

---

---

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO



Facultad de Ingeniería Civil



Tesis Profesional  
“DENSIFICACIÓN DE MATRICES CEMENTICIAS A BASE  
DE ADICIONES ORGÁNICAS”

Que para obtener el título de:  
INGENIERO CIVIL

Presenta:  
FABIÁN LÓPEZ REGALADO

Asesor:  
DRA. ING. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Coasesores:  
M.I.T. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

M.I.T. CIPRIANO BERNABÉ REYES

Morelia Michoacán, México, Noviembre de 2016

---

---



## **Dedicatorias**

A Dios, por cuidarme, guiarme y acompañarme durante todo este tiempo y todo este recorrido, por permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida, por enseñarme que los sueños se cumplen cuando caminas a su lado, por demostrarme que si lo dejas entrar en tu corazón, todo es posible.

A mis padres, Ester Regalado García y Lamberto López Ríos, porque ellos son mi más grande motivación, mi inspiración y mi orgullo. No hay palabras que puedan describir el amor que siento por ambos. Sin ustedes, yo no sería nada.

A mis hermanos Jetzaly, Juan David y Audrey porque son el mejor regalo que me pudo dar la vida y mi motor para seguir creciendo como persona intentando ser un ejemplo para ustedes. Los amo.

A mis abuelos, Guadalupe García Rubio (mamalupe), Norberto Regalado Morales (papa), Emma Ríos Campos (mamaem) y de una forma muy especial a mi abuelo Pedro López Espinosa (papapit) (1942 – 2013), que estoy seguro que desde el cielo, nunca me dejó solo. Nunca conocerás amor más sincero que el de un abuelo a sus nietos. Su bendición siempre me acompañó.

A mis tíos, de manera muy especial a mi tía Rosa Regalado García y su esposo Jesús Santos Velázquez Guerrero por abrirme las puertas de su casa y brindarme apoyo siempre que lo necesité. Son mi segunda familia.

A mis primos, siempre luchen por lo que anhelan, todo es posible.



## **Agradecimientos**

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a la Facultad de Ingeniería Civil y al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” y su personal, por haberme facilitado las instalaciones, el equipo y todos los medios necesarios para esta investigación.

A mis padres y hermanos, por el gran apoyo que me dieron durante toda la carrera, por brindarme absolutamente todo, gracias por su enorme ayuda, su confianza, su entrega y sobre todo, por su amor.

A mi hermano Juan David López Regalado, por ayudarme a colar los especímenes utilizados en la investigación.

A mi asesora la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por ser tan humilde y tan sencilla, por poner toda su confianza en mí, sabiendo que iba a lograr lo que me propusiera, dándome ánimos para seguir adelante y siempre pelear por lo que quiero. Por tenerme paciencia y explicarme cada vez que yo lo requería.

A mis coasesores, M.I.T. Sandra del Carmen Arguello Hernández y M.I.T. Cipriano Bernabé Reyes, por el valioso tiempo que invirtieron en mí, por aclarar todas mis dudas, por estar ahí cuando los necesité, por corregirme, regañarme, apoyarme, motivarme y sobre todo, por ser algo más que mis coasesores, llegaron a ser para mí muy buenos amigos; aprendí de ustedes muchísimas cosas, desde todo lo relacionado con este trabajo hasta cómo ser como persona, me enseñaron la humildad, el respeto, la fidelidad y el valor de una amistad, gracias por los momentos tan agradables que pasamos, las desveladas, los días que se hacían eternos y el apoyo incondicional que me brindaron sin esperar nada a cambio. Gracias Berna, gracias Sandra.



Al M. A. Wilfrido Martínez Molina y al Dr. Hugo Luis Chávez García, por sus asesorías y el apoyo durante esta investigación.

A mis compañeros Fidel Bautista, Ariel Villanueva, Víctor Hugo Blancas, Giovanni Arciga, Osiel Morales, Oscar Cuellar y Sixto Pineda, que trabajaron en su tesis al mismo tiempo que yo y nos apoyamos mutuamente desde el inicio de este trabajo hasta el final, iniciamos juntos este nuevo reto y nos propusimos terminarlo, sé que lograrán lo que quieren, gracias por los días y noches enteras en el laboratorio, las discusiones, las risas, gracias.

A mis compañeros Amirais Flores y Emmanuel González Castro, gracias por explicarme, orientarme y por brindarme su ayuda cuando yo la necesité sin esperar nada a cambio.

A los chavos del verano Delfín y del Verano Nicolaita 2015, Herminia Sánchez, Benjamín Demeza, Carla Díaz, Esmeralda Velázquez, Mariela Hernández, Rasiel Omar Mucul, Irving Martínez, Donají Pérez, Ana María Zarco, Luis Manuel Ramírez (el archi), Noemí Lavariega, Luis Manuel Yopez, Daniel Barrón, Juan Armando Arias y Filiberto Vasquez; porque fueron de mucha ayuda para la realización de este trabajo, contribuyendo en la parte experimental. No solo ellos vinieron a aprender, sino que yo aprendí muchas cosas de ellos.

A los compañeros del servicio social, Mayra Alejandra Guiza y Job Daniel Álvarez, por su apoyo durante la experimentación de este trabajo.



## Índice de contenido

Dedicatorias .....	I
Agradecimientos.....	II
Índice de contenido .....	IV
Índice de figuras .....	VIII
Índice de tablas .....	XIV
Resumen .....	XVI
Abstract .....	XVII
Objetivo .....	XVIII
Justificación.....	XIX
1. Introducción .....	1
2. Marco teórico .....	3
2.1 Cemento.....	3
2.1.1 Proceso de fabricación del cemento Portland .....	3
2.1.2 Clasificación.....	5
2.1.3 Propiedades del cemento Portland.....	6
2.1.3.1 Propiedades Químicas .....	6
2.1.3.2 Propiedades Físicas .....	10
2.1.4 Especificaciones .....	12
2.1.5 Cemento utilizado en la investigación.....	15
2.2 Agregados.....	16
2.2.1 Origen de los agregados .....	17
2.2.2 Propiedades de los agregados .....	19
2.2.2.1 Físicas .....	19
2.2.2.2 Químicas .....	21
2.2.2.3 Mecánicas .....	21
2.2.3 Agregados utilizados en la investigación .....	23
2.3 Agua.....	23
2.3.1 Especificaciones .....	23
2.3.2 Agua utilizada en la investigación.....	25



2.4	Morteros .....	26
2.4.1	Tipos y usos.....	26
2.5	Materiales en estudio como sustitución parcial del cemento.....	27
2.5.1	Fibra de nopal.....	27
2.5.1.1	Antecedentes .....	27
2.5.1.2	Usos .....	28
2.5.1.3	Fibra de nopal utilizada en la investigación .....	29
2.5.2	Almidón.....	31
2.5.2.1	Antecedentes .....	31
2.5.2.2	Tipos.....	32
2.5.2.3	Fécula de maíz utilizada en la investigación .....	33
2.6	Aditivos.....	34
2.6.1	Tipos y usos.....	34
2.6.2	Aditivo utilizado en la investigación .....	36
3.	Metodología.....	37
3.1	Caracterización de los materiales utilizados en la investigación .....	37
3.1.1.	Cemento .....	37
3.1.1.1	Consistencia.....	37
3.1.1.2	Fraguado por el método de Gillmore .....	41
3.1.2.	Arena .....	43
3.1.2.1.	Cuarteo de la arena .....	44
3.1.2.2.	Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.....	50
3.1.2.3.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS). 53	
3.1.2.4.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).....	55
3.1.2.5.	Granulometría en arenas. ....	56
3.1.2.6.	Colorimetría en arenas.....	62
3.1.2.7.	Sedimentación en arenas.....	67
3.1.2.8.	Material que pasa por la malla #200. ....	69
3.1.2.9.	Terrones de arcilla. ....	72



3.1.2.10. Densidad de la arena.....	75
3.1.2.11. Equivalente de arena.....	77
3.1.3. Agua.....	80
3.1.4. Aditivo.....	80
3.2 Pruebas realizadas al mortero fresco.....	82
3.2.1. Fluidez.....	82
3.2.2. pH.....	86
3.2.3. Elaboración de especímenes.....	87
3.2.3.1. Cubos.....	88
3.2.3.2. Prismas.....	91
3.2.3.3. Briquetas.....	92
3.2.3.4. Cilindros.....	95
3.2.4. Curado.....	96
3.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido.....	97
3.3.1. No destructivas.....	97
3.3.1.1. Densidad.....	98
3.3.1.2. Gravedad específica (densidad relativa).....	100
3.3.1.3. Resistividad eléctrica.....	102
3.3.1.4. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	106
3.3.2. Pruebas Destructivas.....	108
3.3.2.1. Resistencia a la compresión simple.....	109
3.3.2.2. Resistencia a flexión.....	113
3.3.2.3. Resistencia a la tensión directa.....	117
3.3.2.4. Resistencia tensión indirecta.....	121
4. Resultados y discusiones.....	125
4.1 Características y propiedades de los materiales.....	125
4.1.1 Cemento.....	125
4.1.1.1 Consistencia.....	125
4.1.1.2 Fraguado por el método de Gillmore.....	125
4.1.2. Arena.....	126



4.1.2.1.	Cuarteo .....	126
4.1.2.2.	Humedad superficial y humedad de absorción en arenas .....	126
4.1.2.3.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS) .....	126
4.1.2.4.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).....	127
4.1.2.5.	Granulometría en arenas .....	128
4.1.2.6.	Colorimetría en arenas.....	131
4.1.2.7.	Sedimentación en arenas.....	132
4.1.2.8.	Material que pasa por la malla #200 .....	132
4.1.2.9.	Terrones de arcilla .....	133
4.1.2.10.	Densidad de la arena .....	133
4.1.2.11.	Equivalente de arena .....	134
4.2	Pruebas realizadas al mortero fresco.....	134
4.2.1	Fluidez .....	134
4.2.2	pH.....	135
4.2.3	Elaboración de especímenes .....	136
4.2.4	Curado.....	136
4.3	Pruebas realizadas al mortero endurecido.....	137
4.3.1	No destructivas .....	137
4.3.1.1	Densidad .....	137
4.3.1.2	Gravedad específica (densidad relativa) .....	139
4.3.1.3	Resistividad eléctrica.....	141
4.3.1.4	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) .....	145
4.3.2	Destructivas .....	150
4.3.2.1	Resistencia a la compresión simple .....	150
4.3.2.2	Resistencia a flexión.....	152
4.3.2.3	Resistencia a la tensión directa.....	155
4.3.2.4	Resistencia tensión indirecta.....	157
5.	Conclusiones .....	161
6.	Bibliografía.....	163



## Índice de figuras

Figura 2.1. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997). .....	9
Figura 2.2. Resistencia de los componentes principales del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997). .....	9
Figura 2.3. Fibra de nopal utilizada en la investigación, grado alimenticio. (F. López Regalado, 2016). .....	30
Figura 2.4. Nopal deshidratado en polvo. (F. López Regalado, 2016). .....	31
Figura 2.5. Almidón o fécula de maíz utilizada en la investigación, grado alimenticio. (F. López Regalado, 2016). .....	34
Figura 3.1. Formación del cráter de cemento. (F. López Regalado, 2016). .....	38
Figura 3.2. Agregado del agua al cemento. (F. López Regalado, 2016). .....	39
Figura 3.3. Mezclado de la muestra. (F. López Regalado, 2016). .....	39
Figura 3.4. Medición del tiempo de fraguado (F. López Regalado, 2016). .....	43
Figura 3.5. Divisor, charola y cucharón para realizar la prueba. (F. López Regalado, 2016). .....	46
Figura 3.6. Agregado de la muestra a través del divisor. (F. López Regalado, 2016). .....	46
Figura 3.7. Colocación del material en una superficie limpia. (F. López Regalado, 2016). .....	47
Figura 3.8. Mezclado del material. (F. López Regalado, 2016). .....	48
Figura 3.9. Aplanado de la pila. (F. López Regalado, 2016). .....	48
Figura 3.10. División de la muestra en cuartos iguales. (F. López Regalado, 2016). .....	49
Figura 3.11. Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico. (F. López Regalado, 2016). .....	52
Figura 3.12. Pesado del recipiente lleno con el material. (F. López Regalado, 2016). .....	54
Figura 3.13. Colocación de las mallas. (F. López Regalado, 2016). .....	57
Figura 3.14. Mallas colocadas en orden decreciente. (F. López Regalado, 2016). .....	58



Figura 3.15. Utilización de la maquina Raf-tap para agitar la muestra. (F. López Regalado, 2016).....	58
Figura 3.16. Extracción del material retenido en cada una de las mallas. (F. López Regalado, 2016).....	59
Figura 3.17. Material retenido en cada una de las mallas previamente pesado. (F. López Regalado, 2016). ....	60
Figura 3.18. Ejemplo de gráfica de composición granulométrica. ....	62
Figura 3.19. Elaboración de la solución de color normal. (F. López Regalado, 2016).....	64
Figura 3.20. Vaciado del material dentro del biberón. (F. López Regalado, 2016). .....	65
Figura 3.21. Muestras dejandose reposar durante 24 horas. (F. López Regalado, 2016).....	65
Figura 3.22. Tabla colorimétrica. (F. López Regalado, 2016).....	66
Figura 3.23. Llenado del recipiente. (F. López Regalado, 2016).....	68
Figura 3.24. Agitación del material. (F. López Regalado, 2016).....	68
Figura 3.25 Muestras en reposo. (F. López Regalado, 2016). ....	69
Figura 3.26. Lavado del material. (F. López Regalado, 2016).....	71
Figura 3.27. Muestras representativas para la realización de la prueba de terrones de arcilla. (F. López Regalado, 2016). ....	73
Figura 3.28. Desintegración de los terrones de arcilla. (F. López Regalado, 2016). .....	74
Figura 3.29. Humectación de la mesa de fluidez. (F. López Regalado, 2016). ....	83
Figura 3.30. Compactación de la mezcla. (F. López Regalado, 2016).....	84
Figura 3.31. Enrasado de la mezcla. (F. López Regalado, 2016). ....	84
Figura 3.32. Expansión de la mezcla de forma manual, haciendo girar la leva. (F. López Regalado, 2016). ....	85
Figura 3.33. Toma de lecturas para obtener la fluidez. (F. López Regalado, 2016). .....	85
Figura 3.34. Instrumentos para realizar la medición del pH. (F. López Regalado, 2016).....	86



Figura 3.35. Determinación del pH en el mortero fresco. (F. López Regalado, 2016).	87
Figura 3.36. Llenado de los moldes cúbicos. (F. López Regalado, 2016).	88
Figura 3.37. Etapas del llenado de cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm.	89
Figura 3.38. Apisonado en el llenado de los moldes cúbicos. (F. López Regalado, 2016).	89
Figura 3.39. Enrazado del cubo. (F. López Regalado, 2016).	90
Figura 3.40. Desmoldado de cubos. (F. López Regalado, 2016).	90
Figura 3.41. Nomenclatura de especímenes. (F. López Regalado, 2016).	91
Figura 3.42. Molde para la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).	92
Figura 3.43. Llenado de los moldes para la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).	93
Figura 3.44. Apisonado de la mezcla para la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).	93
Figura 3.45. Enrazado de las briquetas. (F. López Regalado, 2016).	94
Figura 3.46. Retiro del molde en la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).	94
Figura 3.47. Secuencia en la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).	95
Figura 3.48. Briquetas terminadas colocadas sobre una superficie de vidrio previamente engrasada. (F. López Regalado, 2016).	95
Figura 3.49. Curado de especímenes. (F. López Regalado, 2016).	97
Figura 3.50. Picnómetro y probeta a utilizar en la determinación de la densidad. (F. López Regalado, 2016).	98
Figura 3.51. Pesado del espécimen marcado y superficialmente seco. (F. López Regalado, 2016).	99
Figura 3.52. Determinación de la densidad. (F. López Regalado, 2016).	100
Figura 3.53. Determinación de la gravedad específica. (F. López Regalado, 2016).	102
Figura 3.54. Montado de los cubos en el equipo. (F. López Regalado, 2016).	103
Figura 3.55. Montado de los prismas en el equipo. (F. López Regalado, 2016).	104



Figura 3.56. Medición de la Resistividad Eléctrica. (F. López Regalado, 2016)..	105
Figura 3.57. Equipo para medir la Velocidad de Pulso Ultrasónico. (E. González Castro, 2016).....	107
Figura 3.58. Colocación del espécimen en la máquina de prueba Tinius Olsen. (F. López Regalado, 2016). .....	110
Figura 3.59. Centrado del espécimen entre las platinas. (F. López Regalado, 2016). .....	111
Figura 3.60. Aplicación de la carga hasta la falla de la muestra. (F. López Regalado, 2016).....	111
Figura 3.61. Falla de la muestra. (F. López Regalado, 2016). .....	112
Figura 3.62. Marcado de los prismas a dos centímetros de sus extremos y al centro del claro. (F. López Regalado, 2016). .....	114
Figura 3.63. Colocación del prisma sobre los apoyos. (F. López Regalado, 2016). .....	115
Figura 3.64. Colocación del prisma en la máquina universal de pruebas Tinius Olsen. (F. López Regalado, 2016). .....	115
Figura 3.65. Fractura del espécimen sometido a tensión por flexión. (F. López Regalado, 2016).....	116
Figura 3.66. Representación de la prueba de flexión estática en prismas, mediante un solo punto de carga.....	117
Figura 3.67. Nivelación de la máquina de pruebas para tensión en morteros tipo Michaelis. (F. López Regalado, 2016). .....	118
Figura 3.68. Colocación de las municiones hasta la falla de la briqueta. (F. López Regalado, 2016).....	119
Figura 3.69. Falla de la muestra. (F. López Regalado, 2016). .....	119
Figura 3.70. Obtención de la masa de los cilindros metálicos. (F. López Regalado, 2016). .....	120
Figura 3.71. Marcado de los especímenes. (F. López Regalado, 2016). .....	122
Figura 3.72. Colocación de la tira inferior de cuero debajo del espécimen. (F. López Regalado, 2016). .....	123
Figura 3.73. Falla del cilindro por tensión indirecta. (F. López Regalado, 2016). .....	123



Figura 4.1. Gráfica de composición granulométrica de la arena de “Joyitas”.....	130
Figura 4.2. Comparación del resultado de la prueba con la tabla colorimétrica. (F. López Regalado, 2016). .....	131
Figura 4.3. Resultados de la prueba de sedimentación. (F. López Regalado, 2016). .....	132
Figura 4.4. pH del mortero fresco. (F. López Regalado, 2016). .....	136
Figura 4.5. Resultados de densidad en cubos a 7 días.....	137
Figura 4.6. Resultados de densidad en cubos a 28 días.....	138
Figura 4.7. Resultados de densidad en cubos a 45 días.....	138
Figura 4.8. Gravedad específica en cubos a 7 días. ....	139
Figura 4.9. Gravedad específica en cubos a 28 días. ....	140
Figura 4.10. Gravedad específica en cubos a 45 días. ....	140
Figura 4.11. Resistividad eléctrica en cubos a 7 días. ....	141
Figura 4.12. Resistividad eléctrica en cubos a 28 días. ....	142
Figura 4.13. Resistividad eléctrica en cubos a 45 días. ....	142
Figura 4.14. Resistividad eléctrica en prismas a 7 días. ....	143
Figura 4.15. Resistividad eléctrica en prismas a 28 días. ....	144
Figura 4.16. Resistividad eléctrica en prismas a 45 días. ....	144
Figura 4.17. Resistividad eléctrica en prismas a 90 días. ....	145
Figura 4.18. Velocidad de pulso ultrasónico en cubos a 7 días. ....	146
Figura 4.19. Velocidad de pulso ultrasónico en cubos a 28 días.....	147
Figura 4.20. Velocidad de pulso ultrasónico en cubos a 45 días.....	147
Figura 4.21. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 7 días.....	148
Figura 4.22. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 28 días.....	149
Figura 4.23. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 45 días.....	149
Figura 4.24. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 90 días.....	150
Figura 4.25. Resistencia a compresión simple a 7 días. ....	151
Figura 4.26. Resistencia a compresión simple a 28 días. ....	151
Figura 4.27. Resistencia a compresión simple a 45 días. ....	152
Figura 4.28. Módulo de ruptura a 7 días. ....	153
Figura 4.29. Módulo de ruptura a 28 días. ....	153



Figura 4.30. Módulo de ruptura a 45 días. ....	154
Figura 4.31. Módulo de ruptura a 90 días. ....	154
Figura 4.32. Resistencia a tensión directa a 7 días.....	155
Figura 4.33. Resistencia a tensión directa a 28 días.....	156
Figura 4.34. Resistencia a tensión directa a 45 días.....	156
Figura 4.35. Resistencia a tensión directa a 90 días.....	157
Figura 4.36. Resistencia a tensión indirecta a 7 días.....	158
Figura 4.37. Resistencia a tensión indirecta a 28 días.....	158
Figura 4.38. Resistencia a tensión indirecta a 45 días.....	159
Figura 4.39. Resistencia a tensión indirecta a 90 días.....	159



## Índice de tablas

Tabla 0.1. Producción y consumo de cemento en los últimos años en México. (CANACEM, 2016) .....	XIX
Tabla 2.1. Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	5
Tabla 2.2. Clasificación de los Cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	5
Tabla 2.3. Abreviaturas de los óxidos del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).....	6
Tabla 2.4. Componentes principales del cemento Portland (Shetty, 2005).....	7
Tabla 2.5. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997). .....	8
Tabla 2.6. Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014). .....	12
Tabla 2.7. Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	13
Tabla 2.8. Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	13
Tabla 2.9. Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	14
Tabla 2.10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014). .....	14
Tabla 2.11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).....	24
Tabla 2.12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua (Instituto del Concreto, 1997).....	25
Tabla 3.1. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos. ....	43
Tabla 3.2. . Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de granulometría. ....	60
Tabla 3.3. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M. ....	61
Tabla 3.4. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004).....	66
Tabla 3.5. . Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200). ....	72



Tabla 3.6. Dosificación del CRISOTAN R-5 en polvo para una mezcla de concreto. .....	81
Tabla 3.7. . Criterios de evaluación. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000). .....	106
Tabla 3.8. Criterios de evaluación en Velocidad de Pulso Ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).....	108
Tabla 3.9. Ejemplo de tabla de registro para resistencia a la compresión simple. .....	112
Tabla 4.1. Resultados de consistencia normal. ....	125
Tabla 4.2. . Resultados de tiempos de fraguado. ....	125
Tabla 4.3. Resultados del porcentaje de humedad de absorción en la arena. ....	126
Tabla 4.4. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta. (MVSS).....	127
Tabla 4.5. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada. (MVSV). ....	127
Tabla 4.6. Módulo de finura de la muestra 1. ....	128
Tabla 4.7. Módulo de finura de la muestra 2. ....	128
Tabla 4.8. Módulo de finura de la muestra 3. ....	129
Tabla 4.9. Módulo de finura promedio. ....	130
Tabla 4.10. Resultados de colorimetría. ....	131
Tabla 4.11. Porcentaje de material fino que contiene la arena.....	132
Tabla 4.12. Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena. ....	133
Tabla 4.13. Resultados de la densidad de la arena. ....	133
Tabla 4.14. Porcentaje del equivalente de arena. ....	134
Tabla 4.15. Resultados de fluidez para cada mezcla. ....	135
Tabla 4.16. Resultados y comparación. ....	160



## Resumen

La sustitución parcial de fibras orgánicas como la fibra de nopal (FN) y el almidón (fécula de maíz, MZ), fue realizada para mejorar las propiedades físico – mecánicas de los morteros base Cemento Portland (CP), así como para reducir la cantidad de cemento que se utiliza en la elaboración de dicho mortero.

La arena utilizada en la investigación fue volcánica, extraída del banco de materiales llamado “Joyitas”, ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia - Quiroga en el acceso a la localidad de San Bernabé en Michoacán; la fibra de nopal y el almidón o fécula de maíz.

Las sustituciones utilizadas fueron FN 0.5%, FN 1.5% y FN 0.5% - MZ 2%, en relación a la masa de cemento.

Se realizaron probetas en forma cúbica, prismática, cilíndrica y en forma de briquetas, realizándoles pruebas no destructivas como densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico; y pruebas destructivas como resistencia a compresión simple, tensión directa e indirecta y flexión. Las edades de prueba fueron 7, 28, 45 y 90 días. Se compararon los resultados de las tres mezclas con la mezcla testigo para cada prueba. La caracterización de los materiales y los procedimientos de pruebas destructivas y no destructivas se realizaron siguiendo la normativa ASTM y las normas mexicanas NMX. Las pruebas no destructivas son un parámetro que indica de manera indirecta la densidad de los morteros; fueron obtenidos resultados favorables en pruebas no destructivas, incluso superiores que la mezcla testigo; en cuanto a las pruebas destructivas, los resultados solo se incrementaron en algunos casos a la edad de 28 días. Los resultados más favorables, que superan a la mezcla testigo, se obtienen en la mayoría de los casos con la sustitución de FN 0.5% - MZ 2%.

**Palabras clave:** mortero, fibra de nopal, almidón, pruebas destructivas, pruebas no destructivas.



## **Abstract**

The partial substitution of organic fibers such as Cactus fiber (FN) and starch (cornstarch, MZ), was carried out to improve the properties of physical - mechanical of Portland cement mortars (CP) and reduce the amount of cement used in the elaboration of mortar.

The sand used in the research was volcanic, extracted from the bank of materials called "Jewels", located at 28 km of the highway Morelia - Quiroga in the access to the village of St. Bernabe in Michoacan; the Cactus fiber and cornstarch. The substitutions used were FN 0.5%, FN 1.5% and FN 0.5% - MZ 2%, relative to the cement mass.

Test specimens were made in cubic, prismatic, cylindrical and briquette form, performing non-destructive tests such as density, specific gravity, electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity; and destructive testing as simple compression, direct and indirect tension and bending resistance.

The test ages were 7, 28, 45 and 90 days. The results of the three mixtures were compared with the control mixture for each test. Characterization of materials and non-destructive and destructive testing procedures were performed following the American standards (ASTM) and the Mexican standards (NMX). Non-destructive tests are a parameter which indirectly indicates the density of mortars; were obtained favorable results in non-destructive testing, even greater than the control mixture; in terms of destructive tests, the results only increased in some cases at the age of 28 days. The most favorable results, exceeding the mixture control, were in the majority of cases with the replacement of 0.5% FN - MZ 2%.

**Key words:** mortar, nopal fiber, starch, destructive tests, non-destructive tests.



## **Objetivo**

El objetivo de esta investigación consiste en analizar de manera detallada, las propiedades físicas y mecánicas del mortero común, sustituido parcialmente con materiales orgánicos como la fibra de nopal y el almidón; mediante pruebas no destructivas como son densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico; y pruebas destructivas tales como resistencia a la compresión simple, tensión directa e indirecta y flexión; esto con la finalidad de disminuir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.



## Justificación

Para el año 2056 la construcción con concreto será la forma más común en países como los Estados Unidos e incluso México. El clima cambiante hará que la construcción con concreto adquiera prominencia, gracias a ser monolítico, masivo, sustentable y resistente. El proceso total de la construcción con concreto será más simple y efectivo como resultado de la necesidad de reducir energía. Los procesos incluirán mejoras en la producción, entrega y técnicas de control de calidad del material (Guzmán, 2016).

