquellas muestras que no se hallan sometido a los ciclos de humedecimiento y secado. Cada uno de los pasos del 3 al 6 se repiten hasta completar 5 ciclos de prueba.

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.



Ilustración 72. Afectaciones en el cubo de mortero en el quinto ciclo de la prueba de sulfatos (Fotografía L. Colín).

Después de la prueba muchos especímenes sufren afectaciones en las caras superiores después de varios ciclos a sulfatos (Ilustración 72).

3.3.3.3. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros.

La prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido utilizada 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.

Determina la resistividad que presenta el mortero al paso del ion cloruro en tan solo 6 horas, al inducir un voltaje que polariza dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruros a penetrar en el mortero.

El ataque por cloruros al mortero 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).

Objetivo:

Consiste en determinar la calidad del concreto al estar expuesto al ataque de iones cloruro, caso que se puede presentar en estructuras que se encuentran en zonas costeras.

Procedimiento:

Preparación de los especímenes:

1. Se hierve la cantidad de agua necesaria para la prueba, durante 15 minutos con el objetivo que esté libre de aire. Se procede a dejarla enfriar y colocarla a un lado del desecador.
2. Se extrae un espécimen de la pila de curado y se cortan los extremos de éste, se marca con ayuda de un flexómetro una distancia de 5 cm desde la orilla del espécimen, para obtener especímenes con dimensiones de 10 cm de diámetro y 5 de espesor.
3. Los especímenes se proceden a poner dentro del desecador, pudiendo poner un máximo de 6 especímenes dentro del desecador.
4. Se limpia el sello o empaque del desecador y se procede a humedecerlo completamente con vaselina. Se le coloca la tapa al desecador, en seguida se conecta una manguera con un extremo conectado a una bomba de vacío y el otro a una de las válvulas del desecador.
5. Se pone a funcionar la bomba de vacío y se abre la válvula del desecador, manteniendo el vacío durante 3 horas, se cierra la válvula y se apaga la bomba de vacío.



6. Conectando una segunda manguera a la válvula opuesta del desecador y colocando el otro extremo de la manguera dentro del recipiente que contiene el agua libre de aire. Se procede a abrir la válvula, lo que generará que el agua fluya hacia el desecador (por el vacío generado dentro del desecador) hasta cubrir totalmente las muestras, dejando un tirante de agua por encima de ellas. Esto se hace sin permitir que entre aire al desecador.
7. Se revisa que estén cerradas ambas válvulas antes de prender la bomba, con el motivo de que no absorba agua la bomba de vacío. Se abre la válvula de la manguera que está conectada a la bomba para generar vacío por una hora.
8. Se desconecta la bomba y se quitan las mangueras, para inmediatamente después abrir una de las válvulas lentamente para que entre aire al desecador. Dejando los especímenes dentro del desecador durante 18 horas.

Colocación de los especímenes en las celdas:

9. Después de preparar las dos soluciones: 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. Y transcurridas las 18 horas se extraen las muestras del desecador para colocarlas en las celdas de cloruros, colocando los empaques en los bordos del espécimen recubiertos con vaselina, para que no haya desprendimiento de sustancias al momento de probarlas. Las celdas se sujetan con tornillos que están en las cuatro orillas para confinar el espécimen.
10. En cada extremo las celdas tienen un orificio para colocar en cada uno la solución que marca.



11. Con ayuda de un embudo, para no derramar líquido, se llenan completamente las celdas. Se conectan las terminales (positivo y negativo) a la fuente de carga, además, de conectar un cable que servirá como medidor de temperatura, en donde está contenido el Hidróxido de Sodio (NaOH).
12. Se conecta la fuente de carga y se pone a trabajar, posteriormente se inicia el programa en la computadora para tomar las medidas de cada espécimen.
13. El proceso requiere de 6 horas para llevarse a cabo y será hasta transcurrido ese tiempo cuando se apague el programa y se desconecte la fuente de carga.

Tabla 19. Tipos de permeabilidad de acuerdo a ASTM C 1202.

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



4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización del agregado fino:

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la arena mediante las diferentes pruebas de laboratorio.

Tabla 20. Resultados de la caracterización de la arena

Prueba	Arena de Tlalpujahuá
Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)	5 %
Humedad de Absorción (NMX-C-165-ONNCCE, 2004)	5.18 %
M.V.S.S.(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.52 (gr/cm ³)
M.V.S.V.(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.57 (gr/cm ³)
Sedimentos	Aceptable (<30ml)
Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)	Escala 3 (aceptable)
Contenido de material fino (pasa malla ASTM No 200) (NMX-C-084-ONNCCE, 2006) (5% Max)	14.5 %
Contenido de Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)	4 %
Densidad (g/cm ³) (2.15 Aceptable)	2.33
Módulo de Finura (<2.3-3.1>)	2.7 (mediana)
Gravedad Específica	2.33

La distribución granulométrica se presenta en la Ilustración 73 junto con los límites superior e inferior establecido por la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

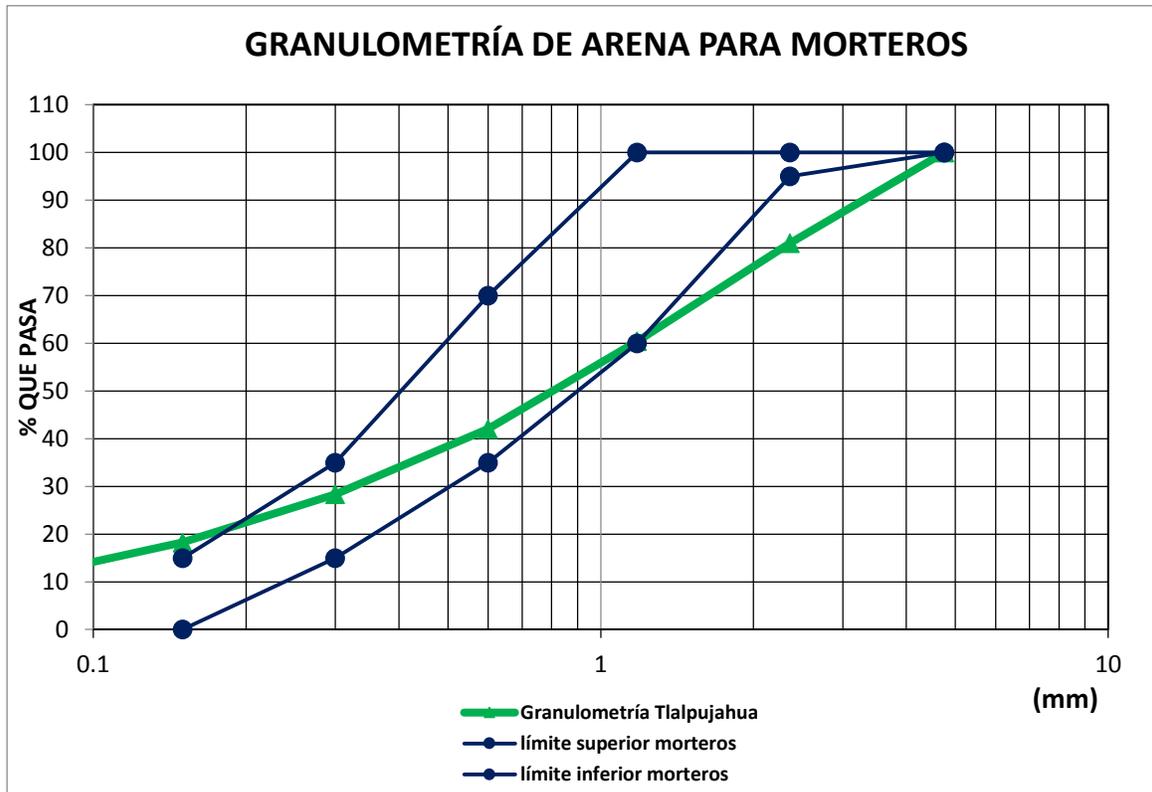


Ilustración 73. Distribución granulométrica de arena de Tlalpujahuá y límites inferior y superior (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

Como se puede observar en la Ilustración 73 la arena en estudio no cumple con los límites de granulometría para mortero de acuerdo a lo establecido por la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

4.2. Pruebas realizadas al mortero fresco

4.2.1. Fluidiez

Tabla 21. Resultados de la prueba de fluidiez para cada adición

MEZCLA	Cemento (g)	FN (g)	MZ (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluidiez (%)
Testigo	163.6	0	0	450	125.9	0.77	0.3	110
FN 2%	163.6	20	0	450	129.72	0.77	0.74	106
MZ 2%	163.6	0	20	450	128.49	0.77	0.4	100



En la tabla 21 se registran los valores del diseño de la mezcla de acuerdo al parámetro de fluidez, debido a que el agregado fino es muy fino la cantidad de agua utilizada fue alta y por tanto la relación a/c es alta en comparación con otras investigaciones, se diseñó con la misma relación a/c y se amplió el rango de fluidez de 110 ± 10 %.

La adición de fibra de nopal en un 2% necesita una mayor cantidad de agua para cumplir con la fluidez por lo que se optó por usar un aditivo en todas las mezclas para poder compararlas, siendo la fibra de nopal la mezcla en que se usó la máxima cantidad de aditivo superplastificante.

4.3. Pruebas realizadas al mortero endurecido

4.3.1. Pruebas no destructivas

4.3.1.1. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

En las Ilustraciones 74, 75, 76 y 77 se presentan los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en 4 edades. El almidón de maíz es la adición que presenta mejores resultados, superiores a los de la mezcla testigo y de la mezcla con fibra de nopal. De acuerdo a los criterios de durabilidad para concreto, los resultados se encuentran en una alta calidad del mortero (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000). Los mejores resultados se presentan a la edad de 90 días donde la adición de almidón de maíz tiene 3785.6 m/s, mientras la mezcla testigo registra 3766.26 m/s y la fibra de nopal se encuentra por debajo de las dos mezclas anteriores al registrar un valor de 3668.25 m/s.

