



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

**“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO
PORTLAND, CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”**

PRESENTA PARA OBTENER TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FIDEL BAUTISTA LEON

Asesor

M. A. Ing. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Co-asesores

M.I.T. SANDRA DEL CARMEN ARGÜELLO HERNÁNDEZ

M.I.T. CIPRIANO BERNABÉ REYES

Morelia, Michoacán, México, Mayo 2017



Índice

Índice	i
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas	xi
Dedicatorias	xiii
Agradecimientos	xiv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Justificación.....	xviii
Objetivos	xix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Cemento portland	3
2.1.1. Fabricación del cemento portland	4
2.1.2. Tipos de cemento portland.....	12
2.1.3. Propiedades del cemento portland.....	15
2.1.4. Especificaciones	19
2.1.5. Cemento empleado en la investigación	21
2.2. Material pétreo.....	22
2.2.1. Origen del material pétreo.....	23
2.2.2. Propiedades del material pétreo	25
2.2.3. Material pétreo empleado en la investigación	28
2.3. Morteros.....	29



2.3.1.	Tipos de morteros	30
2.4.	Agua	32
2.4.1.	Especificaciones	32
2.4.2.	Agua empleada en la investigación.....	34
2.5.	Aditivos	35
2.5.1.	Tipos de aditivos y usos	35
2.5.2.	Aditivo usado en la investigación	38
2.6.	Mucílago de Nopal.....	38
2.6.1.	Nopal (<i>CACTUS OPUNTIA FICUS-INDICA</i>).....	39
2.6.2.	Usos del mucílago de nopal en la industria de la construcción .	41
2.6.3.	Aplicación de mucílago de nopal en morteros.....	43
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	46
3.1.	Caracterización de los materiales.....	46
3.1.1.	Caracterización del cemento.....	46
3.2.	Arena	54
3.2.1.	Muestreo y cuarteo	54
3.2.2.	Humedad de absorción	55
3.2.3.	Masa volumétrica seca y suelta (MVSS).....	57
3.2.4.	Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)	59
3.2.5.	Análisis granulométrico	60
3.2.6.	Colorimetría.....	62
3.2.7.	Sedimentación	65
3.2.8.	Material que pasa la malla No. 200.....	66
3.2.9.	Terrones de arcilla	68
3.2.10.	Densidad de la arena	70



3.2.11.	Equivalente de arena	71
3.3.	Preparación del mucílago de nopal	73
3.4.	Aditivo	75
3.5.	Pruebas realizadas al mortero fresco	75
3.5.1.	Fluidez.....	75
3.5.2.	pH	77
3.5.3.	Temperatura.....	77
3.6.	Elaboración de especímenes.....	78
3.6.1.	Elaboración de probetas cúbicas	78
3.6.2.	Elaboración de probetas prismáticas	80
3.6.3.	Elaboración de briquetas.....	81
3.6.4.	Elaboración de probetas cilíndricas	81
3.7.	Curado de especímenes.....	82
3.8.	Evaluaciones al mortero endurecido.....	82
3.8.1.	Pruebas no destructivas.....	83
3.8.2.	Pruebas destructivas.....	88
3.8.3.	Pruebas de durabilidad	94
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	110
4.1	Agua.....	110
4.2	Caracterización del cemento.....	111
4.2.1.	Densidad.....	111
4.2.2.	Consistencia normal.....	111
4.2.3.	Tiempos de fraguado	111
4.3	Arena	112
4.4	Pruebas en mortero fresco.....	114



4.4.1.	Fluidez.....	114
4.4.2.	pH y temperatura	114
4.5	Evaluaciones en el mortero endurecido	115
4.5.1	Pruebas no destructivas.....	115
4.5.2	Pruebas destructivas.....	117
4.6	Pruebas de durabilidad	122
4.6.1.	Determinación de la sanidad por medio de sulfato de sodio ...	123
4.6.2.	Permeabilidad rápida de cloruros.....	124
4.6.3.	Ciclos acelerados hielo-deshielo en primas de 6cm x 6cm x 24 cm 125	
4.6.4.	Carbonatación.....	126
4.6.5.	Absorción capilar.....	127
4.6.6.	Porosidad total	134
4.7	Correlación entre las propiedades evaluadas	134
4.7.1	Resistividad eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico	135
4.7.2	Resistencia a la Compresión y Resistividad eléctrica	135
4.7.3	Resistencia a la Compresión y Velocidad de Pulso Ultrasónico	136
4.7.4	Resistencia a la Compresión y Porosidad total	137
5.	CONCLUSIONES	140
	BIBLIOGRAFÍA	143



Índice de figuras

Figura 1. Cemento Portland, compuesto por silicatos hidráulicos (Kosmatka, et al, 2004, pág. 25).....	3
Figura 2. Caliza, una de las principales materias primas (Kosmatka, et al, 2004, pág.29).....	6
Figura 3. Horno rotatorio donde se obtiene el clinker. La imagen inferior derecha muestra la vista interior del horno. (Kosmatka, et al, 2004, pág.30)	6
Figura 4. El clinker, se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice. Específicamente este tiene un diámetro de 20 mm (3/4 pulg). (Kosmatka, et al, 2004, pág.30)	7
Figura 5. Yeso, se muele con el clinker para formar el cemento portland. El yeso controla el tiempo de fraguado, las propiedades de contracción por secado y el aumento de la resistencia. (Kosmatka, et al, 2004, pág.30)	7
Figura 6. Etapas en la producción tradicional del cemento portland (Kosmatka, et al, 2004 pág.26).....	9
Figura 7. Etapas en la producción moderna del cemento portland, del proceso seco. (Kosmatka, et al, 2004, .pág.27)	10
Figura 8. Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final (Kosmatka, et al, 2004, pág.31	11
Figura 9. (Izquierda) Desempeño en suelos con sulfatos de concretos preparados con diferentes tipos de cemento. Los cementos tipos II y V tienen menor contenido de C3A, lo que mejora la resistencia a los sulfatos. (Derecha) La mejoría de la resistencia a los sulfatos resultante de la baja relación agua-materiales cementantes, como lo demuestran las vigas de concreto expuestas a suelos con sulfatos en un ambiente de mojado y secado. (Kosmatka, et al, 2004, Pag.32.) .	13
Figura 10. Distribución del tamaño de las partículas del cemento portland (Kosmatka, et al, 2004, pág. 57)	15
Figura 11. Ensayo de consistencia normal para pastas usando la aguja de Vicat (Bautista León, 2015).....	16



Figura 12. Determinación de fraguado inicial y final (Bautista León, 2015)	17
Figura 13. Representación del ciclo de las rocas (Departamento de Geología, Universidad de Chile; “Las rocas y sus procesos de formación”).....	24
Figura 14. Diferentes estados de saturación del agregado (El concreto y otros materiales para la construcción, Gutiérrez de López, UNC, sede Manizales)	26
Figura 15. Llegada de la arena del banco de material “Calderón” de la localidad Joyitas (Bautista León, 2015).....	29
Figura 16. Aditivos líquidos, de izquierda a derecha: aditivo antideslave, reductor de retracción, reductor de agua, agente espumante, inhibidor de corrosión e incorporador de agua (WWW.ARQHYS.COM)	35
Figura 17. Aditivo plastificante usado en la investigación, Crisotan R-5 (Villanueva Guzmán, 2015)	38
Figura 18. Nopal en su medio natural (www.bioenciclopedia.com).....	39
Figura 19. Datos estadísticos de la producción de Nopal en México durante el periodo 2000-2010 [SINAREFI (SIAP, 2012)]	41
Figura 20. Elaboración de pintura a base de nopal (Expresión Fovissste, 2014) .	42
Figura 21. Representación esquemática para la gelificación de pectina de nopal en presencia de iones de calcio (Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, 2009)	44
Figura 22. Matraz de Le Chatelier (NMX-C-152-ONNCCE, 2010).....	47
Figura 23. Formación de cráter en el cemento, (López Regalado, 2016)	50
Figura 24. Vertiendo el líquido de amasado al cemento, (Bautista León, 2016) ...	50
Figura 25. Mezclado de cemento con líquido de amasado, (López Regalado, 2016)	50
Figura 26. Amasado de mezcla, (Bautista León, 2016)	51
Figura 27. Determinación de tiempos de fraguado (Bautista León, 2016)	53
Figura 28. Cuarteo de arena usando un divisor mecánico (Bautista León, 2015).	55
Figura 29. Secado superficialmente de la arena (Bautista León, 2015)	56
Figura 30. Determinación del peso + material (Bautista León, 2015)	58
Figura 31. Pase de material por las mallas (Bautista León, 2015)	60



Figura 32. Peso de los retenidos de cada una de las mallas (Bautista León, 2015)	61
Figura 33. Elaboración de color normal (Bautista León, 2015)	63
Figura 34. Colocación de la arena dentro del biberón (Bautista León, 2015)	64
Figura 35. Tabla colorimétrica (Bautista León, 2015)	64
Figura 36. Llenado del recipiente con material (Bautista León, 2015)	65
Figura 37. Reposo de material durante 24 h (López Regalado, 2015)	66
Figura 38. Desintegración de los terrones de arcilla en la muestra (Bautista León, 2015)	69
Figura 39. Agitado de material, 90 ciclos en 30 s (Bautista León, 2015)	72
Figura 40. Introducción de tubo agitador para obtener la lectura de arena (Bautista León, 2015)	72
Figura 41. Pruebas de equivalente de arena donde se observa el nivel de arena (Bautista León, 2015)	73
Figura 42. Nopal obtenido de la central de abastos de la ciudad de Morelia, Michoacán	73
Figura 43. Picado de nopal de 1 a 1.5 cm de lado de cada trozo (Bautista León, 2015)	74
Figura 44. Macerado del nopal después de 3 h de cocción.	74
Figura 45. Mucílago de nopal	74
Figura 46. Expansión de la mezcla manualmente girando la leva (Bautista León, 2015)	76
Figura 47. Toma de medidas distribuidas simétricamente para la obtención de fluidez (Bautista León, 2015)	76
Figura 48. Determinación de pH mediante papel indicador (López Regalado, 2015)	77
Figura 49. Determinación de pH de las mezclas (Bautista León, 2015)	77
Figura 50. Sentido de golpes con el pisón de acrílico para el llenado de moldes (NMX-C-061-ONNCCE, 2004)	79
Figura 51. Enrasado del cubo (López Regalado, 2015)	79