En México, es notable el incremento del uso del cemento Portland a través de los años, para el año 2013, se registraba un consumo de 32.7 millones de toneladas, y para el año 2014 se registra un consumo de 35.2 millones de toneladas de cemento en el país, esto representa un 7.65% de aumento en el consumo en tan solo un año. La producción de cemento, al igual que su consumo, ha ido incrementando debido a la demanda, esta producción aumentó en un 5.78 % entre los años 2013 y 2014. Tabla 0.1.

Tabla 0.1. Producción y consumo de cemento en los últimos años en México. (CANACEM, 2016)

Año	Producción	Consumo Nacional (Millones Tons.)	Habitantes	Kgs/Habitante
2009	35.1	34.4	107,550,697	321
2010	34.5	33.9	112,336,538	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 5% de toda la producción mundial de CO<sub>2</sub> se debe a la fabricación del cemento, y este es un porcentaje que, en años sucesivos, no solo se mantendrá, sino que se incrementará conforme se activen las economías emergentes asiáticas. Tengamos



en cuenta que el cemento Portland es el elemento fundamental del concreto y el mortero, y este es, junto con el acero y el aluminio, uno de los productos más consumidos mundialmente en la construcción. Para cuantificar de una manera sencilla la aportación de cemento a la producción de CO<sub>2</sub> basta con analizar los siguientes datos: cada tonelada de cemento Portland producida por el sistema convencional genera una tonelada de CO<sub>2</sub>; si en vez de cemento convencional, producimos cementos especiales podemos llegar a reducir la cifra de emisiones de CO<sub>2</sub> a 0.4 toneladas por tonelada producida (Domoterra, 2013).

Una de las opciones para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas en la elaboración del cemento Portland, es agregar materiales orgánicos que sustituyan un cierto porcentaje de cemento. Al evaluar las características físico – mecánicas de estos nuevos productos, se puede evaluar la viabilidad de aplicar dichas sustituciones. El presente trabajo contribuye, además de buscar mejoras en las características del mortero, en reducir el impacto ambiental que se ve reflejado en el fenómeno del calentamiento global.



## 1. Introducción

En la tecnología del concreto actual, y en todos los continentes, hay una tendencia muy clara e irreversible hacia la utilización de los cementos adicionados, más aún que el uso de cementos Portland convencionales. Esta tendencia está asociada con la gran importancia que ha adquirido el concepto de durabilidad del concreto, y además con la creciente preocupación por los temas de protección ambiental, amén de los beneficios económicos implícitos en su uso.

Los cementos adicionados (o compuestos), son mezclas de Clínker de cemento Portland, sulfato de calcio (yeso) y adiciones minerales; estos cementos pueden ser producidos por molienda conjunta de esos componentes o por la mezcla de los componentes finamente molidos.

Las adiciones minerales de uso más frecuente pueden clasificarse en tres grupos dependiendo de su actividad y de su contribución al desarrollo de la resistencia del cemento.

- **Adiciones hidráulicas** (o con hidraulicidad latente): son adiciones que poseen un potencial hidráulico natural, pero que requieren un activador para que puedan endurecer bajo agua; dicho activador puede ser: cal, Clínker de cemento Portland, yeso o un activador químico. La adición típica de este grupo es la escoria.
- **Adiciones puzolánicas:** son adiciones que solo endurecen en presencia de Clínker de cemento Portland debido a que la reacción ocurre entre los silicatos activos del material puzolánico y el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) liberado por el Clínker en el transcurso de la hidratación. Los materiales más comunes pertenecientes a este grupo son: la puzolana natural, por lo general de origen volcánico, y la ceniza volante.



- **Adiciones inertes:** son adiciones que no poseen actividad hidráulica ni puzolánica, pero que contribuyen al desarrollo de otras propiedades del cemento, diferentes de la resistencia. Se usa comúnmente el llenante calizo, en especial cuando se trata de la producción de cementos para mampostería.

El proceso para la fabricación de los cementos adicionados debe ser diseñado de acuerdo con las propiedades químicas y físicas de las adiciones, y además con miras a las especificaciones del producto final, por lo cual puede ser diferente del proceso de fabricación de un cemento Portland.

La producción de los cementos adicionados se ha incrementado de modo importante en todo el mundo por múltiples razones, como el mejoramiento de las propiedades del cemento y de su calidad, la posibilidad de producir cementos especiales para aplicaciones específicas, la conservación de energía térmica y de los recursos minerales, la necesidad de disminuir emisiones de CO<sub>2</sub> y de calor a la atmósfera, la posibilidad de usar subproductos de otras industrias así como el incremento de la productividad en la industria cementera.

El uso de los cementos adicionados en la fabricación de concretos traen consigo una serie de ventajas, tales como: resistencias que son desarrolladas a edades tardías, 28 o más días, siempre y cuando se realice el curado adecuado, se consiguen altas o muy altas resistencias finales, mayor durabilidad, debida a la formación de una matriz de cemento más densa que evita además el desarrollo de la carbonatación, mayor densidad de la matriz cementosa ayudando a la menor permeabilidad, alta resistencia a los sulfatos y al agua de mar y una menor propensión a la reacción álcali – agregado, igualmente por la menor presencia del Clínter en el cemento Portland (Correa, 2000).



## 2. Marco teórico

### 2.1 Cemento

El cemento Portland es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un elemento 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 (Instituto del Concreto, 1997).

#### 2.1.1 Proceso de fabricación del cemento Portland

El proceso de fabricación empleado en plantas productoras de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares, pero en general todas realizan las siguientes 6 etapas:

1. **Explotación de materias primas:** este procedimiento se realiza de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre es suficiente. Una vez extraídos los materiales de las respectivas canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de 1". Los materiales que no requieran trituración se llevan a un lugar de almacenamiento (Instituto del Concreto, 1997).
2. **Dosificación, molienda y homogenización de materias primas:** las materias primas seleccionadas se Trituran, muelen y dosifican de tal



manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada (Kosmatha & Panarese, 1992).

3. **Clínkerización:** Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno, pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para calcinar es inyectado; donde las temperaturas de 1 420°C a 1 650°C transforman químicamente a la materia prima en Clínker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro (Kosmatha & Panarese, 1992).
4. **Enfriamiento:** el material transformado en Clínker debe ser enfriado rápidamente a 70°C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presente cambio de volumen.
5. **Molienda de Clínker, adiciones de yeso:** en este proceso se transforma el Clínker en polvo y se agregan las adiciones (puzolanas o escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200 y así se obtiene el cemento Portland propiamente dicho. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez que entra en contacto con el agua, porque cuando su proporción es baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea.
6. **Empaque y distribución:** el cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaca en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel (Instituto del Concreto, 1997).



### 2.1.2 Clasificación

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 2.1, pero la normativa ha cambiado y ahora se utiliza la indicada en la tabla 2.2. Esta nomenclatura solo se utiliza en México, la nomenclatura a nivel mundial sigue utilizando los números romanos de ASTM C 150.

Tabla 2.1. Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

Tabla 2.2. Clasificación de los Cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario	20	RS (Resistente a los Sulfatos)
<b>CPP</b>	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA (Baja Reactividad Álcali Agregado)
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R= Resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto	40	B (Blanco)



<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	-
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

### 2.1.3 Propiedades del cemento Portland

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

#### 2.1.3.1 Propiedades Químicas

El proceso de clinkerización del cemento Portland involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento Portland frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en la tabla 2.3. Los cuatro compuestos principales del cemento Portland se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.3. Abreviaturas de los óxidos del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).

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



Tabla 2.4. Componentes principales del cemento Portland (Shetty, 2005).

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

De esta forma se habla de las fases:

- **Halita, con alto contenido de  $\text{C}_3\text{S}$ :** es la fase principal de la mayoría de los Clínters Portland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial (Instituto del Concreto, 1997).
- **Belita:** es usualmente la segunda fase en importancia del Clínter. Su componente principal ( $\text{C}_2\text{S}$ ) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días. Las fases belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suman aproximadamente de 70 a 80% del cemento Portland. Se supone que de manera aproximada, el  $\text{C}_3\text{S}$  aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas) y el  $\text{C}_2\text{S}$  a mediano y largo plazo (contribución al desarrollo de la resistencia de la cuarta semana en adelante).
- **Aluminato tricálcico:** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de  $\text{C}_3\text{A}$  con algo de impurezas de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{MgO}$  que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una



alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto, propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento (Instituto del Concreto, 1997).

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

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

En la tabla 2.5 se enumeran algunos valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cemento. En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente la contribución de los componentes principales del cemento, en calor de hidratación y en la Figura 2.2 la resistencia a la compresión (Instituto del Concreto, 1997).

Tabla 2.5. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

Cemento	Composición Química en %			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
Tipo I	48	27	12	8
Tipo II	40	35	5	13
Tipo III	62	13	9	8
Tipo IV	25	50	5	12
Tipo V	38	37	4	9

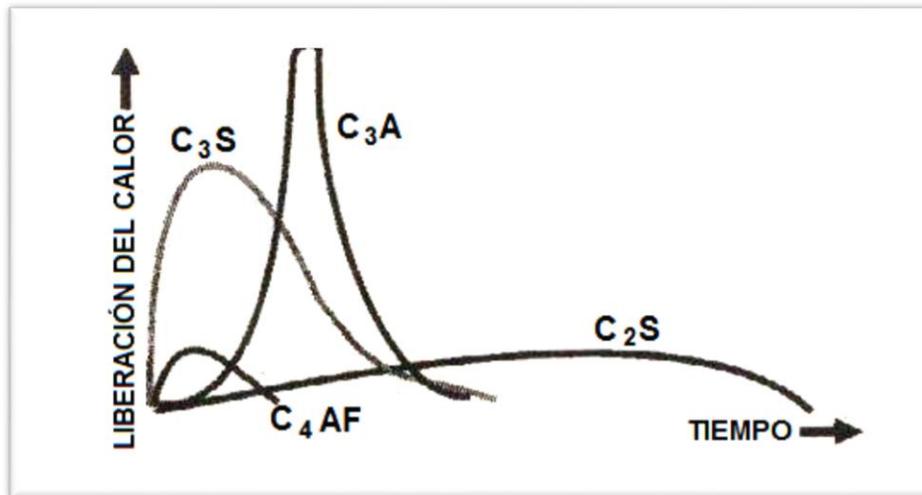


Figura 2.1. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

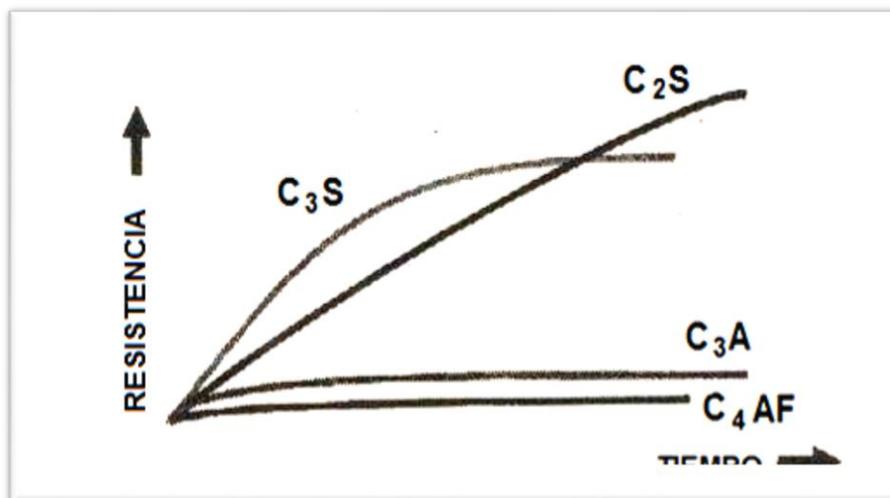


Figura 2.2. Resistencia de los componentes principales del cemento Portland (Instituto del Concreto, 1997).

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

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



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

### 2.1.3.2 *Propiedades Físicas*

Las propiedades físicas más importantes del cemento son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión.

- **Densidad:** es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Portland normal, suele estar muy cercano a  $3.15 \text{ g/cm}^3$ . En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de Clínter por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de  $2.9 \text{ g/cm}^3$ , dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.
- **Finura:** el proceso de molienda de Clínter y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y



aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.

- **Consistencia normal:** es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% (Instituto del Concreto, 1997).
  
- **Tiempos de fraguado:**
  - **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica formada por la hidratación del cemento pierde su fluidez, llegando a disminuir su viscosidad y por tanto su plasticidad.
  - **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta endurece.
  - **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
  - **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.
  
- **Expansión en autoclave:** para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Las normas NMX-C-062 y ASTM-C-151, limitan la



expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave. Este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 25.4 cm hechas de pasta de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

### 2.1.4 Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites de la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

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



- (2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.  
 (3) El Cemento Portland Compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual o en conjunto con Clínter + yeso.

Los requisitos que deben cumplir los componentes principales del cemento están mostrados en la tabla 2.7. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Tabla 2.7. Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Componente principal	Índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días (% mínimo)	Carbonatos totales (% mínimo)
Escoria Granulada de Alto Horno	75	-
Puzolana	75	-
Humo de Sílice	100	-
Caliza	-	75

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

Tabla 2.8. Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

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



Tabla 2.9. Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Propiedades	Tipos de cemento	Especificación (% en masa)
Pérdida por ignición	CPO, CEG	Max 5.0 %
Residuo insoluble	CPO, CEG	Max 5.0 %
Sulfato (SO <sub>3</sub> )	Todos	Max 5.0 %

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, este debe cumplir con las especificaciones indicadas en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por reacción álcali agregado (máx. %)		Calor de hidratación (máx.) KJ/Kg (Kcal/Kg)		Blancura (min. %)
			1 año	14 días	56 días	7 días	
RS	Resistente a los Sulfatos	0.1	-	-	-	-	-
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	-	0.02	0.06	-	-	-
BCH	Bajo Calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-
B	Blanco	-	-	-	-	-	70



### 2.1.5 Cemento utilizado en la investigación

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

El cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta un bajo contenido de Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). La norma inglesa para este cemento, BS 4027:1980, estipula un contenido de  $C_3A$ , del 3.5%. La finura mínima es  $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ . El cemento resistente a los sulfatos debe cumplir con la norma BS 12: 1978 para cemento Portland normal.

En los Estados Unidos de Norteamérica, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma (ASTM C 150, 2016). Esta especificación limita el contenido de  $C_3A$  al 5% y también restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetrálcico ( $C_4AF$ ), a más del doble del contenido de  $C_3A$  al 20%. El contenido de óxido de magnesio está limitado a un 6%.

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

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



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

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

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

## **2.2 Agregados**

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

El sólo hecho de que los agregados ocupen del 70 al 80 % del volumen del concreto, su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable. Para saber más sobre el concreto es muy importante que se aprenda más acerca de los agregados que constituyen el mayor volumen del concreto. La



profundidad y el alcance de los estudios que se requieren para entender sus efectos variables y su influencia en las propiedades del concreto no pueden ser subestimados (Shetty, 2005).

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

### **2.2.1 Origen de los agregados**

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

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

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



extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie (Instituto del Concreto, 1997).

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

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

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

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



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

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

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

## **2.2.2 Propiedades de los agregados**

### **2.2.2.1 Físicas**



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

- **Granulometría.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición. La malla No. 4 separa las gravas de las arenas. Los morteros se elaboran con todo el material que pasa la malla No. 4.
- **Porosidad y absorción.** Cuanto más poroso es el material, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.
- **Masa unitaria.** La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa (Instituto del Concreto, 1997).
- **Forma.** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles intrusiones en la roca y su estado de meteorización. La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.



- **Textura.** Reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como: densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar.

### 2.2.2.2 Químicas

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

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

### 2.2.2.3 Mecánicas

- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como



aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.

- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurecida. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.
- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto.** Es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.
- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto entre agregado y pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico – químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende



de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas (Instituto del Concreto, 1997).

### **2.2.3 Agregados utilizados en la investigación**

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

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

## **2.3 Agua**

### **2.3.1 Especificaciones**

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



elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Tabla 2.11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

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

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

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

(c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl<sub>2</sub> como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.



El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). En la tabla 2.12 se dan a conocer los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

Tabla 2.12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua (Instituto del Concreto, 1997).

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

### 2.3.2 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.



## 2.4 Morteros

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

### 2.4.1 Tipos y usos

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

**Mortero físico.** El paso del estado pastoso o semilíquido a un sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.

**Mortero químico.** El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero se cuenta con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.

**Mortero aéreo.** Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.

**Mortero bituminoso.** Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.

**Mortero hidráulico.** Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad



como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento (Mendoza Anaya, et al., 2004).

Los morteros de cemento Portland se elaboran con arena, agua y cemento Portland. Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar ladrillos y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeños resquicios ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos. Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia (Constructor Civil, 2016).

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

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

## **2.5 Materiales en estudio como sustitución parcial del cemento**

### **2.5.1 Fibra de nopal**

#### **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 cactáceas. 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 suelo no salino o muy arenoso. (Torres Acosta, et al., 2010).

### 2.5.1.2 Usos

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.

En la medicina tradicional mexicana el nopal también se utiliza para el tratamiento de diabetes y contra altas concentraciones de colesterol. Su acción baja el azúcar de la sangre documentado ya en algunos estudios.

Diversas especies del cactus de nopal se han empleado como fuente de aditivos a la producción de cal y la conservación de la arquitectura en América Latina. Por ejemplo, una de las prácticas actualmente extensas de conservación es utilizar el residuo de agua hervida con cactus de nopal, comúnmente disponible en la



producción de masilla de cal que se emplea como una capa para proteger o reparar las iglesias o misiones de adobe en México y suroeste de América del Sur (Torres Acosta, et al., 2010).

Son muchos los sectores industriales que se pueden beneficiar con la explotación del nopal, ya que esta planta es de gran ayuda para el desarrollo de diferentes tecnologías para beneficio del hombre. A continuación se mencionan alguna de ellas (Torres Acosta, et al., 2010):

- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas de tuna y nopalitas).
- Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas).
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal).
- Industria cosmética (cremas, “shampoo”, lociones de cladodios).
- Industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios).
- Industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta).
- Sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios).
- Sector energético (producción de biogás a partir de las pencas).
- Sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos).
- Sector turismo (artesanías con base en cladodios lignificados).
- Industria textil (uso de colorantes naturales, como el carmín de cochinilla).
- Aditivo anticorrosivo en concreto reforzado (del Valle Moreno, et al., 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, es de grado alimenticio para humanos. Figura 2.3.

Los porcentajes utilizados como sustitución parcial de cemento fueron 0.5% y 1.5%. Se utilizó en estado deshidratado en forma de polvo. Figura 2.4.



Figura 2.3. Fibra de nopal utilizada en la investigación, grado alimenticio. (F. López Regalado, 2016).



Figura 2.4. Nopal deshidratado en polvo. (F. López Regalado, 2016).

Como se observa en la Figura 2.4, el color de la fibra de nopal es amarillento.

## 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.

Los seres humanos al consumir dichas plantas adquieren las propiedades de éstos, por lo tanto, los almidones 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.

Los almidones no sólo se originan en las plantas, también pueden ser elaborados de manera artificial y hay algunos alimentos que tienen éstos como base. (QuimiNet, 2016).



### 2.5.2.2 Tipos

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

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

(QuimiNet, 2016).

#### ***Fécula de maíz***

Uno de los almidones más conocidos es la fécula de maíz, esta proviene de los cereales, granos y harinas.

La fécula de maíz es conocida como harina fina de maíz, almidón de maíz o maicena.

La fécula 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.

La maicena puede ser dispersada en agua, dando lugar así a la formación de suspensiones de baja viscosidad que pueden ser fácilmente mezcladas y bombeadas, actuando como agentes espesante en salsas y en la elaboración de gomas comestibles. (QuimiNet, 2016).



### **Características de la fécula de maíz**

La fécula de maíz cuenta con diversas características como son:

- **Gelatinización**

Durante la gelatinización o formación de gel o mucílago, se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio de temperatura, siendo los gránulos más finos los que primero gelatinizan.

- **Retrogradación**

Se define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y reaccionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos.

- **Gelificación**

Cuenta con excelente gelificación debido a que tiene una baja viscosidad y es opaca. (QuimiNet, 2016).

#### **2.5.2.3 Fécula de maíz utilizada en la investigación**

El almidón o fécula de maíz que se utilizó en la investigación es conseguido en cualquier centro comercial, es de grado alimenticio para humanos, Figura 2.5. El porcentaje que se utilizó de almidón es de 2% combinado con fibra de nopal en un porcentaje de 1.5% con respecto 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 a la mezcla testigo, en pruebas como resistencia a la compresión y resistividad eléctrica.



Figura 2.5. Almidón o fécula de maíz utilizada en la investigación, grado alimenticio. (F. López Regalado, 2016).

## 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 o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto.

### 2.6.1 Tipos y usos

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

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, resistente y durable. Esta calidad se puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados.

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.
5. Es más fácil adicionar materiales que producir cementos especiales.

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se le 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, et al., 2004).

### **2.6.2 Aditivo utilizado en la investigación**

El aditivo que se utilizó en esta investigación fue el Crisotan R-5, distribuido principalmente para la construcción. Está clasificado como un aditivo plastificante (fluidificante). La presentación que se utilizó es en polvo, tiene un color café oscuro.



### 3. Metodología

#### 3.1 Caracterización de los materiales utilizados en la investigación

##### 3.1.1. Cemento

###### 3.1.1.1 Consistencia

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 mm  $\pm$  1 mm bajo la superficie libre, durante 30 segundos después de haber iniciado la prueba (NMX-C-057-ONNCCE, 2015); (ASTM-C-187-04, 2004).

El objetivo es obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con un determinado peso de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado.

#### ***Equipo a utilizar.***

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

#### ***Procedimiento.***



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, formando una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula. Figura 3.1.



Figura 3.1. Formación del cráter de cemento. (F. López Regalado, 2016).

2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje respecto al peso 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). Figura 3.2.



Figura 3.2. Agregado del agua al cemento. (F. López Regalado, 2016).

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). Figura 3.3.



Figura 3.3. Mezclado de la muestra. (F. López Regalado, 2016).



4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador para colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
  
5. Se 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.
  
  - 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).

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



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

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

### **3.1.1.2 Fraguado por el método de Gillmore**

El objetivo es determinar el tiempo de fraguado inicial y final del cemento hidráulico mediante las agujas de Gillmore (Navarro Sánchez, et al., 2011).

#### **Equipo.**

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



### ***Temperatura y humedad.***

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

### ***Preparación de la pasta de cemento.***

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

### ***Moldeado del espécimen.***

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

### ***Determinación de los tiempos de fraguado.***

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



### Recomendaciones.

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



Figura 3.4. Medición del tiempo de fraguado (F. López Regalado, 2016).

#### 3.1.2. Arena

En la tabla 3.1 se pueden observar las normas, tanto las mexicanas como las internacionales, que rigen a cada prueba realizada a los materiales pétreos, en este caso, a la arena.

Tabla 3.1. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03



<b>Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.</b>	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
<b>Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.</b>	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
<b>Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.</b>	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
<b>Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.</b>	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
<b>Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.</b>	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
<b>Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.</b>	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
<b>Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.</b>	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
<b>Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.</b>	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99
<b>Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.</b>	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
<b>Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.</b>	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02

### 3.1.2.1. Cuarteo de la arena

El objetivo es obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado de la muestra obtenida en el campo.

#### **Equipo.**



- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.
- Brochas o cepillos de pelo.
- Balanza o báscula.
- Divisor de muestras.
- Traza de plástico flexible de 40 por 40 centímetros.

### ***Procedimiento.***

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

### ***Método “A”. Cuarteo Mecánico.***

- Procedimiento para divisor de muestras.

Se tomó la muestra en una charola ancha, se vació sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.



Figura 3.5. Divisor, charola y cucharón para realizar la prueba. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.6. Agregado de la muestra a través del divisor. (F. López Regalado, 2016).

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 requerida.

### **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. Figura 3.7 (NMX-C-170-ONNCCE, 1997) (ASTM-C-70, 2003).



*Figura 3.7. Colocación del material en una superficie limpia. (F. López Regalado, 2016).*

2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto. Figura 3.8.



Figura 3.8. Mezclado del material. (F. López Regalado, 2016).

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 aplanan la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala. Figura 3.9.



Figura 3.9. Aplanado de la pila. (F. López Regalado, 2016).



5. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos utilizando 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. Figura 3.10.



Figura 3.10. División de la muestra en cuartos iguales. (F. López Regalado, 2016).

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.
- 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 bordo de la mesa, de tal manera que la mitad del plástico quede sobre la mesa y la otra mitad en el aire sujeta con una de las manos, cogiendo el extremo que esta sobre la mesa, soltando el extremo que está en el aire, con lo cual se elimina la mitad del material. Este deberá ser depositado 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 deben estar superficialmente secas, y deben reducirse en tamaño por el método "A". Las muestras de campo que se reduzcan por el método "B" deben encontrarse húmedas superficialmente, de no ser así se deben humedecer debiendo ser remezcladas.

#### ***3.1.2.2. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.***

El objetivo es determinar la cantidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

### ***Equipo a utilizar.***



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

### ***Procedimiento 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 truncocónico como se describe a continuación (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) (ASTM C 128, 2004).
  - 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 truncocónico 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. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse, significa que se ha secado superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que la arena conserva agua en exceso, por lo tanto hay que continuar



secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Figura 3.11. Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico. (F. López Regalado, 2016).

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



### **Cálculos.**

$$\% \text{ de humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (1)$$

Donde:

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

Ms = Masa seca del material. (Gramos).

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

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.

#### **Equipo a utilizar.**

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

#### **Procedimiento de la prueba.**

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



Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).



Figura 3.12. Pesado del recipiente lleno con el material. (F. López Regalado, 2016).

La masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.

### **Cálculos.**

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Dónde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm<sup>3</sup>).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).



### **3.1.2.4. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).**

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

#### **Equipo a utilizar.**

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

#### **Procedimiento de la prueba.**

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 (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

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 el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

#### **Cálculos a realizar.**



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

Dónde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm<sup>3</sup>).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).

### **3.1.2.5. Granulometría en arenas.**

El objetivo es pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura.

#### **Equipo a utilizar.**

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

#### **Procedimiento de la prueba.**

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.



2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura 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, 200 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa. Figura 3.13.



Figura 3.13. Colocación de las mallas. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.14. Mallas colocadas en orden decreciente. (F. López Regalado, 2016).

5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo. El agitado puede ser manual o mecánico (Raf-tap). Figura 3.15.



Figura 3.15. Utilización de la maquina Raf-tap para agitar la muestra. (F. López Regalado, 2016).

6. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro



correspondiente. 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, 100 y 200 se limpiarán con cepillo de cerdas.



*Figura 3.16. Extracción del material retenido en cada una de las mallas. (F. López Regalado, 2016).*

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



Figura 3.17. Material retenido en cada una de las mallas previamente pesado. (F. López Regalado, 2016).

El registro debe hacerse en una tabla como la siguiente.

Tabla 3.2. . 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 de las respectivas mallas en la columna (1).
2. El retenido de la columna (2) se calcula de la siguiente manera:



$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{suma de la masa retenida}} * 100 \quad (4)$$

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

$$\% \text{ acumulativo de la malla} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior} \quad (5)$$

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

$$\% \text{ Que pasa de la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla} \quad (6)$$

5. Módulo de finura:

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de malla \#8 hasta \#100}}{100} \quad (7)$$

### **Recomendaciones y especificaciones.**

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

### **Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.**

Tabla 3.3. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.