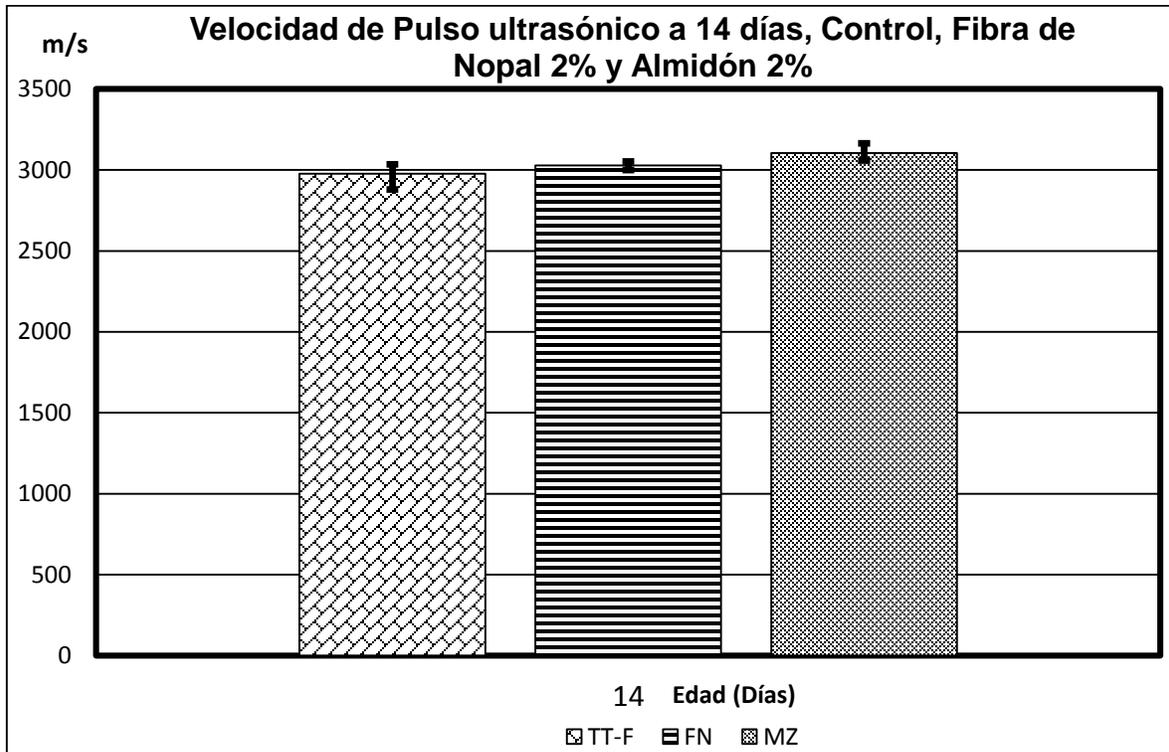


Ilustración 74. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 14 días

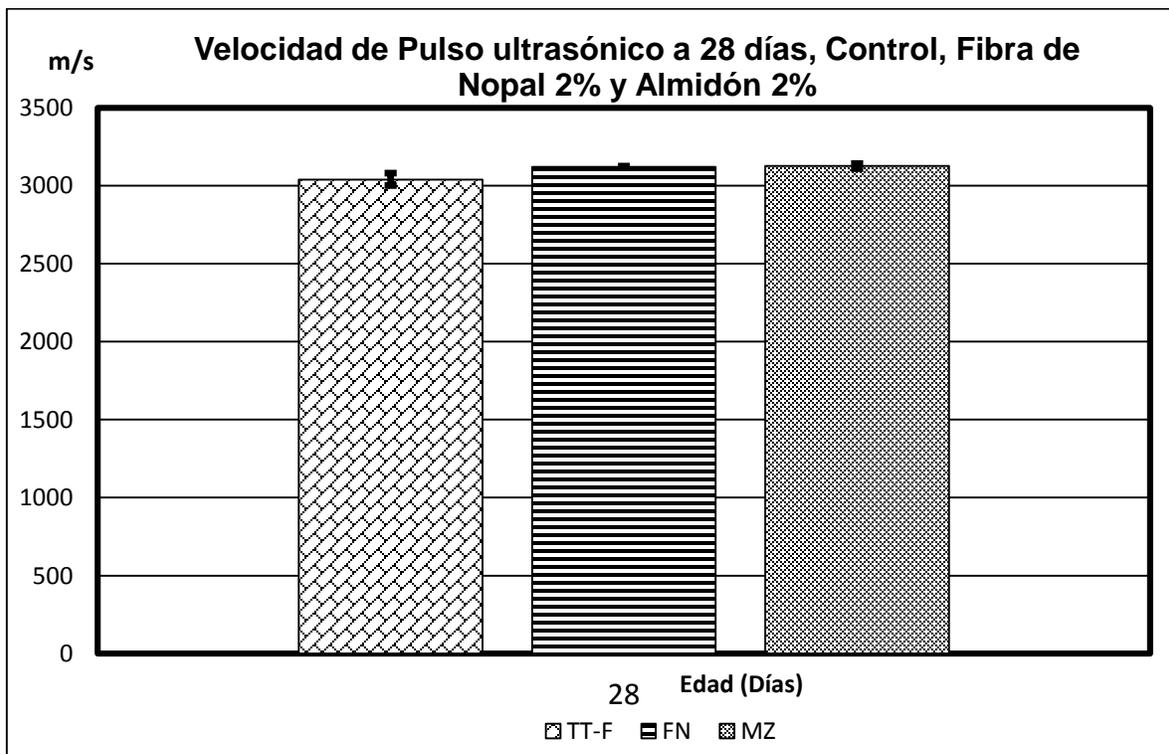


Ilustración 75. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 28 días

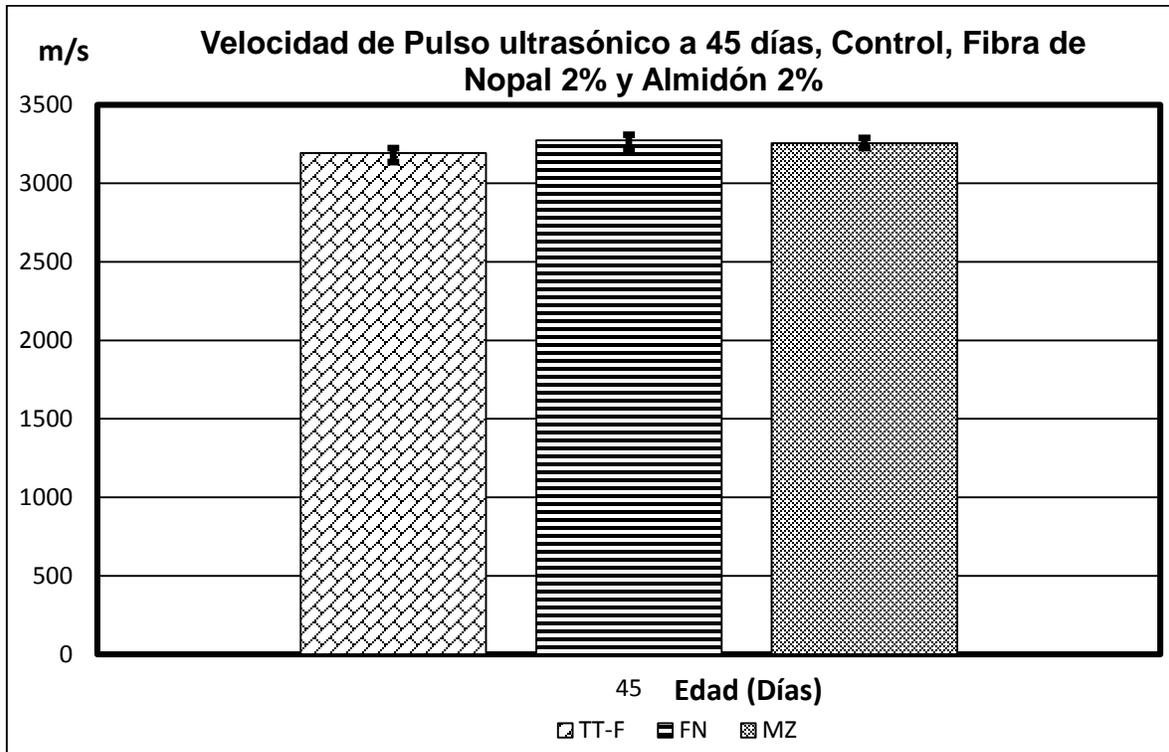


Ilustración 76. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 45 días

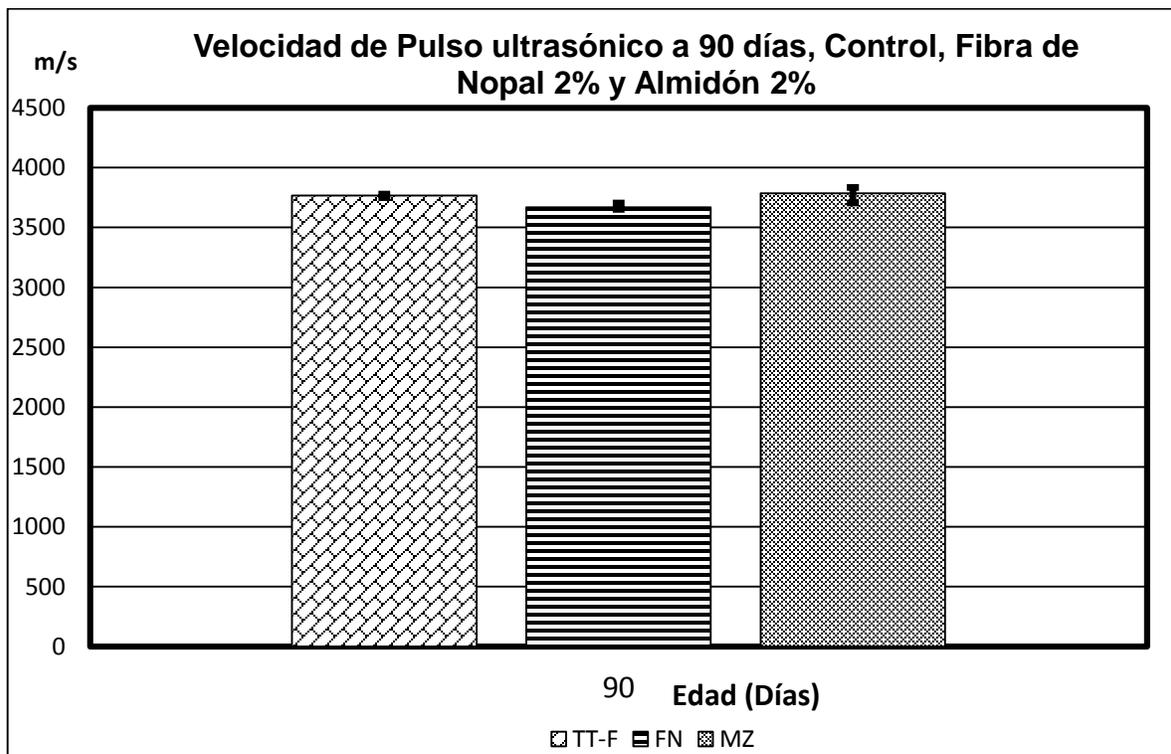


Ilustración 77. Velocidad de Pulso Ultrasónico a 90 días.



4.3.1.2. Resistividad eléctrica

En la prueba de resistividad eléctrica, el testigo presenta mejores resultados a la edad de 14 días (Ilustración 78), con valores registrados de 3.76 k Ω -cm, mientras que las adiciones registran valores de 3.39 k Ω -cm respectivamente, conforme la edad de prueba va aumentando los valores siguen incrementándose, en 28 y 45 días la mezcla de fibra de nopal obtiene valores de 5.39 y 7.47 k Ω -cm respectivamente por encima del testigo y del almidón de maíz los cuales registran valores de 4.65 y 6.68 k Ω -cm (Ilustración 79, 80).

Es hasta la edad de 90 días (Ilustración 81) donde el almidón de maíz presenta su mejor resultado al obtener 11.23 k Ω -cm, el testigo 9.40 k Ω -cm y la fibra de nopal 8.36 k Ω -cm, esto puede atribuirse a que el almidón de maíz tarda en cubrir por completo los pequeños poros gracias a que sus partículas son más finas que la fibra de nopal.

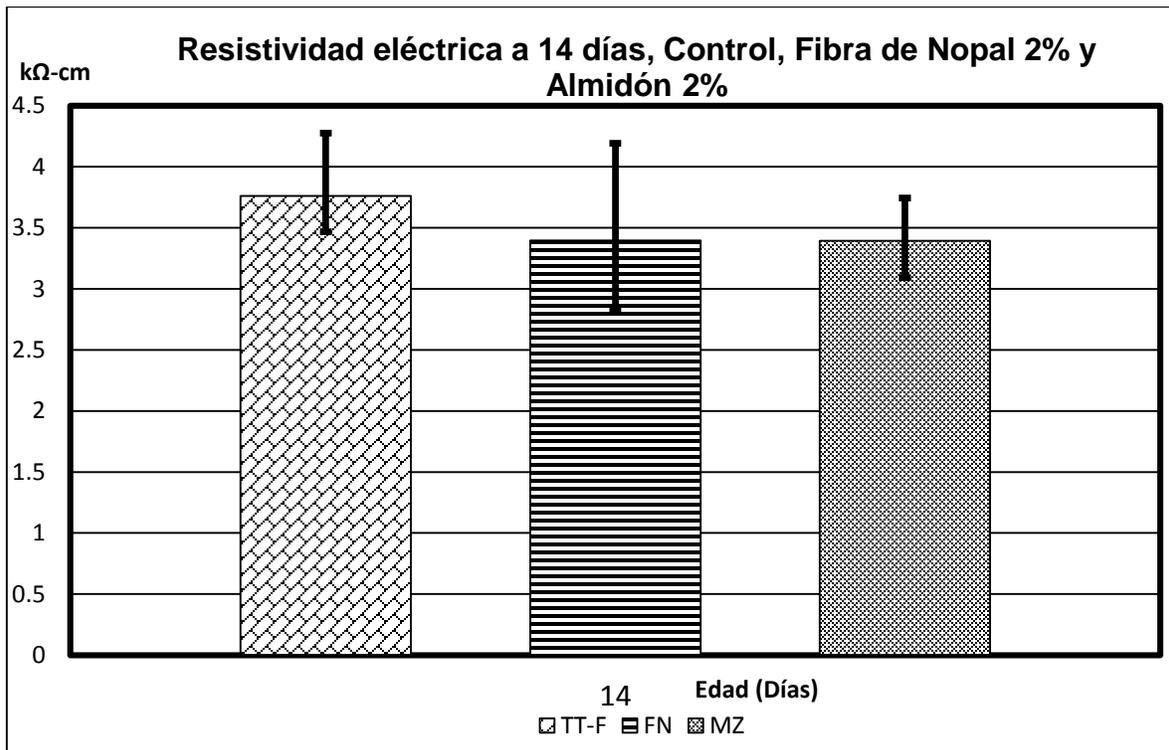


Ilustración 78. Resistividad Eléctrica a 14 días

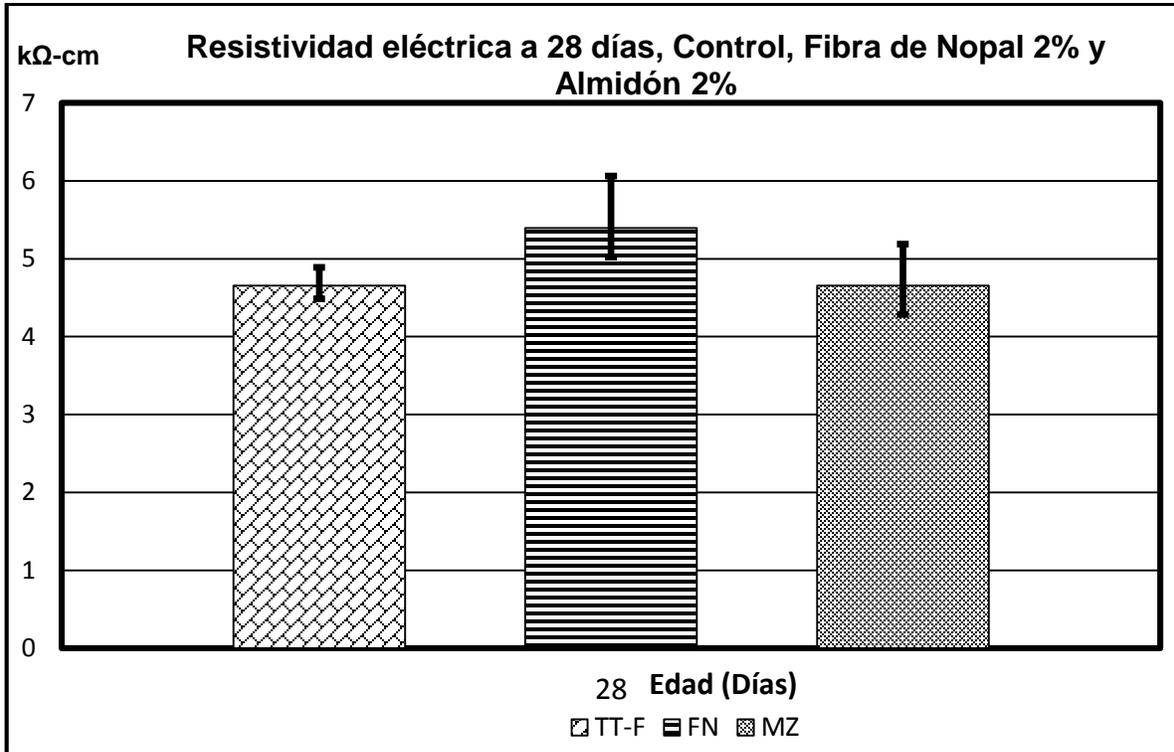


Ilustración 79. Resistividad eléctrica a 28 días

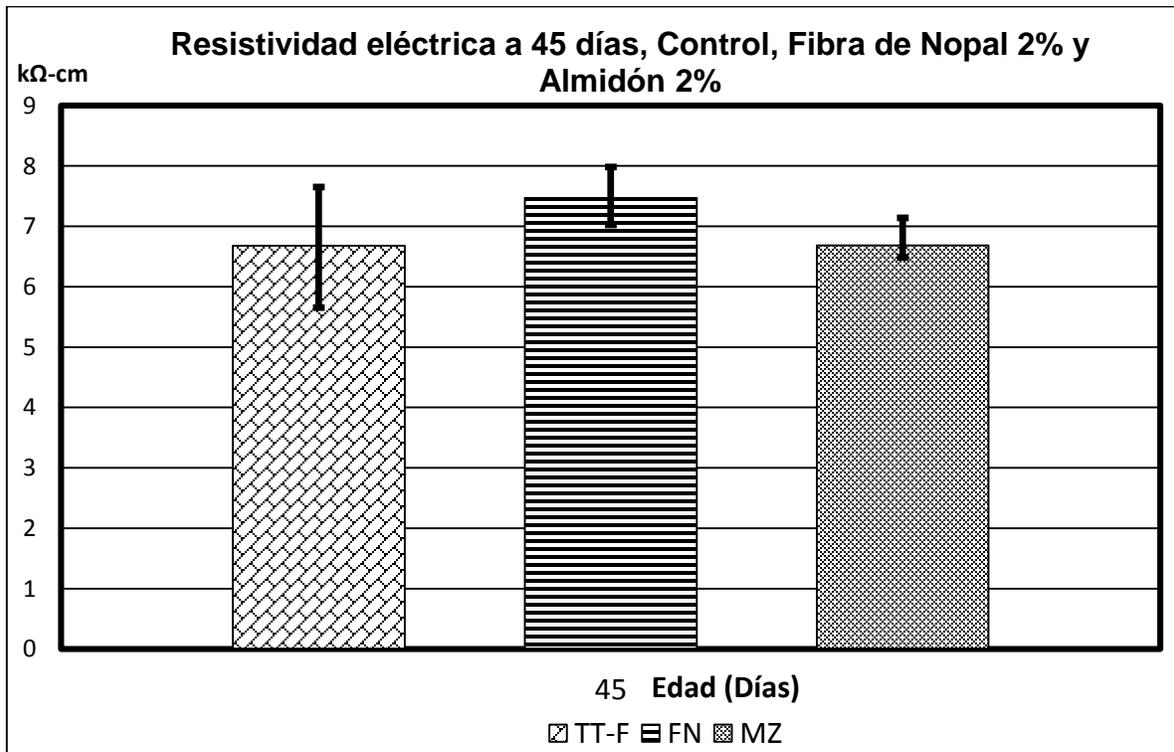


Ilustración 80. Resistividad Eléctrica a 45 días

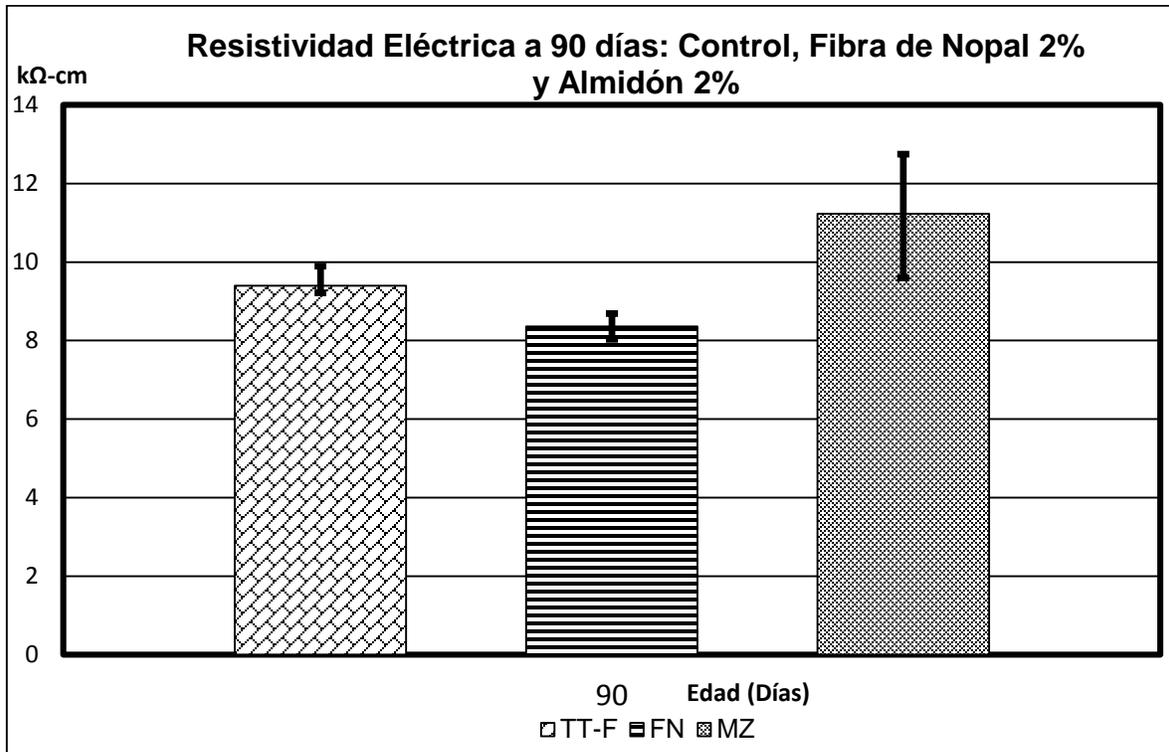


Ilustración 81. Resistividad Eléctrica a 90 días

4.3.1.3. Porosidad total

A la edad de 90 días las mezclas presentan sus mejores resultados, la adición de maíz es la mezcla que registra los mejores valores (Ilustración 85), con un porcentaje de porosidad de 22.98%, mientras que la adición de fibra de nopal registra 23.70% y el testigo de 24.27%, entre menor sea este porcentaje nos indica que son menos los poros en la matriz cementicia.