Figura 52. Curado de especímenes (Bautista León, 2015)	80
Figura 53. Elaboración de probetas prismáticas (Bautista León, 2015)	80
Figura 54. Elaboración de probetas en forma de maní con molde de bronce que se puede desmoldar al instante (Villanueva Guzmán, 2015)	81
Figura 55. Determinación de la densidad (Villanueva Guzmán, 2016)	84
Figura 56. Determinación de la resistividad eléctrica (Villanueva Guzmán, 2016)	85
Figura 57. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico (González Castro, 2016)	87
Figura 58. Compresión simple en morteros (Bautista León, 2015)	88
Figura 59. Aplicación de carga al centro de la viga (Bautista León, 2015).....	89
Figura 60. Ejecución de la prueba de tensión directa (Bautista León, 2015)	91
Figura 61. Prueba de tensión indirecta (López Regalado, 2015)	92
Figura 62. Fallas de las probetas evitado que sea por impacto (Bautista León, 2015)	92
Figura 63. Determinación de la resistencia al despegue con el quipo Pull-off (Bautista León, 2015).....	93
Figura 64. Falla de la base donde el mortero está pegado (Bautista León, 2015)	94
Figura 65. Posibles fallas de adherencia (ASTM C1583, 2004).....	94
Figura 66. Preparación de solución de sulfato de sodio (Bautista León, 2015)	96
Figura 67. Probetas de la mezcla “Control” en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015)	97
Figura 68. Probetas de la mezcla “MN 1:2” en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015)	97
Figura 69. Probetas de la mezcla “MN 1:3” en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015)	98
Figura 70 Esquema del programa PROOVE it, análisis de resultados.	100
Figura 71. Pruebas después de hielo-deshielo (Bautista León, 2015)	101
Figura 72. Prueba de frecuencia de resonancia (Bautista León, 2016)	102
Figura 73. Probetas listas para ser introducidos al frigorífico durante 4 h (Bautista León, 2016).....	102
Figura 74. Probetas envueltas de hielo en el ciclo seis (Bautista León, 2016) ...	103



Figura 75. Exposición de probetas a la intemperie (Bautista León, 2015)	106
Figura 76. Aplicación de fenolftaleína para verificar la carbonatación (Bautista León, 2015).....	106
Figura 77. Sumergido de probetas para iniciar la prueba (Bautista León, 2015)	107
Figura 78. Probetas en prueba de absorción capilar.....	107
Figura 79. Toma de lecturas de peso, procurando usar siempre el mismo equipo (Bautista Leon, 2015).....	107
Figura 80. Distribución granulométrica de la arena empleada en la investigación (Bautista León, 2015).....	113
Figura 81. Densidad de los diferentes morteros estudiados	115
Figura 82. Resistividad en probetas cúbicas de todas las edades estudiadas ...	116
Figura 83. Velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos de las mezclas estudiadas.....	117
Figura 84. Compresión simple en probetas cúbicas	118
Figura 85. Esfuerzo de flexión en probetas prismáticas.....	119
Figura 86. Gráfica de resultados de la prueba de tensión directa en probetas de mortero en forma de cacahuete.	120
Figura 87. Resistencia a la tensión indirecta.....	121
Figura 88. Adherencia a edad de 120 días	122
Figura 89. Adherencia a 180 días	122
Figura 90. Pérdida de masa en probetas sometidas a intemperismo acelerado, 90 días	123
Figura 91. Pérdida de masa en probetas sometidas a intemperismo acelerado, 180 días	124
Figura 92. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros, edad de 180 días.	125
Figura 93. Vibraciones de resonancia resultantes para determinar las frecuencias fundamentales transversales.	126
Figura 94. Profundidad de carbonatación, evaluada a los 225 días.....	127
Figura 95. Absorción de agua de la probeta MN 1:3 (2/5)	129



Figura 96. Coeficiente de absorción de agua (k).....	130
Figura 97. Absorción capilar (S).....	131
Figura 98. Resistencia de penetración al agua (m).....	132
Figura 99. Porcentaje de porosidad efectiva (ϵ_e).....	133
Figura 100. Porosidad total (mediante el método de inmersión)	134
Figura 101. Correlación entre Resistividad eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico	135
Figura 102. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Resistividad	136
Figura 103. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Velocidad de Pulso Ultrasónico	137
Figura 104. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Porosidad total a la edad de 90 y 180 días.....	138



Índice de tablas

Tabla 1. Fuentes de las materias primas usadas y fabricación del cemento portland (Kosmatka, et al, 2004)	5
Tabla 2. Tipos de cementos (ASTM C 150)	12
Tabla 3. Clasificación del cemento por su tipo (NMX –C-414- ONNCCE, 2010) ...	14
Tabla 4. Clasificación por clase resistente (NMX –C-414- ONNCCE, 2010).....	14
Tabla 5. Nombres, composición y abreviaturas comunes de óxidos y componentes principales en el cemento portland (Monsalvo Vázquez & Girón García, 2008) ...	18
Tabla 6. Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)	19
Tabla 7. Requisitos de los componentes principales del cemento (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)	20
Tabla 8. Especificaciones físicas del cemento (NMX-C-414-ONNCCE)	20
Tabla 9. Especificaciones químicas complementarias para cementos portland (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)	21
Tabla 10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)	21
Tabla 11. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas en la elaboración de concreto (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)	32
Tabla 12. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (Instituto del Concreto, 1997).....	33
Tabla 13. Efectos que se ven por algunos factores de contaminación del agua de mezclado (NMX-C-003-ONNCCE, 2009).....	34
Tabla 14. Ejemplo de tabla de registro de los pesos de retenido después de cribar el material.....	61
Tabla 15. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation ASTM	62
Tabla 16. Parámetros permisibles que pasa la malla no. 200.....	67
Tabla 17. Parámetros de evaluación (Red Durar, Durabilidad de la armadura, 2000)	86



Tabla 18. Parámetros de evaluación en propagación de pulso ultrasónicos (Red Durar, Durabilidad de la armadura, 2000).....	87
Tabla 19. Tipos de permeabilidad (ASTM C1202)	100
Tabla 20. Resultados de análisis de prueba	110
Tabla 21. Resultado de densidad del cemento (Bautista León, 2015)	111
Tabla 22. Datos obtenidos de Consistencia normal (Bautista León, 2015)	111
Tabla 23. Valores de tiempos de fraguado (NMX-C-177-ONNCCE, 2005).....	112
Tabla 24. Resultados de la evaluación de la arena del banco “Joyitas” (Bautista León, 2015).....	112
Tabla 25. Análisis granulométrico de la arena del banco “Joyitas”	113
Tabla 26. Alcalinidad de morteros y temperatura.....	114
Tabla 27. Comparación de coeficientes de carbonatación.....	127
Tabla 28. Resultados de prueba de capilaridad de una probeta de MN 1:3	128
Tabla 29. Parámetros de porosidad de la probeta MN 1:3 (2/5)	130
Tabla 30. Resumen de resultados de porosidad.....	133
Tabla 31. Determinación de la calidad de los morteros	138
Tabla 32. Comparación de resistencias respecto a la Compresión	141



Dedicatorias

A Dios, por permitir que esto fuera posible, por enseñarme, guiarme y protegerme en los senderos de la vida, al creer en él, logré ver el horizonte.

A ti mamá: Modesta León Gómez, por ser siempre mi fortaleza, por no dejarme solo, por hacer conmigo un buen equipo cuando papá no estaba, por dar lo mejor de tí, por no permitir que me desviara del camino, por enseñarme a vivir con la nostalgia, para mí siempre estuvimos y estaremos juntos, hoy obtuvimos el logro del difícil trabajo que tuviste que hacer en mí, eres mi todo.

A ti papá: Juan Bautista Díaz, por entrenarme para el trabajo, para la vida, por enseñarme desde lo más difícil, por regañarme cuando veías que lo hacía mal, por dejarme volar desde temprana edad, sin tu esfuerzo, confianza y voluntad no hubiera podido lograrlo, mi conocimiento con tu experiencia lograremos más.

A ustedes abuelas y abuelos: que desde pequeño me acompañaron en los llantos de dolor, de tristeza, de soledad, ahora de alegría, por curarme cuando salía herido, por preocuparse por mí, por sus consejos y precauciones dadas cuando tenía que partir, esto que hoy se ha obtenido también les pertenece, es un honor ser descendiente de ustedes.

A mi familia: porque nunca me dejaron solo, por poner su confianza en mí, por creer que lo podía lograr, por enseñarme que la familia no necesariamente tiene que estar junta, sino unida, este logro es de todos ustedes también, es nuestro.



Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar hasta aquí, por iluminar mi camino, por darme fuerzas para seguir después de cada caída.

Gracias a mi mamá y papá, por sembrar sencillez, humildad en mí, por inculcarme sabiduría, cultura y conciencia para mi formación, por forjarme de la manera inigualable para llegar aquí. ¡”Me’, tat, colawalik”!

A mi hogar, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por aceptarme y permitirme formarme personal y profesionalmente, siempre orgulloso me sentiré de ser Nicolaita. A la Facultad de Ingeniería Civil, la cual pondré muy en alto su nombre en cualquier territorio que pise.

Al personal del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales, por las instalaciones, materiales y herramientas brindadas para la construcción de este proyecto.

A mi asesor, M. A. Ing. Wilfrido Martínez Molina, gracias por sus aportaciones, observaciones, aclaraciones de dudas y por su apoyo moral. A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, al Dr. Hugo Luis Chávez García y a la M.I. Cindy Lara Gómez, gracias por sus conocimientos, por su paciencia, por su apoyo incondicional.

A la maestra Arguello Hernández Sandra del Carmen, al maestro Bernabé Reyes Cipriano, quienes fueron los pilares en esta investigación, por acompañarme y ayudarme en los días y noches de la realización de las pruebas.

A mis compañeros, Blancas Herrera Victor Hugo, Villanueva Marcos Ariel, Pita Álvarez Job Daniel, Regalado López Fabián, Morales Osiel, Pineda Sixto, Cuellar Oscar, Arciga Giovanni, Viveros Ramos José Wilbert, Flores Ponce Amirais, Rodríguez Palominos Jesús Daniel, Colín Velázquez Luis, Guzmán Oropeza Antonio, Guiza Sánchez Mayra Alejandra, López Reyes Sóstenes Alberto, Balvanera Oscar Geovanny, De León Ambrocio Bersaín. A los maestros Mondragón Ornelas Marco Antonio, Díaz González Noel, Zamudio José de Jesús, Trujillo Calderón Isaías por su apoyo y disposición gracias, a Carmelita por las molestias que causábamos.



A Mis compañeros de la vida universitaria, que siempre me atendieron cuando requerí ayuda, Navarro Farfán María del Mar, Redonda León Gabriel, Blancas Herrera, Arciga Ramírez Luis Daniel, Sandoval M. Juan Carlos, Sánchez Rivera Imer, Morales Pedraza Julio César, Sóstenes López Reyes, y al grupo en general son lo mejor.

A mis profesores, que me transmitieron sus erudiciones, todo por el bien mío y mi futuro.

A todos, los que fueron parte de esta etapa de mi vida, mil gracias.