MALLA	% QUE PASA
3/8	100



4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10

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

**Gráfica.**

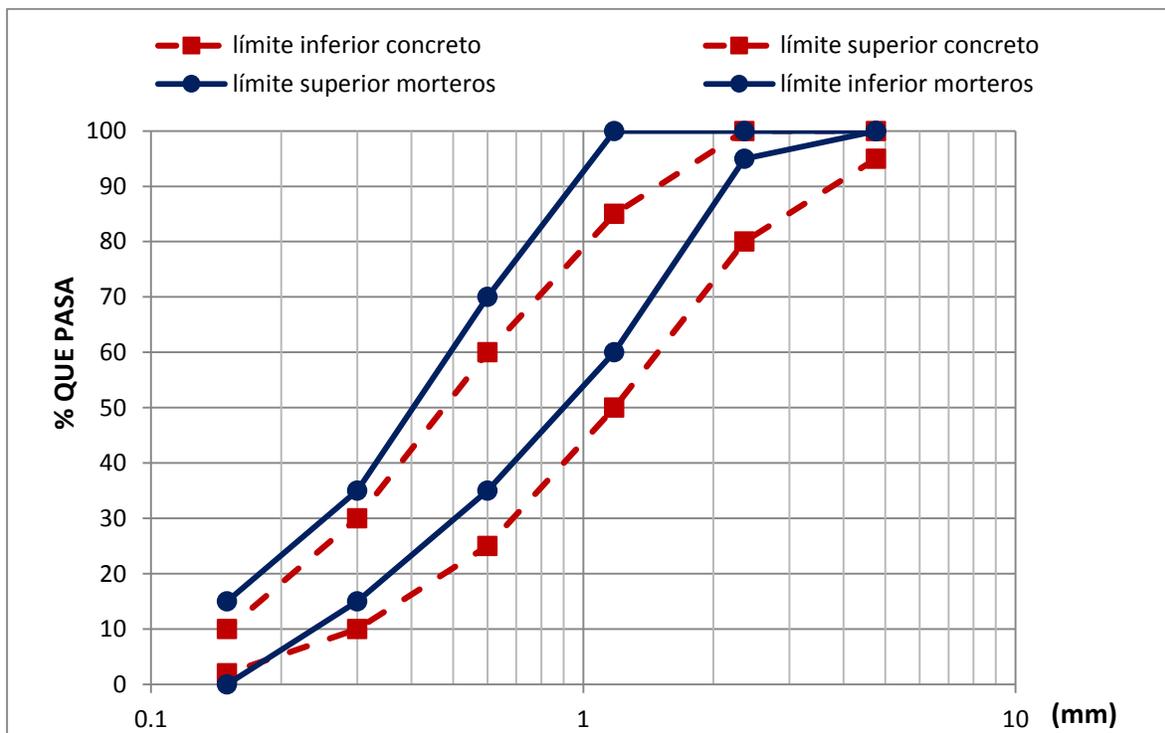


Figura 3.18. Ejemplo de gráfica de composición granulométrica.

**3.1.2.6. Colorimetría en arenas.**

El objetivo es determinar el contenido de materia orgánica en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal.

**Equipo a utilizar.**



- Dos botellas iguales de vidrio incoloro de 250 a 350 cm<sup>3</sup> con marcas a cada 25 cm<sup>3</sup> (frasco de biberón).
- Charolas, parrillas de secado, espátulas, balanza, vasos de precipitado.
- Material para las soluciones y tabla colorimétrica. Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de solución de normal en agua destilada.

### ***Procedimiento de la prueba.***

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 cm<sup>3</sup> de alcohol, posteriormente se añaden 90 cm<sup>3</sup> 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 cm<sup>3</sup> de la primera solución (ácido tánico) y se reúnen con 97.5 cm<sup>3</sup> de solución de sosa cáustica.

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



Figura 3.19. Elaboración de la solución de color normal. (F. López Regalado, 2016).

Después de 24 horas se comparan los colores.

- Se toma una muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
- Se seca hasta peso constante a una temperatura no mayor a  $110^{\circ}\text{C}$ .
- Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta  $133\text{ cm}^3$  adicionándole solución de sosa cáustica hasta los  $206\text{ cm}^3$ .



Figura 3.20. Vaciado del material dentro del biberón. (F. López Regalado, 2016).

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



Figura 3.21. Muestras dejándose reposar durante 24 horas. (F. López Regalado, 2016).



- 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.



Figura 3.22. Tabla colorimétrica. (F. López Regalado, 2016).

Tabla 3.4. 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 o no en la elaboración de concreto.

#### ***Equipo a utilizar.***

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

#### ***Procedimiento 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. Figura 3.23.



Figura 3.23. Llenado del recipiente. (F. López Regalado, 2016).

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. Figura 3.24.



Figura 3.24. Agitación del material. (F. López Regalado, 2016).



3. Se deja reposar el frasco durante 24 horas para determinar el nivel del material fino, esto se logra observando si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml. Figura 3.25.



Figura 3.25 Muestras en reposo. (F. López Regalado, 2016).

### **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. Material que pasa por la malla #200.**

El objetivo es determinar la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla N° 200.

### **Equipo a utilizar.**



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

***Procedimiento 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. Figura 3.26.



Figura 3.26. Lavado del material. (F. López Regalado, 2016).

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).

**Cálculo.**

$$A = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (8)$$

Dónde:

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

M<sub>i</sub> = masa seca inicial, gramos.

M<sub>f</sub> = masa seca después de lavar (final) en gramos.

**Recomendaciones y especificaciones a seguir.**



Cuando la arena se emplea en la elaboración de concreto hidráulico y esta contiene exceso de partículas finas que pasan la malla N° 200, la cantidad de cemento necesario aumenta considerablemente, existiendo la posibilidad de que aparezcan grietas en las estructuras de concreto.

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

Tabla 3.5. . *Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (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 <sup>(1)</sup>	3.00 <sup>(A)</sup>
En concretos presforzados	8.00 <sup>(1)</sup>	-
En otros concretos	15.00	5.00 <sup>(A)</sup>

<sup>(1)</sup> 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.

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

### 3.1.2.9. *Terrones de arcilla.*

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

#### ***Equipo a utilizar.***

- Mallas N° 16 y N°30.
- Parrillas eléctricas.



- Charolas.
- Balanzas.
- Espátulas.
- Un cristal.

**Procedimiento de la prueba.**

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente un kilogramo, se seca a una temperatura no mayor de 110° C, teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla (Navarro Sánchez, et al., 2011).
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 Mi pesados al décimo de gramo. En este caso, se obtuvo un promedio de tres muestras realizadas.



*Figura 3.27. Muestras representativas para la realización de la prueba de terrones de arcilla. (F. López Regalado, 2016).*

3. Se colocan los 100 gramos de arena en una charola y se le adiciona agua hasta cubrir la muestra, se deja saturar durante 24 horas.



4. Posteriormente se escurre el agua libre y se extiende la arena en una charola para romper, con los dedos, los terrones de arcilla que aún existan.



Figura 3.28. Desintegración de los terrones de arcilla. (F. López Regalado, 2016).

5. A continuación se hace pasar el material por la malla N° 30, lavándola con mucha agua; el retenido en esta malla se recoge en una charola y se seca totalmente, se deja enfriar y se pesa nuevamente al décimo de gramo anotándose como  $M_f$ .
6. Cálculo del porcentaje de terrones de arcilla:

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

Dónde:

$M_i$  = masa inicial, 100 gramos.

$M_f$  = masa seca sin terrones en gramos.



### ***Especificaciones y recomendaciones a seguir.***

Las especificaciones de la ASTM especifican un porcentaje admisible de terrones de arcilla en la arena del 0.6 % y un máximo permisible del 1.2 %. En caso de que la arena esté contaminada en más del 1 % se hará un estudio económico tendiente a ver si es factible cambiar el material o proceder a lavar la arena contaminada para eliminar la arcilla (ASTM C 142, 1997).

#### ***3.1.2.10. Densidad de la arena.***

El objetivo es determinar el volumen absoluto 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.

#### ***Equipo a utilizar.***

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

#### ***Procedimiento 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  $\text{cm}^3$ . Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como masa de la arena ( $M_a$ ) que aproximadamente estará entre 200 y 300 gramos.
  3. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua para evitar 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 del agua, registrando este valor como volumen final  $V_f$ .

### **Cálculos a realizar.**

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

$$DA = \frac{M_a}{V_f - V_i} \quad (10)$$

Dónde:

DA = densidad de la arena en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

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

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

- Utilizando un frasco.



1. Se procede a pesar el frasco lleno de agua colocando el vidrio en la parte superior registrando este peso como  $M_i$  en gramos.
2. Enseguida se coloca un muestra de arena saturada y superficialmente seca dentro del frasco, llenado el resto del volumen con agua, se coloca el cristal y se obtiene la masa, a esta masa la llamaremos  $M_2$ , a la masa de la muestra de arena la llamaremos  $M_h$  y estará entre 200 y 300 gramos.

**Cálculos a realizar.**

$$DA = \frac{M_h}{M_i + M_h + M_2} \quad (11)$$

**3.1.2.11. Equivalente de arena.**

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.

**Equipo a utilizar.**

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule.
- Tubo irrigador.
- Un tramo de manguera.
- Un pisón metálico de  $1000 \pm 5$  gramos.
- Cápsulas de  $85 \pm 5$  mi (metálicas).



- Embudo.
- Cronómetro.
- Dos frascos de 3.875 litros.
- Malla N° 4.
- Papel filtro N° 12.
- Solución de reserva.
- Solución de trabajo.

### ***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 3.875 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.



2. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de  $4 \pm 0.1$  de pulgada y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material. Se deja reposar  $10 \pm 1$  minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.
3. Se coloca el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo y se agita con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos.
4. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedó en las paredes de la probeta; se llena con solución de trabajo hasta la marca de 15 y se deja reposar 20 minutos, al término de este tiempo en la escala de la probeta se lee el nivel superior de la arcilla en suspensión la cual se denominará lectura de arcilla.
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:

$$Eq. de arena = \frac{Lectura de arena}{Lectura de arcilla} * 100 \quad (12)$$

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 es potable, proveniente de la red de suministro público. El departamento de Ambiental realizó pruebas de potabilidad que fueron controladas contra la normativa vigente. 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 provocan la atracción entre ellas.

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

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

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



Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150° C. Su temperatura de descomposición es a los 380° C. En dosificaciones normales, 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 3.6).

Tabla 3.6. Dosificación del CRISOTAN R-5 en polvo para una mezcla de concreto.

Agregados	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Cemento</b>	445	445	445	379
<b>Arena</b>	796	867	914	972
<b>Grava</b>	920	920	920	920
<b>Agua</b>	206	170	155	158
<b>CRISOTÁN R-5 (SÓLIDOS)</b>	---	1.8	3.3	2,8
<b>Revenimiento (cm)</b>	11.5	10.2	12.7	10.8
<b>%RH</b>	---	18.18	25.3	24
<b>%RC</b>	---	---	---	14.8
<b>Relación a/c</b>	0.46	0.38	0.34	0.41

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

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

La forma en la cual se utilizó el aditivo fue mezclando el porcentaje requerido en el agua de mezclado 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  $110 \pm 5$ , sin utilizar cantidades mayores a las que especifica la ficha técnica), 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 ello, 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.

#### ***Equipo a utilizar.***

- Mesa de fluidez puede ser eléctrica o manual.
- Aceite SAE-10 o cualquier otro lubricante con la misma densidad.
- Moldes.
- Calibrador.
- Varilla para compactar 5/8".

#### ***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 (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), (ASTM C 109 M, I., 2002).
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, todo para poder realizar el ensaye (Figura 3.29), se centra el molde en la mesa, después se ajusta y se llena en dos capas, que en total cubran el volumen del molde. Se compacta cada una de las capas con 20 golpes, las cuales se distribuyen en la sección transversal, teniendo cuidado de no penetrar la capa subyacente (Figura 3.30), al finalizar se enrasa con una llana el exceso de mortero y se retira (Figura 3.31), limpiando el área de la mesa donde 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 (Figura 3.32), el diámetro del mortero extendido es el promedio de seis medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas a 0.5 cm.



Figura 3.29. Humectación de la mesa de fluidez. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.30. Compactación de la mezcla. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.31. Enrasado de la mezcla. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.32. Expansión de la mezcla de forma manual, haciendo girar la leva. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.33. Toma de lecturas para obtener la fluidez. (F. López Regalado, 2016).

**Cálculos a realizar.**



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

$$\text{Fluidez (\%)} = \frac{\text{Diámetro extendido} - 25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} * 100 \quad (13)$$

### 3.2.2. pH

Para la obtención del pH del mortero en estado fresco, se utilizaron tiras de papel de la marca CIVEQ, producida por la empresa Científica Vela Quin S.A. de C.V.



Figura 3.34. Instrumentos para realizar la medición del pH. (F. López Regalado, 2016).

Se emplearon colocandolas sobre el mortero, haciendo que el lado que contiene los indicadores toque perfectamente al mortero, como se muestra en la Figura 3.35, se deja ahí el tiempo necesario para que la tira nos arroje un valor más exacto, en este caso, lo dejamos un minuto en contacto directo.



Figura 3.35. Determinación del pH en el mortero fresco. (F. López Regalado, 2016).

Al retirar la tira de papel del mortero, se compara el color obtenido con los valores que vienen en la tabla del producto, los 4 colores deben coincidir para poder obtener un resultado.

### 3.2.3. 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 las dimensiones y el tipo de material. Estos deben ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material que no sea absorbente, permeable ni reactivo con el cemento Portland. 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.



### 3.2.3.1. 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 (ASTM C 109 M, I., 2002).

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes con un desmoldante, esto con la finalidad de facilitar el descimbrado al día siguiente sin desmoronar los especímenes, para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diésel.

Después de engrasados los moldes y preparada la mezcla se procedió al llenado de los cubos. Figura 3.36.



Figura 3.36. Llenado de los moldes cúbicos. (F. López Regalado, 2016).

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, como se ilustra en la Figura 3.37. El pisón utilizado es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5 cm x 1.25 cm, después del llenado de la última capa, se tuvo el cuidado de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula. Figura 3.39.

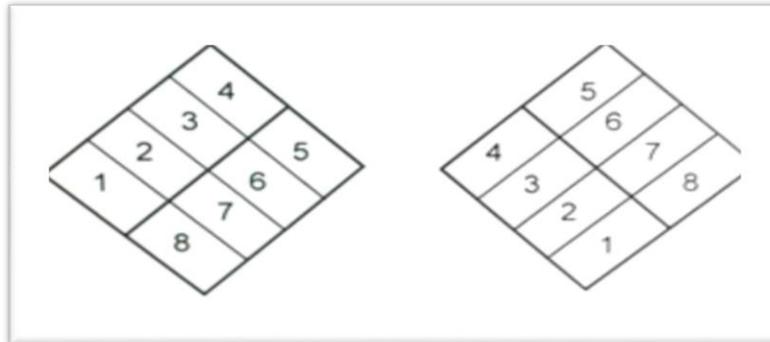


Figura 3.37. Etapas del llenado de cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm.

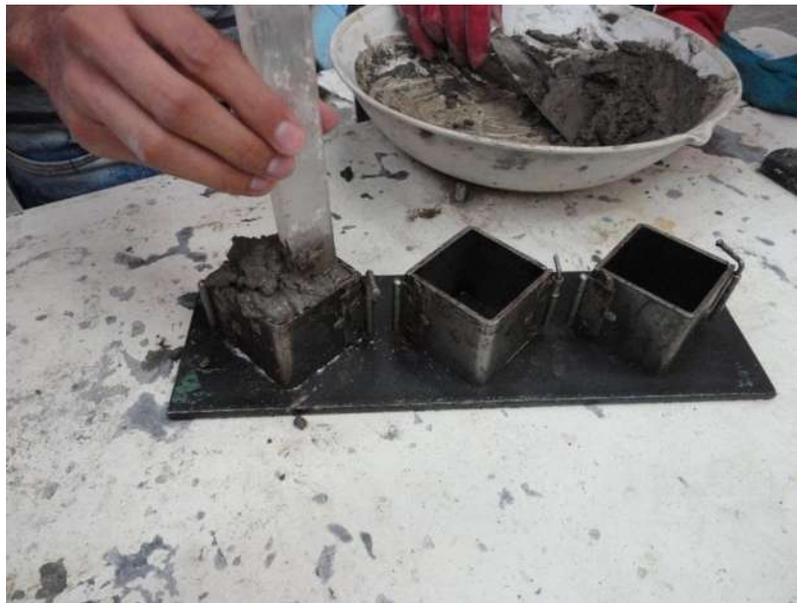


Figura 3.38. Apisonado en el llenado de los moldes cúbicos. (F. López Regalado, 2016).

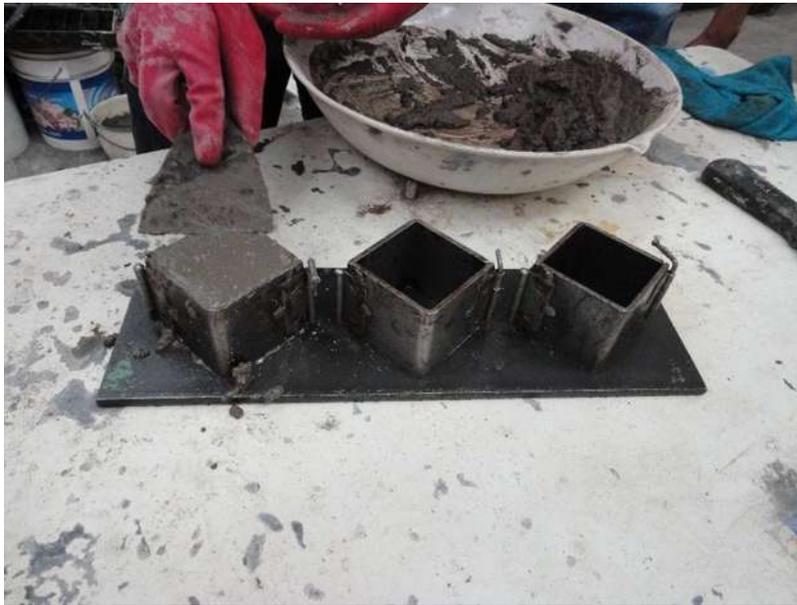


Figura 3.39. Enrazado del cubo. (F. López Regalado, 2016).

Una vez fabricados el número de cubos correspondientes a las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se dejaron fraguar en sus moldes, y al transcurso de 24 horas aproximadamente, fueron desmoldados. Figura 3.40. En el caso de la FN, se dejaron fraguar 48 horas, ya que la fibra de nopal actúa como retardante de fraguado.



Figura 3.40. Desmoldado de cubos. (F. López Regalado, 2016).



En la superficie de cada espécimen se colocó con ayuda de un marcador indeleble su nomenclatura correspondiente, dicha nomenclatura contiene la fecha de elaboración del cubo, la sustitución y el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró, como se indica en la Figura 3.41.



Figura 3.41. Nomenclatura de especímenes. (F. López Regalado, 2016).

Una vez realizado lo anterior, se sometieron los especímenes al curado. El curado al que fueron sometidos fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 515, 2003).

### 3.2.3.2. 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 paredes 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  $\pm 3$  mm en moldes de 150 mm o más de profundidad, y de  $\pm 1.5$  mm en moldes de menor profundidad. Los moldes no deben variar de la longitud especificada en  $\pm 1.5$  mm, excepto para los especímenes por flexión.

### 3.2.3.3. 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.



Figura 3.42. Molde para la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).

Puesto que no hay ninguna reglamentación para la elaboración de briquetas, se siguió el procedimiento descrito en el manual del Laboratorio de Análisis de Materiales tercera edición, el cual consiste en llenar los moldes con mezcla y comprimirla con el dedo índice, para después 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 (Navarro Sánchez, et al., 2011).

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



Figura 3.43. Llenado de los moldes para la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.44. Apisonado de la mezcla para la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.45. Enrazado de las briquetas. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.46. Retiro del molde en la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.47. Secuencia en la elaboración de briquetas. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.48. Briquetas terminadas colocadas sobre una superficie de vidrio previamente engrasada. (F. López Regalado, 2016).

#### 3.2.3.4. Cilindros

Los moldes cilíndricos, 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) (NMX-C-160-ONNCCE, 2004), deben estar provistos de una base maquinada metálica con planos lisos y con elementos para sujetarlas firmemente al molde con su plano perpendicular al eje del molde.

### **3.2.4. Curado**

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

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

Todos los especímenes fueron curados sumergiéndose en agua a la cual se le monitoreo la temperatura para cumplir con las especificaciones de la norma (NMX-C-148-ONNCCE, 2010). Figura 3.49.



Figura 3.49. Curado de especímenes. (F. López Regalado, 2016).

### 3.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido

Las pruebas realizadas al mortero endurecido se clasifican en: no destructivas y destructivas.

#### 3.3.1. No destructivas

Las pruebas no destructivas son todas aquellas que se realizan sobre el espécimen y no se pierde o se daña la estructura del mismo, generalmente estas pruebas nos arrojan un aproximado de la calidad de la mezcla.

Las pruebas no destructivas conforman una base sólida con las cuales se pueden referenciar los resultados de las pruebas mecánicas. Con los resultados que arrojan podemos tener una idea clara de la composición y acomodo de los materiales en una muestra. Este tipo de pruebas, generalmente se emplean para determinar características físicas, mecánicas o químicas sin alterar de forma



permanente sus propiedades. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o casi nulo en la muestra examinada y son repetibles.

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

### **3.3.1.1. Densidad**

La prueba de densidad se aplicó a especímenes cúbicos de cada material por cada porcentaje, el procedimiento que se realizó en base al procedimiento indicado en el manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, Tercera edición. (Navarro Sánchez, et al., 2011).

El equipo que se utilizó fue picnómetro, probeta, balanza con aproximación al décimo de gramo. Figura 3.50.



*Figura 3.50. Picnómetro y probeta a utilizar en la determinación de la densidad. (F. López Regalado, 2016).*



El procedimiento se describe a continuación:

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



Figura 3.51. Pesado del espécimen marcado y superficialmente seco. (F. López Regalado, 2016).

- Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada hasta que se escurra totalmente; anotando el volumen de agua desalojada como el volumen (V) del espécimen.

Los cálculos para obtener la densidad se realizan con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{M}{V} \quad (14)$$

Dónde:



D = densidad en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

M = masa del espécimen en g.

V = volumen del espécimen en  $\text{cm}^3$ .



Figura 3.52. Determinación de la densidad. (F. López Regalado, 2016).

### 3.3.1.2. Gravedad específica (densidad relativa)

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

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



La prueba de gravedad específica realizada a los especímenes cúbicos se llevó a cabo en base al manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, tercera edición. (Navarro Sánchez, et al., 2011) (NMX-C-263-ONNCCE, 2010).

El procedimiento se describe a continuación:

1. Se secan las muestras superficialmente con una franela y se determina su masa superficial seca ( $M_{ss}$  = Masa superficialmente seca).
2. Se adapta una canastilla a la balanza y se sumerge en agua para determinar su masa.
3. Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla.
4. Se determina la masa sumergida del espécimen ( $M_a$  = Masa sumergida).
5. Se secan las muestras en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.
6. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa seca con ayuda de una balanza ( $M_s$ =Masa seca).

Los cálculos se hacen con la siguiente fórmula:

$$G. E. = \frac{M_s}{M_{ss} - M_a} \quad (15)$$



Figura 3.53. Determinación de la gravedad específica. (F. López Regalado, 2016).

### 3.3.1.3. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. 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. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, et al., 2010).

#### **Procedimiento de la prueba.**

1. Se toman las dimensiones de la muestra.



En el caso de los cubos, se tomaron medidas de lado 1, lado 2 y espesor; en los prismas, se tomaron medidas de la base, espesor y longitud y en el caso de los cilindros se tomaron las medidas de su diámetro y su longitud.

2. Se garantiza la conexión del amperímetro y voltímetro.
3. Se coloca la muestra en el equipo correspondiente.

Los cubos se acomodan de acuerdo al lado que tenga menos imperfecciones, nunca por la cara que recibió el apisonado. Figura 3.54. Los prismas y los cilindros se colocan con las placas a cada extremo de su longitud. Figura 3.55.

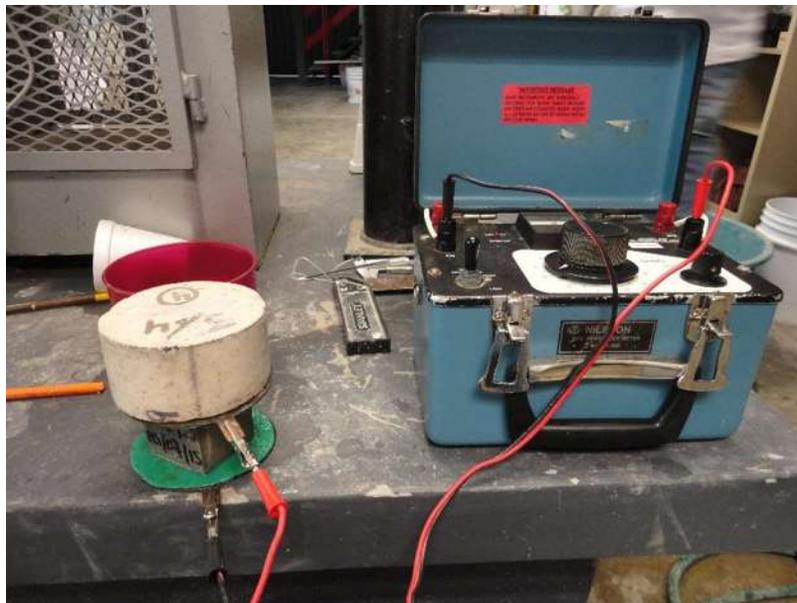


Figura 3.54. Montado de los cubos en el equipo. (F. López Regalado, 2016).

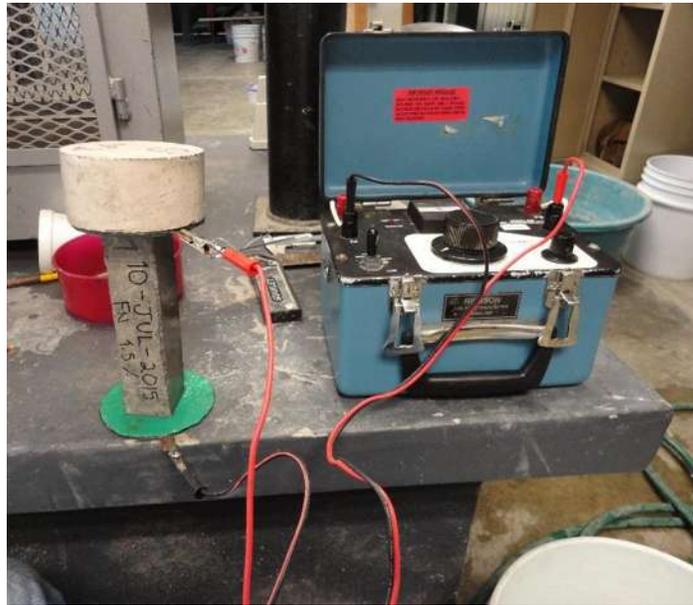


Figura 3.55. Montado de los prismas en el equipo. (F. López Regalado, 2016).

4. Se corrobora el contacto de los pines con las placas metálicas que se colocan sobre el concreto.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada, (I).
6. Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato lo más preciso posible.



Figura 3.56. Medición de la Resistividad Eléctrica. (F. López Regalado, 2016).

### **Cálculos a realizar.**

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

$$\rho = R_e \frac{A}{L} \quad (16)$$

Donde:

$\rho$  = resistividad eléctrica, en ohm-cm.