Aunque los resultados desde los 14 días hasta los 90 días se clasifican como un mortero de durabilidad inadecuada debido al alto porcentaje de porosidad, lo cual afecta la durabilidad del mortero permitiendo la penetración de agentes agresivos para el mortero será alta.

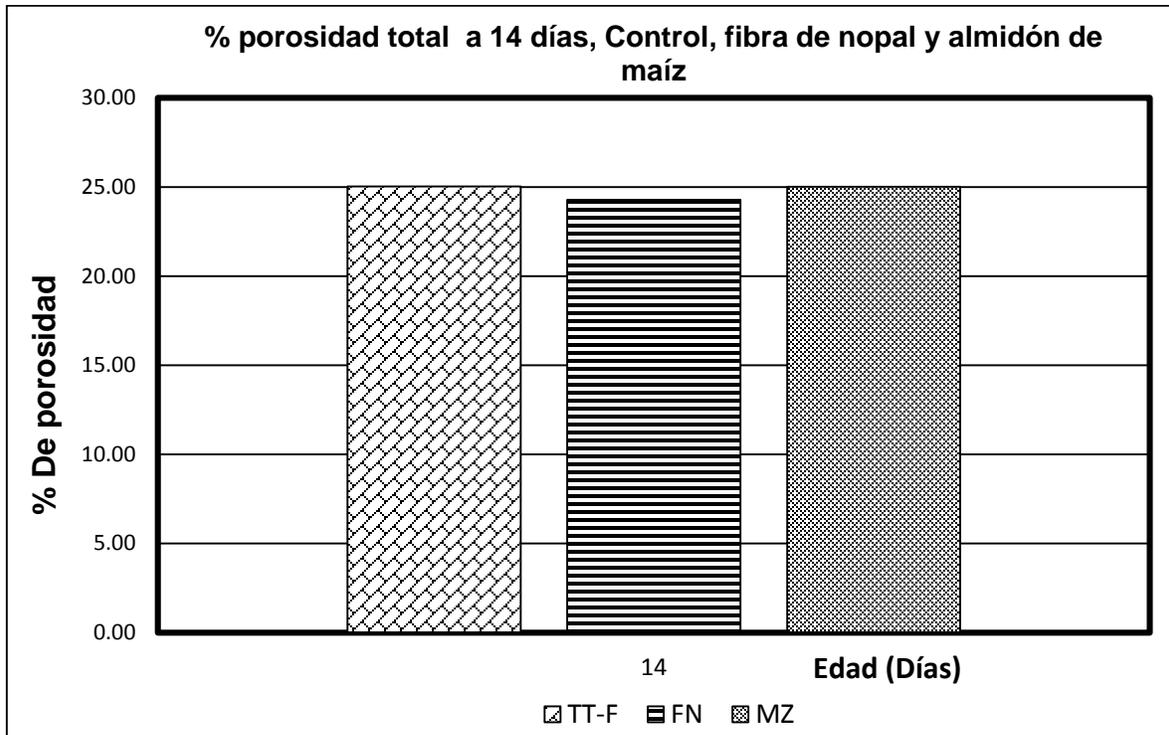


Ilustración 82. % De porosidad a 14 días

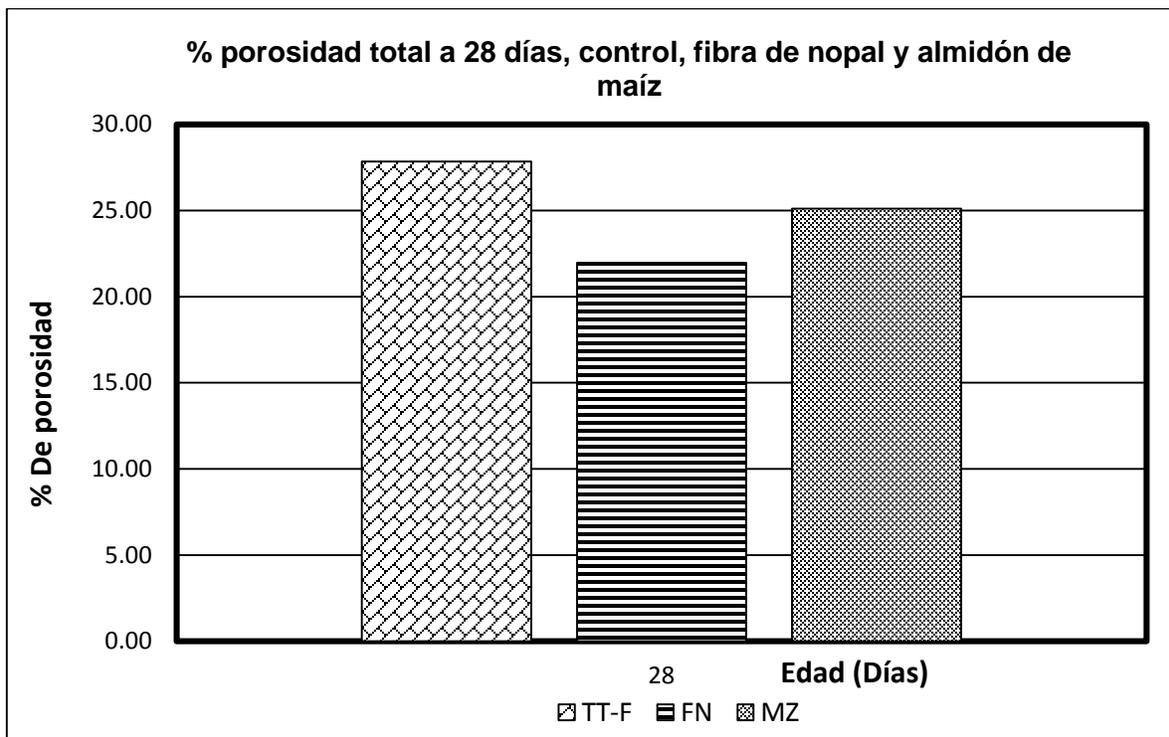


Ilustración 83. % De porosidad a 28 días

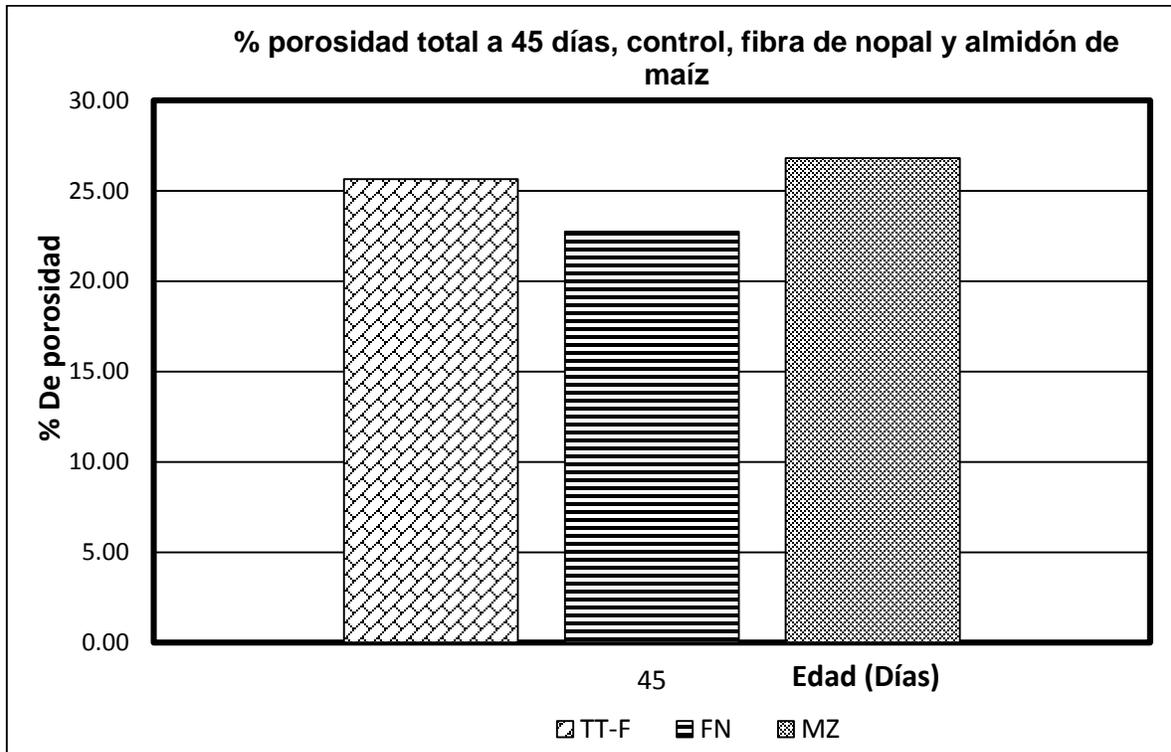


Ilustración 84. % De porosidad a 45 días

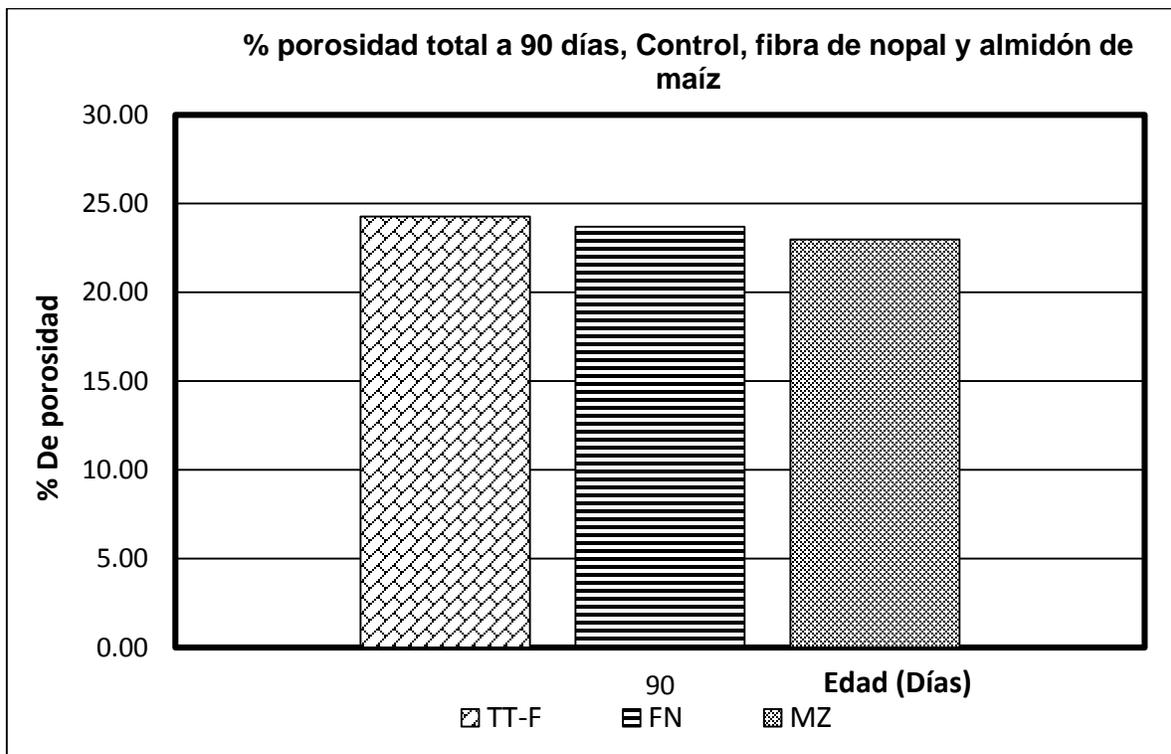


Ilustración 85. % De porosidad a 90 días



4.3.2. Pruebas destructivas

4.3.2.1. Resistencia a compresión

La compresión simple es una prueba de máxima importancia ya que es la única prueba que esta normada y con la cual haremos comparaciones respecto a otras pruebas realizadas.

El almidón de maíz es la adición en la que se obtienen mejores valores, registrando resultados siempre por arriba del testigo y de la fibra de nopal, aunque en las 4 edades de prueba los valores fueron en incremento.

En la edad de 90 días (Ilustración 89) el resultado de almidón de maíz es de 27.71 MPa, estando por encima de la fibra de nopal (27.23 MPa), lo cual es producto de un mejor acomodo de las partículas del agregado y de las partículas del almidón de maíz, además de una mejor densificación dentro de la matriz cementicia.

Los mejores resultados de la fibra de nopal se registraron a la edad de 28 días (22.15 MPa) donde se encuentra solo por arriba de la mezcla testigo y no del almidón de maíz.