Resumen

Con la introducción de nuevos aditivos y materiales suplementarios (naturales o industriales) se han obtenido materiales altamente trabajables, con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad. El mucílago de nopal se ha empleado en el área de conservación principalmente en el centro y norte de la República. No obstante, en cada lugar se extrae, añade y usa de manera distinta. Las proporciones de agua y cladosios (penca) de nopal varían en cada caso, así también los agregados pétreos que se usan. La arena se obtuvo de un banco de material pétreo ubicado a 15 km de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, y fue sometida a pruebas que indicaron ausencia de materia orgánica y arcillas. Para la obtención de mucílago, el nopal se hirvió en agua en ebullición. La primera proporción fue de 1 kg de nopal por 2 L de agua, y se empleó en la mezcla o mortero MN 1:2, con 1 % de aditivo superplastificante. La segunda proporción fue de 1 kg de nopal por 3 L de agua y fue usada en el mortero o mezcla MN 1:3, con 0.3 % de aditivo; por último el mortero Control, fue un mortero convencional, que no contuvo ni aditivo. Se evaluaron los morteros por resistencia mecánica en las edades de 7, 28, 45, 90, 120, 150, 180 y 300 días; para las evaluaciones por durabilidad las pruebas se hicieron a 90 y a 180 días. A la edad de 7 días el mortero Control logró el 80 % de la resistencia a compresión respecto a los 28 días, sin embargo los morteros con mucílago de cactus opuntia blanco no alcanzaron el 75 %, esto es porque la hidratación del cemento no había progresado en su totalidad, sin embargo a la edad de 300 días el MN 1:3 alcanza una resistencia de 37 MPa. Cuando un material tiene buena densidad, indica que es un material resistente a los agentes patógenos, es impermeable para el ión cloruro o sulfato y es resistente ante la carbonatación. De acuerdo a las características anteriores se concluye que el mortero MN 1:3 presentó resultados favorables, clasificándolo como material de buena calidad. El mortero Control y el mortero MN 1:2 se clasifican dentro de calidad regular.

Palabras claves: mucílago, hidratación, morteros, resistencia y durabilidad.



Abstract

With the introduction of new additives and supplementary materials (natural or industrial) have been obtained highly workable materials, with better mechanical properties and durability. The mucilage of nopal has been used in the conservation area mainly in the Centre and North of the Republic. However, in each place removed, added and used in different ways. The proportions of water and cactus cladodes (cladode) vary in each case, thus also stony aggregates used. The sand was obtained from a stone material bank located 15 km from the city of Morelia, Michoacan, Mexico, and was subjected to tests indicating absence of organic material and clay. For the production of mucilage, prickly pear boiled in boiling water. The first proportion was 1 kg of nopal per 2 L of water, and was used in the mix or mortar MN 1:2 with 1% Superfluidifying additive. The second proportion was 1 kg of nopal per 3 L of water and was used in mortar or MN 1: 3 mixture, with 0.3% of additive; Finally the Mortar Control, was a conventional mortar, that did not contain nor additive. The mortars were evaluated by mechanical strength at the age of 7, 28, 45, 90, 120, 150, 180 and 300 days. For tests for durability tests were performed at 90 and 180 days. At the age of 7 days the Control mortar achieved 80% of the compressive strength compared to 28 days, however the mortars with white opuntia cactus did not reach 75%, this is because the hydration of the cement had not progressed in its entirety, however at the age of 300 days MN 1:3 reaches a strength of 37 MPa. When a material has a good density, it indicates that it is a material resistant to pathogens, it is impermeable to the chloride or sulfate ion and is resistant to carbonation. According to the above features, it is concluded that mortar 1:3 MN showed favourable results, classifying it as good quality material. The Control mortar and mortar MN 1:2 are classified within regular quality.

Keywords: mucilage, hydration, mortars, strength and durability.



Justificación

México es considerado como el centro de origen del nopal, la abundancia en nuestro país es realmente impresionante, de 2005-2010 se produce más 600 000 ton según el Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (SINAREFI).

El nopal está beneficiando a muchos sectores industriales, como el ámbito alimenticio y medicinal, por su fácil producción y almacenaje, pero principalmente por sus propiedades. En el sector de la construcción se ha utilizado en pinturas o anticorrosivos por sus propiedades aglutinantes.

La baba de nopal se ha empleado en morteros de cal que eleva su resistencia a la penetración del agua, y son empleados en la restauración de monumentos, los morteros de cemento con baba de nopal, perjudica en la restauración ya que es duro, con esa dureza el mortero base cemento con mucílago de nopal podría beneficiar en la restauración del elementos de concreto que están en contacto con agentes patógenos como el cloruro de sodio (NaCl), sulfato de sodio (Na_2SO_4) o el dióxido de carbono (CO_2); es más, podría elaborarse morteros u concretos con contenido de mucílago de nopal que optimizará recursos destinados para la restauración.

Se puede lograr esto ya el mucílago de nopal tiene la propiedad de retardar el fraguado, permite que el cemento se hidrate de manera adecuada y pueda formarse la red de la matriz interna del mortero u concreto. Obviamente se debe encontrar una proporción de mucílago que no afecten las propiedades de los agregados, para que mantenga resistencia y durabilidad.

Entonces al lograr que los nuevos morteros elaborados con mucílago, presenten respuestas favorables en el comportamiento físico-mecánico y de durabilidad beneficiará mucho a la industria de construcción de obra civil y también al sector agroindustrial.



Objetivos

General

Diseñar un mortero con contenido óptimo de mucílago de nopal como líquido de amasado en materiales base cemento portland, encontrar respuestas favorables de resistencia físico-mecánico y de durabilidad ya que son escasos los estudios de estos materiales orgánicos y que se podría aprovechar en el ámbito de la ingeniería de la construcción y beneficiar al sector agroindustrial.

Específicos

- Encontrar la proporción eficaz de mucílago de nopal que mejore el desempeño mecánico del mortero endurecido ante las distintas sollicitaciones a que estará sujeto.
- Determinar el porcentaje viable de mucílago de nopal para ser empleado posteriormente en la elaboración de concreto, sin demérito de sus propiedades.
- Analizar las propiedades del mortero con mucílago de nopal para verificar si es posible usarlo como material en la restauración.
- Con el uso de mucílago, diseñar un mortero que sea capaz de inhibir los agentes dañinos a las estructuras de concreto expuestos en ambientes severos.



1. INTRODUCCIÓN

En el mundo de la construcción existen morteros u concretos con propiedades muy diversas., debido a que están elaborados con diferentes materiales o que no solo están contruidos con cemento y agregados, sino que poseen adiciones o sustituciones y aditivos.

Las adiciones o sustituciones en proporción viable han sido componentes importantes e integrales de los conglomerantes, con la introducción de nuevos aditivos y materiales suplementarios (naturales o industriales) se han obtenido materiales altamente trabajables, con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad. En algunos países se utilizan subproductos industriales para la mejora de propiedades, como son la ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice. Sin embargo, en México algunas de estas adiciones minerales se importan y su alto costo reduce la competitividad del concreto o mortero. Es por esto que es necesario identificar aditivos alternativos de alta disponibilidad que contribuyan a mejorar las propiedades de los materiales base cemento en estado fresco y endurecido. (Ramírez Arellanes, Cano Barrita, Julián Caballero, & Gómez Yáñez, 2012).

En esta memoria se evaluaron morteros hechos a base de cemento portland, arena y mucílago de nopal como líquido de masado. El agregado fino empleado es procedente del banco de material “Calderón” de la comunidad de Joyitas, ubicada en el km 28 de la carretera Morelia-Quiroga, salida a San Bernabé y fue sometido a pruebas que indicaran que estaba libre de materia orgánica, que las partículas no estuvieran recubiertos por arcillas y que tuvieran cierta dureza. Se sometió en ebullición el nopal para obtener el mucílago. La primera proporción fue 1 kg de nopal por 2 L de agua, esta se empleó en la mezcla o mortero llamado **MN 1:2**, con 1 % de aditivo superplastificante; la otra fue 1 kg de nopal por 3 L de agua y fue usada en el mortero o mezcla **MN 1:3**, con 0.3 % de aditivo; por último se tuvo al mortero **Control**, fue un mortero convencional, que no contuvo ni aditivo ni sustitución, simplemente conformada por agua, cemento y arena.



En el estado fresco de los morteros, se determinaron su consistencia y fluidez, ya que esto ayudó en la trabajabilidad.

Las evaluaciones fueron por resistencias mecánica y se hicieron en diferentes edades, 7, 28, 45, 90 días (edades tempranas) y 120, 150, 180, 300 días (edades tardías); para las evaluaciones por durabilidad se hicieron a 90 días (edad temprana) y a 180 días (edad tardía).

Se analizaron y se discutieron los resultados, determinando cuál de los tres morteros presentaron mejores propiedades mecánicas y de durabilidad, se hicieron correlaciones de algunas propiedades, para ver más a detalle las características.

Finalmente se eligió el mortero que podrá ser aplicado en la industria de la construcción, que obtuvo alta resistencia, mínima cantidad de porosidad y resistente ante agentes patógenos.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento portland

El cemento Portland es un alúmino silicato de calcio (Fig. 1), patentado por J. Aspdin en 1824, y denominado portland por su semejanza a una piedra que abunda en una localidad en Inglaterra. Se obtiene por calentamiento incipiente (aproximadamente 1300 °C) de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3 m de diámetro y 100 m de largo. El material obtenido denominado “clinker” se muele finamente adicionándole de un 2% a 3% de yeso para evitar que fragüe instantáneamente (Universidad Nacional del Nordeste [UNN], s.f.). La cuantía de estos componentes depende de multitud de factores relativos a las materias primas, en la dosificación del crudo, a los procesos de cocción y enfriamiento del clinker, y al ensilado y aireación del cemento (Calleja & Del Olmo, 1971).



Figura 1. Cemento Portland, compuesto por silicatos hidráulicos (Kosmatka, et al, 2004, pág. 25)



La historia de los conglomerantes y cementos en la construcción se remonta a los tiempos del antiguo Egipto, seguido por griegos y romanos. En general, todos los materiales entonces empleados eran productos naturales que, en algún caso, se sometían a tratamientos térmicos. La palabra cemento, se aplica a todo tipo de producto o mezcla que presenta propiedades adhesivas y entendemos por conglomerante un compuesto de una o varias sustancias capaces de endurecer al reaccionar con otros productos (agua en el caso de los cementos portland), a corto o largo plazo. El nombre cemento como material de construcción tiene su origen en los romanos, que llamaron *opus caementum* a una obra de mampostería de piedra y un conglomerante de cal viva. Más tarde, se nombró como *cementum*, *cimentum*, *caement* y *cement* a los conglomerantes hidráulicos que se obtenían al mezclar adiciones tales como ladrillos cerámicos triturados o toba volcánica con la cal viva. Con el «cemento romano» se construyeron obras importantes, entre las que destaca el Foro romano y el Panteón de Roma (año 27 a.c.). En aquella época, se utilizaron en la construcción mezclas de cal, agua, piedras, arena y ladrillos; un material similar al concreto (Sanjuán & Chinchón, 2014).

Las construcciones del imperio romano han sobrevivido hasta ésta época, con su material cementante aún duro, resistente y firme. A pesar de que en la Edad Media hubo una disminución general en la calidad y el uso del cemento.

Actualmente, en el sentido más amplio la palabra cemento indica cualquier clase de adhesivo, en construcción y en ingeniería civil, es una sustancia que puede emplearse para unir arena y roca triturada, u otros tipos de áridos y formar una masa sólida, cuyas principales propiedades presentan una mayor dureza y resistencia mecánica que los agregados que le dieron origen, de esta manera se originan materiales como el concreto, los morteros y diferentes clases de productos. Un cemento es un compuesto químico único, cuyas materias primas principales son minerales arcillosos, calcáreos y yeso (Vázquez & Girón, 2008).