$R_e$  = resistencia eléctrica, en Volts.

$A$  = área transversal del espécimen, en  $\text{cm}^2$ .

$L$  = longitud del espécimen, en cm.

### **Especificaciones.**



Tabla 3.7. . Criterios de evaluación. (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

#### 3.3.1.4. 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).



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, Figura 3.57; 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 $\mu$ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 $\mu$ 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.



Figura 3.57. Equipo para medir la Velocidad de Pulso Ultrasónico. (E. González Castro, 2016).

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar por lo cual se empleó un medio conductor, en este caso un gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel comercial estético, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, por lo que se decidió aceptar el empleo del gel estético



para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que, el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones que se iban a llevar a cabo, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.

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

Además, la velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Criterios de evaluación en 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

Los especímenes empleados para determinar lecturas de resistividad eléctrica eran pasados en seguida a una mesa contigua en donde se la determinaba el tiempo de tránsito de pulso ultrasónico (ASTM-C-597, 2009).

Esta prueba se debe realizar al final de las pruebas no destructivas debido a que los poros del material se llenan de gel y esto puede ocasionar variaciones en los resultados.

### 3.3.2. Pruebas Destructivas



Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, es decir 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.

Las pruebas destructivas realizadas al mortero fueron: resistencia a la compresión simple, resistencia a flexión y resistencias a tensión directa e indirecta.

### ***3.3.2.1. Resistencia a la compresión simple***

El objetivo es determinar la resistencia a la compresión en morteros compuestos de cemento, arena y agua.

Este ensayo se realiza de acuerdo a las normas (NMX-C-061-ONNCCE, 2015) y (ASTM C 109 M, I., 2002) sobre cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada).

La prueba se le realizó a especímenes cúbicos de 5 cm por lado utilizando la maquina Tinius Olsen. Se probaron 5 especímenes de cada mezcla a las edades de 7, 28, 45 y 90 días, promediando los 5 resultados obtenidos. Cabe mencionar que se realizó la prueba a 5 especímenes cúbicos sin sustitución de materiales, es decir, a especímenes testigo.

#### ***Procedimiento de la prueba***

En la fecha señalada, una vez que las muestras hayan cumplido la edad de prueba, se sacan del curado y se seca cada espécimen hasta que su superficie haya quedado completamente seca. Se obtienen las dimensiones de la cara que estará en contacto con la platina móvil de la máquina universal de pruebas (previo a realizar la prueba a compresión, se realizaron las pruebas no destructivas). Se



llevan las muestras a la máquina debiendo poner en la platina fija una cama de arena fina, colocándose el cubo sobre esta. Sobre la cara superior de la muestra se esparce una cama de arena, esto con la finalidad de que la carga se distribuya uniformemente en toda el área y se aplica la carga en forma lenta hasta la falla de la muestra (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).



Figura 3.58. Colocación del espécimen en la máquina de prueba Tinius Olsen. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.59. Centrado del espécimen entre las platinas. (F. López Regalado, 2016).

Se aplicó carga (Figura 3.60) a una velocidad constante en el rango de 50000 kg, con una aproximación de 0.5 kg, esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del cubo, registrando esta carga para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109 M, I., 2002).



Figura 3.60. Aplicación de la carga hasta la falla de la muestra. (F. López Regalado, 2016).

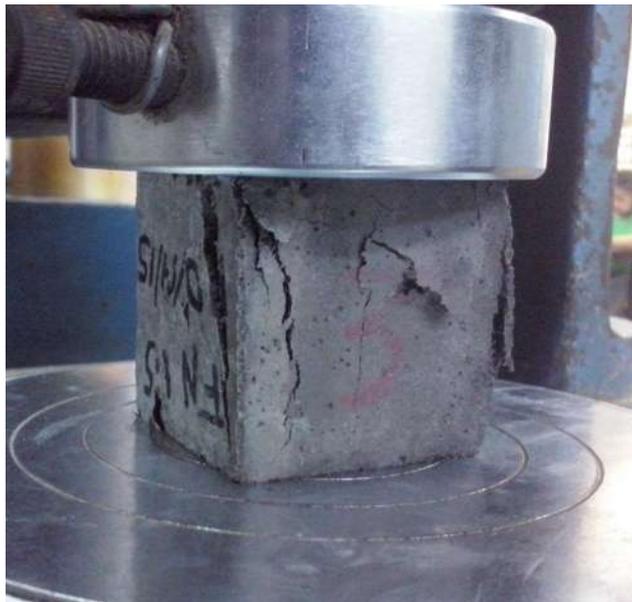


Figura 3.61. Falla de la muestra. (F. López Regalado, 2016).

El número de especímenes para cada edad especificada debe ser como mínimo 3.

### Cálculos.

$$R = \frac{W}{A} \quad (17)$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>.

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

A = Área de la muestra, en cm<sup>2</sup>.

### Tabla de registro.

Tabla 3.9. Ejemplo de tabla de registro para resistencia a la compresión simple.

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



--	--	--	--	--	--

### **3.3.2.2. Resistencia a flexión**

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

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma (ASTM C 348, 1997) en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) bajo esfuerzos de flexión en prismas de 40 x 40 x 160 mm (Instituto del Concreto, 1997).

Según la norma (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  $\pm 2\%$ . Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensayo. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, etc.



Figura 3.62. Marcado de los prismas a dos centímetros de sus extremos y al centro del claro. (F. López Regalado, 2016).

La norma (NMX-C-191-ONNCCE, 2015) indica que se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado, se centra en los bloques de apoyo y estos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada; los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos.

La prueba se le realizó 5 muestras a cada edad y se tomó un promedio.

La prueba se efectuó como sigue:

Se marcó el prisma a 2 centímetros de cada extremo y al centro del claro en donde fue aplicada la carga.

Se colocaron los prismas sobre los soportes adecuados para esta prueba y se aplicó carga de manera gradual para evitar el impacto (ASTM C 293, 2002) (ASTM C 348, 1997).



Figura 3.63. Colocación del prisma sobre los apoyos. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.64. Colocación del prisma en la máquina universal de pruebas Tinius Olsen. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.65. Fractura del espécimen sometido a tensión por flexión. (F. López Regalado, 2016).

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula con la ecuación 18.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (18)$$

Donde:

R = Módulo de ruptura, en kPa (kgf/cm<sup>2</sup>).

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 con la ecuación 19.

$$R = \frac{Pa}{bd^2} \quad (19)$$



Dónde:

$R$  = Módulo de ruptura en  $\text{kgf/cm}^2$ .

$P$  = Carga de ruptura en  $\text{kgf}$ .

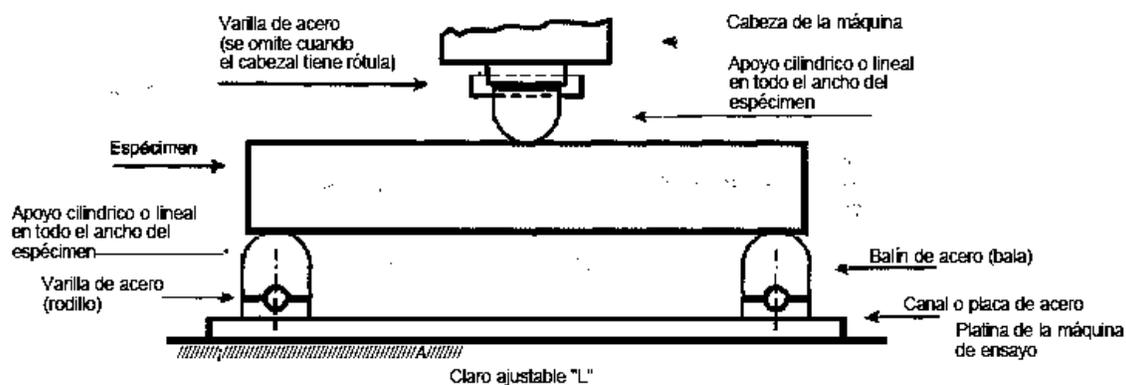
$L$  = Claro en  $\text{cm}$ .

$b$  = Ancho promedio en  $\text{cm}$ .

$d$  = Peralte promedio en  $\text{cm}$ .

$A$  = 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

Figura 3.66. Representación de la prueba de flexión estática en prismas, mediante un solo punto de carga.

### 3.3.2.3. Resistencia a la tensión directa

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

#### Equipo a utilizar

- Un molde para fabricar briquetas.
- Máquina de pruebas con mordazas especiales para briquetas de mortero.



- Municiones o postas para aplicar la carga.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.

Para la determinación de la resistencia a tensión en briquetas se utilizó la máquina de prueba para tensión directa en morteros tipo Michaelis (Navarro Sánchez, et al., 2011).

### ***Procedimiento de la prueba.***

1. Cumplida la edad de prueba se sacan las muestras y se secan hasta obtener una superficie superficialmente seca.
2. Se toman las medidas de la sección media ( $S_m$ ) de la briqueita, se lleva a la máquina que previamente será nivelada, 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.



*Figura 3.67. Nivelación de la máquina de pruebas para tensión en morteros tipo Michaelis. (F. López Regalado, 2016).*



Figura 3.68. Colocación de las municiones hasta la falla de la briqueta. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.69. Falla de la muestra. (F. López Regalado, 2016).

3. Después de la falla de la muestra se retiran las municiones pesándolas al décimo de gramo. La masa de las municiones ( $M_m$ ) es considerada 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 cilindros metálicos, estos fueron previamente pesados y colocados uno a uno de forma uniforme sobre la tolva de la máquina para después continuar colocando municiones hasta la falla de la briqueta. La resistencia a tensión se calculó con la ecuación 20.



Figura 3.70. Obtención de la masa de los cilindros metálicos. (F. López Regalado, 2016).

**Cálculos a realizar.**

$$R = \frac{Mm * 50}{Sm} \quad (20)$$

Dónde:

R = resistencia a la tensión en kgf/cm<sup>2</sup>.

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

Sm = Sección media de la briqueta en cm<sup>2</sup>.

50 = constante de la máquina.



### **3.3.2.4. Resistencia tensión indirecta**

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

#### **Equipo a utilizar**

- Máquina de prueba.
- Placa o barra de apoyo suplementario.
- Tiras de apoyo.

#### **Observaciones**

Para cada espécimen se usaron dos tiras de apoyo, en este caso de cuero sin imperfecciones, con un ancho de 2,5 cm (1") aproximadamente, y una longitud igual al espécimen, se emplearon las tiras para cada cilindro. Los especímenes se mantuvieron húmedos hasta la realización de la prueba.

#### **Procedimiento de la prueba**

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. Figura 3.71.
2. Se toma la dimensión del diámetro promediando las medidas de dos mediciones cerca de los extremos y una al centro. La longitud se obtiene promediando las dos medidas de las líneas que unen los extremos 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 como lo indica la Figura 3.72, se coloca longitudinalmente la segunda tira de cuero sobre el cilindro, concentrándola sobre las líneas marcadas 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 estén 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 dentro del intervalo de 7 a 14 kgf/cm<sup>2</sup>/min de esfuerzo indirecto de tensión, hasta la falla del espécimen, Figura 3.73, debe de anotarse la carga máxima, el tipo de falla y la apariencia del mortero (NMX-C-163-ONNCCE, 1997).



Figura 3.71. Marcado de los especímenes. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.72. Colocación de la tira inferior de cuero debajo del espécimen. (F. López Regalado, 2016).



Figura 3.73. Falla del cilindro por tensión indirecta. (F. López Regalado, 2016).

### **Cálculos a realizar**

La resistencia a la tensión indirecta del espécimen se calcula con la fórmula 21.



$$T = \frac{2P}{dL\pi} \quad (21)$$

Dónde:

T = resistencia a tensión indirecta en kgf/cm<sup>2</sup>.

P = carga aplicada máxima en kgf.

L = longitud en cm.

d = diámetro en cm.



## 4. Resultados y discusiones

### 4.1 Características y propiedades de los materiales

#### 4.1.1 Cemento

##### 4.1.1.1 Consistencia

Los resultados de la prueba de consistencia normal para cada mezcla se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados de consistencia normal.

Material		Consistencia Normal %
Testigo		31
Fibra de Nopal	0.5%	32
	1.5%	31.5
Fibra de Nopal + Almidón o fécula de maíz.	FN 0.5% - MZ 2%	31.5

##### 4.1.1.2 Fraguado por el método de Gillmore

Los resultados de los tiempos de fraguado para cada mezcla se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. . Resultados de tiempos de fraguado.

Materiales		Tiempos de fraguado	
		Inicial (min)	Final (min)
TESTIGO		150	390
FN	0.5%	120	1260



<b>FN</b>	1.5%	210	1515
<b>FN - MZ</b>	0.5 - 2%	135	1174

#### 4.1.2. Arena

##### 4.1.2.1. Cuarteo

El cuarteo se realizó combinando dos métodos, revolviendo la arena con las palas y dividiéndola utilizando el divisor para obtener la muestra representativa.

##### 4.1.2.2. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas

Se realizaron tres pruebas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resultados del porcentaje de humedad de absorción en la arena.

<b>% de Absorción</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Mh (g)</b>	<b>Ms (g)</b>	<b>% de Absorción</b>
<b>1</b>	300	292.3	2.63
<b>2</b>	300	292.2	2.67
<b>3</b>	297.3	290.6	2.31
		Promedio	2.54

El porcentaje de humedad de absorción de la arena en estudio es de 2.54 %.

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

La prueba para determinar la masa volumétrica seca y suelta se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).



Se realizó esta prueba a 3 muestras representativas de arena, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4.4. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta. (MVSS).

<b>Determinación de la masa volumétrica seca y suelta</b>					
<b>Muestra</b>	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	MVSS (g/cm <sup>3</sup> )
<b>1</b>	1945	6100	4155	2783	1.49
<b>2</b>	1945	5980	4035	2783	1.45
<b>3</b>	1945	5970	4025	2783	1.45
				Promedio	1.46

La masa volumétrica seca y suelta (MVSS) de la arena es de 1.46 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2.4. **Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV)**

La prueba para determinar la masa volumétrica seca y varillada se realizó de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4.5. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada. (MVSV).

<b>Determinación de la masa volumétrica seca y varillada</b>					
<b>Muestra</b>	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	MVSV (g/cm <sup>3</sup> )
<b>1</b>	1945	6270	4325	2783	1.55
<b>2</b>	1945	6250	4305	2783	1.55
<b>3</b>	1945	6200	4255	2783	1.53
				Promedio	1.54



La masa volumétrica seca y varillada (MVSV) de la arena es de 1.54 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2.5. Granulometría en arenas

Esta prueba se realizó a tres muestras de arena, los resultados fueron los siguientes:

Muestra No. 1.

Tabla 4.6. Módulo de finura de la muestra 1.

<b>Granulometría</b>				
<b>Malla</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulativo</b>	<b>% Que Pasa</b>
<b>4</b>	1	0.25	0.25	99.75
<b>8</b>	20.7	5.175	5.425	94.575
<b>16</b>	88	22	27.425	72.575
<b>30</b>	129.2	32.3	59.725	40.275
<b>50</b>	72.5	18.125	77.85	22.15
<b>100</b>	33.3	8.325	86.175	13.825
<b>200</b>	18.7	4.675	90.85	9.15
<b>Charola</b>	36.6	9.15	100	0
<b>Suma</b>	400	100	447.7	352.3
<b>Módulo de Finura (MF)</b>	2.566			

Muestra No. 2.

Tabla 4.7. Módulo de finura de la muestra 2.

<b>Granulometría</b>				
<b>Malla</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulativo</b>	<b>% Que Pasa</b>
<b>4</b>	2	0.5	0.5	99.5
<b>8</b>	22.6	5.65	6.15	93.85



<b>16</b>	73.4	18.35	24.5	75.5
<b>30</b>	124.9	31.225	55.725	44.275
<b>50</b>	76.9	19.225	74.95	25.05
<b>100</b>	37.9	9.475	84.425	15.575
<b>200</b>	20.6	5.15	89.575	10.425
<b>Charola</b>	41.7	10.425	100	0
<b>Suma</b>	400	100	435.825	364.175
<b>Módulo de Finura (MF)</b>	2.458			

Muestra No. 3.

Tabla 4.8. Módulo de finura de la muestra 3.

<b>Granulometría</b>				
<b>Malla</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulativo</b>	<b>% Que Pasa</b>
<b>4</b>	0.7	0.175	0.175	99.825
<b>8</b>	30.4	7.6	7.775	92.225
<b>16</b>	84.7	21.175	28.95	71.05
<b>30</b>	123.2	30.8	59.75	40.25
<b>50</b>	69.2	17.3	77.05	22.95
<b>100</b>	35.4	8.85	85.9	14.1
<b>200</b>	19.4	4.85	90.75	9.25
<b>Charola</b>	37	9.25	100	0
<b>Suma</b>	400	100	450.35	349.65
<b>Módulo de Finura (MF)</b>	2.594			

Del promedio de las tres muestras se obtuvo el módulo de finura igual a 2.5, el cual, según la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) y de acuerdo a parámetros de calidad, está dentro de los rangos recomendables entre 2.5 y 3. Tabla 4.9.



Tabla 4.9. Módulo de finura promedio.

Granulometría				
Malla	Peso Retenido	% Retenido	% Acumulativo	% Que Pasa
4	1.23	0.31	0.31	99.69
8	24.57	6.14	6.45	93.55
16	82.03	20.51	26.96	73.04
30	125.77	31.44	58.40	41.60
50	72.87	18.22	76.62	23.38
100	35.53	8.88	85.50	14.50
200	19.57	4.89	90.39	9.61
Charola	38.43	9.61	100.00	0.00
Suma	400.00	100.00	444.63	355.38
Módulo de Finura (MF)	2.539			

La gráfica de composición granulométrica resultó como sigue:

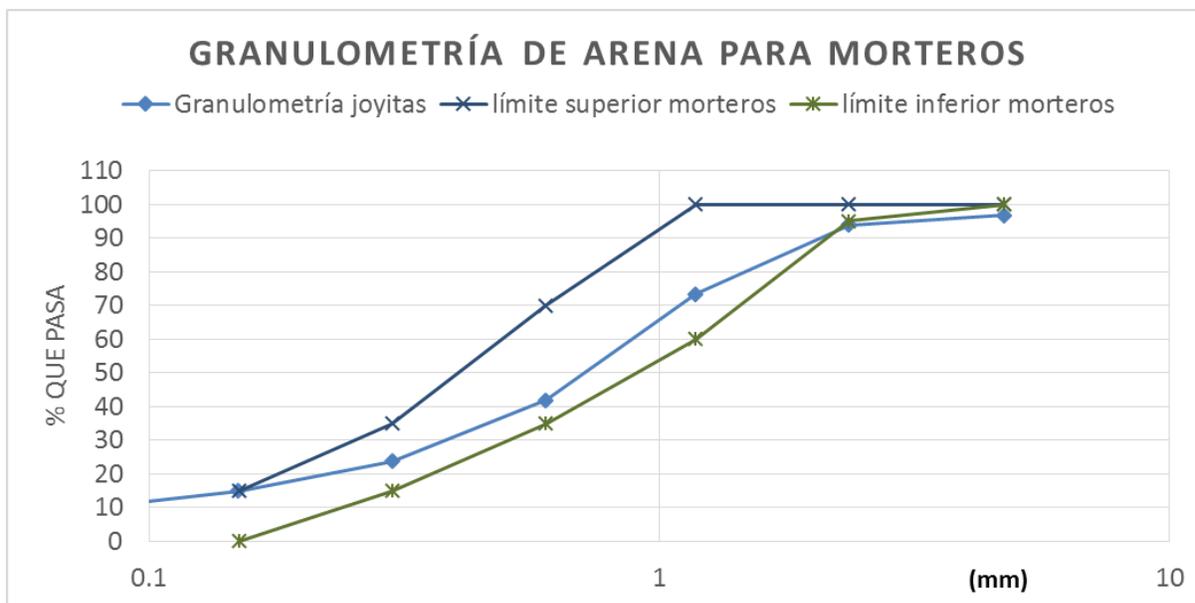


Figura 4.1. Gráfica de composición granulométrica de la arena de "Joyitas".

En la Figura 4.1, se observa que la arena de Joyitas utilizada en la investigación se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) para la elaboración de los morteros.



#### 4.1.2.6. Colorimetría en arenas

Se tomaron 3 muestras de arena a las cuales se les efectuó la prueba de colorimetría, estos fueron los resultados:

Tabla 4.10. Resultados de colorimetría.

Muestra	Colorimetría
1	Escala 2
2	Escala 2
3	Escala 2



Figura 4.2. Comparación del resultado de la prueba con la tabla colorimétrica. (F. López Regalado, 2016).

El color observado en las 3 muestras es similar al color número 2 de la tabla colorimétrica, por lo que podemos decir que el material cumple con las especificaciones de la prueba y por lo tanto es aceptable, debido a que no contiene exceso de materia orgánica.



#### 4.1.2.7. Sedimentación en arenas

Se realizó la prueba a tres muestras representativas de arena, dos de ellas cumplieron con lo establecido en las especificaciones del manual de prácticas del Laboratorio de Materiales (Navarro Sánchez, et al., 2011), por lo cual podemos decir que la muestra es aceptable.



Figura 4.3. Resultados de la prueba de sedimentación. (F. López Regalado, 2016).

#### 4.1.2.8. Material que pasa por la malla #200

Tabla 4.11. Porcentaje de material fino que contiene la arena.

Material que pasa la malla No. 200			
Muestra	Masa Inicial	Masa Final	A
1	597.7	553.8	7.35
2	597.7	552.5	7.56
3	598.45	561.6	6.16
		Promedio	7.02

De acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014), los valores están dentro de límite permisible para elaborar concretos presforzados, en nuestro caso, para un



mortero sometido a compresión, el valor límite es de 8%. Por lo tanto, el contenido de material fino es aceptable.

#### 4.1.2.9. Terrones de arcilla

Es de suma importancia conocer el contenido de terrones de arcilla que contiene una arena ya que estos son partículas de baja resistencia estructural que en contacto con agua se convierten en lodos que son perjudiciales para el concreto y mortero.

Tabla 4.12. Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena.

Muestra	Mi (g)	Mf (g)	% Terrones
1	100	99.4	0.6
2	100	99.3	0.7
3	100	98.8	1.2
		Promedio	0.83

Se calculó el promedio de las muestras, el cual resultó de 0.83 %. Lo que indica un bajo y aceptable contenido de terrones de arcilla en la arena. Este valor está dentro de los rangos que indica la norma (ASTM C 142, 1997), los cuales son 0.6 y 1.2 %.

#### 4.1.2.10. Densidad de la arena

Los resultados de la prueba de densidad se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.13. Resultados de la densidad de la arena.

Muestra	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	2.47
2	2.48
3	2.47
Promedio	2.47



El promedio indica que la densidad del material es alta, es decir, es de buena calidad.

#### 4.1.2.11. *Equivalente de arena*

En esta prueba determinamos las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene la arena, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de dichos materiales finos (NMX-C-480-ONNCCE, 2014).

*Tabla 4.14. Porcentaje del equivalente de arena.*

<b>Muestra</b>	<b>Lectura de Arcilla</b>	<b>Lectura de Arena</b>	<b>Equivalente de Arena</b>
<b>1</b>	10.9	10.1	92.66 %
<b>2</b>	10.5	9.7	92.38 %
<b>3</b>	11.4	10.4	91.23 %
		Promedio	92.09 %

La desviación estándar para un solo operador es de 1.5 para equivalentes de arena mayores a 80 % y 2.9 para valores menores que 80 % (NMX-C-480-ONNCCE, 2014).

## 4.2 Pruebas realizadas al mortero fresco

### 4.2.1 Fluides

Los resultados obtenidos de fluides se describen a continuación en la Tabla 4.15.



Tabla 4.15. Resultados de fluidez para cada mezcla.

Mezcla	Cemento (g)	FN (g)	MZ (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluidez (%)
Testigo	163.64	0.00	0	450	111.27	0.68	0	99
FN 0.5%	162.82	0.82	0	450	111.27	0.68	0.3	115
FN 1.5%	161.18	2.45	0	450	111.27	0.68	0.55	104
FN 0.5% MZ 2%	159.55	0.82	3.27	450	111.27	0.68	0.56	112

Se tomó un rango de 90 a 115 %, debido a que la arena se utilizó con todos los tamaños para elaborar concreto y la absorción de dicha arena es de 2.54 %, la cual no se corrigió. Es importante tomar la muestra de manera que sea homogénea para obtener la misma trabajabilidad.

#### 4.2.2 pH

De acuerdo al método que se utilizó para esta medición, el resultado del pH se mantuvo entre 12 y 14, lo cual indica que las mezclas tienen carácter alcalino. Figura 4.4.



Figura 4.4. pH del mortero fresco. (F. López Regalado, 2016).

#### 4.2.3 Elaboración de especímenes

Todos los especímenes se realizaron de acuerdo a las normas que rigen la elaboración de cada tipo, en el caso de los cubos, se elaboraron conforme a la norma (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), el llenado de los moldes, el apisonado y el desmoldado se realizaron correctamente, no hubo problemas significativos de exudación o a la hora de desmoldar.

#### 4.2.4 Curado

Como ya se mencionó, en el apartado 3.2.4, los especímenes fueron curados por inmersión utilizando recipientes de plástico, permaneciendo en esa condición hasta la edad de prueba.

La fibra retarda el fraguado, por lo cual el curado se llevó a cabo después de 48 horas de haberse colado; de igual manera, la combinación de FN y MZ, se curó después de 48 horas.



### 4.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido

#### 4.3.1 No destructivas

##### 4.3.1.1 Densidad

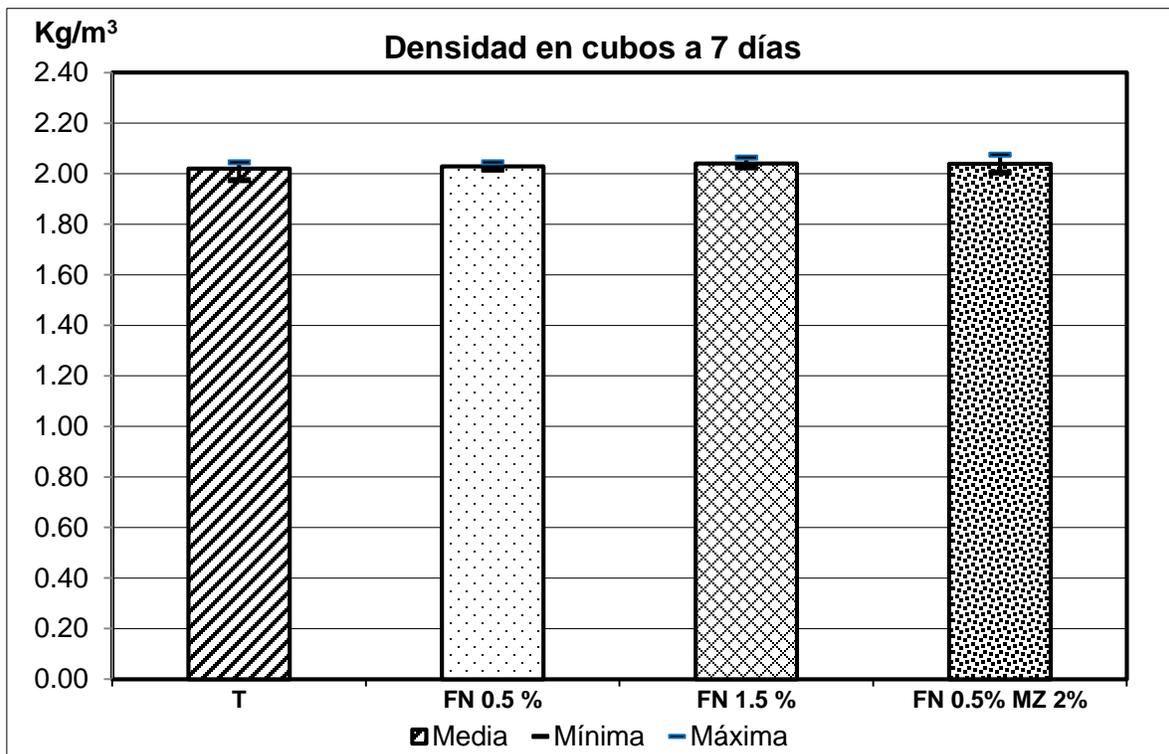


Figura 4.5. Resultados de densidad en cubos a 7 días.