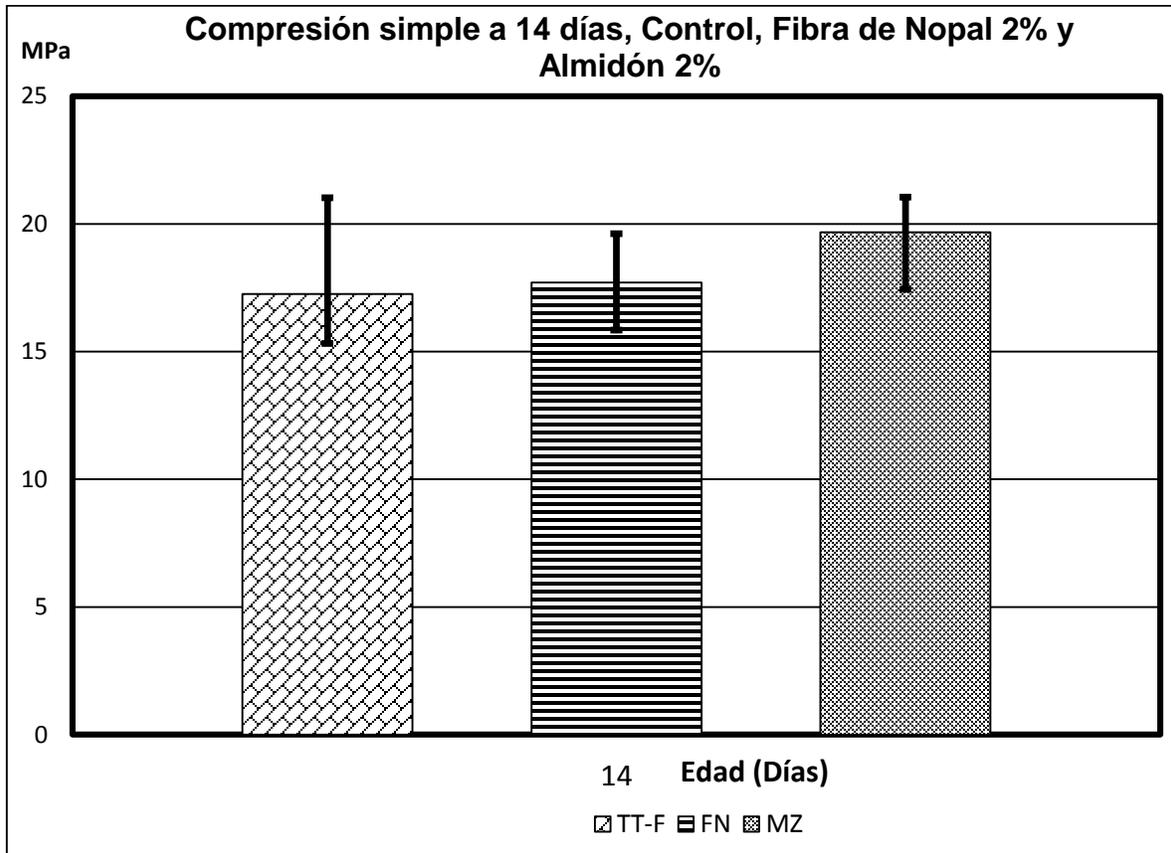


Ilustración 86. Compresión simple a 14 días

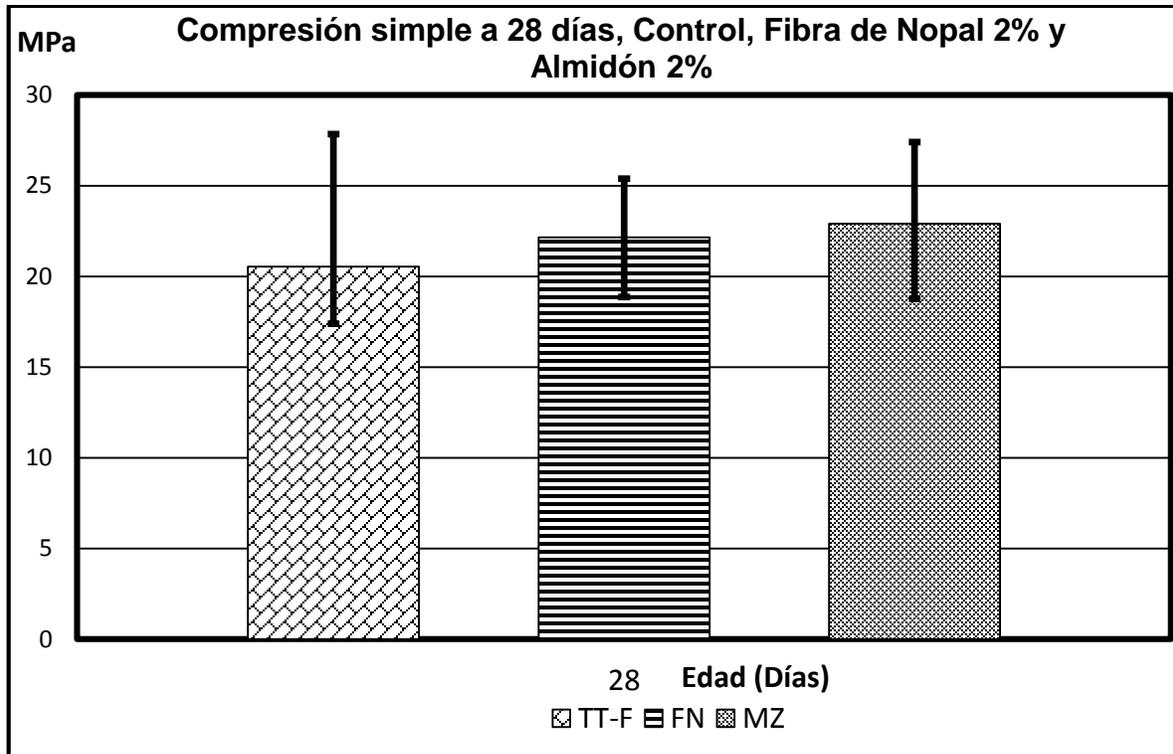


Ilustración 87. Compresión simple a 28 días

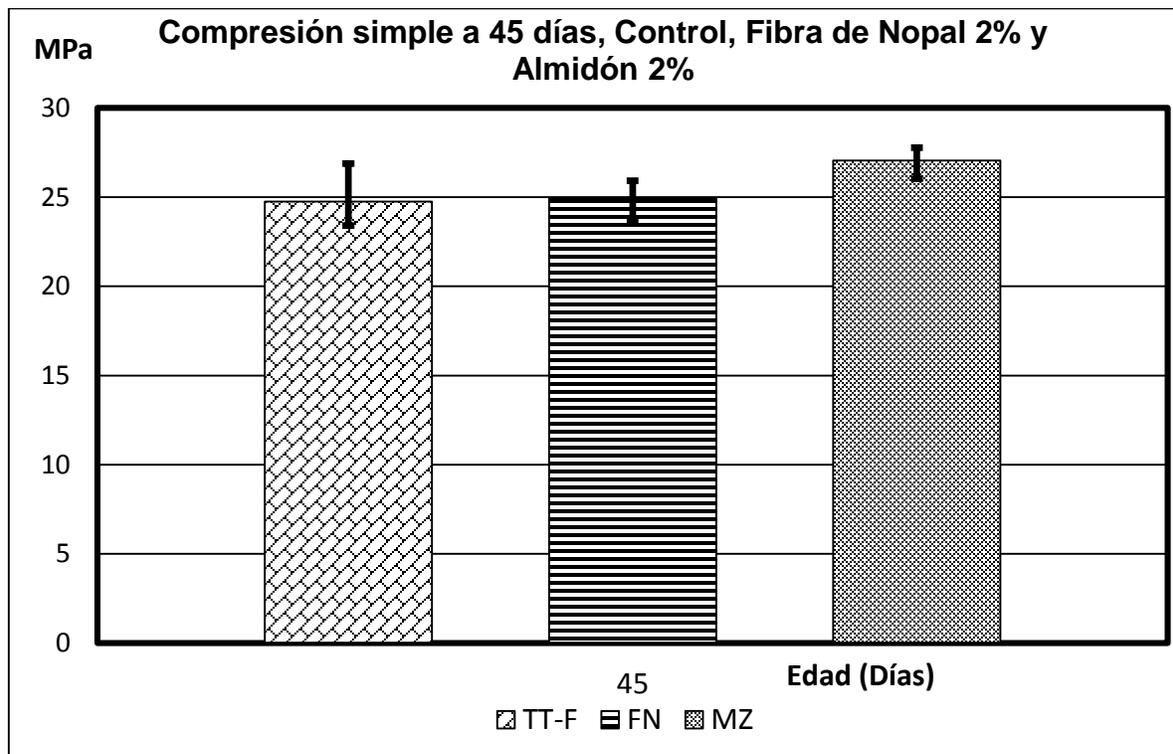


Ilustración 88. Compresión simple a 45 días.

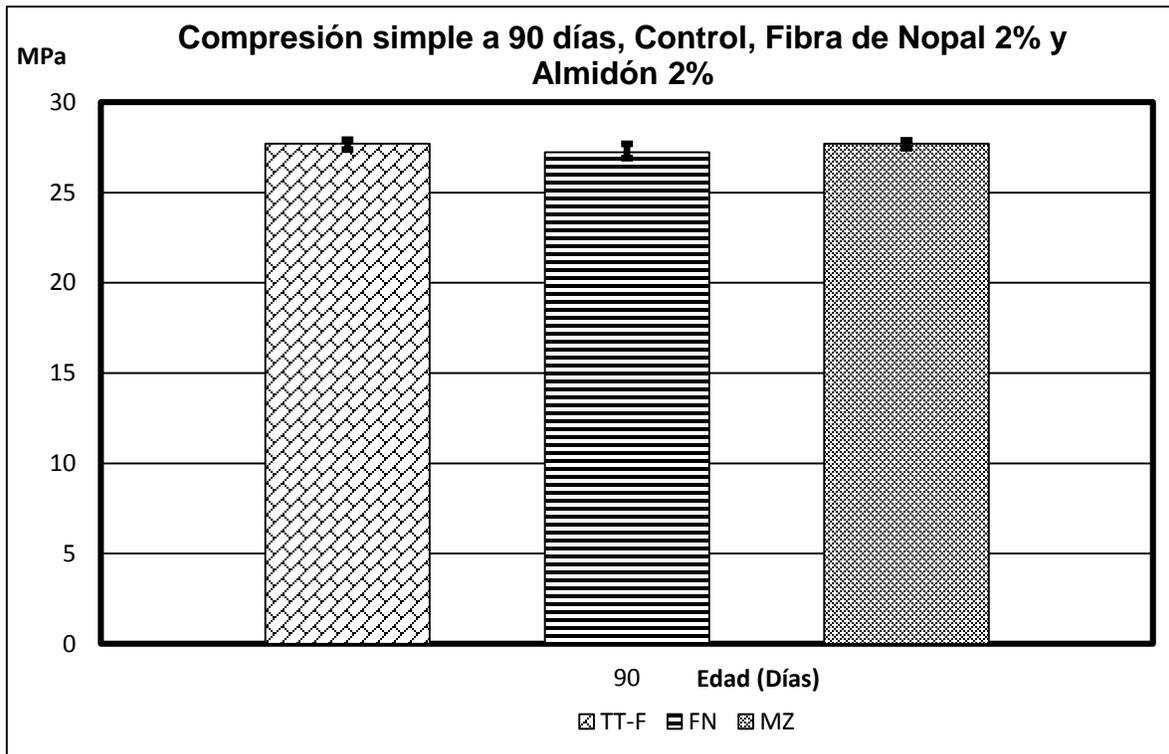


Ilustración 89. Compresión simple a 90 días.

4.3.2.2. Resistencia a la flexión

En las ilustraciones 90, 91, 92 y 93 se muestran los resultados obtenidos para los esfuerzos promedio a la flexión (valores del módulo de ruptura) de cada mezcla elaborada para cada edad de prueba. Se observa que el testigo supera a las adiciones en 2 de las 4 edades (14 y 28 días), pero en las siguientes edades de prueba la adición de almidón de maíz es la que sigue presentando los mejores resultados ya que supero a la mezcla testigo y a la fibra de nopal en las edades de 45 y 90 días registrando valores de 7.20 y 7.25 MPa respectivamente.

Cabe mencionarse que a la edad de 14 y 28 días el mortero adicionado con almidón de maíz presenta esfuerzos inferiores a los del testigo, pero en las siguientes edades aumenta su valor y supera al testigo, este comportamiento se debe a que conforme avanza el tiempo la matriz se densifica incrementando su resistencia.