2.1.1. Fabricación del cemento portland

El cemento portland se obtiene por la pulverización del clinker el cual contiene silicatos de calcio. Los materiales usados en la producción del cemento portland



deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación se hacen pruebas frecuentes para garantizar calidad alta.

Las materias primas (Tabla 1) se transportan de la cantera (Fig. 2), se trituran, se muelen y se dosifican de modo que la harina (carbonato de calcio) obtenida tenga la composición esperada, tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos; en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada.

Tabla 1. Fuentes de las materias primas usadas y fabricación del cemento portland (Kosmatka, et al, 2004)

Cal (CaO)	Hierro (Fe ₂ O ₃)	Sílice (SiO ₂)	Alúmina (Al ₂ O ₃)	Yeso o Sulfato (CaSO ₄ ·2H ₂ O)
Desechos industriales	Polvo de humo del horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno del cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Levaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	
Esquisto		Arenisca	Escoria de cobre	
Escoria		Esquisto*	Estaurolita	
		Escoria Basalto		

Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento portland. * Las fuentes más comunes



Figura 2. Caliza, una de las principales materias primas (Kosmatka, et al, 2004, pág.29)

Al terminar el mezclado, se coloca la materia prima en la parte superior del horno giratorio (Fig. 3), este podía ser de varias formas: enteramente cilíndricos, cónicos (rectos o inversos), elipsoidales, esféricos en la parte inferior y piramidales o cónicos

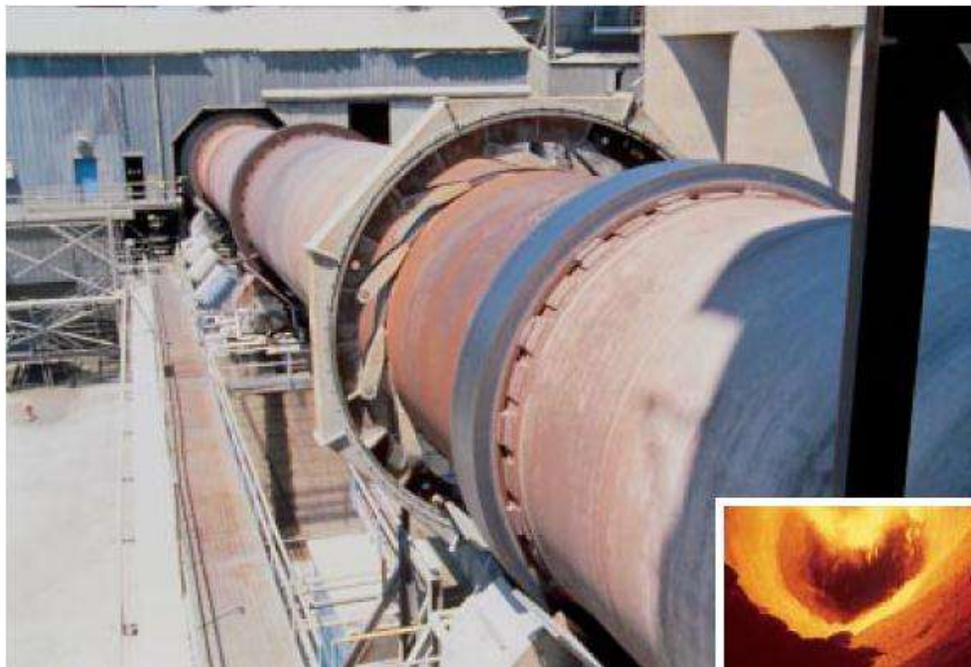


Figura 3. Horno rotatorio donde se obtiene el clinker. La imagen inferior derecha muestra la vista interior del horno. (Kosmatka, et al, 2004, pág.30)

en la parte superior, (Burgos Núñez, Olmo García , & Sáez Pérez, 2014).

La harina pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y velocidad de rotación del horno. Se aumenta el combustible en la parte inferior del horno para aumentar la temperatura de 1400°C a 1550°C y así convertir la materia prima cruda en clinker, compuesta por Silicato tricálcico, Silicato bicálcico,



Aluminato tricálcico y Ferrito aluminato tetra cálcico (ARQHYS, 2012), son como esferas de color gris del tamaño predominante de las canicas (Fig. 4). Después se enfría el clinker y se pulveriza, se le adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado, (Kosmatka, Kerkhoff, Panarase, & Tanesi, 2004).



Figura 4. El clinker, se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice. Específicamente este tiene un diámetro de 20 mm (3/4 pulg). (Kosmatka, et al, 2004, pág.30)



Figura 5. Yeso, se muele con el clinker para formar el cemento portland. El yeso controla el tiempo de fraguado, las propiedades de contracción por secado y el aumento de la resistencia. (Kosmatka, et al, 2004, pág.30)

Enseguida se describe la producción tradicional del cemento portland mediante el método tradicional (Fig. 6). Primeramente se reduce las rocas hasta 20 mm (3/4 pulg) para entonces almacenarla. Se muelen hasta hacerlas polvo, posteriormente se mezclan con agua para formar una lechada, se calcinan para obtener el clinker, finalmente se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland. En la producción moderna por el proceso seco (Fig. 7), la calcinación se hace por varias etapas con varios hornos. Las materias primas a 700 °C son polvo de flujo libre, entre 700-900 °C aún fluye libremente el polvo, entre 1150-1200 °C



las partículas empiezan a unirse, entre 1200-1350 °C comienza la cocción de los aglomerantes, entre 1350-1450 °C el material sigue aglomerándose hasta que se encima uno por encima del otro (Fig. 8), finalmente se hace el enfriamiento.



“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND, CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”

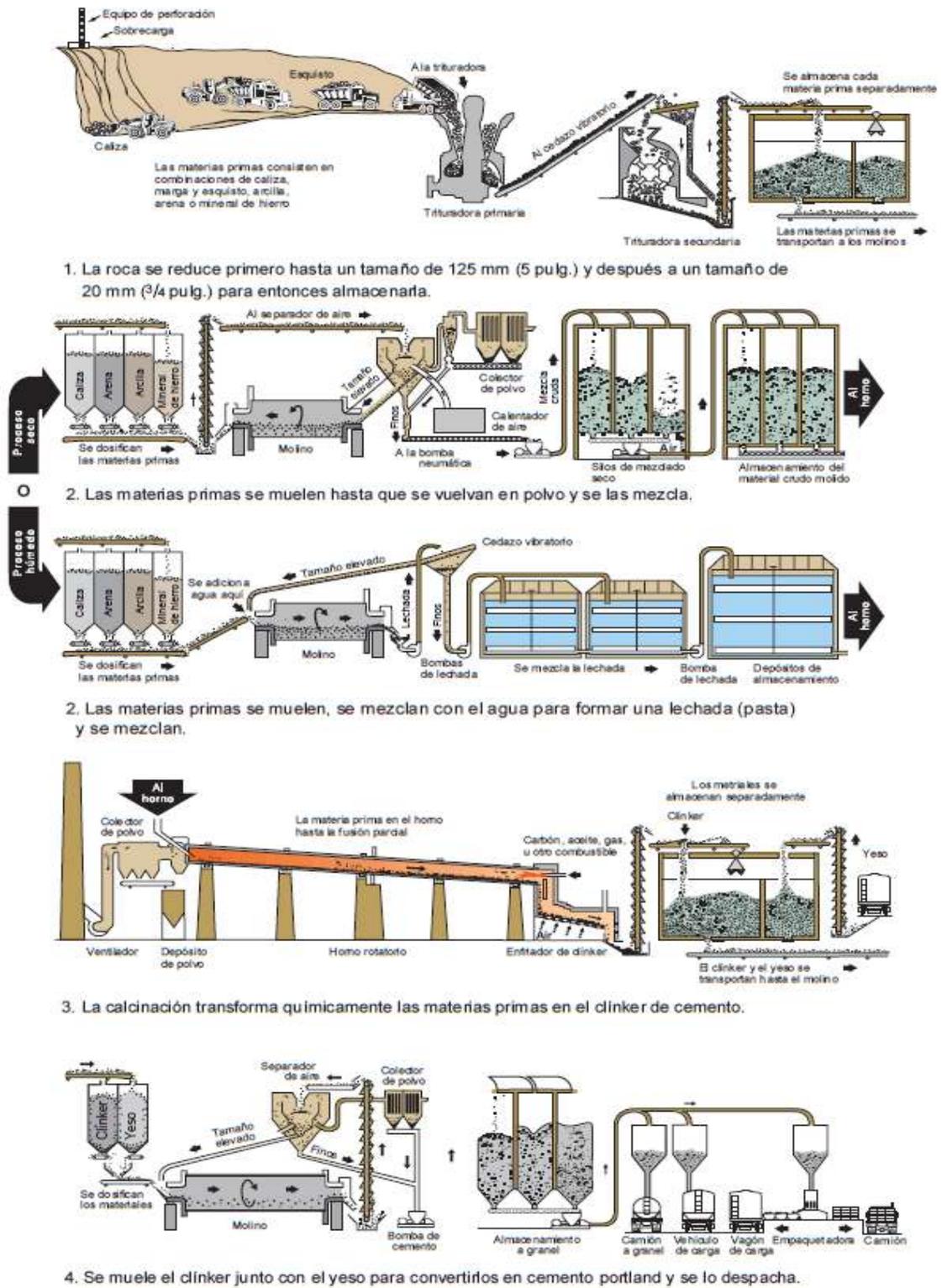


Figura 6. Etapas en la producción tradicional del cemento portland (Kosmatka, et al, 2004 pág.26)



“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND, CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”