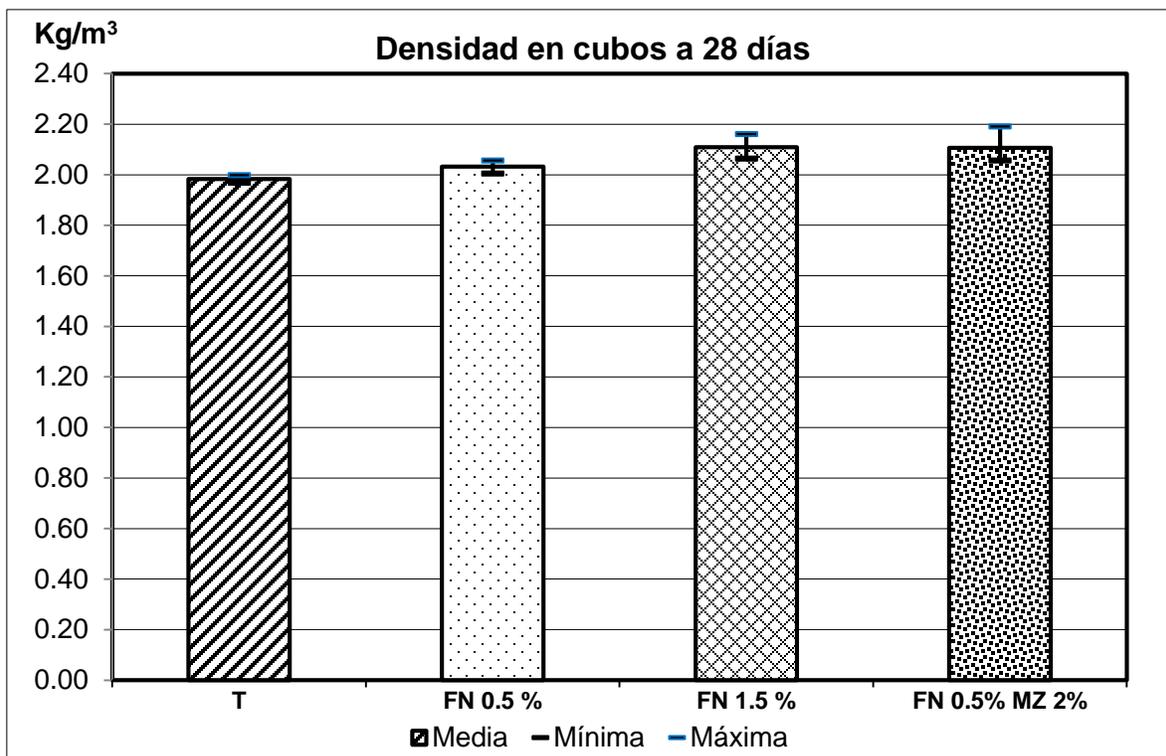


Figura 4.6. Resultados de densidad en cubos a 28 días.

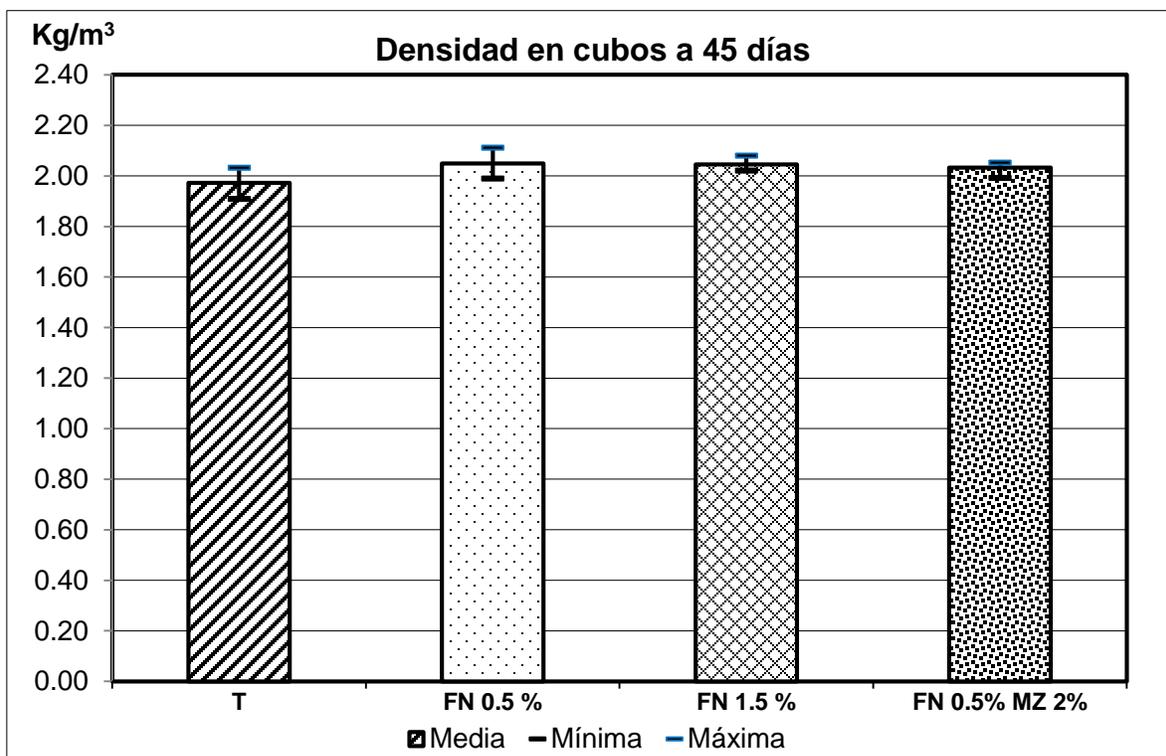


Figura 4.7. Resultados de densidad en cubos a 45 días.



Como se puede observar en las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7, la densidad de los cubos en las edades tempranas está por arriba de la densidad que presenta la mezcla testigo. A 28 días la densidad de las mezclas en estudio son más altas que la de la mezcla testigo.

#### 4.3.1.2 Gravedad específica (densidad relativa)

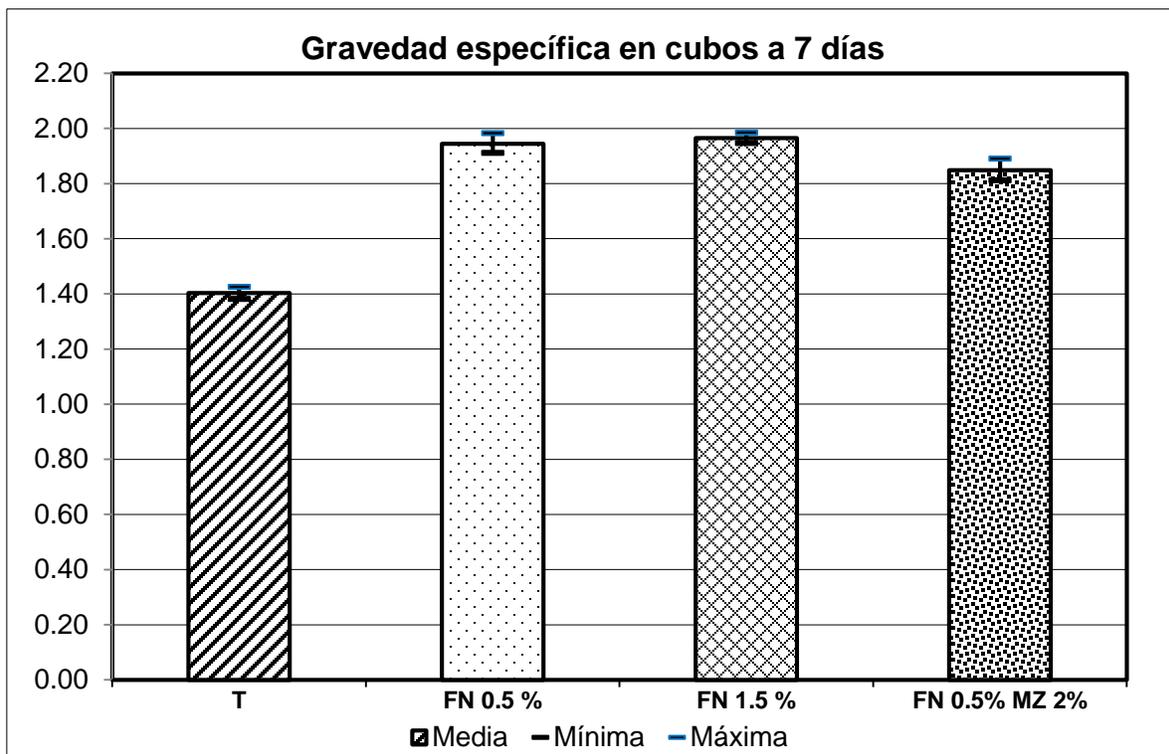


Figura 4.8. Gravedad específica en cubos a 7 días.

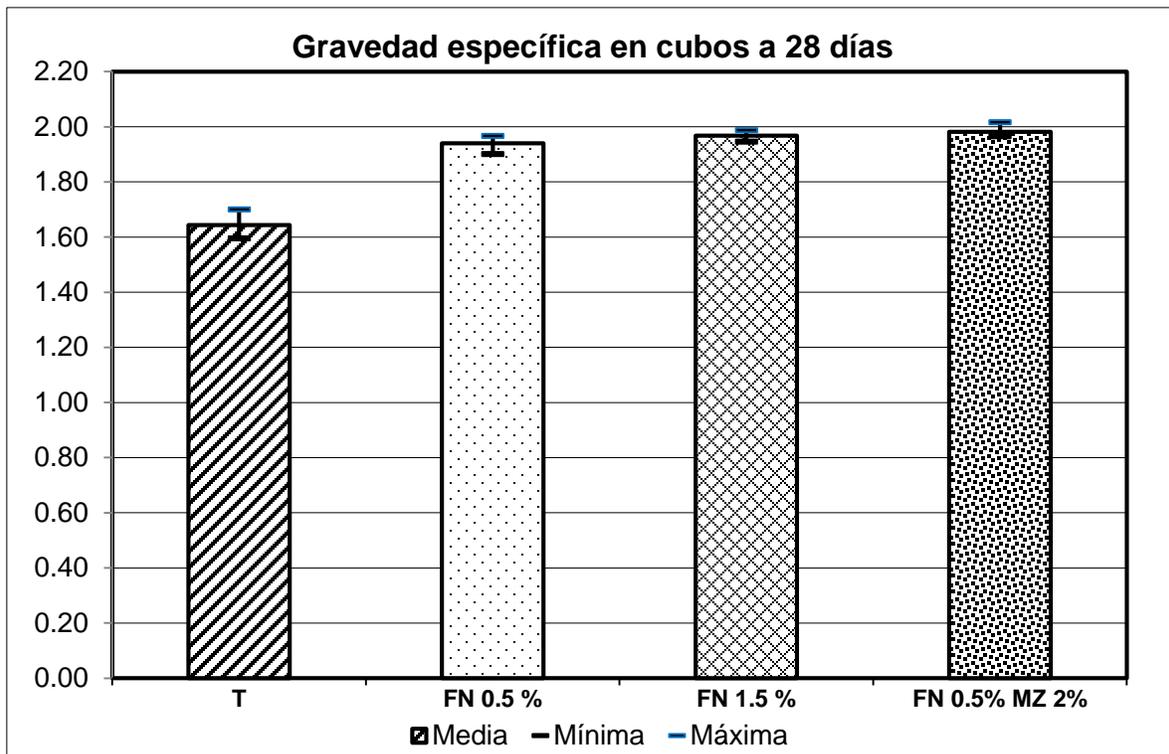


Figura 4.9. Gravedad específica en cubos a 28 días.

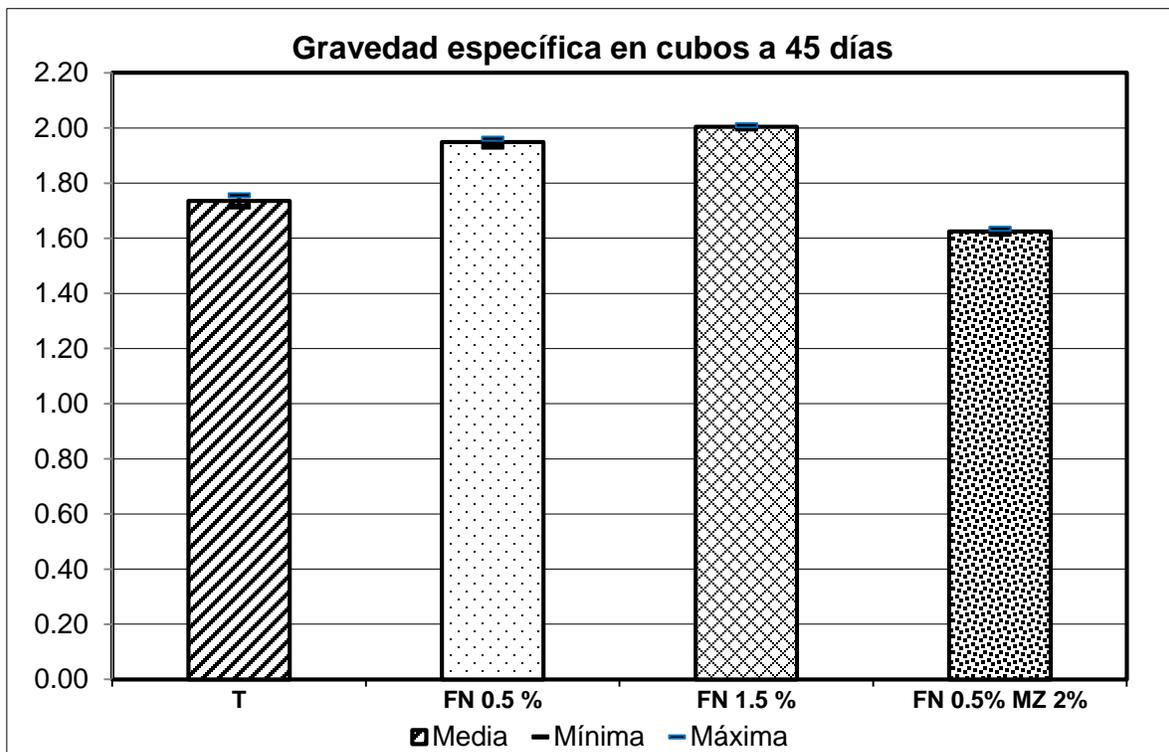


Figura 4.10. Gravedad específica en cubos a 45 días.



En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10, se observa que las mezclas con sustitución de fibra de nopal (FN) presentaron mejores resultados en la prueba de gravedad específica, estando por encima de los valores del mortero testigo. Esto indica que las sustituciones densifican la matriz cementicia del mortero.

### 4.3.1.3 Resistividad eléctrica

#### Resistividad eléctrica en cubos

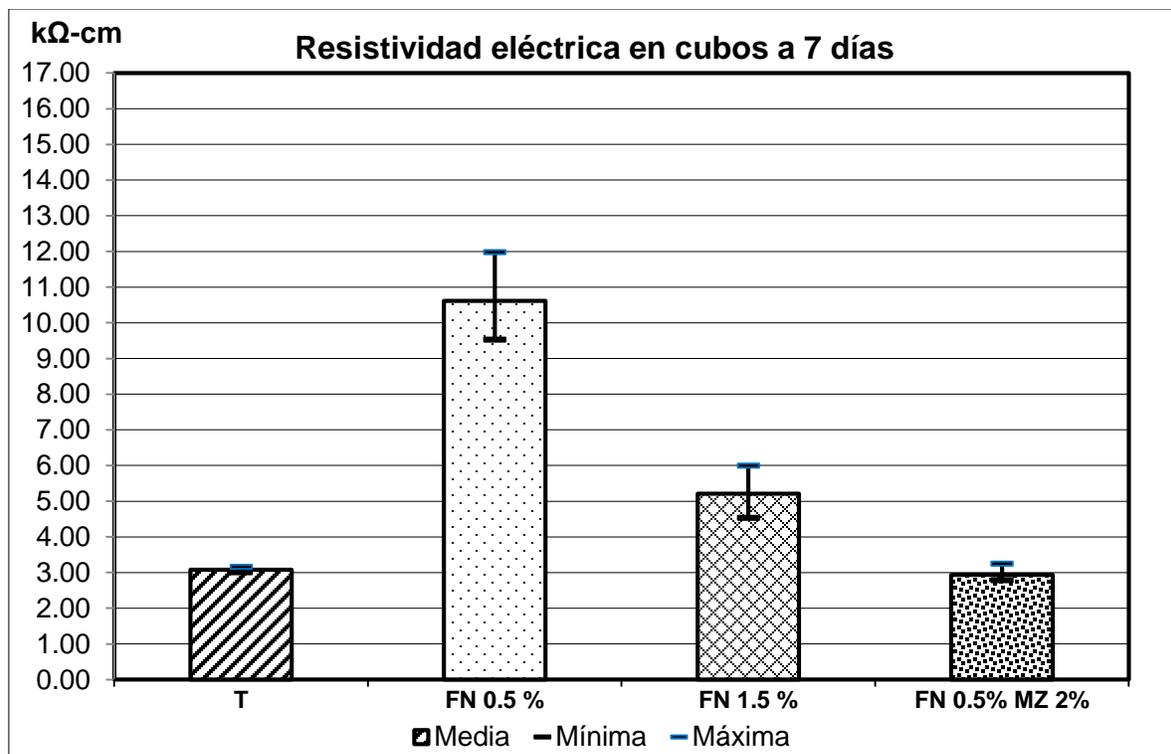


Figura 4.11. Resistividad eléctrica en cubos a 7 días.

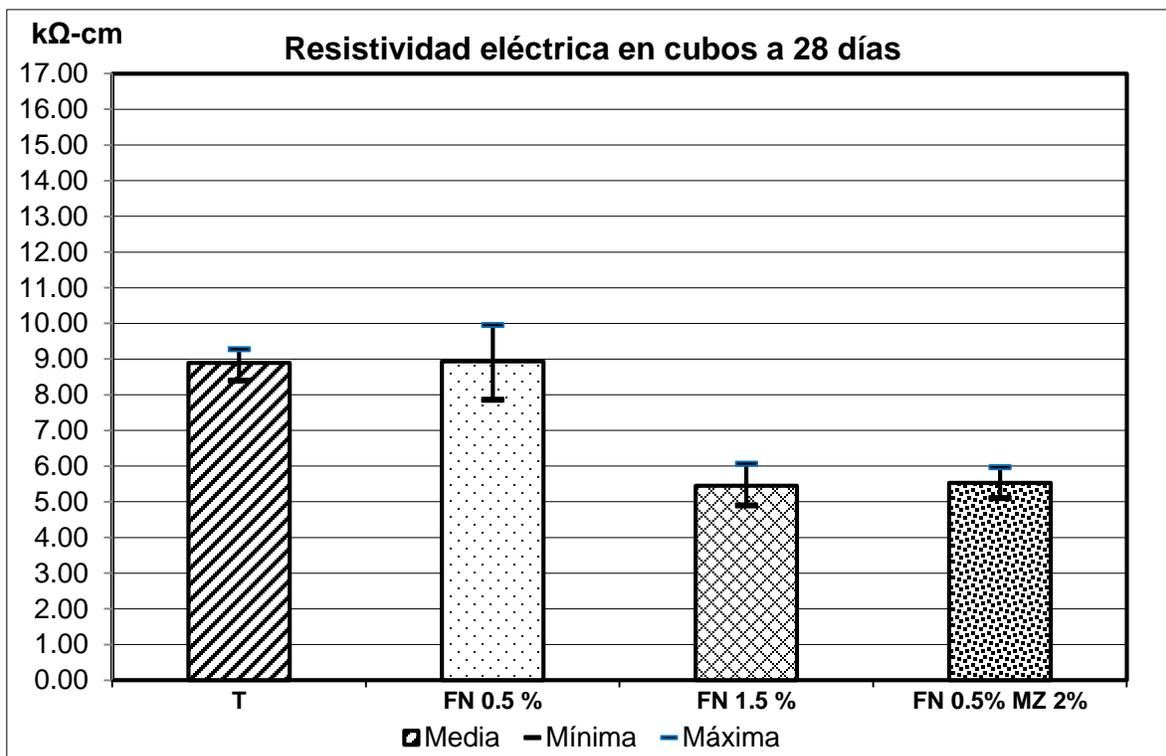


Figura 4.12. Resistividad eléctrica en cubos a 28 días.

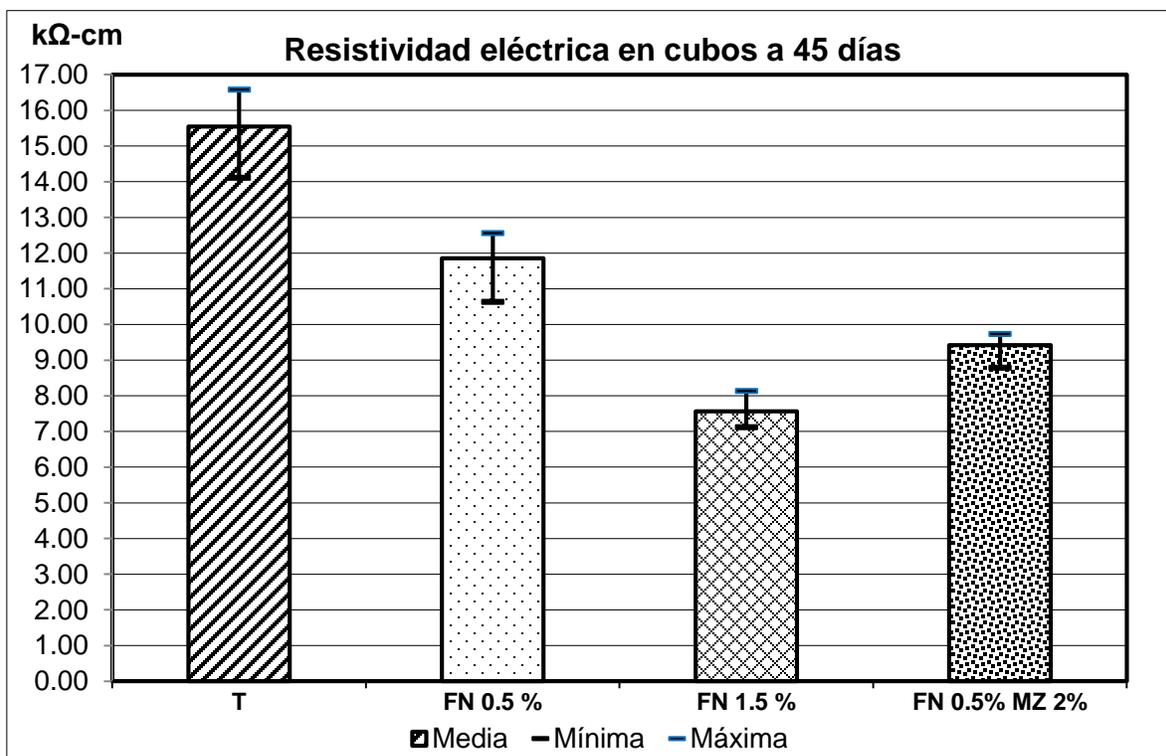


Figura 4.13. Resistividad eléctrica en cubos a 45 días.



### Resistividad eléctrica en prismas

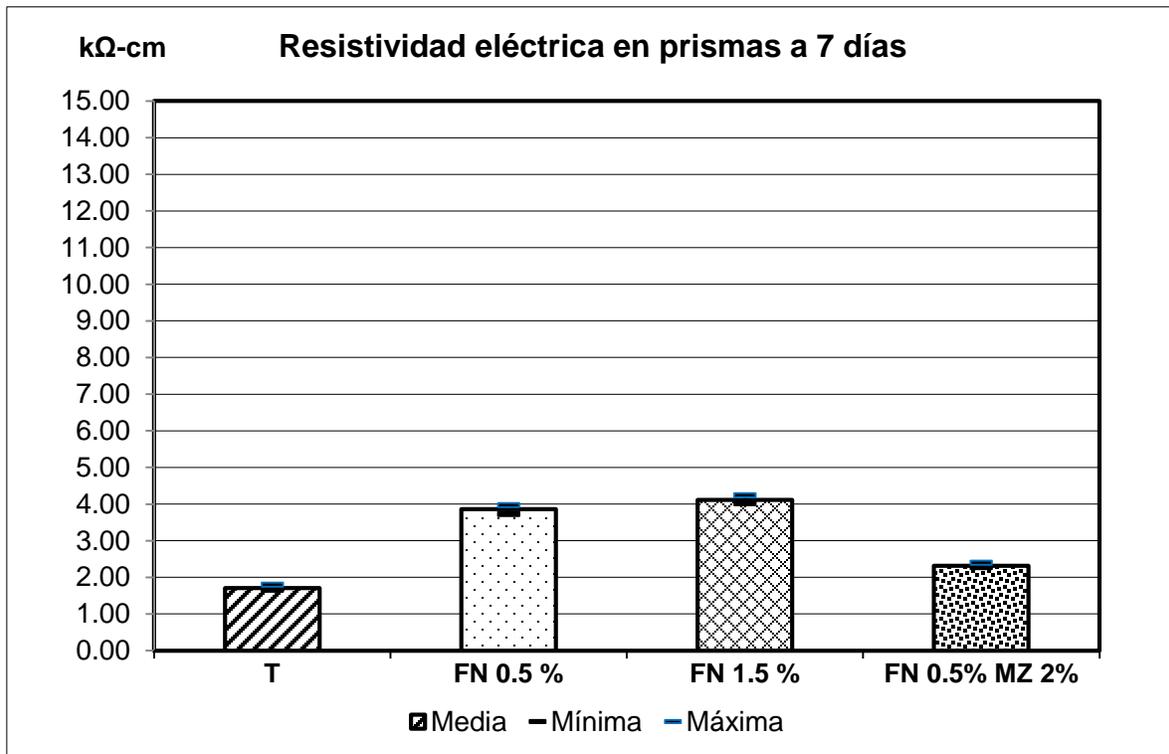


Figura 4.14. Resistividad eléctrica en prismas a 7 días.