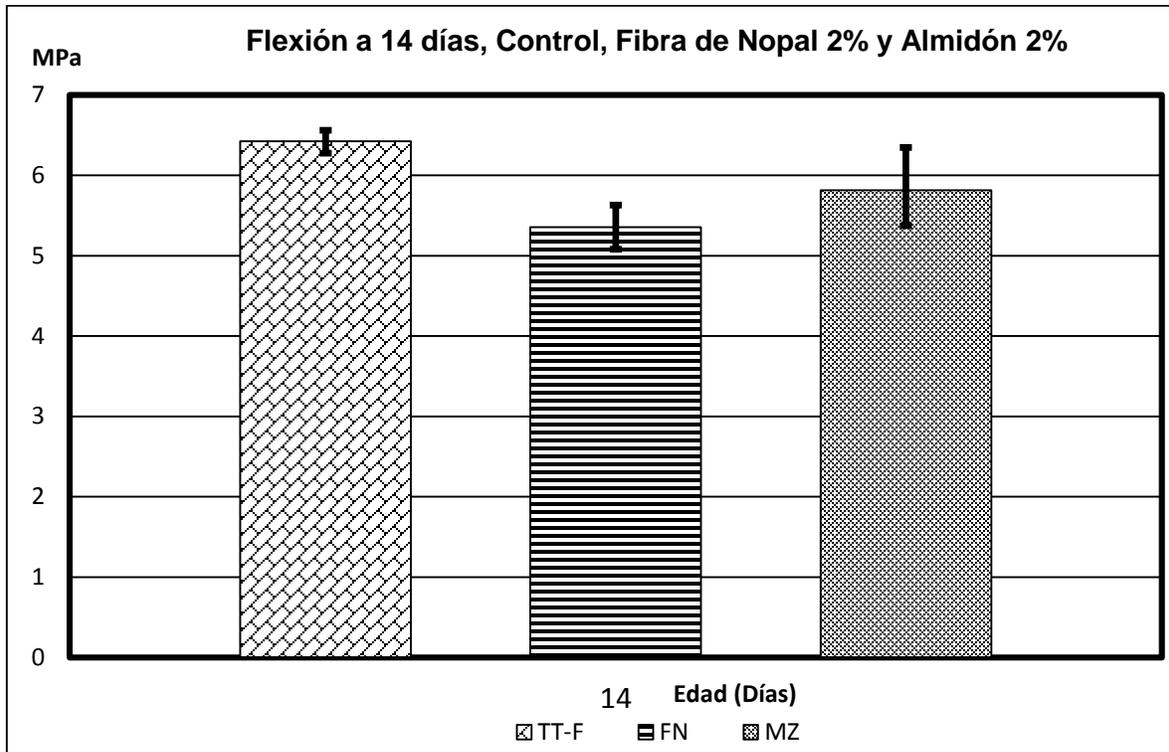


Ilustración 90. Resistencia a flexión a 14 días

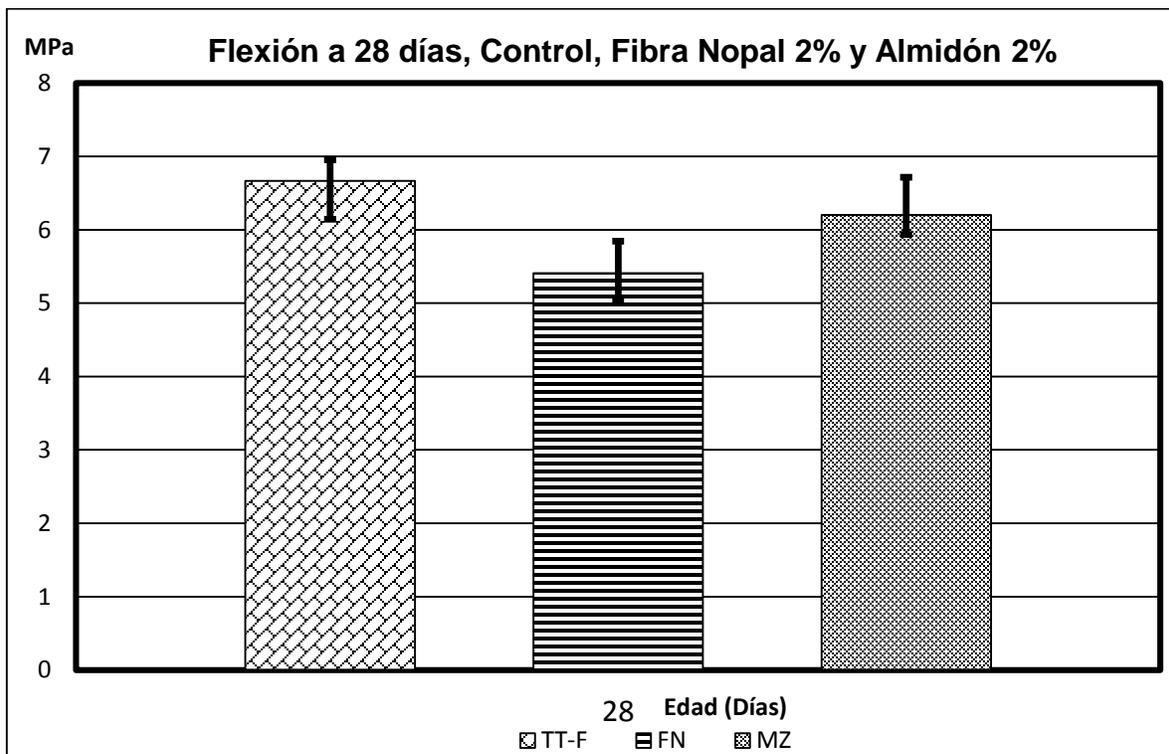


Ilustración 91. Resistencia a flexión a 28 días

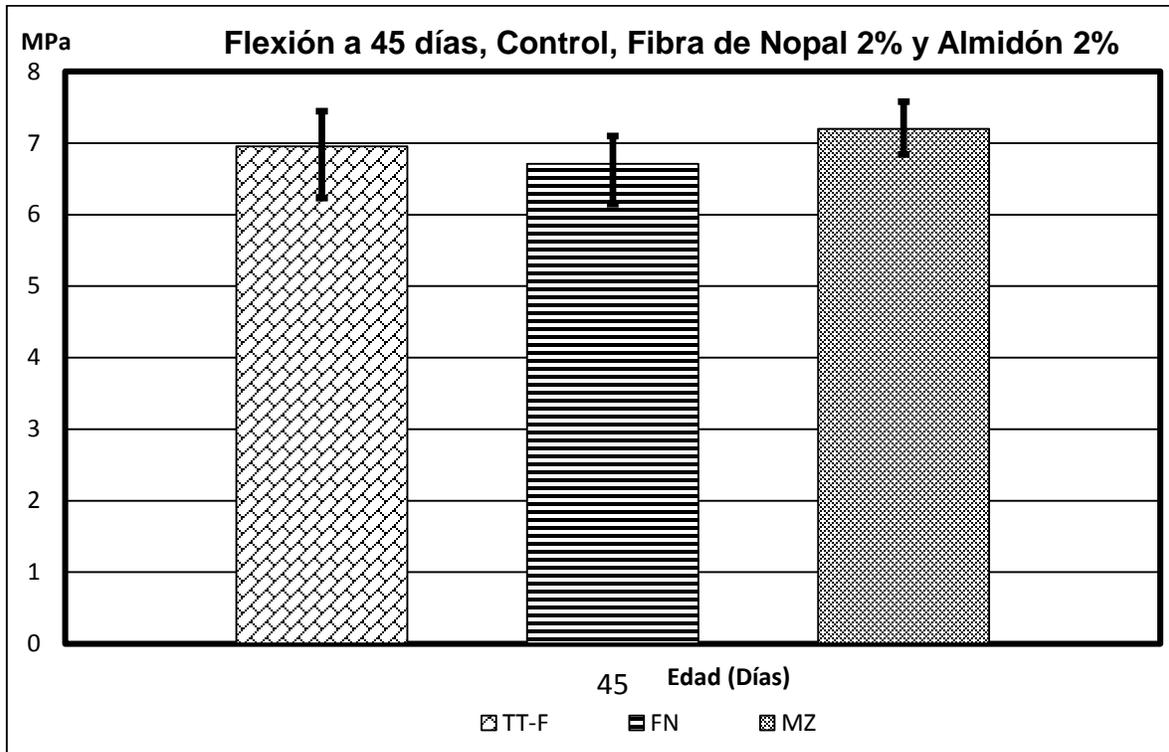


Ilustración 92. Resistencia a flexión a 45 días

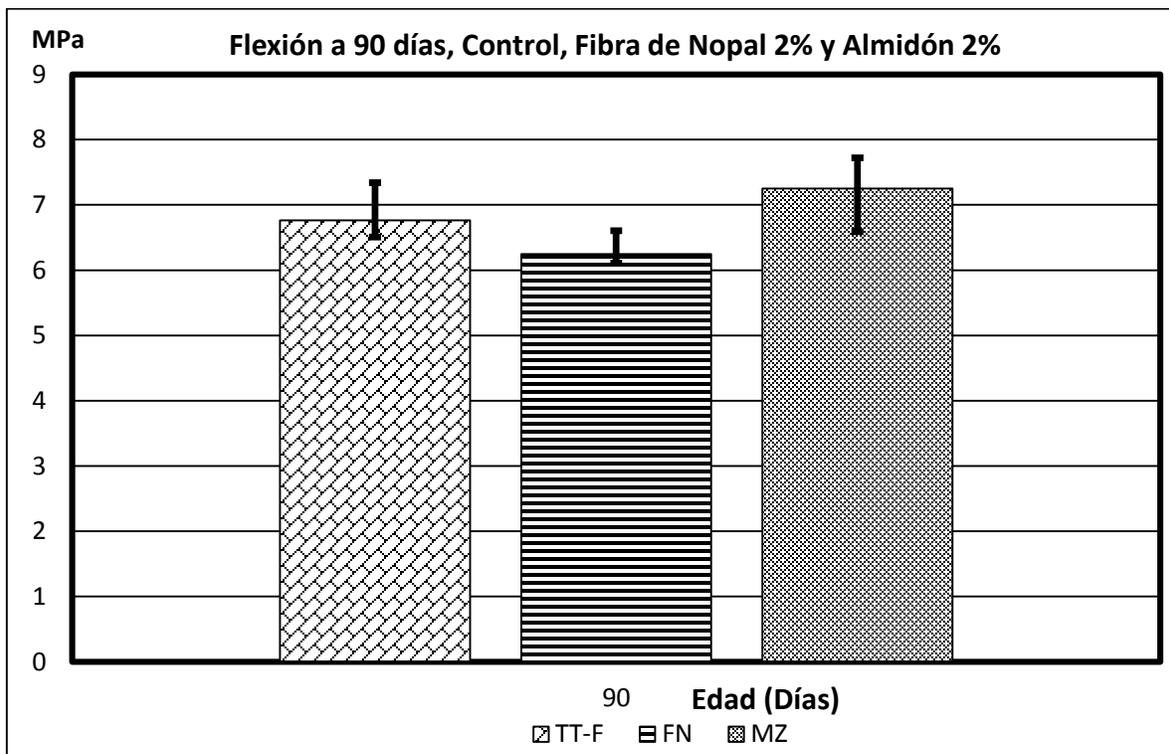


Ilustración 93. Resistencia a flexión a 90 días.



4.3.2.3. Resistencia a tensión directa

En la prueba de resistencia a tensión directa los mejores resultados los registra la fibra de nopal en 3 de las 4 edades, a 14 días el testigo (Ilustración 94), es la mezcla que registra los mejores resultados, el almidón de maíz se encuentra en las 4 edades por debajo de las otras dos mezclas.

Cabe mencionar que a los 45 días los resultados presentan una caída en sus valores lo cual se pueden asociar a varios factores, ya sea por el operador o un error en el instrumento de medición (Ilustración 96).

La fibra de nopal resiste valores de 2.82 MPa a los 90 días de prueba, mientras que el testigo registra resultados de 2.79 MPa y por abajo se encuentra el almidón de maíz con resultados promedio de 2.66 MPa.

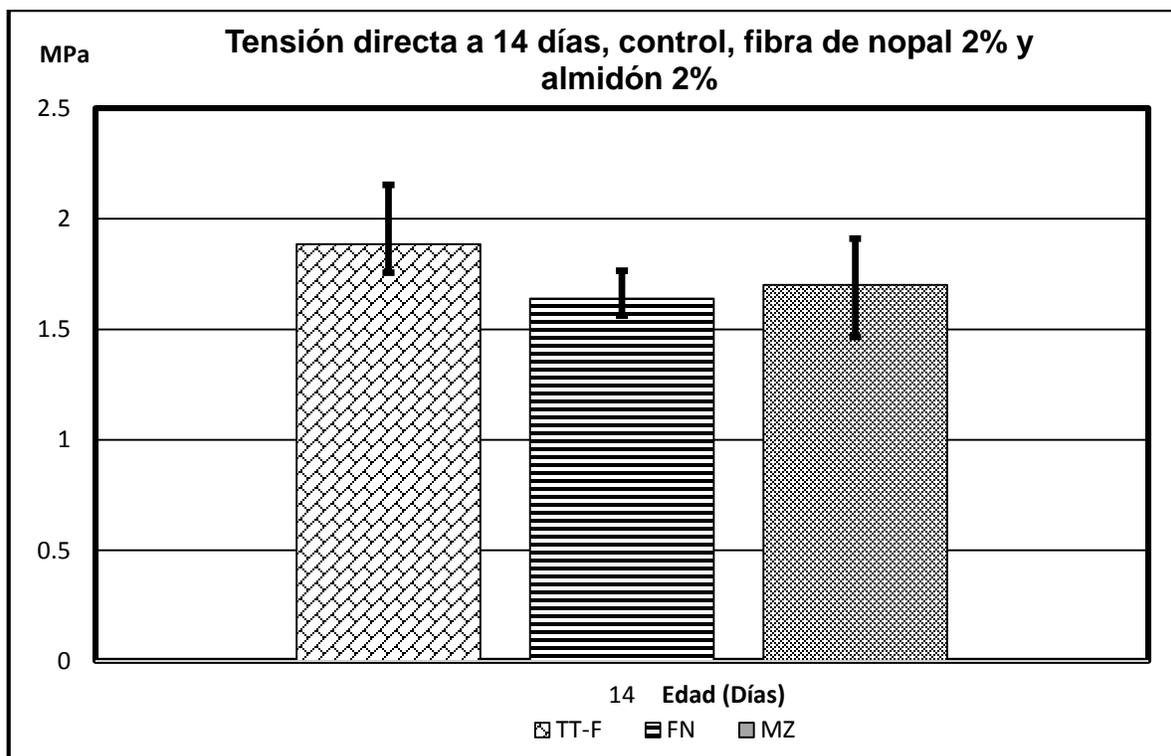


Ilustración 94. Resistencia a tensión directa a 14 días.