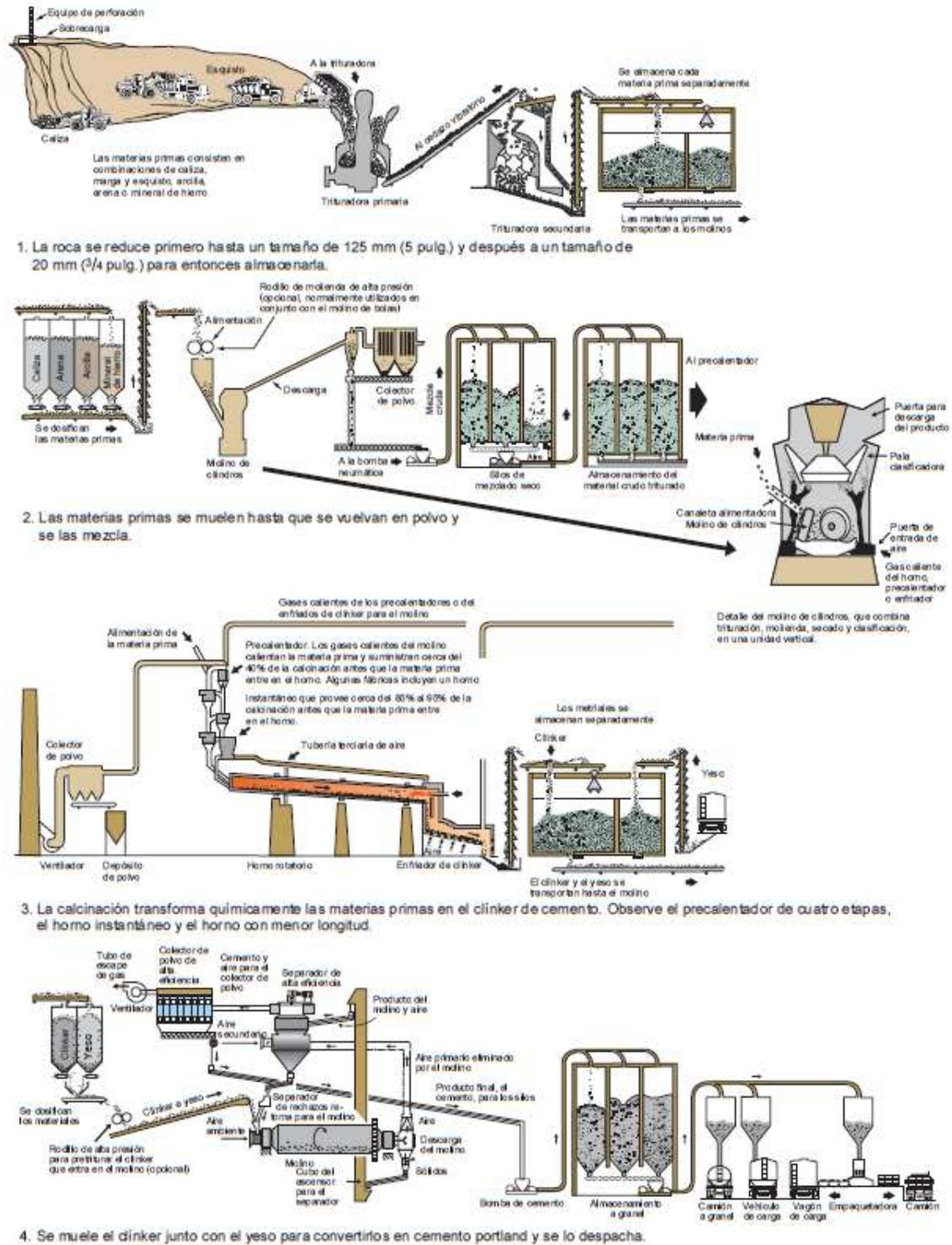


Figura 7. Etapas en la producción moderna del cemento portland, del proceso seco. (Kosmatka, et al, 2004, .pág.27)



“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND, CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”



Sección	Vista del horno	Proceso de nodulización	Reacción de clinkerización
A 700°C Las materias primas son un polvo de flujo libre		Las partículas son sólidas. No hay reacción entre las partículas. 	Hay pérdida de agua. La arcilla deshidratada se recristaliza. ● Partícula de arcilla ● Partícula de caliza
700-900°C El polvo aun fluye libremente		Las partículas aun son sólidas. 	A medida que la calcinación continua, la cal libre aumenta. La sílice reactiva combina con el CaO para empezar a formar C ₂ S. La calcinación mantiene la temperatura de alimentación en 850°C.
1150-1200°C Las partículas empiezan a ser "pegajosas"		Las reacciones empiezan entre las partículas sólidas. 	Cuando la calcinación termina, la temperatura se eleva rápidamente. Los cristales pequeños de belita se forman por la combinación de silicatos con CaO.
1200-1350°C Las partículas comienzan a aglomerarse, ellas se mantienen juntas por el líquido. La rotación del horno empiezan la cocción de los aglomerantes		Las fuerzas capilares del liquido mantienen las partículas juntas. 	La fase liquida se forma cuando la temperatura excede 1250°C. El liquido permite la reacción entre la belita y el CaO libre, formando alita.
1350-1450°C La aglomeración de las partículas continua a medida que el material cae encima uno del otro		Si hay liquido suficiente, se forman nódulos La insuficiencia de liquido producirá un clinker polvoriento. 	La cantidad de cristales de belita disminuye y su tamaño aumenta. El tamaño y la cantidad de alita aumentan.
Enfriamiento		Los nódulos de clinker no cambian durante el enfriamiento 	Bajo el enfriamiento, el C ₃ A y el C ₄ AF se cristalizan en la fase liquida. La estructura lamilar aparece en los cristales de belita.

Figura 8. Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final (Kosmatka, et al, 2004, pág.31



2.1.2. Tipos de cemento portland

Existen muchos tipos de cemento, para diferentes aplicaciones, con propiedades y características específicas. Los cementos portland se producen de acuerdo con las especificaciones ASTM C 150, AASHTO M 85 o ASTM C 1157 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarase, & Tanesi, 2004, pág. 30). La ASTM C 150, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland (Standard Specification for Portland Cement), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos, como sigue:

Tabla 2. Tipos de cementos (ASTM C 150)

Cemento	Característica
Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

Tipo I. Es el cemento convencional, usado en casi todas las edificaciones, construcciones de puentes, carreteras, tanques, presas, mampuestos, elementos de concreto prefabricado y precolado, es un cemento donde no se requiere propiedades especiales.

Tipo II. Se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos. Se puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa. El cemento tipo II tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos porque contiene no más del 8 % de aluminato tricálcico (C_3A). Los sulfatos en suelos húmedos o en agua penetran en el concreto y reaccionan con el C_3A hidratado, ocasionando expansión, descascaramiento y agrietamiento del concreto. Para controlar el ataque del concreto por los sulfatos, se debe emplear el cemento tipo II acompañado del uso de baja relación agua-material cementante y baja permeabilidad. La Figura 9 ilustra la mejoría de la resistencia a los sulfatos del cemento tipo II en comparación al cemento tipo I.



Los cementos tipo II, especialmente producidos para satisfacer a los requisitos de moderado calor de hidratación, una opción de la ASTM C 150 (AASHTO M 85), van a generar una tasa de liberación de calor más lenta que el cemento tipo I y la mayoría de los cementos tipo II. El comprador tiene la opción de especificar Tipo III. Ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente similar al cemento tipo I, a excepción

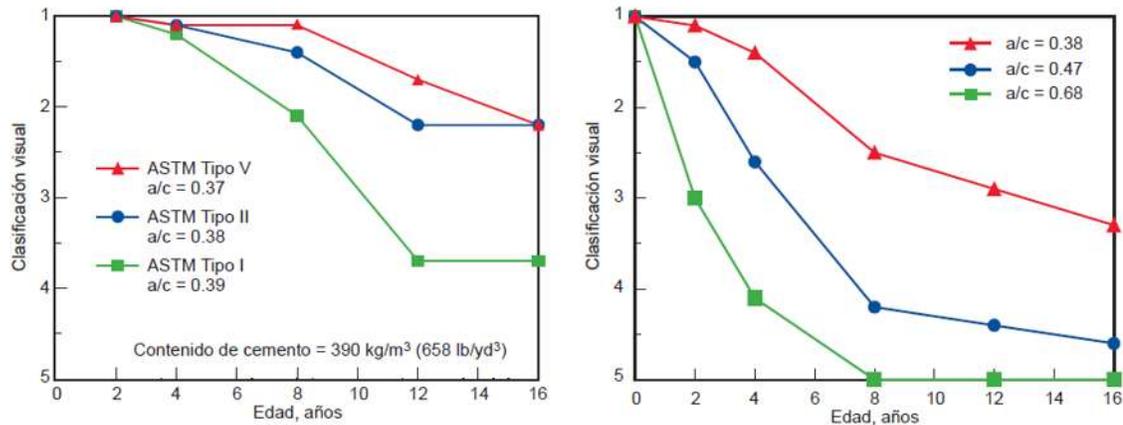


Figura 9. (Izquierda) Desempeño en suelos con sulfatos de concretos preparados con diferentes tipos de cemento. Los cementos tipos II y V tienen menor contenido de C_3A , lo que mejora la resistencia a los sulfatos. (Derecha) La mejoría de la resistencia a los sulfatos resultante de la baja relación agua-materiales cementantes, como lo demuestran las vigas de concreto expuestas a suelos con sulfatos en un ambiente de mojado y seco. (Kosmatka, et al, 2004, Pag.32.)

de que sus partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover las cimbras (encofrados) lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío, su empleo permite una reducción en el tiempo de curado.

Tipo IV. Este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se puede usar el cemento tipo IV en estructuras de concreto masivo, tales como grandes presas por gravedad, donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada. El cemento tipo IV raramente está disponible en el mercado.

Tipo V. Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos, principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos. Su desarrollo de resistencia es más lento que en el cemento tipo I. La alta resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de



aluminato tricálcico, no excediendo a 5 %. El uso de baja relación agua-materiales cementantes y baja permeabilidad son fundamentales para el buen desempeño de cualquier estructura expuesta a los sulfatos. Incluso el concreto con cemento tipo V no puede soportar una exposición severa a los sulfatos si tiene alta relación agua-materiales cementantes.

En México, los cementos se especifican de acuerdo a la normativa (NMX-C-414-ONNCCE, 2010), Tabla 3, clasificándolos en seis tipos básicos:

Tabla 3. Clasificación del cemento por su tipo (NMX –C-414- ONNCCE, 2010)

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Ordinario
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Los cementos se dividen en clases de resistencia: 20, 30, 40, las cuales indican las resistencias a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa (200 kg/cm², 300 kg/cm² y 400 kg/cm²) respectivamente. Existen dos clases más de resistencia: 30R y 40R, éstas no solo presentan resistencia mínima a los 28 días sino a los tres días deben presentar resistencia a la compresión (NMX-C-414-ONNCCE, 2010), Tabla 4. En la norma menciona resistencias máximas a los 28 días, para las clases 20, 30 y 30R.

Tabla 4. Clasificación por clase resistente (NMX –C-414- ONNCCE, 2010)

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

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, tales como RS – resistente a sulfatos; BRA – baja reactividad álcali-agregado; BCH – bajo calor de hidratación; B – blanco.



Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial. Ejemplo: Cemento Portland Compuesto de clase resistente 30R, resistente a sulfatos, se designaría CPC 30R RS.

2.1.3. Propiedades del cemento portland

Es importante conocer las propiedades del cemento, así se hará un mejor usufructo del mismo, emplearlo de acuerdo a su comportamiento físico-químico y mecánico con los agregados. Durante la fabricación se monitorean las siguientes propiedades:

2.1.3.1. Propiedades físicas

De las cualidades más importantes del cemento se tiene: Tamaño de las partículas y finura, densidad, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión.

- *Tamaño de las partículas y finura.* La composición del cemento portland consiste de partículas angulares individuales de una variedad de tamaños debido a la pulverización en el molino. Generalmente los tamaños de las partículas del cemento son menores de 45 micrómetros. El tamaño promedio es de 15 micrómetros. La distribución total del tamaño de las partículas del cemento se llama “finura” (Fig.10).