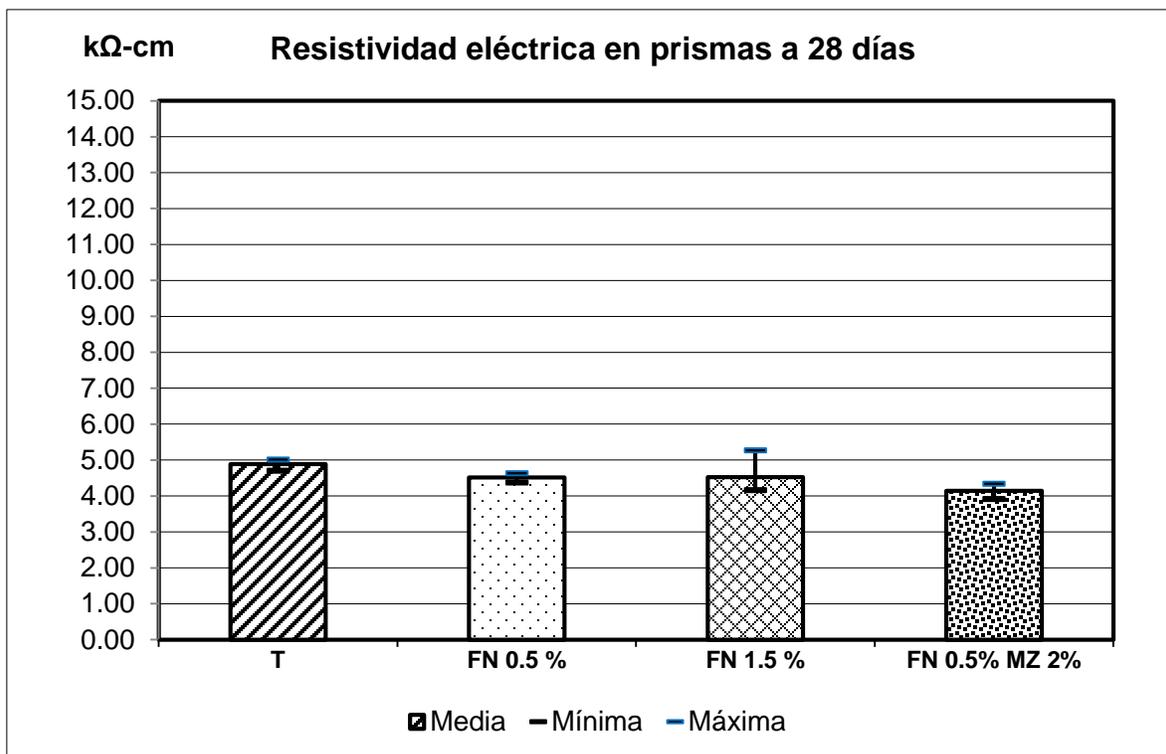


Figura 4.15. Resistividad eléctrica en prismas a 28 días.

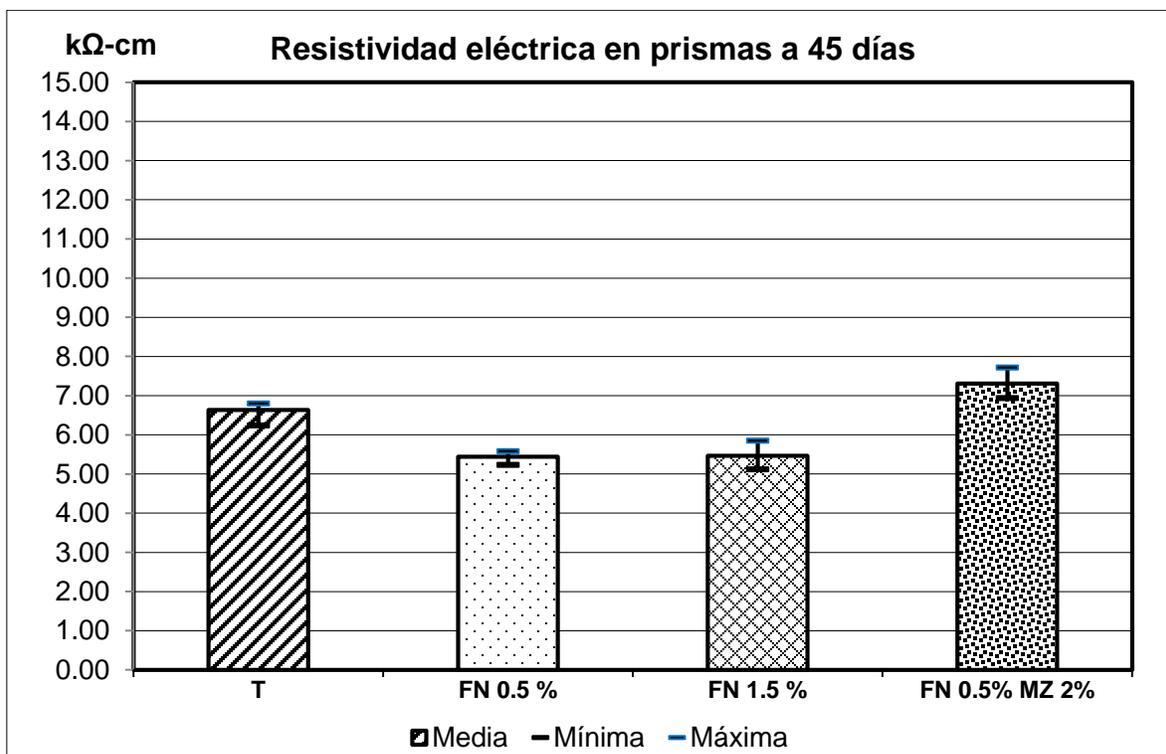


Figura 4.16. Resistividad eléctrica en prismas a 45 días.

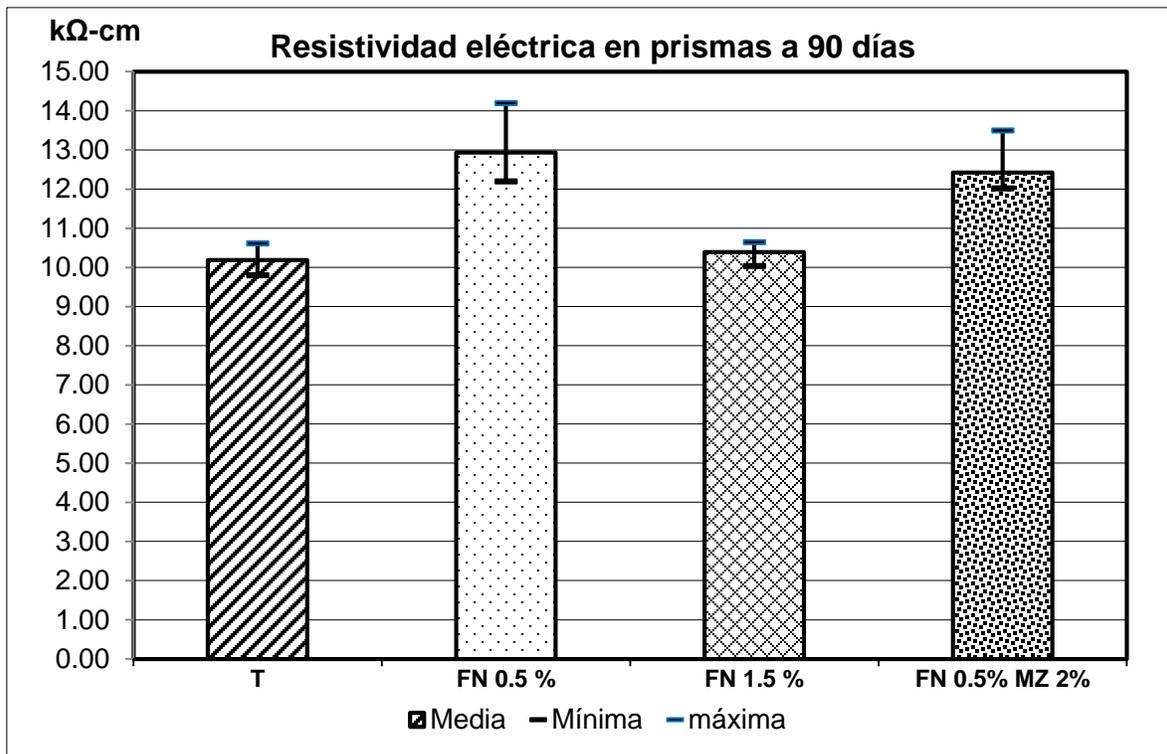


Figura 4.17. Resistividad eléctrica en prismas a 90 días.

En cuanto a resistividad eléctrica, se realizó la prueba a especímenes cúbicos, prismáticos y cilíndricos, los resultados fueron muy peculiares, tales que a la edad de 7 días, la resistividad estuvo muy por encima de los valores del testigo, pero conforme fue aumentando la edad, los valores disminuyeron, quedando por debajo de este.

#### 4.3.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

##### Velocidad de pulso ultrasónico en cubos

Los resultados mostrados en las Figuras 4.18 a 4.24 indican un comportamiento similar en los valores de velocidad de pulso ultrasónico de los morteros testigo y los morteros con sustituciones, con valores superiores a los 3000 m/s. De acuerdo a la RED DURAR (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura),



2000), estos valores clasifican a los morteros como morteros de alta calidad (línea roja). Tabla 3.8.

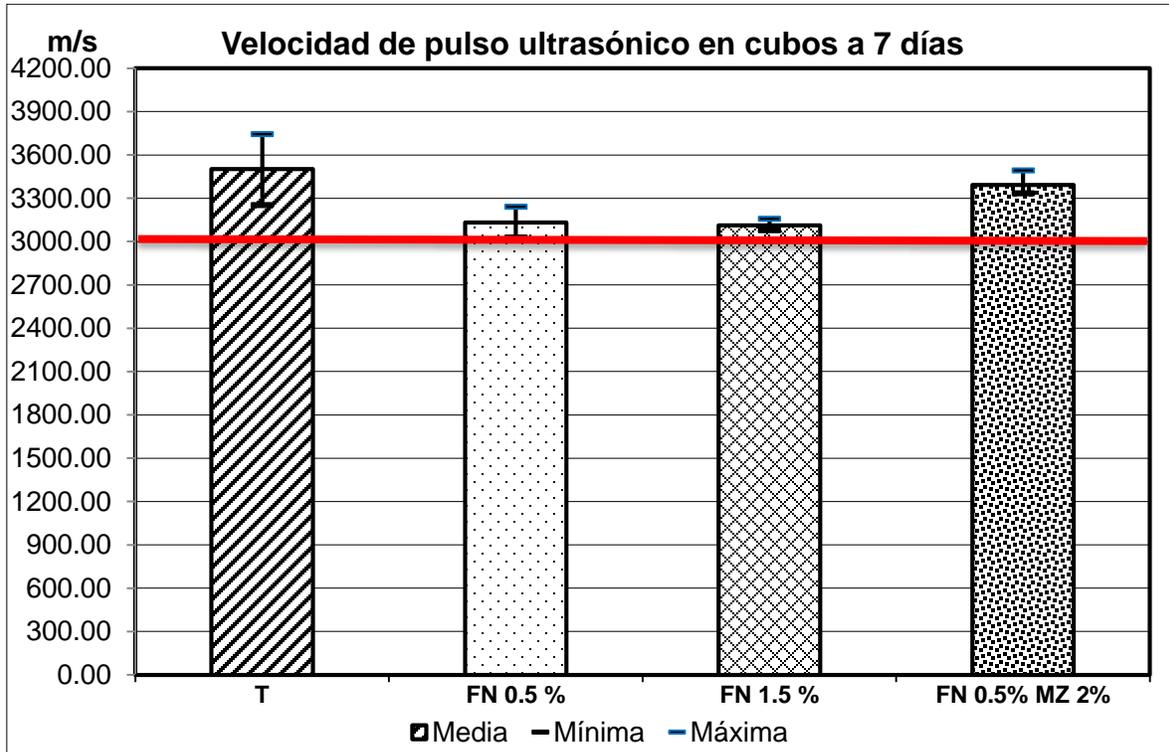


Figura 4.18. Velocidad de pulso ultrasónico en cubos a 7 días.

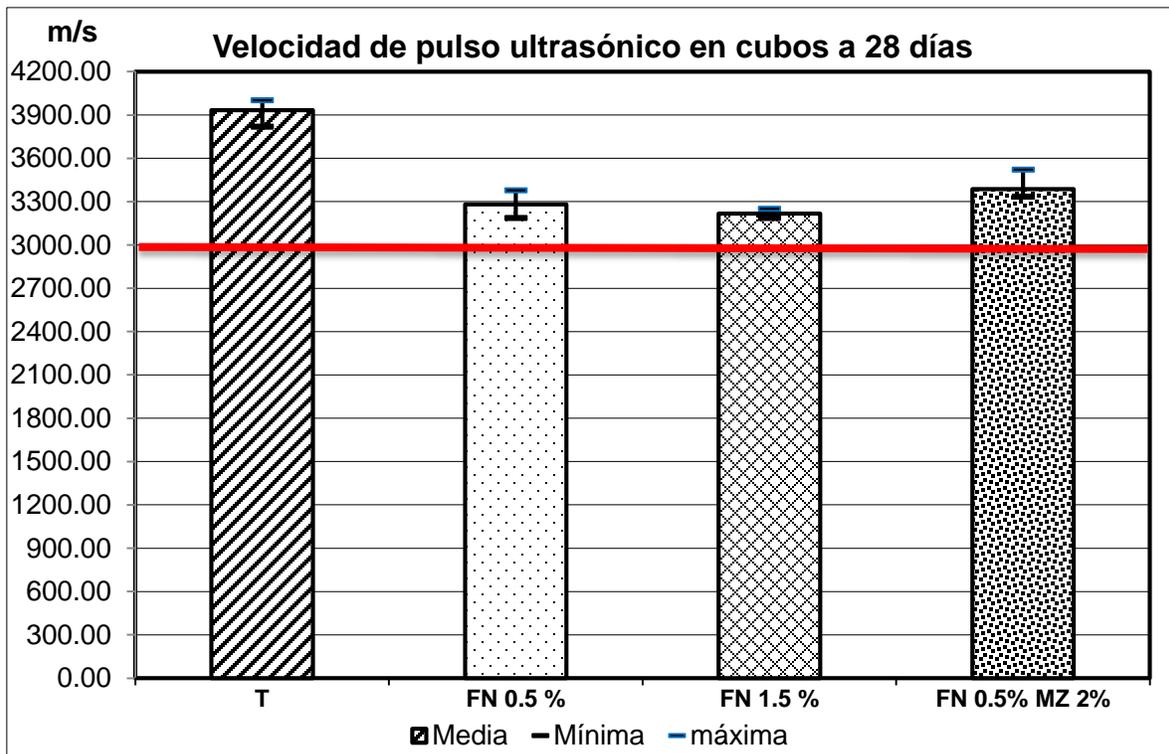


Figura 4.19. Velocidad de pulso ultrasónico en cubos a 28 días.

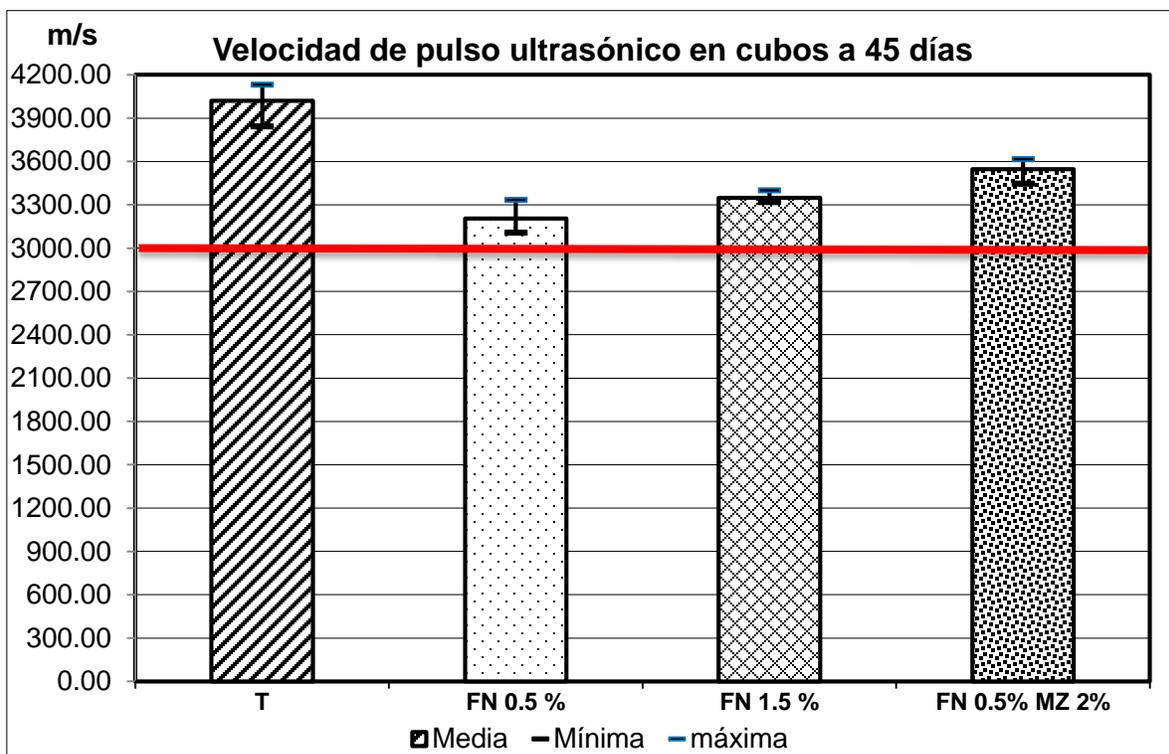


Figura 4.20. Velocidad de pulso ultrasónico en cubos a 45 días.



### Velocidad de pulso ultrasónico en prismas

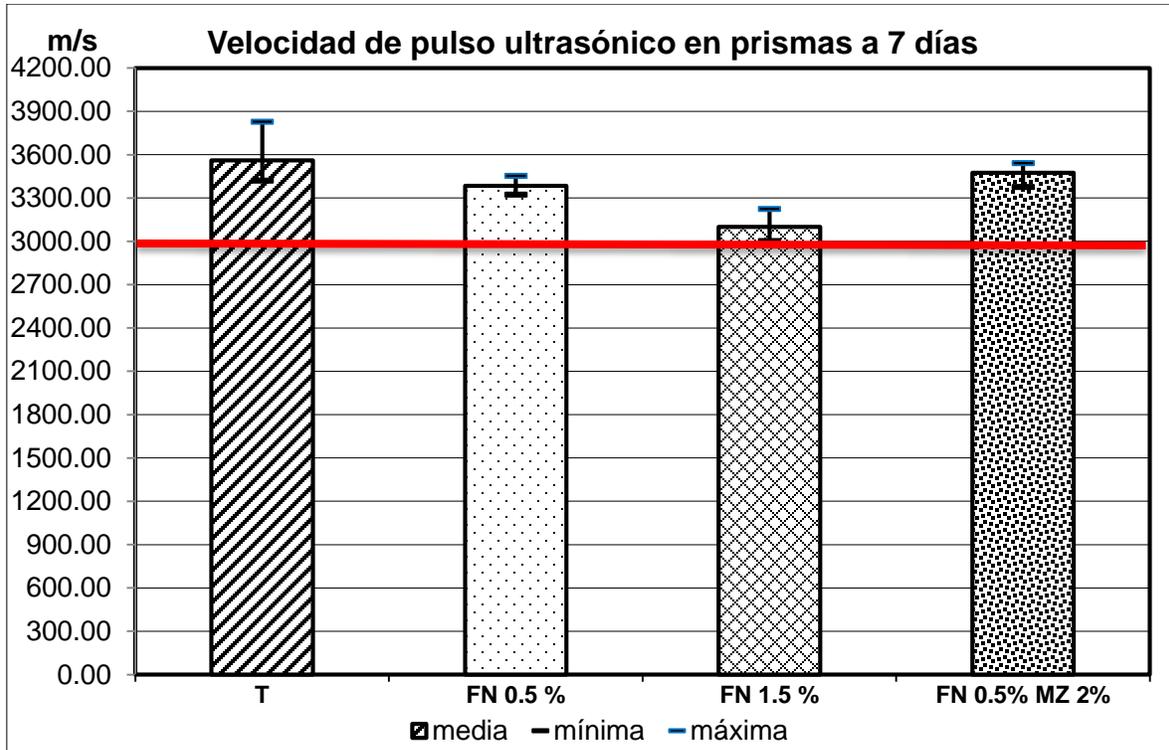


Figura 4.21. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 7 días.

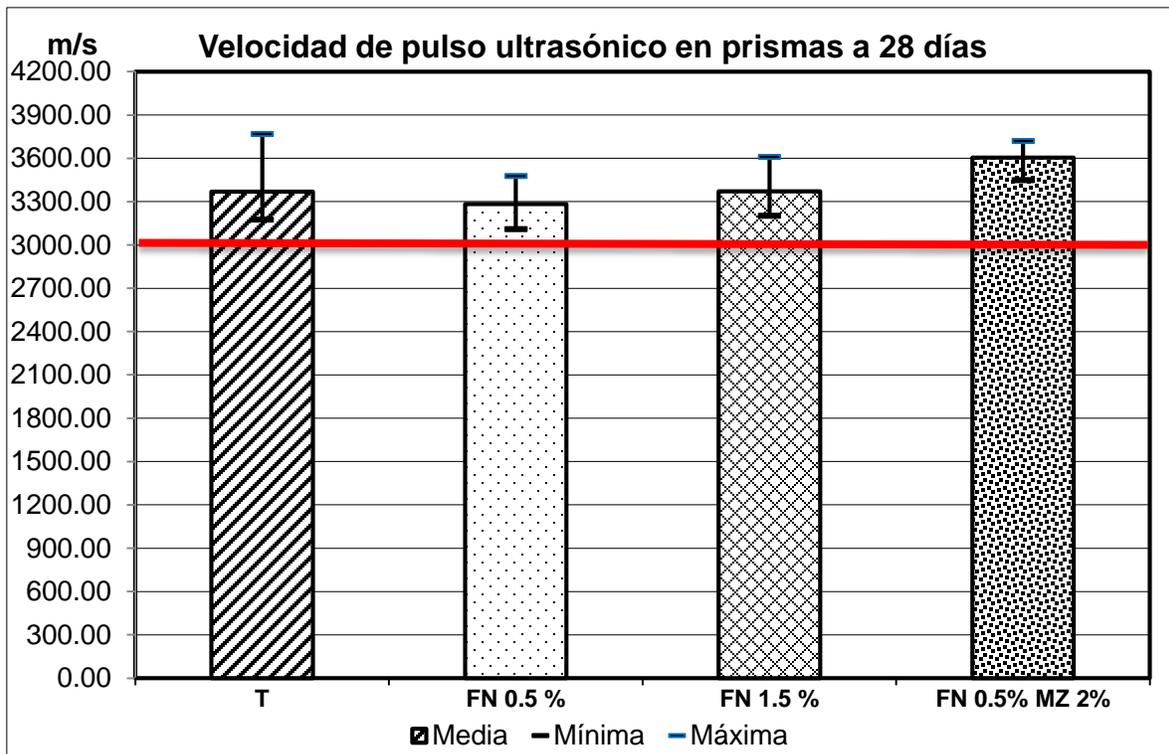


Figura 4.22. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 28 días.

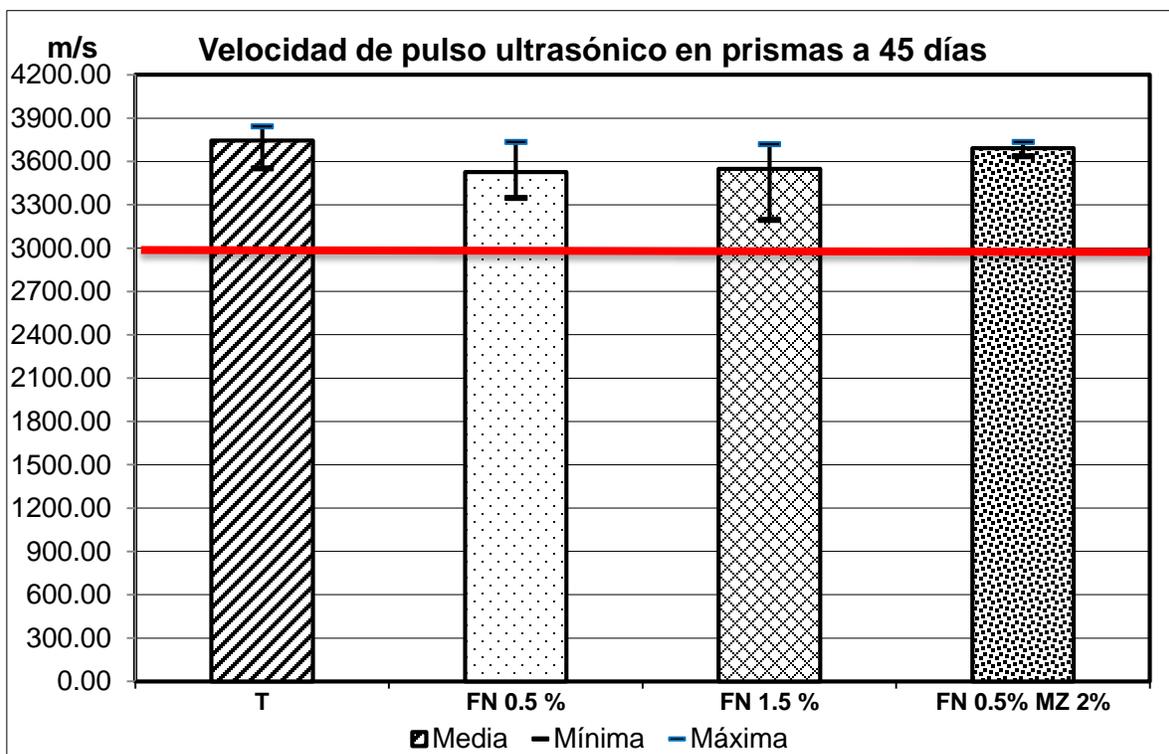


Figura 4.23. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 45 días.

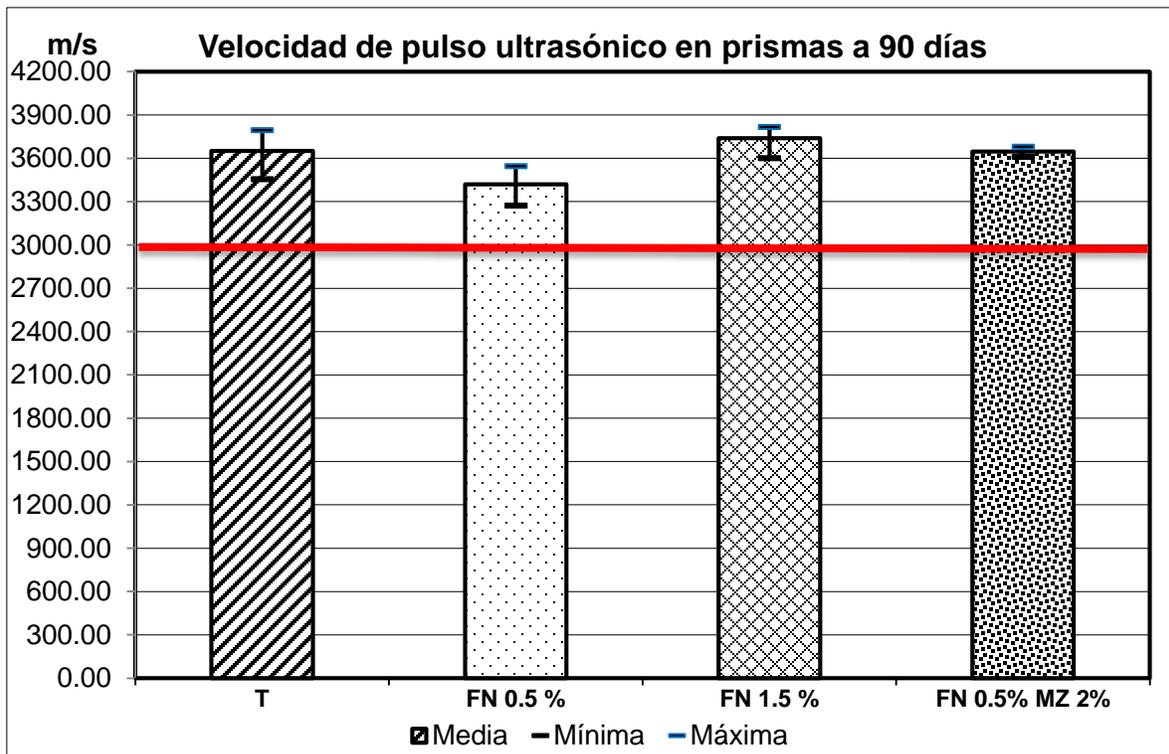


Figura 4.24. Velocidad de pulso ultrasónico en prismas a 90 días.