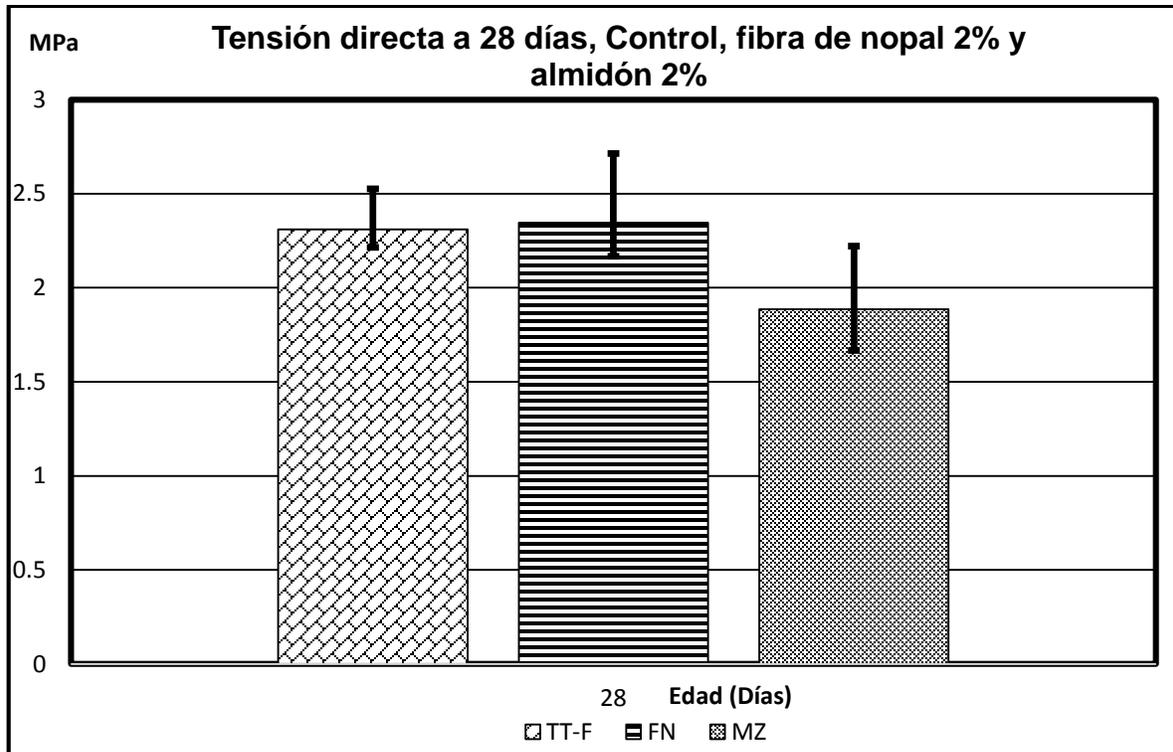


Ilustración 95. Resistencia a tensión directa a 28 días

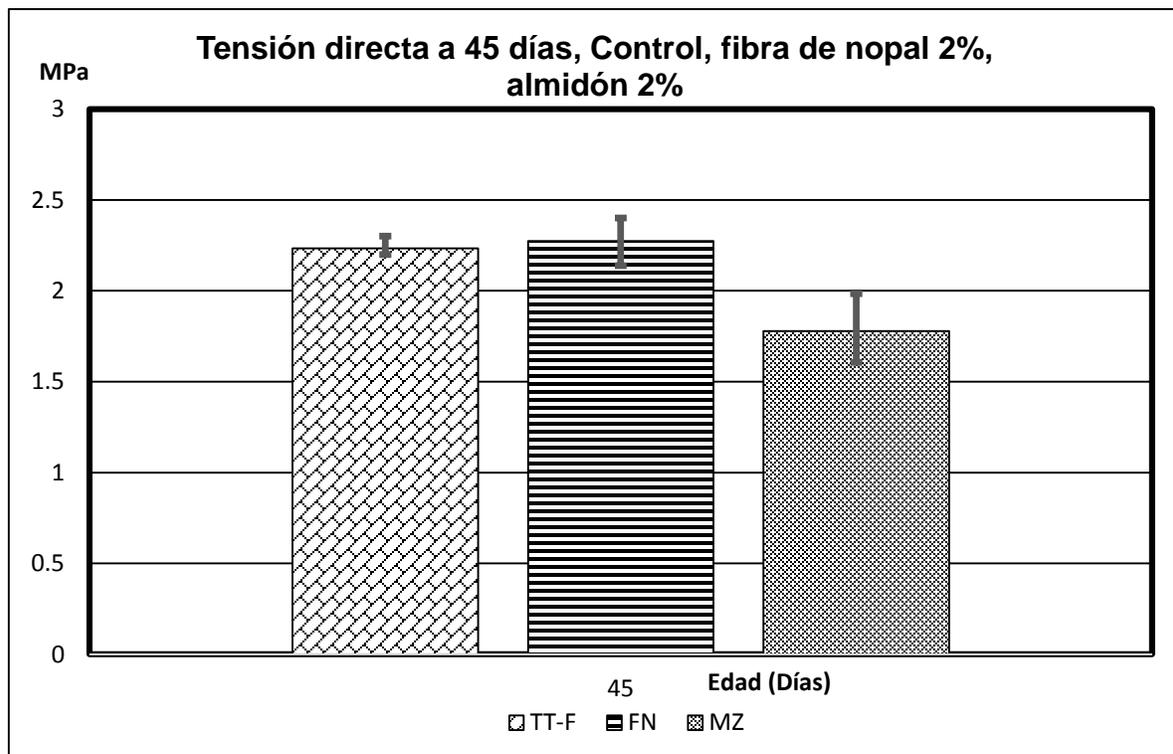


Ilustración 96. Resistencia a tensión directa a 45 días

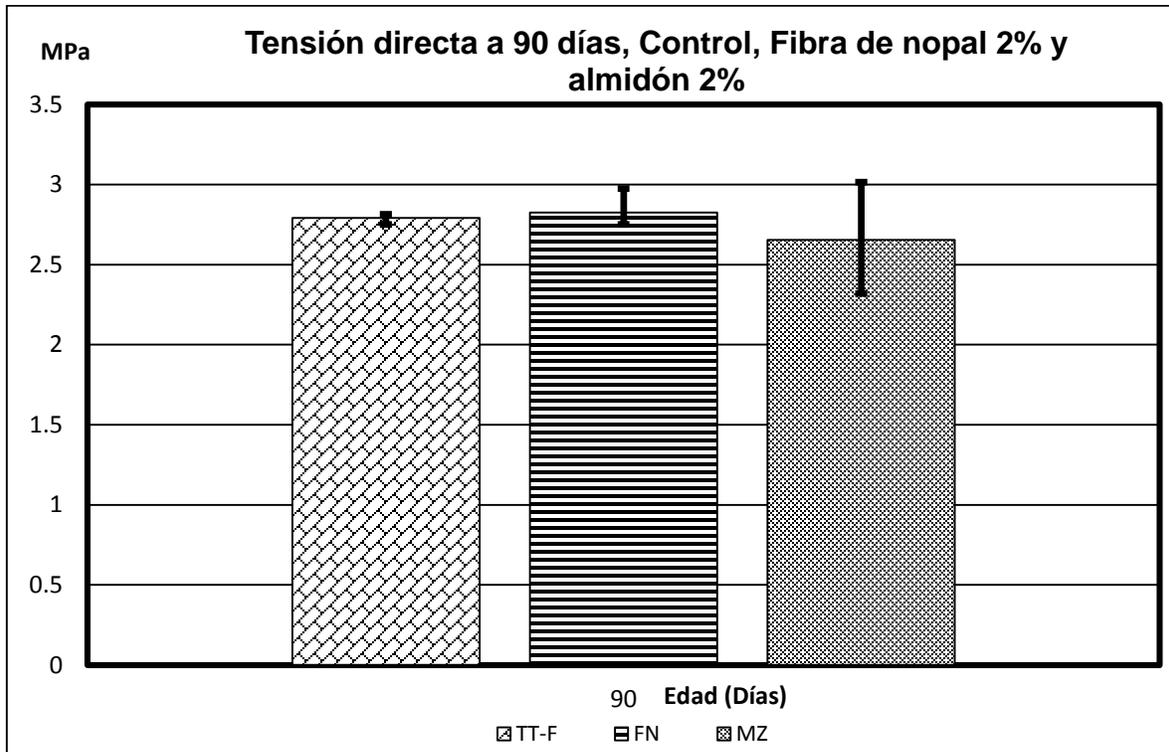


Ilustración 97. Resistencia a tensión directa a 90 días

4.3.2.4. Resistencia a tensión indirecta

En las Ilustraciones 98, 99, 100 y 101, se muestran los valores de la resistencia a tensión indirecta obtenidos en las edades de 14, 28, 45 y 90 días, alcanzando los mejores resultados a los 45 días (Ilustración 100), donde la mezcla testigo obtiene valores de 3.18 MPa, la fibra de nopal con 2.72 MPa y el almidón de maíz de 2.52 MPa.

Se registran disminuciones en los valores de la resistencia a tensión indirecta en las edades de 28 y 90 días. El almidón de maíz es la adición que presenta un comportamiento más favorable ya que no se aprecia un cambio notable en sus resistencias.

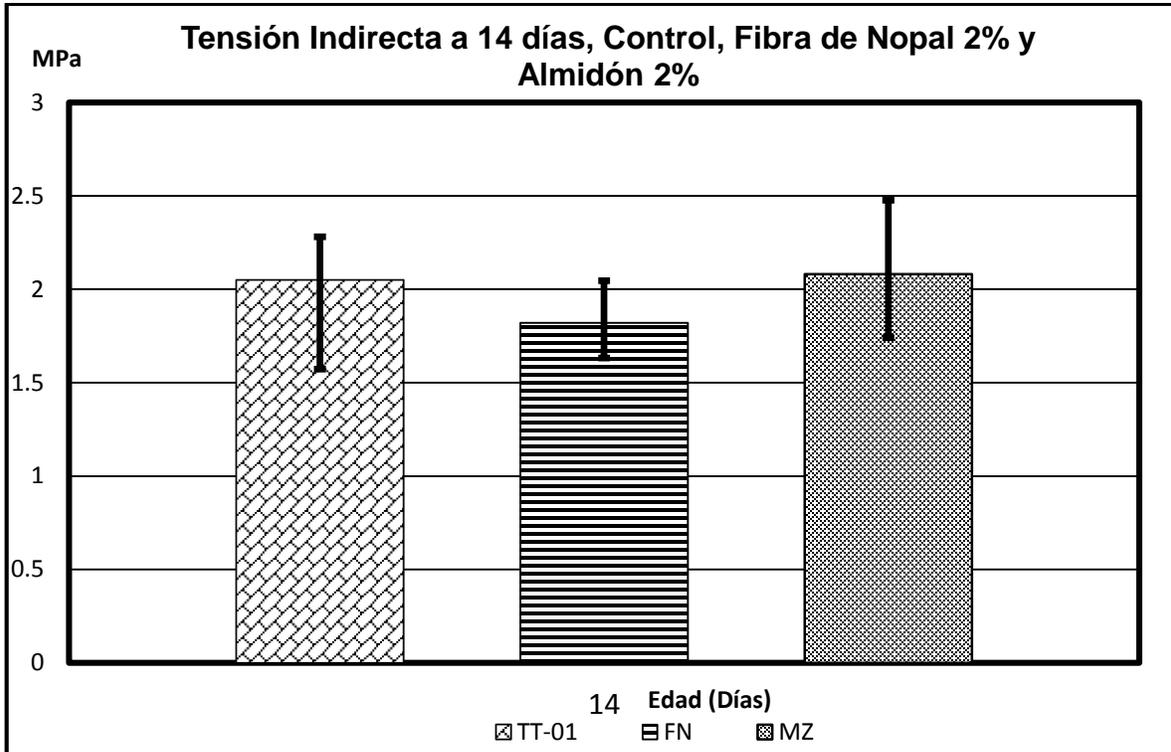


Ilustración 98. Resistencia a tensión indirecta a 14 días

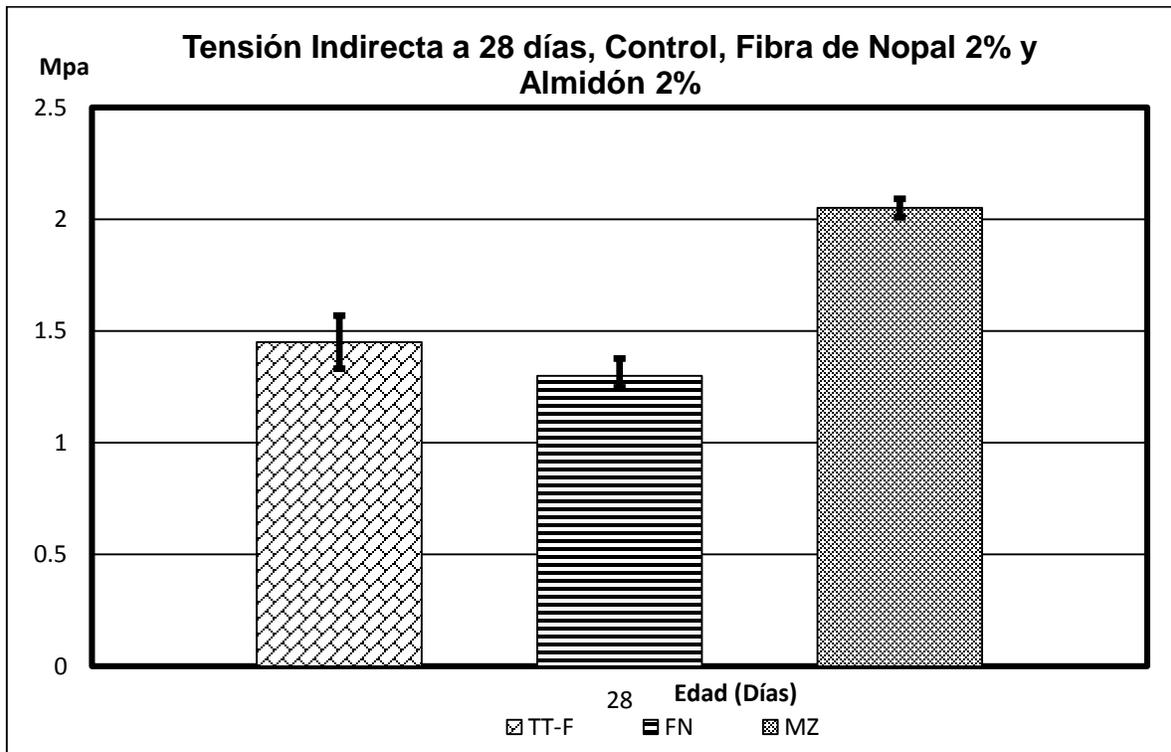


Ilustración 99. Resistencia a tensión indirecta a 28 días

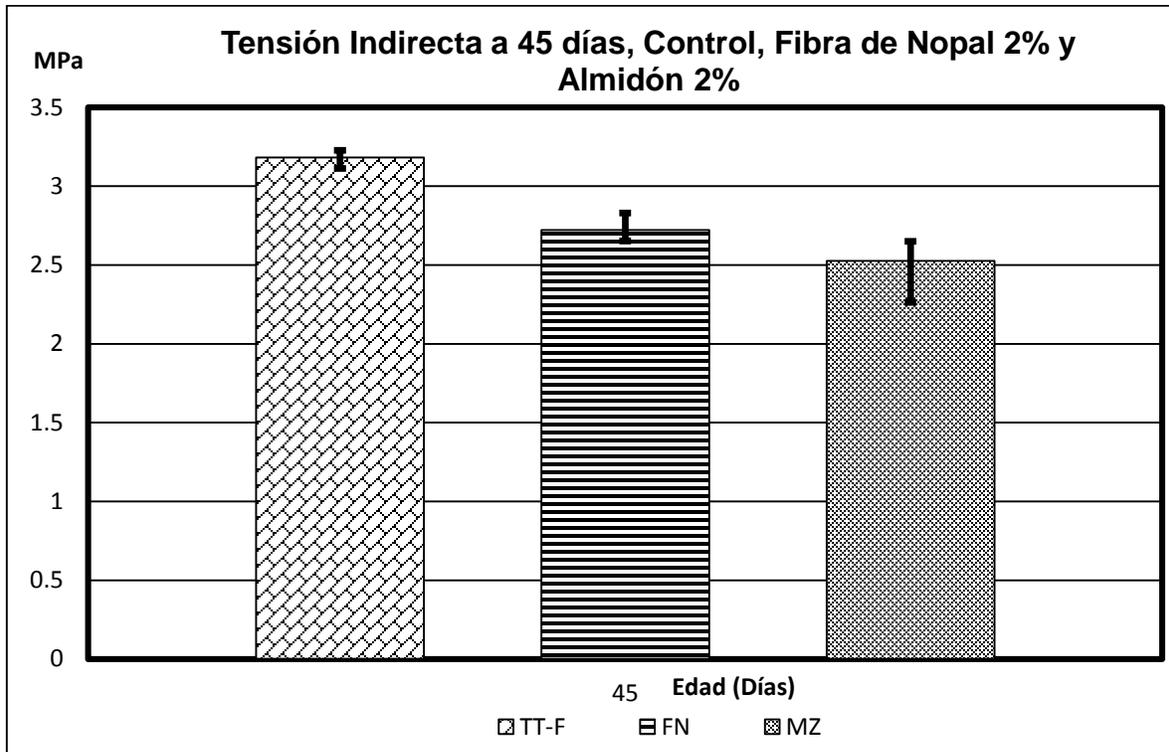


Ilustración 100. Resistencia a tensión indirecta a 45 días

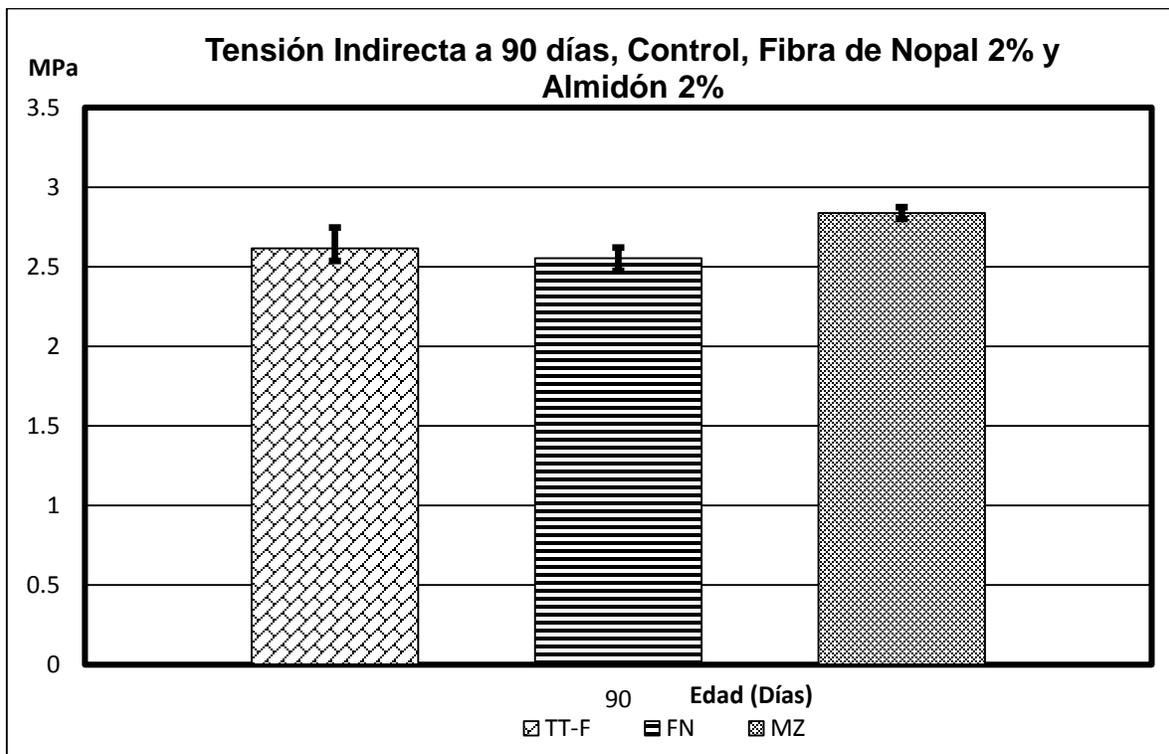


Ilustración 101. Resistencia a tensión indirecta a 90 días.



En la tabla 22 se presenta una comparación de los resultados obtenidos, todos se comparan en base a la compresión simple, se hace una comparación entre compresión, resistencia a flexión, resistencia a tensión indirecta y resistencia a tensión directa.

Tabla 22. Resultados y comparaciones en las diferentes pruebas mecánicas.