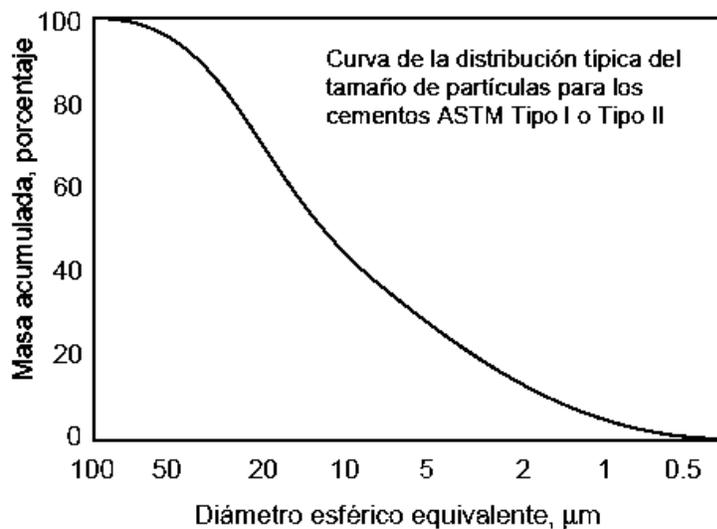


Figura 10. Distribución del tamaño de las partículas del cemento portland (Kosmatka, et al, 2004, pág. 57)



La finura está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Cuando el cemento portland tiene un alto contenido de finura, el cemento adquiere su resistencia de manera rápida (Kosmatka, Kerkhoff, Panarase, & Tanesi, 2004).

- *Densidad.* Es la relación que existe entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de su masa, en un cemento portland normal suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 ; para el caso de los cementos adicionados es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es menor, dando valores cercanos a 2.9 g/cm^3 . La densidad es un parámetro que ayuda a determinar si el cemento contiene adiciones (NMX-C-057-ONNCCE, 2010).
- *Consistencia normal.* Es la propiedad que indica la habilidad de fluir de la mezcla de mortero (Fig. 11). Los cementos requieren más agua cuando contienen adiciones, mientras que en los cementos normales no necesitan. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y tiene una variación entre 23 % y 33 % (NMX-C-057-ONNCCE, 2010) (ASTM-C-191, 2013).



Figura 11. Ensayo de consistencia normal para pastas usando la aguja de Vicat (Bautista León, 2015)



- *Tiempos de fraguado.* Primero se toma el tiempo que pasa desde que se agrega agua a la mezcla hasta que deja de ser plástica, llamado fraguado inicial; el tiempo que se requiere para que la pasta de cemento adquiera dureza se llama fraguado final.



Figura 12. Determinación de fraguado inicial y final (Bautista León, 2015)

Existen dos tipos más de fraguado: El fraguado rápido o relámpago, consiste en que la pasta adquiere un endurecimiento de manera rápida, se caracteriza este tipo por su incremento de calor con mucha velocidad. El fraguado falso, es cuando la pasta adquiere una rigidez prematura después de mezclar el cemento y el agua.

- *Expansión.* Para que un cemento sea estable, se necesita que sus componentes no sufran ninguna expansión. La normatividad limita la expansión mediante un ensayo llamado “autoclave”, que 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 (NMX-C-062-ONNCCE, 2010) (ASTM-C-151, 2015).



2.1.3.2. *Propiedades químicas*

En el proceso de reacción endotérmica (clinkerización) del cemento, las materias primas se convierten en materiales con propiedades especiales “clínker”, está constituido por cuatro compuestos básicos, estos constituyen un 95% del peso total del clínker, siendo el 5% componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros, Tabla 5.

Tabla 5. Nombres, composición y abreviaturas comunes de óxidos y componentes principales en el cemento portland (Monsalvo Vázquez & Girón García, 2008)

Nombre*	Composición	Abreviatura
Óxido de Calcio	CaO	C
Sílice	SiO ₂	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	A
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	F
Agua	H ₂ O	H
Anhídrido sulfúrico	SO ₃	S
Óxido de magnesio	MgO	M
Óxido de sodio	Na ₂ O	N
Óxido de potasio	K ₂ O	K
Silicato tricálcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO SiO ₃	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4 CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₃ AF

*Las fórmulas empleadas en la química del cemento son expresadas como suma de los óxidos presentes, de tal manera que L = Li₂O, P = P₂O₅, T = Ti₂O, F = FeO.

2.1.3.3. *Propiedades mecánicas*

Para poder estudiar las propiedades mecánicas se elaboran probetas con dimensiones especificadas en la normatividad; los especímenes deben estar curados de acuerdo con la prescripción de la norma. Las pruebas realizadas son: resistencia a la compresión simple, flexión, tensión y tensión indirecta, la primera de ellas es la más importante porque influye mucho la composición de los compuestos y la finura del cemento.



- *Compresión simple.* La resistencia a compresión es aquella obtenida por la aplicación de carga a especímenes cúbicos de mortero (relación 1:2.75 cemento-arena) de 5.08 cm de arista de acuerdo con las normas (NMX-061-C-ONNCCE, 2015) (ASTM-109, 2016).
- Flexión. Se obtiene mediante pruebas en probetas de mortero de forma prismática de 4cm x 4cm x 16cm, de igual relación cemento-arena que los cubos en compresión.
- Tensión. Para esto se construyen probetas en forma de cacahuete, de 2.5 cm de espesor, 2.1 cm de ancho y 7.1 cm de largo (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano , 2011)
- *Tensión indirecta.* Determina la resistencia a la tensión por compresión diametral en especímenes cilíndricos de mortero, referenciados a partir de las normas empleadas para concreto (NMX-C-163-ONNCCE, 2005) (ASTM-C-496, 2011).

2.1.4. Especificaciones

El cemento, así como los agregados, debe cumplir con los parámetros que marca la normatividad en lo que refiere a los componentes (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios ¹
		Principales					
		Clinker Portland + Yeso	Escoria Granulada de Alto Horno	Materiales Puzolánicos ²	Humo de Sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50 - 94	-	6 - 50	-	-	0 - 5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40 - 94	6 - 60	-	-	-	0 - 5
CPC	Cemento Portland Compuesto ³	50 - 94	6 - 35	6 - 35	1 - 10	6 - 35	0 - 5



**“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND,
CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”**



CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90 - 99	-	-	1 - 10	-	0 - 5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20 - 39	61 - 80	-	-	-	0 - 5

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

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

³ El Cemento Portland Compuesto debe de llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que esta puede ser forma individual o en conjunto con Clinker + Yeso.

Tabla 7. Requisitos de los componentes principales del cemento (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

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 a 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 se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones físicas del cemento (NMX-C-414-ONNCCE)

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 cementos y de todas las clases resistentes, debe cumplir con lo que marca la Tabla 9. Son algunas propiedades químicas de complementación.



Tabla 9. Especificaciones químicas complementarias para cementos portland (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

Propiedades	Tipos de cemento	Especificación (% en masa)
Pérdida por ignición	CPO, CEG	5 (máx)
Residuo insoluble	CPO, CEG	5 (máx)
Sulfato (SO ₄)	Todos	4 (máx)

Cuando se requiere que el cemento tenga propiedades peculiares, por ejemplo, bajo calor de hidratación o que sea resistente a sulfatos debe cumplir con lo que marca la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2010)

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por reacción álcali agregado (máx. %)			Calor de hidratación (máx) KJ/Kg (Kcal/Kg)		Blancura (min. %)
			1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistente a los Sulfatos	0.1	-	-	-	-	-	
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	-	0.02	0.06	-	-	-	
BCH	Bajo Calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-	
B	Blanco	-	-	-	-	-	70	

2.1.5. Cemento empleado en la investigación

En el presente proyecto de investigación se emplea un cemento CPC-30R-RS de Tolteca®, desglosando la nomenclatura, se trata de un Cemento Portland Compuesto (CPC), de clase 30 con resistencia especificada a 3 días de 30 MPa (30R), es Resistente a los Sulfatos (RS) como propiedad especial (NMX-C-414-ONNCCE, 2010).

Un cemento portland resistente a los sulfatos es aquel que presenta un bajo contenido de aluminato tricálcico (C₃A), por un lado, la norma inglesa (BS-4027, 1996) para este cemento, establece un contenido del 3.5 % de C₃A, los demás



aspectos del cemento resistente a los sulfatos deben de cumplir con la (BS-12, 1996), que rige los parámetros para cemento portland normal; por otro lado, en los EE.UU el cemento resistente a los sulfatos es conocido como “Tipo V” y está incluido en la norma, limita el contenido de C_3A a un 5% y restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) a más del doble del contenido de C_3A al 20%, y por último, el contenido del óxido de magnesio se limita a un 6% (ASTM-C-150-02, 2016).

Este cemento ofrece una alta resistencia a la acción de los sulfatos y se usa exclusivamente en obras de concreto armado en las que se requiere un endurecimiento más rápido de lo normal, (Moctezuma, 2016). En el caso del CPC-30R-RS se genera de manera moderada el calor de hidratación, ya que el C_3S y C_3A , que son los principales responsables de producir un alto calor de hidratación, disminuyen sus proporciones de manera notable.

2.2. Material pétreo

Son materiales que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla de un concreto o un mortero, que proporciona diferentes calidades y características, de las más importantes pueden ser, la resistencia y la durabilidad (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003). La necesidad de contar con un concreto o mortero de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos, especialmente de los agregados. Sin embargo, uno de los problemas que generalmente encuentran los ingenieros y los constructores al emplear el concreto o mortero, es la poca verificación de las características de los agregados pétreos que utilizan, lo que propicia con cierta frecuencia resultados diferentes a los esperados.



Se estima que los agregados (arena y finos) ocupan de 60 a 80% del volumen del mortero, lo que le impacta al mortero en diversas características de manera considerable. El alcance de los estudios que requieren los agregados es amplio, para poder comprender la variabilidad de sus efectos e influencia en las propiedades del mortero, por lo que no debemos de subestimarlos (Instituto del Concreto, 1997).

2.2.1. Origen del material pétreo

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 (Alvarado Alcaraz, 2010). Las rocas ígneas (del latín ignius, “fuego”) se originan a partir de un líquido compuesto principalmente por roca fundida, gases disueltos y cristales en suspensión, al que llamamos magma. Los magmas, a su vez, provienen de zonas profundas de la Tierra, donde las rocas calientes, pero sólidas del manto terrestre pueden derretirse parcialmente. El magma se abre camino hacia arriba, dado que es más liviano que las rocas que lo rodean, y es muy rico en elementos pesados, que abundan en las capas más internas de la Tierra. Así, a medida que asciende por la corteza, se va enfriando dando origen a cristales, los que al ser más pesados que la parte líquida, se depositan al fondo. De esta forma, el líquido restante se hace cada vez más liviano y puede seguir subiendo.

Debido a este proceso, la composición del magma cambia y se pueden ir generando diferentes minerales, dependiendo de la temperatura y de la profundidad a la que este se encuentre. Las rocas ígneas poseen componentes más pesados y suelen ser de color oscuro, mientras que aquellas que poseen minerales más livianos, como el cuarzo, suelen ser claras.