### 4.3.2 Destructivas

#### 4.3.2.1 Resistencia a la compresión simple

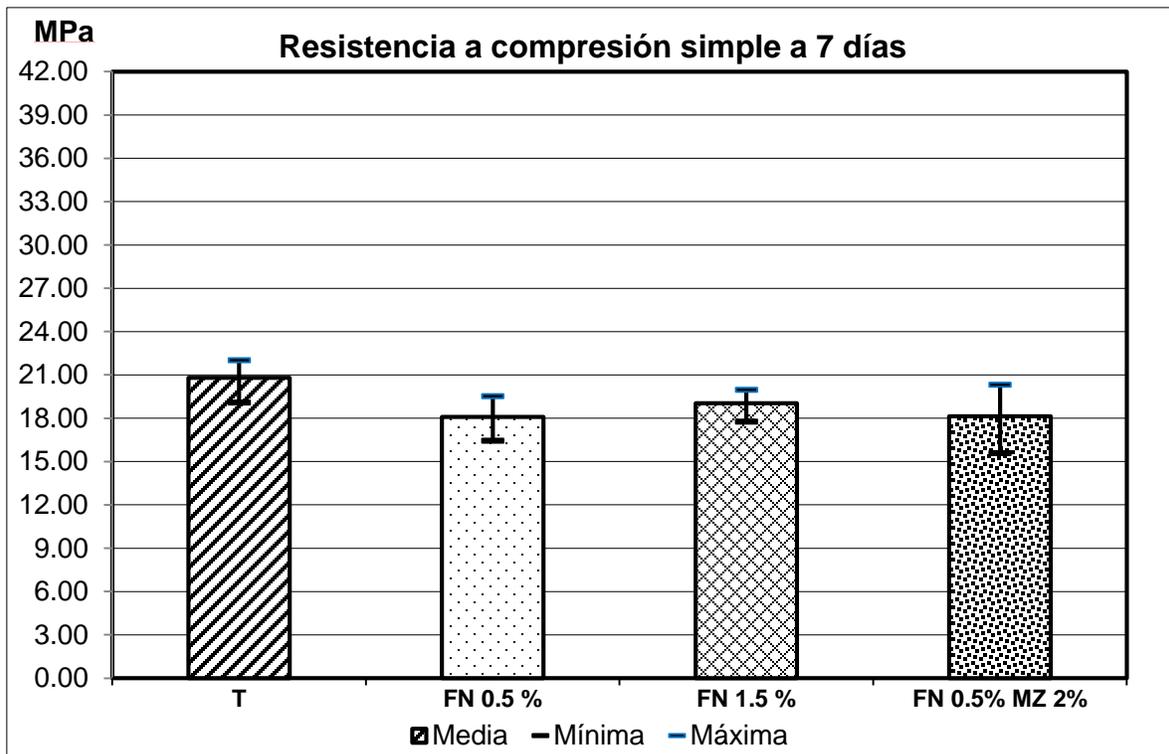


Figura 4.25. Resistencia a compresión simple a 7 días.

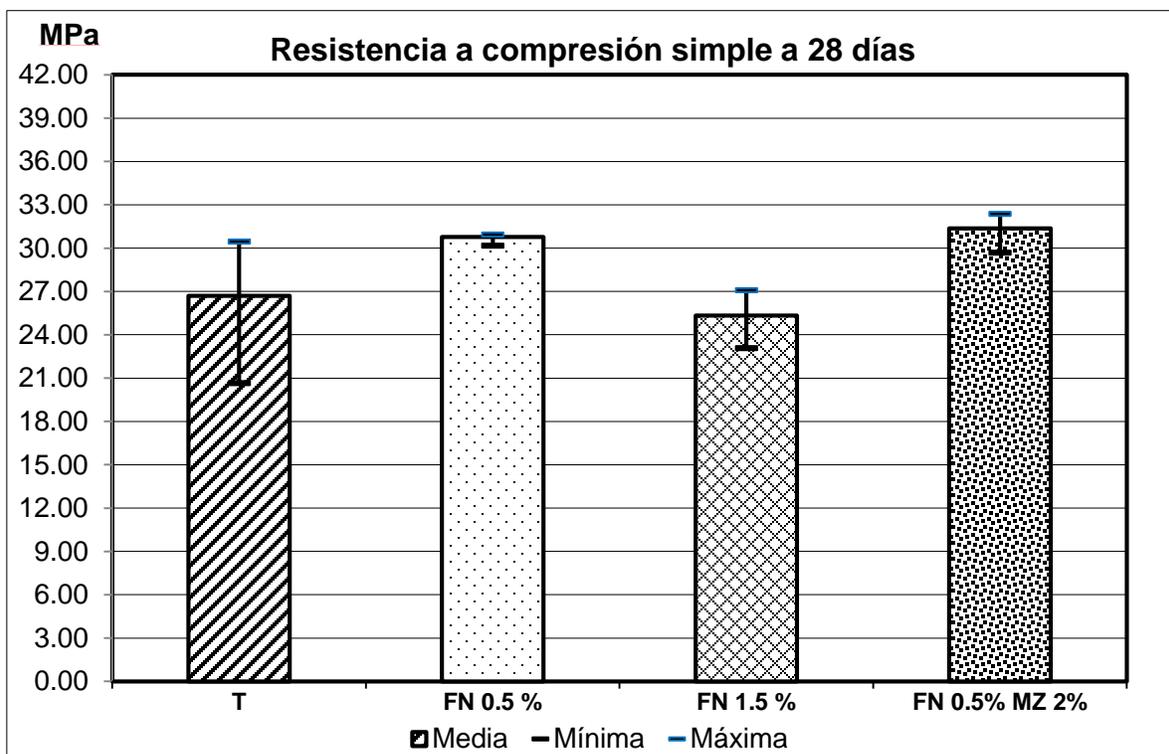


Figura 4.26. Resistencia a compresión simple a 28 días.

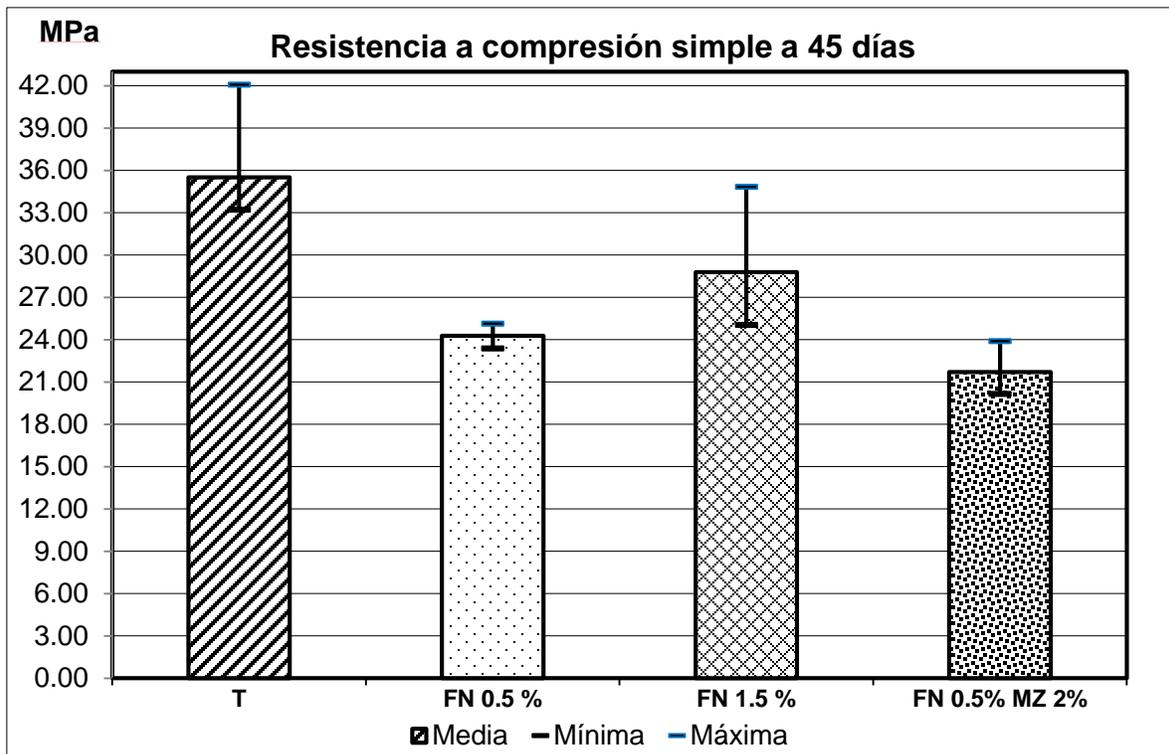


Figura 4.27. Resistencia a compresión simple a 45 días.

Como se puede observar en la Figura 4.26, la resistencia a compresión simple en cubos, fue mejor a la edad de 28 días, superando a la resistencia que tiene la mezcla testigo. Sin embargo a la edad de 45 días la mezcla testigo presenta valores superiores a las mezclas con sustitución. El mortero FN 1.5 % presenta una tendencia a mejorar su resistencia conforme avanza el tiempo, aun cuando los valores se encuentren por debajo de los obtenidos de la mezcla testigo.

#### 4.3.2.2 Resistencia a flexión

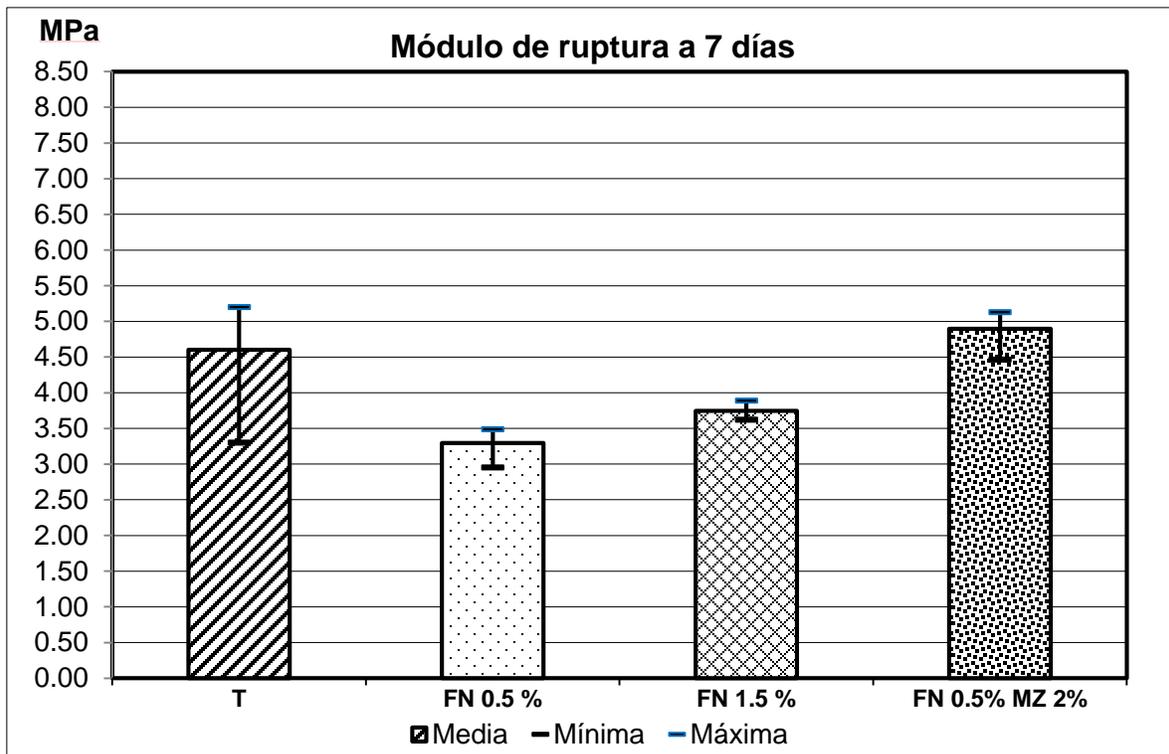


Figura 4.28. Módulo de ruptura a 7 días.

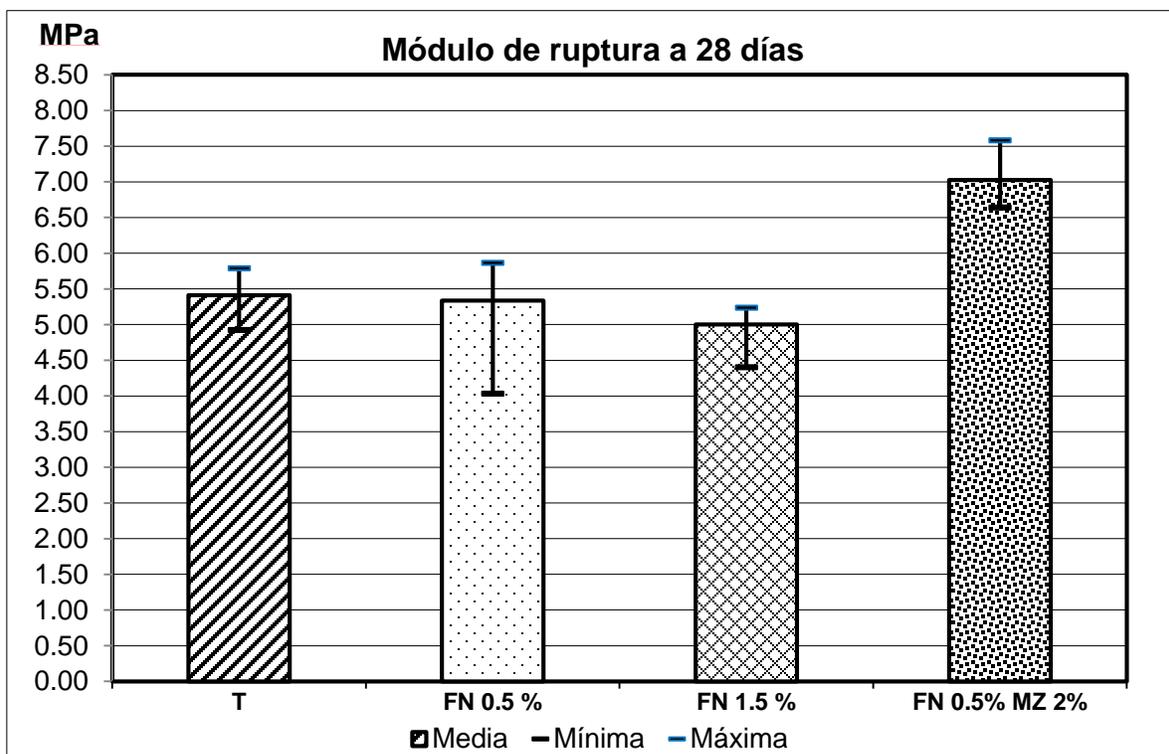


Figura 4.29. Módulo de ruptura a 28 días.

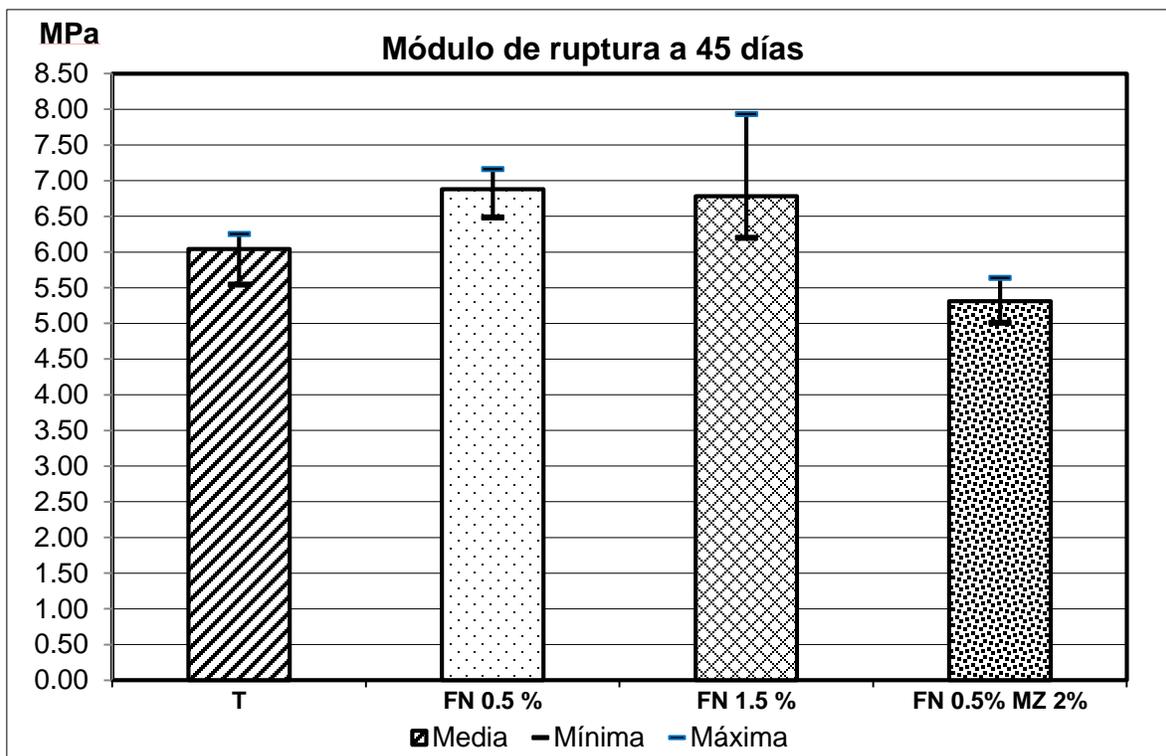


Figura 4.30. Módulo de ruptura a 45 días.

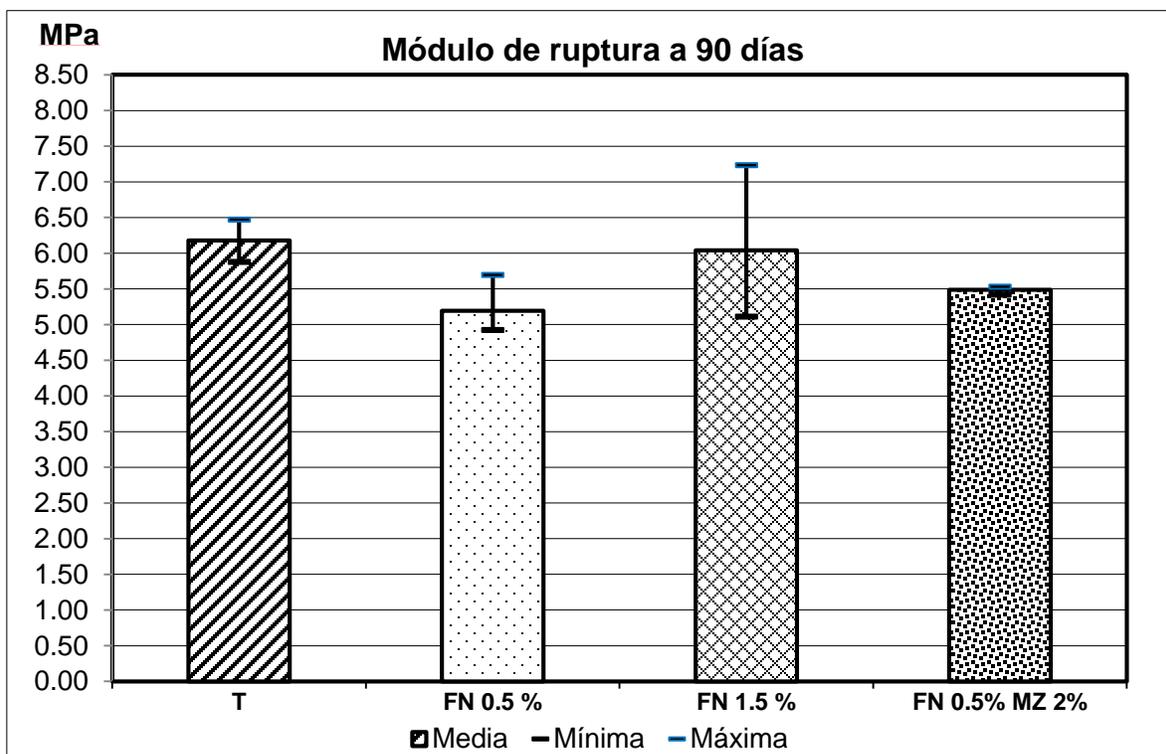


Figura 4.31. Módulo de ruptura a 90 días.



De acuerdo a la tabla de resultados y comparación (Tabla 4.16), todas las mezclas trabajan a flexión ya que ninguna está por debajo de los límites que indica la referencia (Kosmatka, et al., 2004). Los rangos son 0.7 y 0.8 de la raíz cuadrada del esfuerzo a compresión.

### 4.3.2.3 Resistencia a la tensión directa

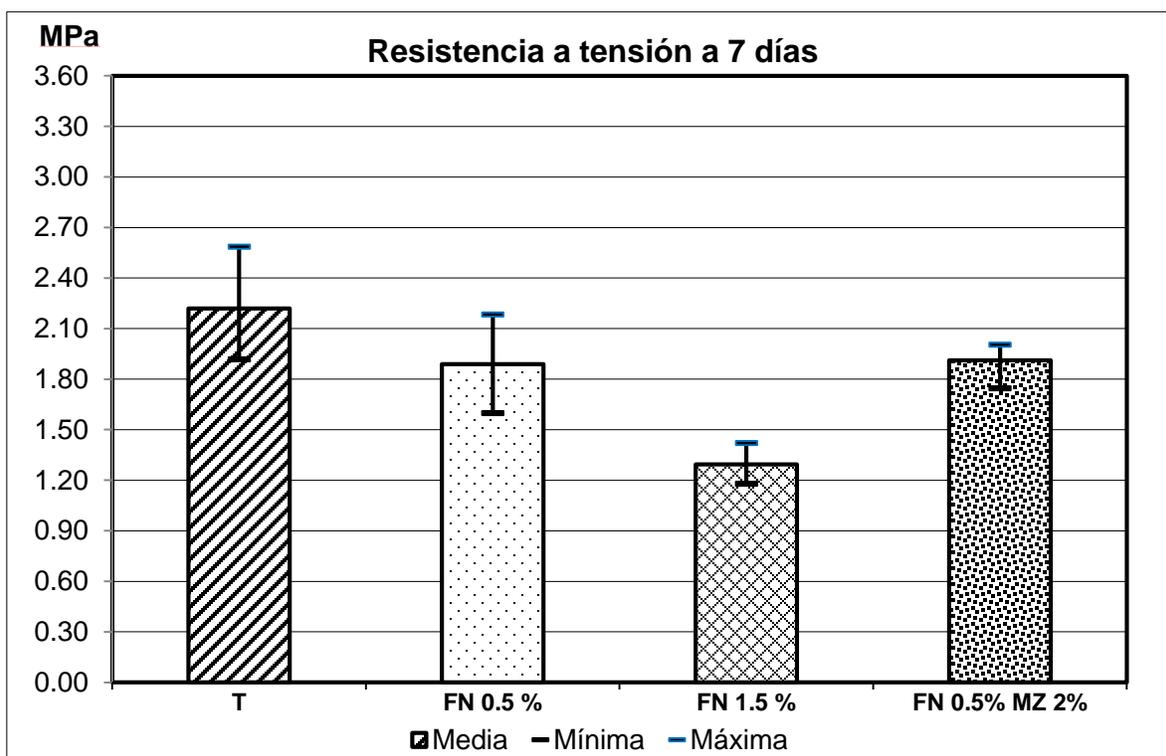


Figura 4.32. Resistencia a tensión directa a 7 días.

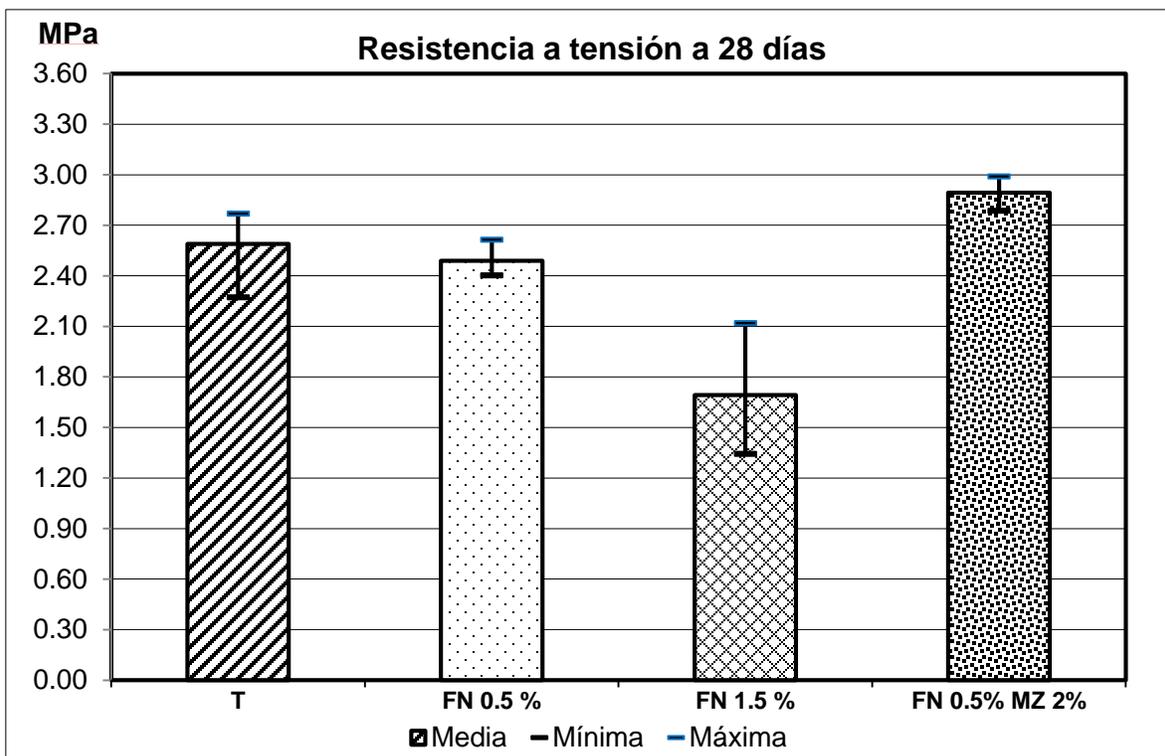


Figura 4.33. Resistencia a tensión directa a 28 días.