Mezcla	Edad (días)	Compresión (MPa)	0.7 √ Compresión	Flexión (MPa)	0.8 √ Compresión	0.4 √ Compresión	Tensión Indirecta (MPa)	0.7 √ Compresión	Tensión Directa (MPa)
Testigo	14	17.26	2.91	6.42	3.32	1.66	2.39	2.91	1.80
	28	20.54	3.17	6.67	3.63	1.81	1.45	3.17	2.31
	45	24.75	3.48	6.95	3.98	1.99	3.18	3.48	2.31
	90	27.71	3.68	6.76	4.21	2.11	2.62	3.68	2.79
FN 2%	14	17.71	2.95	5.35	3.37	1.68	1.82	2.95	1.64
	28	22.15	3.29	5.41	3.77	1.88	1.30	3.29	2.35
	45	24.91	3.49	6.45	3.99	1.99	2.72	3.49	2.27
	90	27.23	3.65	6.24	4.17	2.09	2.55	3.65	2.82
MZ 2%	14	19.67	3.10	5.81	3.55	1.77	2.08	3.10	1.89
	28	22.91	3.35	6.20	3.83	1.91	2.05	3.35	1.78
	45	27.10	3.64	7.19	4.16	2.08	2.53	3.64	1.82
	90	27.71	3.68	7.24	4.21	2.11	2.84	3.68	2.65

Los resultados de la resistencia a flexión y tensión se encuentran dentro de los rangos aceptables, tomando en cuenta como referencia la resistencia a compresión. Se destaca que los rangos son adoptados de las pruebas realizadas al concreto.



4.3.3. Pruebas por durabilidad

4.3.3.1. Efecto a ciclos de congelamiento y deshielo

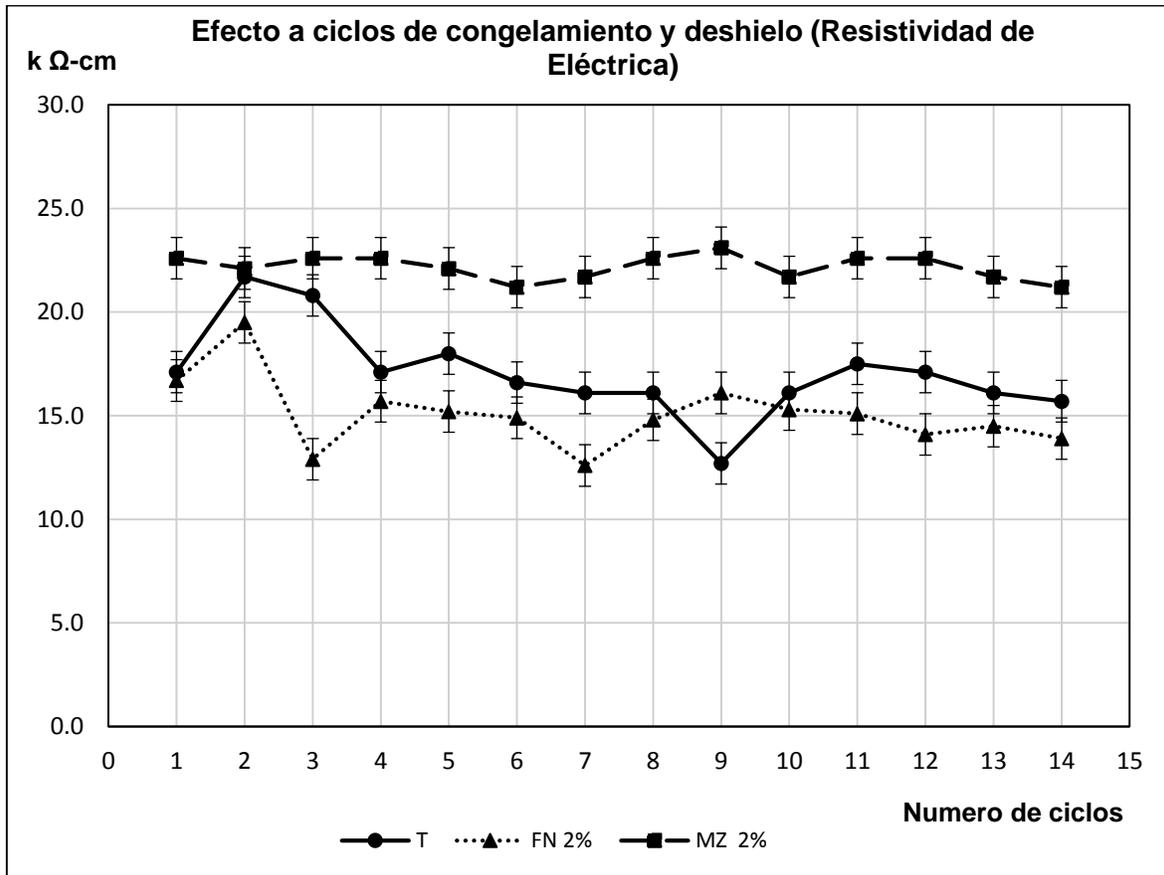


Ilustración 102. Efectos a ciclos de congelamiento y deshielo, prueba de resistividad eléctrica.

El almidón de maíz es la mezcla que presenta los mejores resultados en todos los ciclos de congelamiento y deshielo, mostrando poca variación en el transcurso de los ciclos, por debajo se encuentra el testigo y la fibra de nopal; de acuerdo a la clasificación de la RED DURAR los resultados se encuentran en riesgo moderado (Ilustración 102).

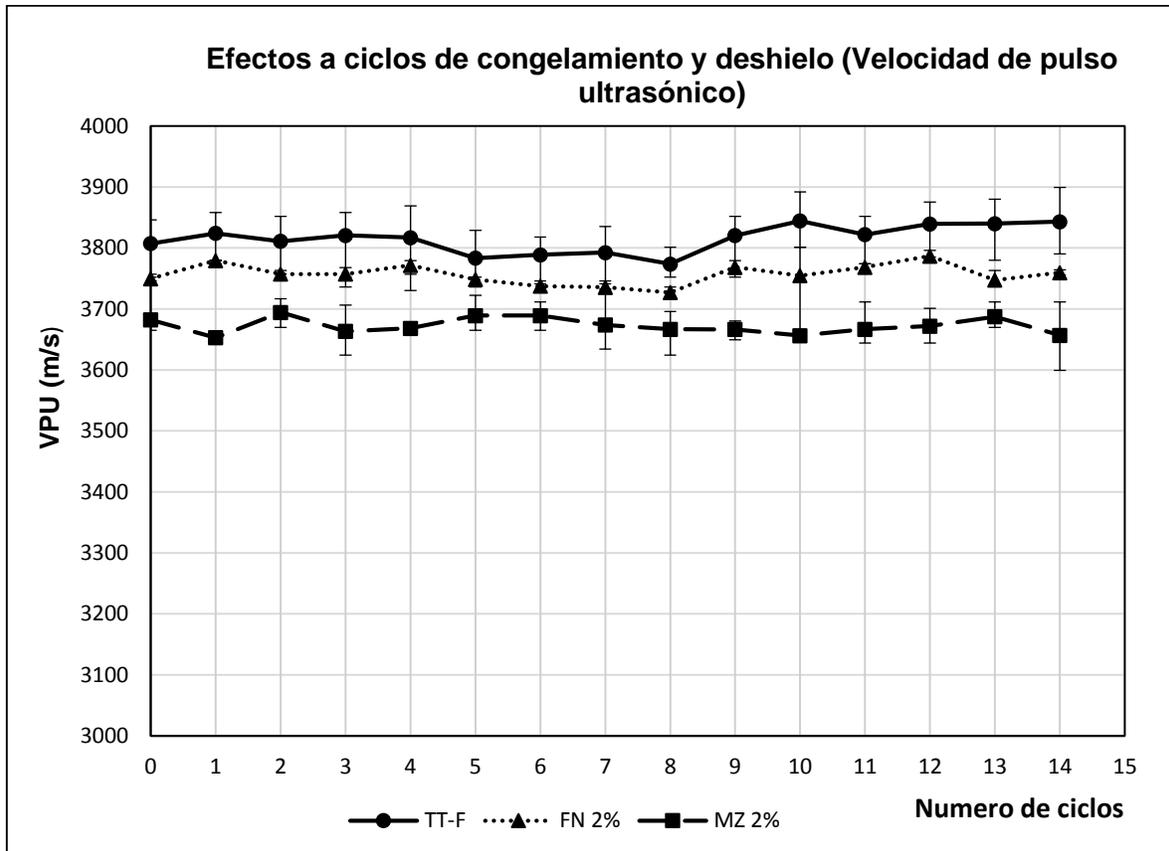


Ilustración 103. Efectos a ciclos de congelamiento y deshielo, prueba de velocidad de pulso ultrasónico.

Los especímenes después de someterlos a ciclos de congelamiento y deshielo siguen presentando buenos resultados en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (Ilustración 103), ya que tiene una calidad de mortero alta de acuerdo a la RED DURAR.



4.3.3.2. Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

La resistividad eléctrica va aumentando hasta llegar a su máximo valor en el ciclo 2 (Ilustración 104), después disminuye un poco pero en menor grado respecto a los primeros ciclos; los poros que existen en la matriz se llenan de sulfato lo que hace que la resistividad eléctrica aumente, aun así los resultados son de un riesgo moderado ante ciclos de sulfatos.

La velocidad de pulso tiene resultados muy estables (Ilustración 105), sin presentar variación de un ciclo a otro. Las mezclas son de alta calidad de acuerdo a la clasificación RED DURAR.

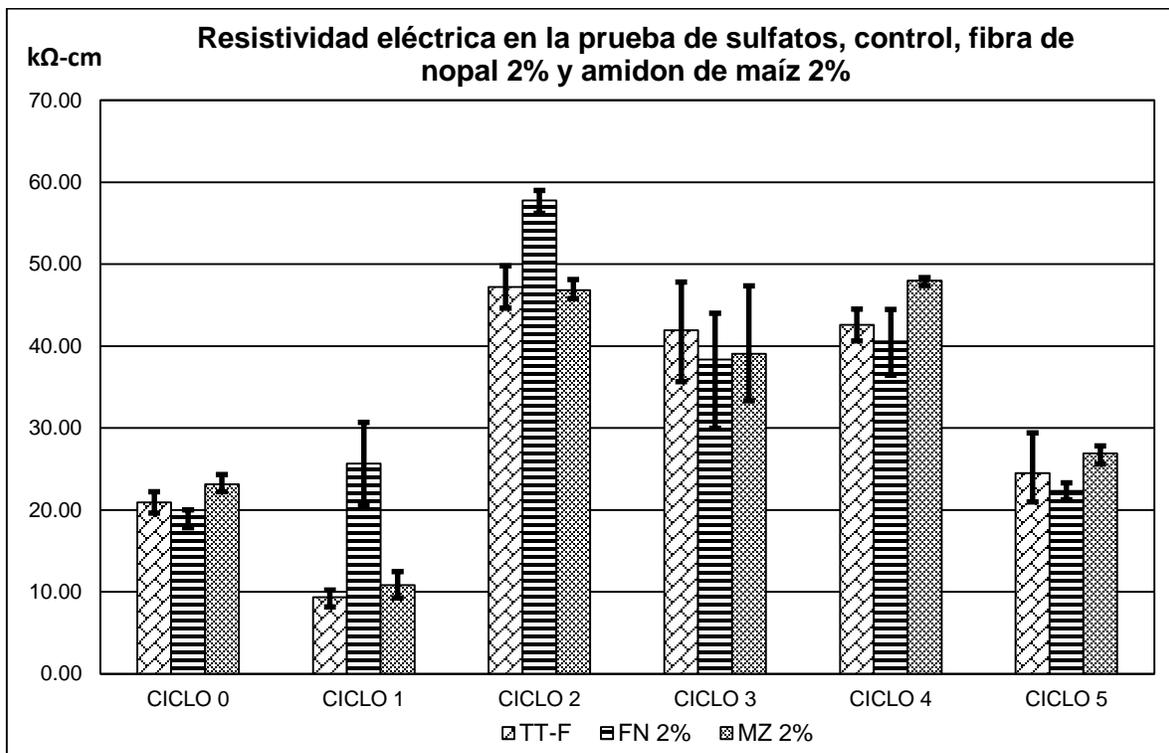


Ilustración 104. Resistividad eléctrica en la prueba de sulfatos.

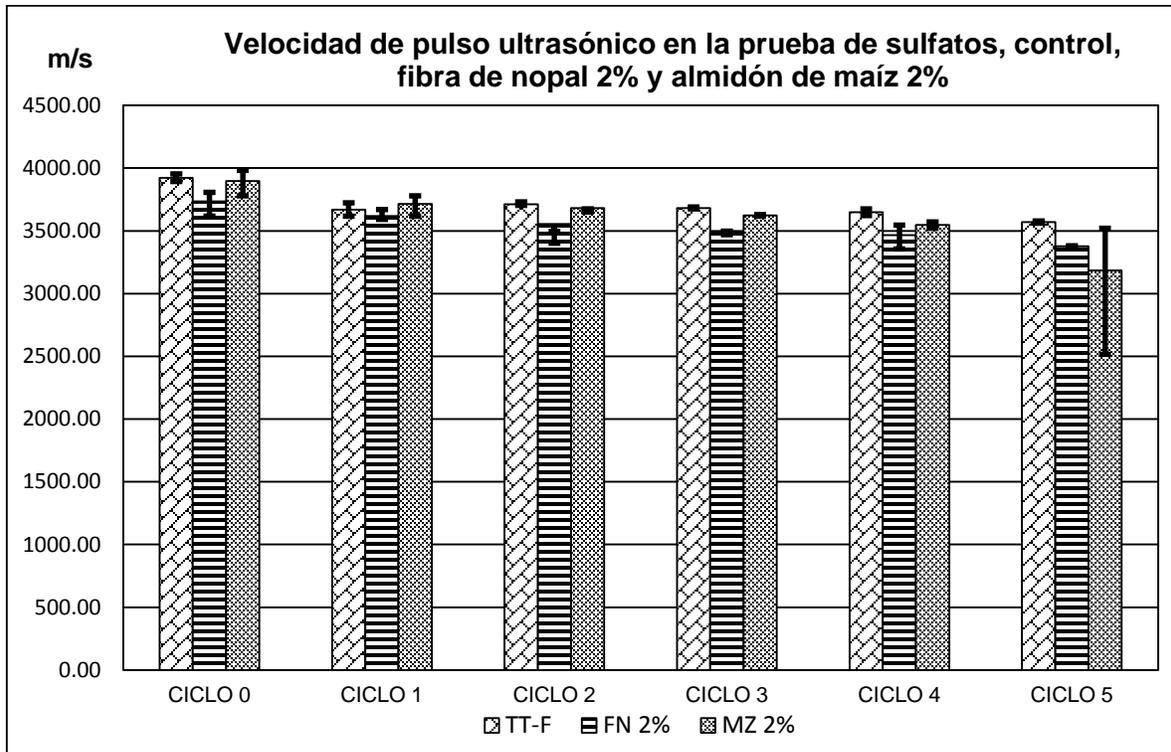


Ilustración 105. Velocidad de pulso ultrasónico en prueba de sulfatos.