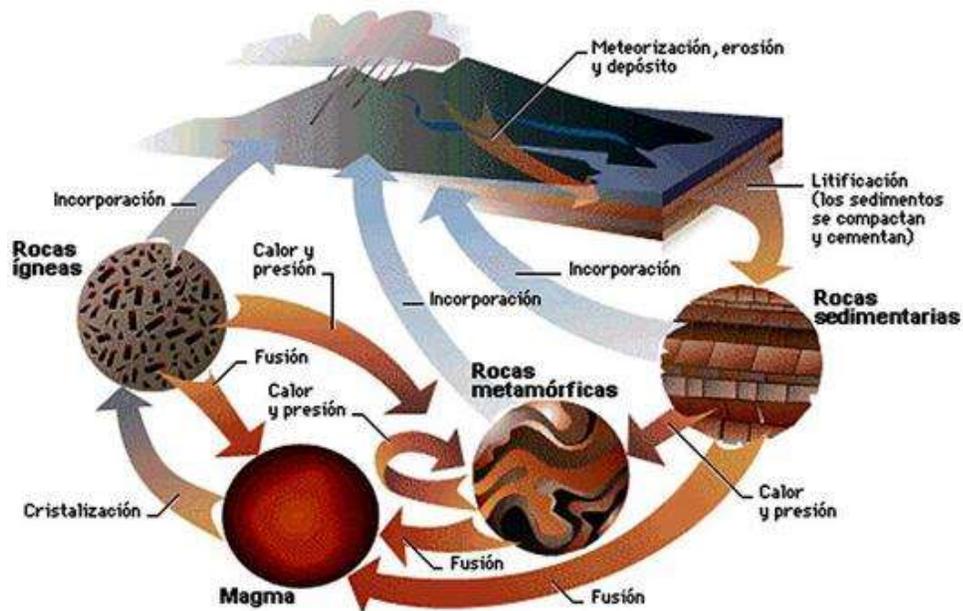


Figura 13. Representación del ciclo de las rocas (Departamento de Geología, Universidad de Chile; “Las rocas y sus procesos de formación”)

Otro tipo de roca lo constituyen **las rocas sedimentarias**. Estas están constituidas por fragmentos de cualquier otra roca que se encuentre en la superficie terrestre, ya sea ígnea, sedimentaria o metamórfica, y que por efecto del agua, el viento o el hielo, entre otros factores, ha sido partida, molida, desintegrada o disuelta, para ser luego transportada por estos agentes.

Por último, existen **las rocas metamórficas** (del griego meta, “cambio”, y morph, “forma”), las cuales se forman cuando una roca de cualquier tipo es sometida a altas presiones y/o temperaturas. Las rocas metamórficas son las más complejas de todas, ya que cualquier roca puede ser sometida a este proceso, por ende sus procesos de generación pueden ser muy variados. Estas pueden formarse cuando las rocas se entierran bajo la superficie, sufriendo gran presión debido al peso de las rocas sobre ellas, y temperaturas más calientes a medida que se ubican a mayor profundidad; pueden originarse cuando un magma que llega caliente la roca, o incluso debido al impacto de un meteorito. De todos modos, algo que todas tienen en común es que sus componentes cambian. Se generan nuevos minerales y los que existían pueden desaparecer o recrystalizarse, es decir, cambiar de forma, de tamaño, de orientación o de posición, dependiendo de las condiciones a las que se



someta la roca y de cómo era esta originalmente. Incluso, cuando el metamorfismo alcanza niveles muy altos, la roca puede ser fundida y dar origen a magma, volviendo a comenzar el ciclo (Villalobos Onchard, 2016).

La generación de gravas, arenas, limos o arcillas se forman por la desintegración mecánica y descomposición química de las rocas. Los suelos deben su origen a una gran variedad de causas, lo cual es difícil dar una explicación de manera detallada, que el innumerable tipo de suelos es el resultado de esta gran variedad de causas (Villanueva Guzmán, 2016).

2.2.2. Propiedades del material pétreo

2.2.2.1. Propiedades físicas

Granulometría. La granulometría o gradación se refiere al tamaño de las partículas y al porcentaje o distribución de las mismas en una masa de agregado. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en hacer pasar una determinada cantidad del agregado a través de una serie de tamices normalizados, dispuestos de mayor a menor, se expresa como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra (en estado seco) (ASTM-C-136, 2014).

Porosidad y Absorción. La porosidad del agregado es una cualidad muy importante, directamente relacionada con la adherencia y resistencia a la compresión y flexión de las partículas, así como a su comportamiento frente a problemas de congelamiento, deshielo e intemperismo.

La porosidad está asociada a la capacidad de absorción de agua u otro líquido que tienen los agregados, capacidad que depende del número y tamaño de los poros y de la continuidad de los mismos. Según su contenido de humedad, las partículas que conforman un agregado pueden estar en los siguientes estados que muestra la Figura 14.

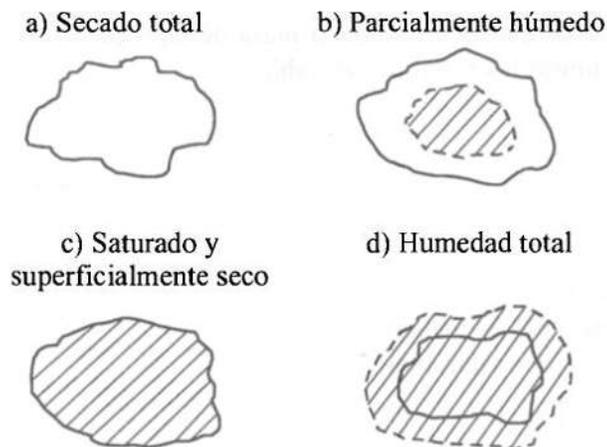


Figura 14. Diferentes estados de saturación del agregado (El concreto y otros materiales para la construcción, Gutiérrez de López, UNC, sede Manizales)

Masa unitaria o peso unitario. Se define como la relación entre el peso de una muestra de agregado compuesta de varias partículas y el volumen que ocupan estas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido. Es decir, el material dentro del recipiente sufre un acomodo de las partículas dejando el menor espacio entre ellas; el mayor peso unitario se tendrá cuando una mayor cantidad de material ocupe el mismo volumen, lo que depende naturalmente de la granulometría, tamaño, forma y textura del agregado.

Forma. La forma de las partículas se indica con dos términos, aduciendo a su redondez y a su esfericidad. Por ejemplo cúbica redondeada o cúbica angular. En general las gravas de río, glaciares, y conglomerados, así como las arenas de playa o desierto son materiales redondeados, y pueden ser esféricos (cantos rodados) y laminares. En cambio los agregados obtenidos por trituración y los provenientes de suelos residuales son angulares y su forma depende de la naturaleza de la roca y del equipo de trituración; así serán cúbicos, tetraédricos, laminares y alargados.

Textura. Esta propiedad del agregado se deriva indirectamente de la roca madre y es responsable de la adherencia del agregado y de la fluidez de las mezclas de concreto. Según la textura superficial podemos decir que el agregado es liso o pulido (material de río) o áspero (material triturado). Esta textura está relacionada con la dureza, forma, tamaño y estructura de la roca original.



Expansión o Abultamiento. Conocida también como hinchamiento de la arena, consiste en un aumento de volumen, para un determinado peso de arena por la presión del agua entre las partículas de arena cuando ésta se encuentra con agua libre. Si el agua libre aumenta de un 5 a un 8%, el abultamiento puede llegar hasta un 20 ó 30%. La expansión puede ser máximo de un 40% para arenas finas y hasta un 20% para arenas gruesas. Cuando se aumenta el contenido de agua libre la expansión disminuye y si la arena está inundada no existe hinchamiento. Conviene tener esto en cuenta en el transporte y almacenamiento de la arena (Gutiérrez de López, 2003).

2.2.2.2. Propiedades químicas

Las exigencias químicas que se deben solicitar a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto, son las de evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos, entre los cuales el más frecuente parece ser la sílice activa (Instituto del Concreto, 1997).

Reacción álcali-agregado. Algunos agregados reaccionan con los álcalis del cemento especialmente los agregados silicios y los agregados carbonatados. Los primeros cuando poseen óxidos de silicio en sus formas inestables reaccionan con los hidróxidos alcalinos del cemento, produciéndose un gel que aumenta de volumen a medida que absorbe agua con lo que origina presiones internas en el concreto con la consiguiente expansión, agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento. Esta reacción se conoce como Álcali-sílice.

Los segundos producen una reacción similar llamada Álcali-carbonato pero es menos frecuente que la Álcali-sílice.

Epitaxia. Es la única reacción favorable que se encarga de mejorar la adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta del cemento, a medida que transcurre el tiempo (Gutiérrez de López, 2003).

2.2.2.3. Propiedades mecánicas

Dureza. Depende de la constitución mineralógica, estructura y origen del agregado. En presencia de un nivel elevado de desgaste por roce o abrasión (revestimientos



en contacto con agua) la dureza del agregado es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.

Resistencia. Ésta propiedad es la más importante ya que se busca que el cemento endurecido falle antes que el agregado pétreo. Cuando se incrementa la adherencia por la forma o textura superficial del agregado, al buscar una alta resistencia de la pasta, de igual manera se ve afectado el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes.

Tenacidad. La tenacidad o resistencia a la falla por impacto es una propiedad que depende de la roca de procedencia y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si éstos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del mortero o concreto que con ellos se elabore.

Adherencia. Se conoce con el nombre de adherencia la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecido y los agregados, mayor será la resistencia. La adherencia depende en gran medida de la calidad de la pasta de cemento y, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, principalmente cuando se trata de resistencia a flexión. Actualmente, no se conoce ningún método que permita medir la mala o buena adherencia de los agregados, pero claramente se sabe que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas.

2.2.3. Material pétreo empleado en la investigación

Para la elaboración de morteros, la arena debe estar limpia, sin ácidos o grasas, libre de restos de vegetación y cualquier materia orgánica. Para el caso particular de esta investigación, el material pétreo utilizado en la elaboración de las mezclas de morteros es arena de origen volcánico, la más común es la arena negra triturada procedente de basalto, de la misma manera las arenas de río y de calizas tienen un buen funcionamiento (Villanueva Guzmán, 2016).



La arena utilizada es procedente del banco de material “Calderón” de la comunidad de Joyitas, ubicada en el km 28 de la carretera Morelia-Quiroga, salida a San Bernabé.



Figura 15. Llegada de la arena del banco de material “Calderón” de la localidad Joyitas (Bautista León, 2015)

2.3. Morteros

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua, que sirven para unir las piedras o ladrillos que integran las obras de fábrica y para revestirlos con enlucidos o revocos.

Los morteros se denominan según sea el aglomerante. La mezcla de un aglomerante y agua se denomina pasta y se dice de consistencia normal cuando la cantidad de agua de amasado es igual a los huecos del aglomerante suelto; si es menor será seca y mayor fluida, llamándose lechada cuando se amasa con mucha agua (EUITA, 2017).