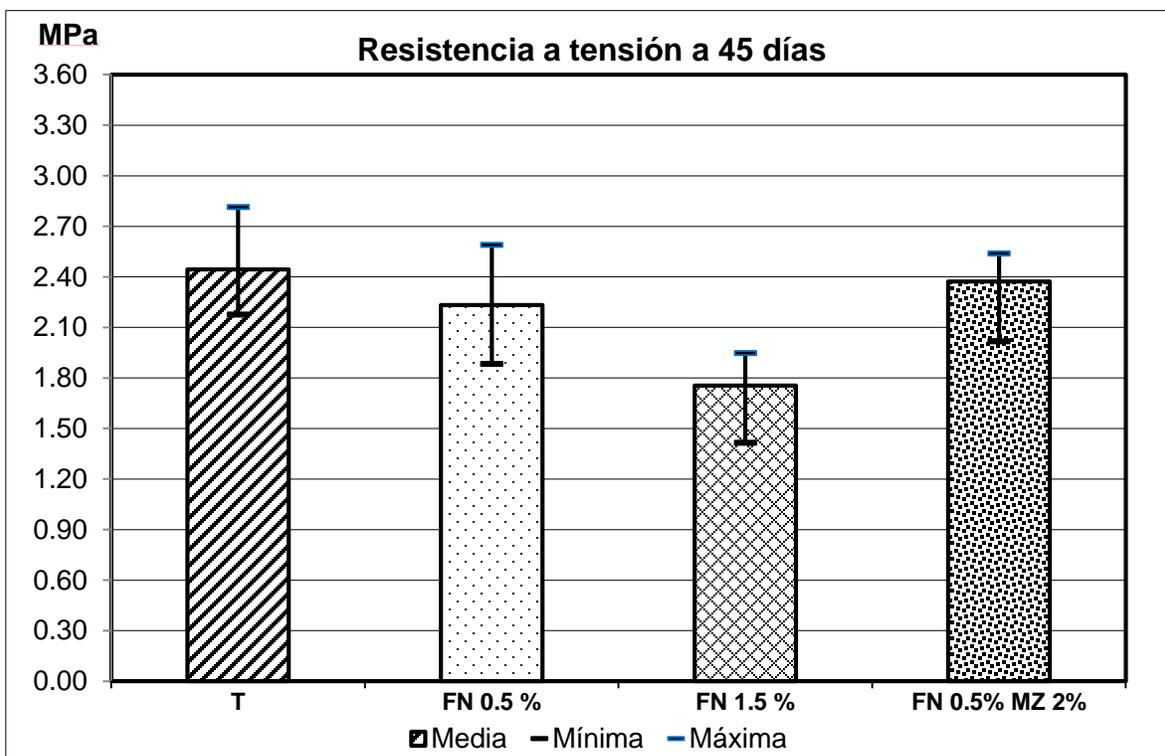


Figura 4.34. Resistencia a tensión directa a 45 días.

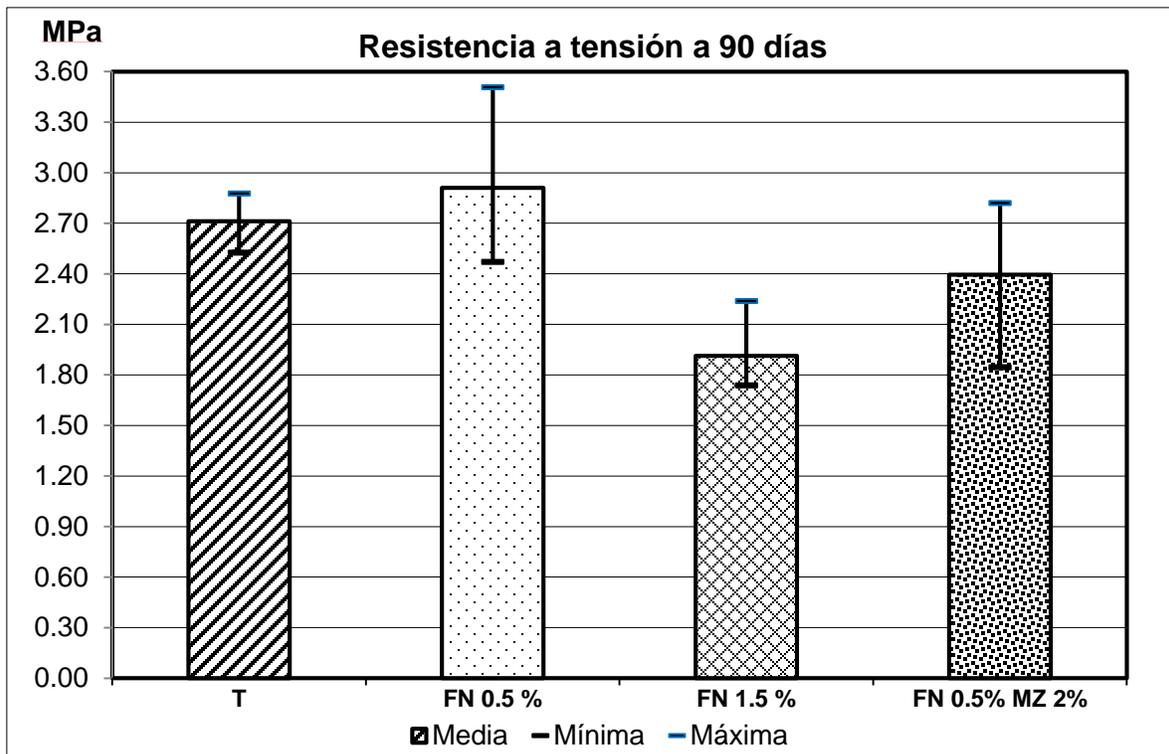


Figura 4.35. Resistencia a tensión directa a 90 días.

Los resultados de tensión directa de las mezclas con las diferentes sustituciones presentan valores en el rango de 1.8 a 3 MPa. A la edad de 90 días, la sustitución de FN 0.5% supera al testigo. Aun cuando la sustitución de FN 1.5% presenta valores inferiores al testigo, estos se encuentran dentro del rango del 8% al 12% de la resistencia a compresión. Esta comparativa se presenta en la tabla 4.16.

#### 4.3.2.4 Resistencia tensión indirecta

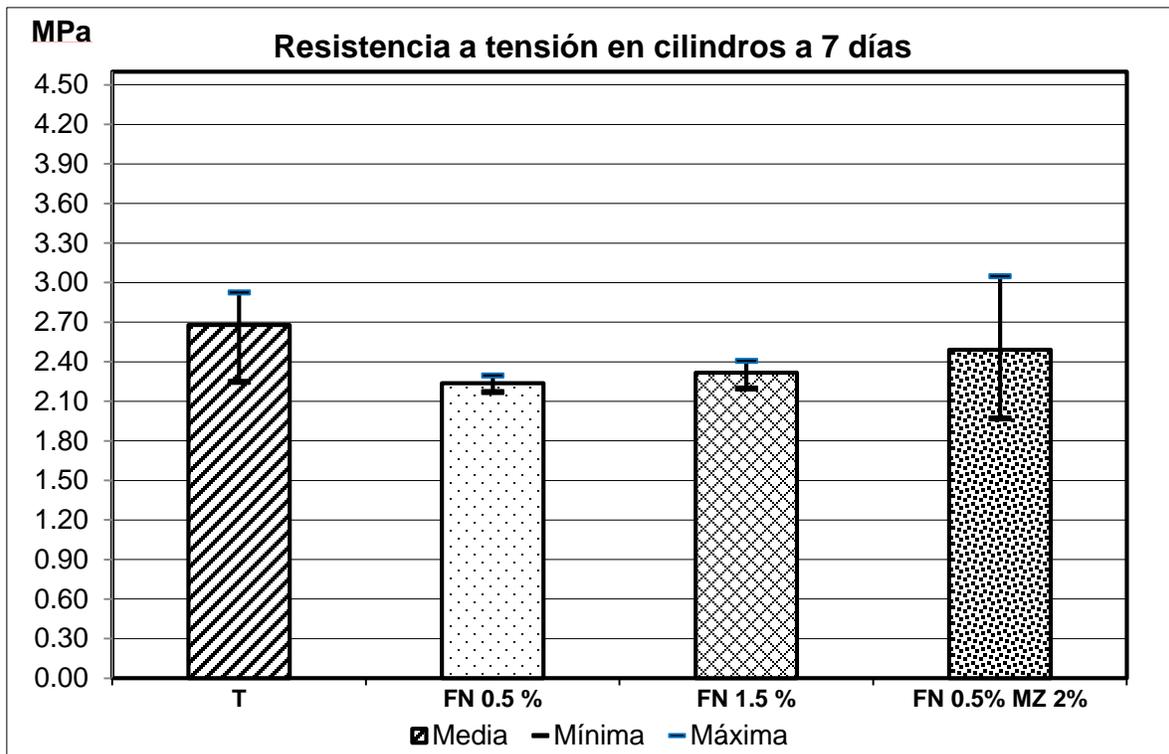


Figura 4.36. Resistencia a tensión indirecta a 7 días.

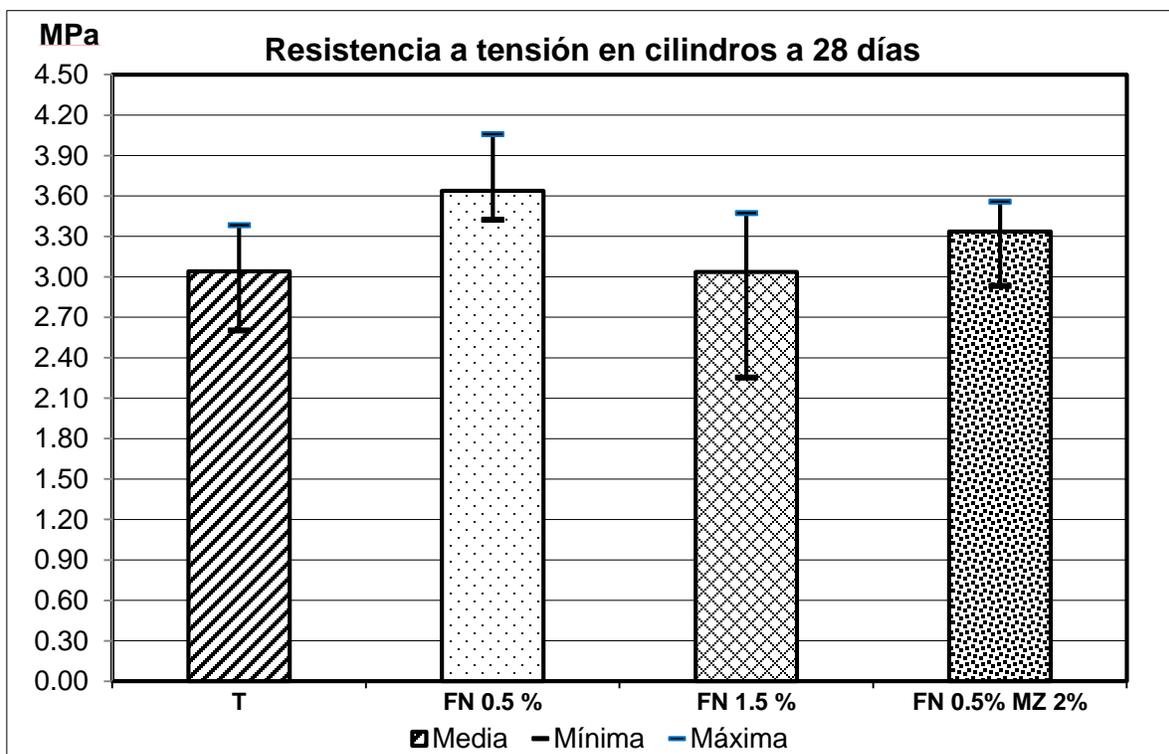


Figura 4.37. Resistencia a tensión indirecta a 28 días.

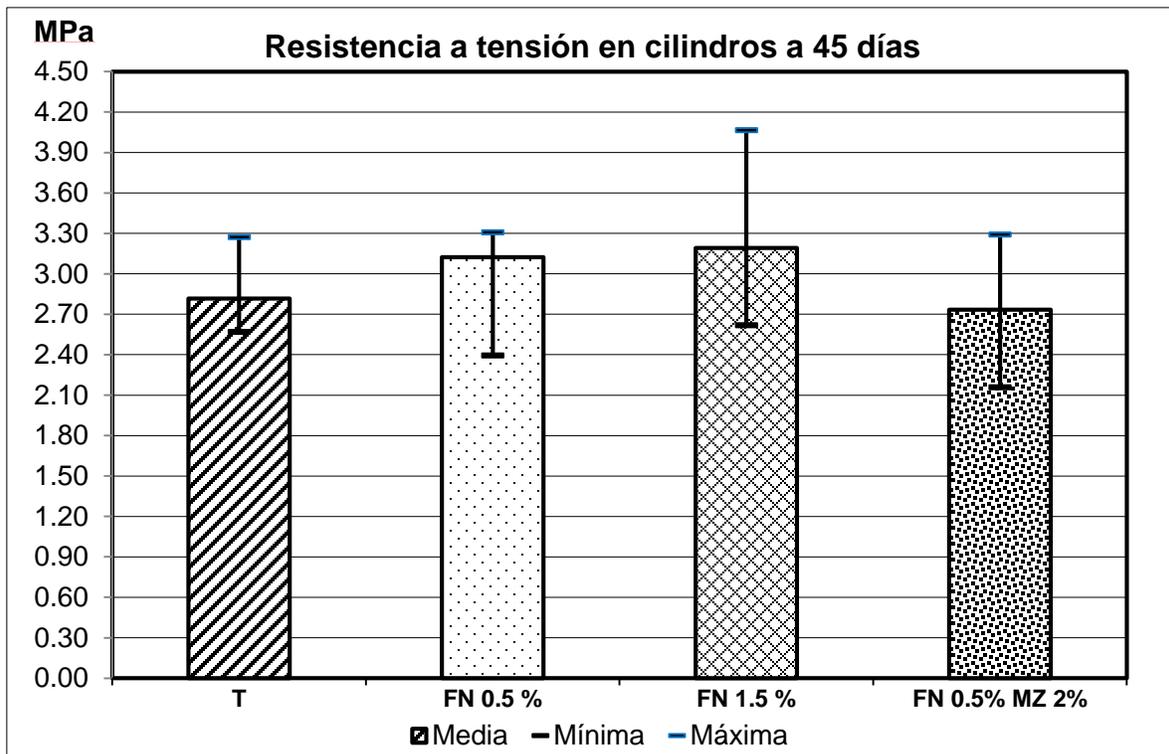


Figura 4.38. Resistencia a tensión indirecta a 45 días.

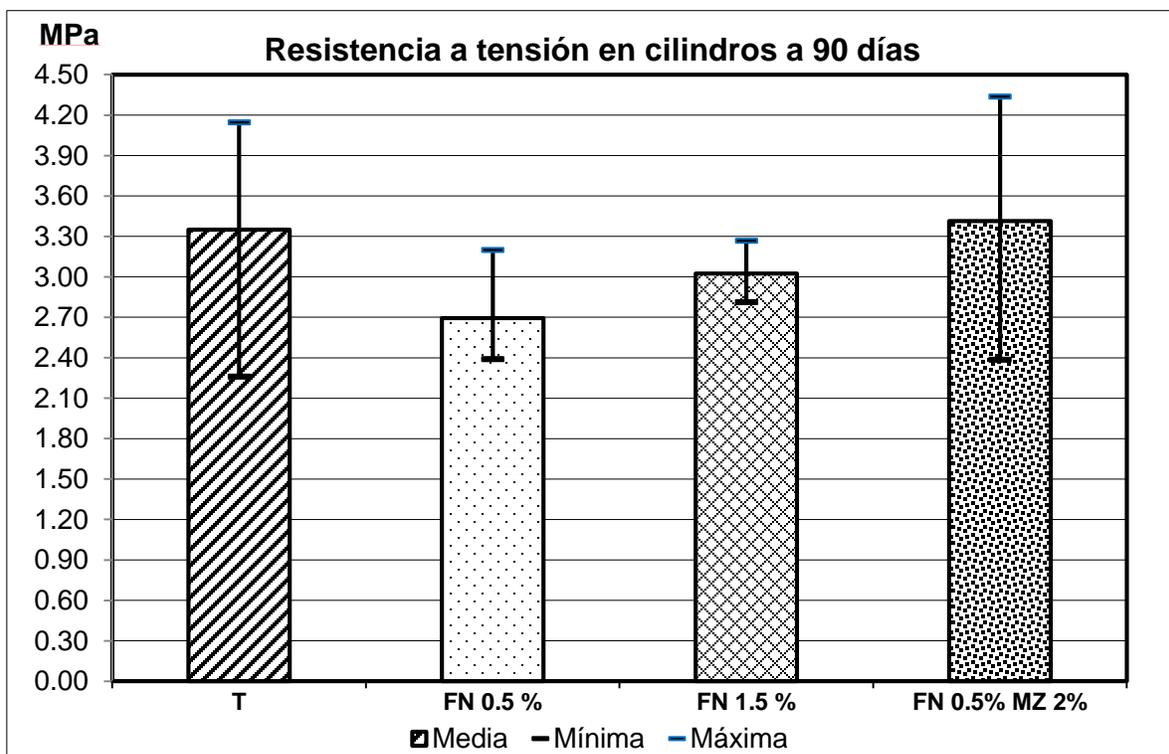


Figura 4.39. Resistencia a tensión indirecta a 90 días.



La tensión indirecta servirá como parámetro cuando no se tengan los elementos necesarios para calcular una tensión directa. Se considera que los resultados obtenidos de ambas pruebas presentan similitud, por lo tanto se pueden calcular de una forma aproximada utilizando el esfuerzo a compresión como dato base. La resistencia a la tensión directa del concreto es aproximadamente el 8% a 12% de la resistencia a compresión, y se estima normalmente evaluando 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, en MPa (Kosmatka, et al., 2004). La resistencia a flexión de concretos de peso normal, es normalmente de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, en MPa.

Tabla 4.16. Resultados y comparación.

Mezcla	Edad (días)	Compresión (Mpa)	0.7 $\sqrt$ Compresión	Flexión (Mpa)	0.8 $\sqrt$ Compresión	0.4 $\sqrt$ Compresión	Tensión Indirecta (Mpa)	Tensión Directa (Mpa)	0.7 $\sqrt$ Compresión
<b>Testigo</b>	7	20.79	3.19	4.60	3.65	1.82	2.68	2.22	3.19
	28	26.71	3.62	5.41	4.13	2.07	3.04	2.59	3.62
	45	35.5	4.17	6.04	4.77	2.38	2.82	2.44	4.17
	90		0.00	6.18	0.00	0.00	3.35	2.71	0.00
<b>FN 0.5%</b>	7	18.09	2.98	3.30	3.40	1.70	2.24	1.89	2.98
	28	30.77	3.88	5.34	4.44	2.22	3.64	2.49	3.88
	45	24.27	3.45	6.88	3.94	1.97	3.12	2.23	3.45
	90		0.00	5.19	0.00	0.00	2.70	2.91	0.00
<b>FN 1.5%</b>	7	19.05	3.06	3.75	3.49	1.75	2.32	1.29	3.06
	28	25.34	3.52	5.00	4.03	2.01	3.04	1.69	3.52
	45	28.79	3.76	6.78	4.29	2.15	3.19	1.75	3.76
	90		0.00	6.04	0.00	0.00	3.02	1.91	0.00
<b>FN 0.5% MZ 2%</b>	7	18.13	2.98	4.90	3.41	1.70	2.49	1.91	2.98
	28	31.36	3.92	7.03	4.48	2.24	3.34	2.89	3.92
	45	21.71	3.26	5.31	3.73	1.86	2.73	2.37	3.26
	90		0.00	5.49	0.00	0.00	3.41	2.40	0.00

Con lo mencionado en la Tabla 4.16, podemos decir que los resultados de las pruebas de flexión, tensión directa e indirecta cumplen con los límites permitidos para cada caso, e incluso, están por arriba del límite superior, esto indica una resistencia muy alta del mortero en estos parámetros.



## **5. Conclusiones**

Las cenizas orgánicas como substitutos parciales del cemento, le infieren a la mezcla de mortero una mayor densidad. Esto se observa en los resultados de las gráficas 4.5, 4.6 y 4.7.

Los procedimientos experimentales desarrollados en la investigación se basan en normativa vigente ASTM y NMX. Es necesario tomar en cuenta los factores del entorno al momento de realizar las pruebas, ya que un procedimiento adecuado pero con variación en las condiciones de humedad y temperatura pueden modificar los resultados.

La arena utilizada, de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización, presentan parámetros físicos muy favorables para su uso en la construcción, debido a que tiene baja absorción y el módulo de finura está dentro de los estándares de calidad.

La pasta cementante con sustitución de fibra de nopal (FN 1.5 %), presentó un tiempo de fraguado final superior al testigo, lo que le confiere propiedades de aditivo retardante del fraguado. Esta característica beneficia al momento de construir en lugares con temperaturas muy altas, superiores a los 32 °C, ya que se presenta bajo calor de hidratación y se tiene más tiempo para colocar la mezcla en los diferentes elementos a construir.

Como se mostró en el capítulo anterior, las diferentes mezclas presentaron un comportamiento que no siguió la curva que describe el comportamiento mecánico de materiales con cemento Portland, sobre todo a la edad de 28 días, donde la mayoría de las mezclas presentaron resultados más altos comparados con los del mortero control.



Los resultados de pruebas destructivas de flexión y tensión, fueron comparados con la prueba de compresión, ya que es la única que está normada para todas las edades de prueba realizadas en esta investigación. Los resultados de las pruebas destructivas estuvieron dentro de los parámetros aceptables, incluso, estuvieron por encima de los límites superiores recomendables por la normativa, por ello, la durabilidad del mortero se clasifica como alta.

La mezcla que mejores resultados presentó en cuanto a pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistividad fue la que contiene FN 0.5%-MZ 2%; dicha mezcla presentó un mejor acomodo de sus componentes y por lo tanto mayor densidad, comprobado visualmente al romper los especímenes en la prueba de tensión indirecta.

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico arrojó buenos resultados ya que de acuerdo a la RED DURAR, la calidad de las mezclas es alta (valores superiores a 3000 m/s).

Las mezclas de mortero que se analizaron en este estudio tienen un comportamiento físico-mecánico aceptable y cumplen con el objetivo de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

La combinación de aditivos orgánicos densificó notablemente a la matriz cementicia, lo que se tradujo en incremento de la resistencia mecánica bajo sollicitaciones de compresión, flexión, tensión directa e indirecta.



## 6. Bibliografía

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.: s.n.

ASTM C 128, 2004. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. s.l.:s.n.

ASTM C 142, 1997. *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*. s.l.:s.n.

ASTM C 150, 2016. *Standard Specification for Portland Cement*. s.l.:s.n.

ASTM C 266, 2015. *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*. s.l.:s.n.

ASTM C 293, 2002. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. s.l.:s.n.

ASTM C 348, 1997. *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*. s.l.:s.n.

ASTM C 494/C494M - 08a, s.f. s.l.:s.n.

ASTM C 515, 2003. *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. EE. UU.: s.n.

ASTM-C-187-04, 2004. *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*. s.l.:s.n.

ASTM-C-40, 2004. *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. s.l.:s.n.

ASTM-C-597, 2009. *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete*. s.l.:s.n.

ASTM-C-70, 2003. *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*. s.l.:s.n.

Calvo, M., s.f. [En línea]  
Available at: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>  
[Último acceso: 5 Agosto 2016].



CANACEM, 2016. *CANACEM*. [En línea]  
Available at: <http://canacem.org.mx/produccion-y-consumo/>  
[Último acceso: 15 Agosto 2016].

Christianson, S.A. de C.V., s.f. *Crisotan R-5*. s.l.:Boletín Técnico.

Constructor Civil, 2016. *Constructor Civil*. [En línea]  
Available at: <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/morteros-de-cemento-portland.html>  
[Último acceso: 13 Agosto 2016].

Correa, R. S., 2000. Los cementos adicionados. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Julio.

del Valle Moreno, A. d. L. y otros, 2015. *Solicitaciones mecánicas y estáticas a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adicionados con fibras deshidratadas de cactus opuntia*, Querétaro: s.n.

Domoterra, 2013. *Domoterra*. [En línea]  
Available at: <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/>  
[Último acceso: 16 Agosto 2016].

Guzmán, J. T., 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.imcyc.com/ct2007/jun07/ingenieria.htm>  
[Último acceso: 15 Agosto 2016].

Instituto del Concreto, 1997. *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.

Jacobo, S. J., 2014. *Tesis de Licenciatura: Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*. Morelia: s.n.

Kosmatha, S. H. & Panarese, W. C., 1992. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Primera ed. México: Instituto del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. & Tanesi, J., 2004. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie(Illinois): Portland Cement Association.

Mendoza Anaya, D., Brito Benitez, E. L. & Arenas Alatorre, J., 2004. *La Ciencia de Materiales y su Impacto en la Arqueología*. s.l.:Academia Mexicana de Ciencia de Materiales.



Molina, M. J. T., 2008. *Teoría de la Equivalencia Global*. Volumen III ed. s.l.:Molwick.

Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W. & Espinoza Mandujano, J. A., 2011. *Análisis de Materiales*. Tercera Edición ed. Morelia(Michoacán): Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Civil.

Neville, A., 1998. *Tecnología del Concreto*. Primera ed. México: Trillas; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).

NMX-C-057-ONNCCE, 2015. *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-061-ONNCCE, 2015. *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-073-ONNCCE, 2004. *Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba..* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-075-ONNCCE, 2006. *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Sanidad por Medio de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio*. s.l.:s.n.

NMX-C-083-ONNCCE, 2014. *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia de Cilindros de Concreto - Método de Prueba*. s.l.:Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-111-ONNCCE, 2014. *Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba..* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-122-ONNCCE, 2004. *Industria de la Construcción -Agua para Concreto-Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-148-ONNCCE, 2010. *Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..



NMX-C-159-ONNCCE, 2004. *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-160-ONNCCE, 2004. *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado en Obra de Especímenes de Concreto*. s.l.:Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-163-ONNCCE, 1997. *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto*. s.l.:Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

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 Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-166-ONNCCE, 2006. *Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Prueba*.. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-170-ONNCCE, 1997. *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo, al Tamaño Requerido para las Pruebas*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

NMX-C-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-263-ONNCCE, 2010. *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico Endurecido - Determinación de la Masa Específica, Absorción y Vacíos*. s.l.:Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la 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..

NMX-C-480-ONNCCE, 2014. *Industria de la Construcción - Geotecnia - Equivalente de Arena de Agregados Finos - Método de Ensayo*. Querétaro: s.n.



QuimiNet, 2016. *QuimiNet*. [En línea]  
Available at: [http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-la-fecula-de-maiz-2653824.htm?mkt\\_medium=2552671&mkt\\_term=&mkt\\_content=&mkt\\_campaign=1&mkt\\_source=174](http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-la-fecula-de-maiz-2653824.htm?mkt_medium=2552671&mkt_term=&mkt_content=&mkt_campaign=1&mkt_source=174)  
[Último acceso: 5 Agosto 2016].

RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Tercera Edición ed. México: CYTED.

Sánchez de Guzmán, D., 2006. *Concretos y morteros*. Colombia: Instituto del Concreto.

Shetty, M., 2005. *Concrete Technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand and Companu LTD.

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: Publicación Técnica #326, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.