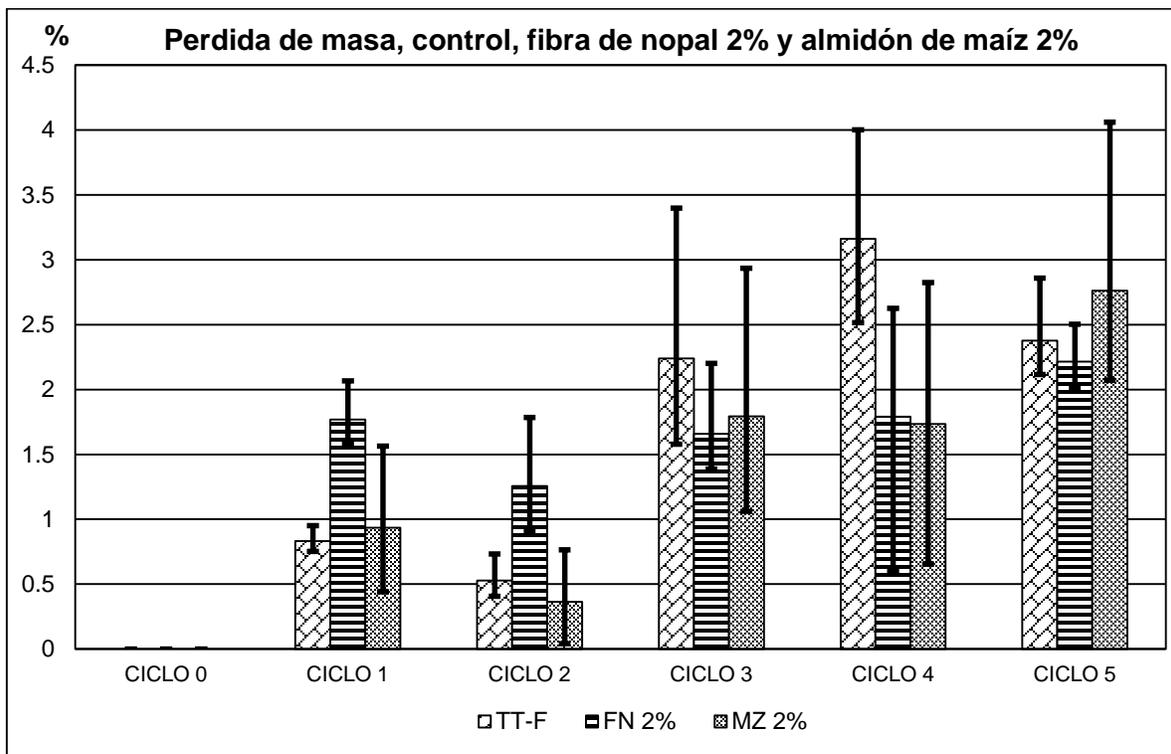


Ilustración 106. Pérdida de masa en prueba de sulfatos.



4.3.3.3. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros

En la prueba de penetración del ion cloruro la mezcla testigo presenta mejores resultados, ya que es la mezcla que registra la menor cantidad de carga eléctrica transferida (coulombs), sin embargo el tipo de permeabilidad es moderado, al igual que en las otras mezclas.

Tabla 23. Resultados de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros (Mezcla control).

TT-F				
Espécimen	Muestra	Coulombs	°C	Tipo de permeabilidad
1	1	3049	35	Moderada
	2	3067	38	Moderada
	3	3056	33	Moderada

Tabla 24. Resultados de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros (Mezcla FN 2%).

FN 2%				
Espécimen	Muestra	Coulombs	°C	Tipo de permeabilidad
1	1	3650	39	Moderada
	2	3670	35	Moderada
	3	3647	36	Moderada

Tabla 25. Resultados de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros (Mezcla MZ 2%).

MZ 2%				
Espécimen	Muestra	Coulombs	°C	Tipo de permeabilidad
1	1	3660	35	Moderada
	2	3682	30	Moderada
	3	3674	31	Moderada

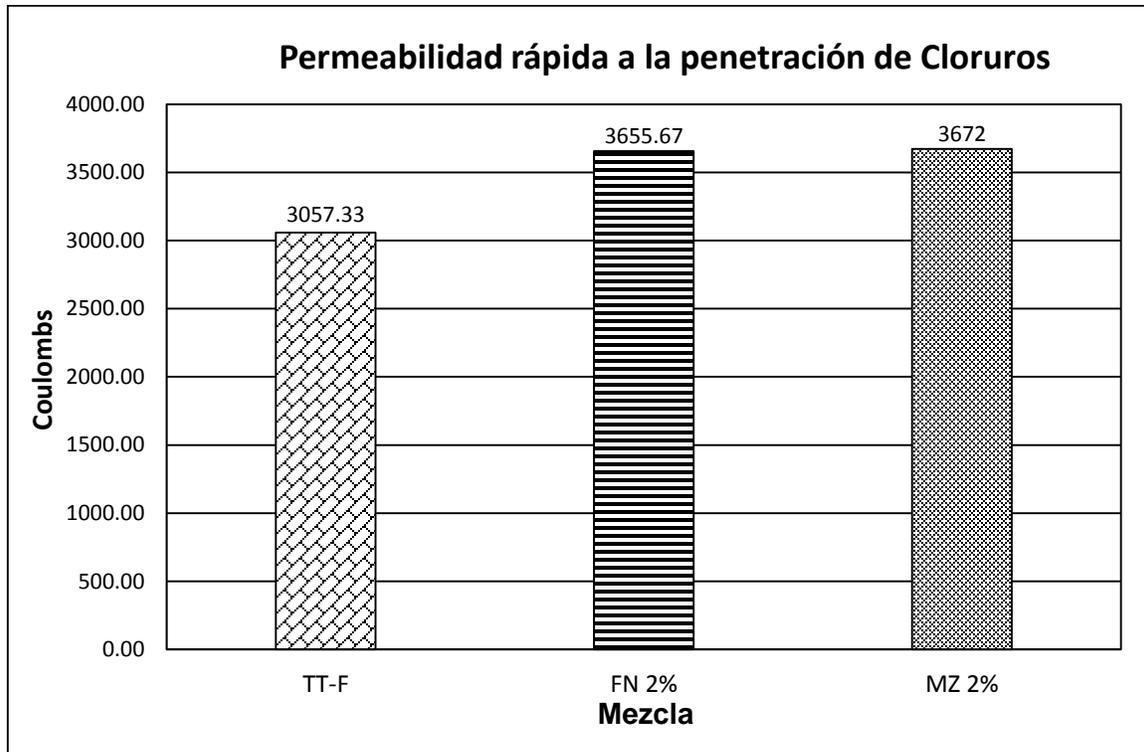


Ilustración 107. Comparación de las diferentes mezclas, permeabilidad rápida a la penetración de cloruros.



5. CONCLUSIONES

Al realizar la caracterización del agregado fino de Tlalpujahua, Michoacán, para la elaboración del mortero, se obtuvieron resultados no muy factibles en varias pruebas ya que algunos de ellos están fuera de los rangos que establecen las normas; tal es el caso de la humedad de absorción y la granulometría.

La humedad de absorción es un parámetro para conocer el porcentaje de agua que absorbe el agregado fino, depende directamente de los finos que contiene el agregado por tanto al ser muy alto este porcentaje se puede definir que la cantidad de parte fina es muy alta, se registran valores por encima de 5% de humedad de absorción.

En la prueba de granulometría a la arena se pudo observar en los resultados, que carece de material de 2.36 mm y de sobra material de 0.15 mm, lo cual corresponde a las mallas 8 y 100 respectivamente, lo cual se interpreta que carece de material grueso y tiene exceso de material fino.

Se puede diseñar una granulometría perfecta que cumpla con los límites marcados para morteros, agregándole material del tamaño faltante y quitándole material fino, pero en obra sería algo costosos y algo trabajoso, además de que se buscan soluciones con el material tal y como se utiliza en obra.

Se analizó el material que pasa la malla 100 como suelo para verificar si se comportaba como arcilla, que en presencia de agua se expande y en ausencia se contrae, se intentó realizar la prueba de la copa de casa grande para así determinar si se trataba de un suelo con alta plasticidad pero no se pudo realizar debido a que al momento de hacer el golpeteo el material se volvía a juntar debido a su plasticidad.

Se observó que el material que pasa la malla 100 tiene propiedades cementantes ya que al agregarle agua y dejarlo en el horno por 24 horas se endurece, sin embargo faltaría realizar estudios a futuro para indicar con una mayor certeza estas propiedades.



La presencia de excesos de finos es la principal causa de erosión en las juntas entre roca y roca del empedrado ya que es lo primero que se erosiona al tener poca adherencia con las rocas.

En la elaboración de los especímenes se pudo observar que al varillar se generaban poros debido a que es muy plástica la mezcla, en los especímenes con adición de fibra de nopal al enrasar en los molde después de algunos minutos se podía observar que sufría alguna reacción ya que se expandían y se tenían que enrasar de nuevo, debido a esto algunos especímenes quedaron un poco más grandes que los de almidón de maíz.

Los morteros de alta calidad, alta resistencia y durabilidad se producen con materiales de alta calidad, y ser diseñados con la menor relación a/c posible, sin dejar de lado el proceso de elaboración, transporte, colocación y terminado, sin embargo no es para nada un proceso sencillo. Al fallar una parte del proceso la calidad bajará. En la elaboración del mortero se buscó hacerlo de la mejor manera aunque como se sabe el agregado fino no cumple con la granulometría, ya que presenta exceso de finos y falta de material de la malla 8, lo cual significo una deficiencia en la calidad de la mezcla.

Las adiciones orgánicas que se le adicionaron al mortero en efecto mejoran algunas propiedades del mortero, sin embargo es complicado lograr la optimización en todas de ellas de manera simultánea.

En compresión simple el almidón de maíz es la adición en la que se obtienen mejores resultados, en la edad de 90 días el resultado de almidón de maíz es de 27.71 MPa, estando por encima de la fibra de nopal (27.23 MPa), lo cual es producto de un mejor acomodo de las partículas del agregado y de las partículas del almidón de maíz, además de una mejor densificación dentro de la matriz cementicia.

Para la resistencia a flexión la adición de almidón de maíz es la que sigue presentando los mejores resultados ya que supero a la mezcla testigo y a la fibra



de nopal registrando resultados de 7.25 MPa mientras que la fibra de nopal fue de 6.21 MPa.

La fibra de nopal presentó sus mejores resultados en resistencia a tensión directa donde se registraron resultados de 2.82 MPa, el almidón de maíz presento resultados de 2.66 MPa.

En pruebas no destructivas como resistividad eléctrica donde el almidón de maíz presenta su mejor resultado al obtener 11.23 k Ω -cm, superando considerablemente al testigo y la fibra de nopal (8.36 k Ω -cm), esto puede atribuirse a que el almidón de maíz tarda en cubrir por completo los pequeños poros gracias a que sus partículas son más finas que la fibra de nopal.

El almidón de maíz es la adición que presenta mejores resultados en todas las edades de velocidad de pulso ultrasónico estando por arriba de la mezcla testigo y de la mezcla con fibra de nopal, de acuerdo a los criterios de durabilidad los resultados se encuentran en una alta calidad del mortero (RED DURAR).

En la prueba de permeabilidad de cloruros tanto las adiciones como el testigo tienen un tipo de permeabilidad moderado ya que se registran valores arriba de 3000 Coulombs pero menores de 4000 Coulombs, lo cual puede atribuirse a que la matriz cementicia tiene poros de acuerdo a las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica.

En los ciclos de congelamiento y deshielo no afecta la resistividad eléctrica y la velocidad de pulso ya que los resultados obtenidos siguen estando en la misma clasificación que sin someterse a ciclos, se realizaron 15 ciclos cumpliendo con la norma (NMX-C-205-ONNCCE-2005) pero según Rehabilitar se requieren 400 ciclos, por tanto se podría seguir estudiando esta prueba a mas ciclos de prueba para conocer su comportamiento.

Las mezclas de mortero que se analizaron tienen un comportamiento físico-mecánico aceptable y cumplen con reducir las emisiones de CO₂ a la atmosfera ya



que también tienen un comportamiento más durable ante ciertos eventos agresivos a los que estarán expuestos los morteros adicionados.

La combinación de adiciones orgánicas densificó notablemente la matriz cementicia de acuerdo con los resultados de resistividad eléctrica ya que son mejores los resultados de las mezclas con adiciones y trajo consigo un incremento en la resistencia mecánica bajo sollicitaciones de compresión, flexión, tensión directa e indirecta.

La adición de almidón de maíz es la que presenta los mejores resultados en la mayoría de las pruebas por lo que sería una muy buena opción como adición para el mejoramiento de las calles empedradas de Tlalpujahua, México.

Se recomienda continuar estudiando estos materiales y realizar pruebas como capilaridad, abrasión entre otras.

Se propone para trabajos posteriores aumentar el contenido de cemento para tratar de cubrir toda el área superficial del agregado.



6. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO-T-106. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de construcción*, 7-38.
- Antigua, E. (2016, Septiembre 02). *Enciclopedia Antigua*. Retrieved from <http://enciclopedia.escolar.com/EnciclopediaAntigua/clases-y-tipos-de-almidon/>
- 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-109-M. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- ASTM-C-128. (2004). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. E.E.U.
- ASTM-C-142. (1997). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*.
- ASTM-C-151-00. (2014). *Método estandar de ensayo para expansión en autoclave del cemento portland*. EE.UU.: 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*.
- ASTM-C270. (2014). *Standard Specification For Mortar for Unit Masonry*. *ASTM International*, 9-10.
- ASTM-C-348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*. EE.UU.
- ASTM-C-40. (2004). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*.
- 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-597. (2009). *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete*. Estados Unidos.
- ASTM-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*.
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*. EE.UU.
- BS-4027:1980. (2000). *Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos*. Inglaterra: British Standards Institution.



- Cámara Nacional del Cemento. (2016, Julio 22-agosto). Retrieved from <http://www.canacem.org.mx>
- Castro, E. G. (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.
- Charles, J. H. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Estados Unidos: McGrae-Hill.
- Christianson, S.A. de C.V. (2014). *Crisota R-5*. México: Boletín Técnico.
- Correa, R. S. (1984). *Diseño de Mezclas de Mortero*. Colombia Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- del Valle Moreno, A. d., Guzmán Torres, J. A., Alonso Guzmán, E. M., Martínez Molina, W., Torres Acosta, A. A., Terán Guillén, J., . . . Martínez Madrid, M. (2015). *Solicitaciones mecánicas y estáticas a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adiciones con fibras deshidratadas de cactus opuntia*. Querétaro.
- Gouygou, M., Lafhaj, Z., & Soltani, F. (2009). Assesment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. *NDT&E International*.
- IMCYC. (2016). *Construcción y Tecnología*. México: IMCYC.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. colombia: Asociación Colombiana de productores de concreto.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2015). *Pruebas de Agregados*. México: IMCyC.
- Jacobo, S. J. (2014). *Tesis de Licenciatura: Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*. Morelia.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- Martínez Molina, W., Navarro Sánchez, L. M., & Espinoza Mandujano, A. (2011). Tiempos de fraguado utilizando las agujas de Gillmore. In *Análisis de Materiales*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil.
- Mendoza Anaya, D., Brito Benitez, E., & Arenas Alatorre, J. (2004). *La Ciencia de Materiales y su Impacto a la Arqueología*. México: Academia Mexicana de Ciencia de Materiales.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. A. (2011). *Análisis de Materiales*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil.
- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. England: ISBN 978-0-273-73219-8.



- NMX-C-057-ONCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la construcción y 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-071-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Determinación de la resistencia a compresión*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS PARA CONCRETO- PARTICULAS MAS FINAS DE LA CRIBA 0,075 mm (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO . México: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino. México: ONNCCE.
- NMX-C-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 Edificación, S.C.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción -Agua para Concreto- Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- 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 Edificación, S.C.
- 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 Edificación, S.C.
- 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 Edificación, S.C.



- NMX-C-165-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificació de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- 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 Edificación, S.C.
- 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-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.
- Pérez, A. (2012). *Morteros, pastas y lechadas*. Retrieved from FICAL: Foro Ibérico de la cal: http://www.fical.org/index.php?option=com_content&view=article&id=57:morteros-pastas-y-lechadas&catid=42:clasificacion&Itemid=145
- QuimiNet. (2016, Septiembre 02). *QuimiNet*. Retrieved from 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*. México: CYTED.
- Rivera, G. (2016, Octubre 11). *Durabilidad del concreto*. Retrieved from Durabilidad del concreto: <ftp://ftp.unicauca.edu.co>
- Shaw, I. B. (2000). *Tecnología del cemento*, Asocem.
- 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.