2.3.1. Tipos de morteros

La calidad de un mortero depende de los aglomerantes utilizados en su fabricación, de los áridos, del agua y de los aditivos que permitan obtener propiedades especiales en los morteros. Los morteros se clasifican:

Según su concepto

Morteros diseñados. La composición y el sistema de fabricación son elegidos por el fabricante con el objeto de obtener las propiedades y características especificadas.

Morteros prescritos. Es el fabricado a partir de componentes primarios (conglomerantes, áridos) en proporciones determinadas (recetas).

Según el sistema de fabricación

Hechos o preparados en fábrica. Clasificado, mezclado, amasado en la fábrica y suministrado a la obra de construcción. Pueden ser secos (hay que mezclarlos con agua) y húmedos (listos para el uso).

Predosificados. Son aquellos en los que los componentes básicos son dosificados en fábrica, se suministran a la obra, listos para su utilización.

In-situ. Los componentes primarios son dosificados, mezclados y amasados en obra.

Según su función

Mortero de fábrica. Une los diferentes elementos de fábrica (piedra, ladrillo, etcétera). Debe presentar buenas características mecánicas adherentes e impermeables: “Bedding” preparación para cimentación, “Grouting” relleno de juntas.

Mortero de revestimiento (“facings”). Proporciona acabado y protección a la fábrica: Paredes, encluidos, revocos, estucos (plaster); pavimentos (suelo); otros elementos arquitectónicos.

Mortero de decoración. Para acabado de los paramentos con fines ornamentales, en capas, en relieve.

Morteros especiales. Estos pueden ser: Hidrorepelentes, rejuntado, apuntalamiento, sellado de juntas y reparaciones.



Según la naturaleza del aglomerante

Mortero de barro. Se prepara con tierras arcillosas y agua, endurece por evaporación del agua. Se emplea para juntas y revestimientos de fábricas de adobe.

Mortero de yeso. Formado por yeso cocido a alta temperatura a cuyo amasado con agua se le añade arena. No se utiliza en exteriores o al aire libre.

Morteros de cal. Los morteros de cal contienen como aglomerante principal la cal, compuesto que se obtiene por calcinación de la roca caliza. Existen varios tipos de cales en el mercado que no debemos confundir: Óxido de calcio o cal viva, hidróxido de calcio o cal apagada, Cal fraguada o carbonato de calcio, las que se describirán más adelante. Los morteros en base al tipo de cal, hidráulica o hidratada (Acha Palomares, 2009).

Mortero de cemento. Mezcla de cemento, arena y agua

Mortero bastardo. El aglomerante es una mezcla de cal y yeso o de cal y cemento.

Según sus propiedades y/o campo de aplicación

Morteros de albañilería. De su uso corriente, en juntas (mayor de 3 mm), se utilizan áridos normales, de capa fina de entre 1 y 3 mm de espesor, son morteros ligeros, morteros diseñados cuya intensidad y módulo de elasticidad es menor que el uso general.

Mortero de revoco/enlucido. De usos general tan solo deben cumplir las exigencias generales, se utilizan tanto en interiores como en exteriores; morteros ligeros, generalmente usan como primera capa, tienen las mismas propiedades que los morteros de albañilería; morteros de revoco coloreado, suelen representar la capa final externa; morteros monocapa para exteriores, se aplican en una solo capa, y se pueden fabricar tanto con áridos normales como ligeros; morteros de renovación, realización de revocos/enlucidos sobre albañilería; morteros para aislamiento térmico; morteros de enlucido para aislamiento acústico; mortero resistente al fuego (Cazalla Vázquez, 2002).



2.4. Agua

El agua utilizada en la elaboración de concretos y morteros debe cumplir con parámetros indicadores de calidad, que se tomarán en cuenta para aceptar su uso (Bernabé Reyes, 2015). El agua es un componente esencial para la elaboración de mezclas de concreto y mortero, ya que gracias al agua se hidrata el cemento y se pueden producir las reacciones químicas para lograr el endurecimiento de la pasta (fraguado). Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad requerida para proveer una relación agua/cemento que cumpla con las necesidades de trabajabilidad, para lavado de los agregados, en la preparación de la mezcla y durante el curado del concreto o mortero (Villanueva Guzmán, 2016).

2.4.1. Especificaciones

Toda agua que sea apta para el consumo humano, que pueda ser bebida, es apropiada para ser utilizada en el mezclado del mortero o concreto. Se debe utilizar agua potable o sin impurezas puesto que de ser utilizada agua de dudosa procedencia, se corre el riesgo de que se presenten fenómenos como manchado, variaciones en el tiempo de fraguado, disminución de la resistencia mecánica y durabilidad, etcétera (Madrigal Valencia, 2013).

En las siguientes tablas se muestran los parámetros ideales que debe cumplir el agua natural o contaminada para emplearse en la elaboración o curado de concreto o mortero (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

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

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio p.p.m	Cementos sulforesistentes p.p.m
En aguas naturales (limos y arcillas)	2 000	2 000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50 000	35 000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)



“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND,
CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”



Para otros concretos reforzados en ambientes húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1 000 (c)
Sulfatos como SO ₄ = (a)	3 000	3 500
Magnesios como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3 500	4 000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor de pH	No menor de 6	No menor de 6

Nota 1. 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.

Nota 2. 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. Nota 3. Cuando se use cloruro de calcio CaCl₂ como aditivo acelerante, la cantidad de este debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de los cloruros de la tabla.

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

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

Los efectos que causa el agua en las mezclas según su calidad se describen a continuación, Tabla. 13. (NMX-C-003-ONNCCE, 2009).



Tabla 13. Efectos que se ven por algunos factores de contaminación del agua de mezclado (NMX-C-003-ONNCCE, 2009)

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

2.4.2. Agua empleada en la investigación

El agua empleada en este proyecto fue tomada de la red de agua potable, la cual años atrás fue sometida a análisis. Bernabé Reyes (como se citó en Pedraza Pérez, 2014) dice que resultados obtenidos en este análisis muestran que el agua es apropiada para la elaboración del espécimen y la realización del curado ya que no posee un componente que pueda llegar a alterar la composición del mismo.



2.5. Aditivos

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto o mortero que, además del cemento portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado (Fig. 16) (IMCYC, 2006).



Figura 16. Aditivos líquidos, de izquierda a derecha: aditivo antideslave, reductor de retracción, reductor de agua, agente espumante, inhibidor de corrosión e incorporador de agua (WWW.ARQHYS.COM)

2.5.1. Tipos de aditivos y usos

Los aditivos normalmente se clasifican en categorías de acuerdo con su efecto:

- Plastificadores (agentes reductores de agua).
- Superplastificadores
- Incluidores de aire
- Aceleradores
- Retardadores

Muchos aditivos proporcionan combinaciones de las propiedades tales como plastificadores/retardadores o plastificadores/incluidores de aire. En las siguientes secciones se discute cada tipo de aditivo.

Plastificantes

Cuando se agregan a una mezcla de concreto, los plastificantes (agentes reductores de agua) son absorbidos en la superficie de las partículas de los aglomerantes, haciendo que se repelen entre sí, lo cual da como resultado una mejora en la trabajabilidad y proporciona una distribución más uniforme de las partículas del aglomerante a través de la mezcla.



Los principales tipos de plastificantes son los ácidos lignosulfónicos y sus sales, los ácidos carboxílico hidroxilados y sus sales, y modificaciones de ambos.

Usos de aditivos plastificantes

- Los plastificantes usualmente incrementan el revenimiento del concreto.
- Los plastificantes pueden reducir el requisito de agua de una mezcla de concreto para una trabajabilidad dada, como regla práctica, en aproximadamente 10%.
- La adición de un plastificante posibilita alcanzar una resistencia dada con un menor contenido de agua.
- Los plastificantes pueden facilitar el bombeo.

Superplastificantes

Estos aditivos son químicamente distintos de los plastificantes normales y aunque su acción es casi la misma, es más marcada.

Cuando se usan para producir concreto fluido puede esperarse una pérdida rápida de trabajabilidad y, por tanto, éstos deben ser agregados justo antes de la colocación. De modo usual, los superplastificantes son compuestos químicos como formaldehído de melamina sulfonatada, formaldehído naftaleno sulfonatado y lignosulfonatos modificados (IMCYC, 2006).

Usos de aditivos superplastificantes

- En áreas de refuerzo congestionado.
- En donde una consistencia autonivelante facilita la colocación.
- Para concreto de alta resistencia, disminuyendo la relación agua-cemento como resultado de reducir el contenido de agua en 15-25%.

Inclusores de aire

Un agente inclusor de aire introduce aire en forma de diminutas burbujas distribuidas de modo uniforme a través de toda la pasta de cemento. Los tipos principales incluyen sales de resinas de madera, grasas y aceites animales y vegetales, e hidrocarburos sulfonatados.

Usos de aditivos inclusores de aire



- En donde se requiera una resistencia mejorada del concreto endurecido contra los daños causados por congelación y deshielo.
- Para una trabajabilidad mejorada, en especial, en mezclas gruesas o pobres.
- Para reducir el sangrado y la segregación, sobre todo cuando una mezcla tiene un déficit de finos.

Aceleradores

Estos aditivos aceleran la reacción química del cemento y el agua, y de este modo aceleran la tasa de fraguado y/o la ganancia temprana en la resistencia del concreto. Entre los tipos principales de aceleradores están el cloruro de calcio, el formiato de calcio, ceniza de sosa, cloruro de potasio y varios materiales orgánicos. El cloruro de calcio parece ser el único predecible, de modo razonable, en su desempeño, pero tiende a promover la corrosión del acero en el concreto.

Usos de aditivos aceleradores

- Cuando se requiere de fraguado rápido y altas resistencias tempranas (por ejemplo, en la profundización de pozos).
- Cuando se requiere la reutilización rápida de moldes o de cimbras.
- Cuando el colado del concreto tenga lugar bajo condiciones muy frías.

Retardadores

Estos aditivos disminuyen la velocidad de la reacción química del cemento y el agua conduciendo a tiempos más largos de fraguado y ganancia de resistencia iniciales más lentas. Los retardadores más comunes son los ácidos carboxílicos hidroxilados, bórax, lignina, azúcar y algunos fosfatos.

Usos de aditivos retardadores

- Cuando se elabora concreto en clima caliente, en particular cuando el concreto es bombeado.
- Para evitar juntas frías debido a la duración de la colocación.
- En concreto debe transportarse durante un largo tiempo.

Otros aditivos

Hay disponibles otros aditivos con diferentes composiciones químicas y efectos (por ejemplo, auxiliares para el bombeo, pigmentos, ayudas de expansión y aditivos de



lechada). Éstos se encuentran más allá del alcance de este texto y debe obtenerse información de los proveedores de aditivos (IMCYC, 2006).

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)

2.5.2. Aditivo usado en la investigación

El aditivo empleado en la investigación fue del tipo plastificante, el cual incrementa



Figura 17. Aditivo plastificante usado en la investigación, Crisotan R-5 (Villanueva Guzmán, 2015)

la fluidez de la mezcla y facilita la colocación sin perder la resistencia ni la durabilidad, se muestra en un aspecto de color café (Fig. 17).

Este aditivo presenta una buena estabilidad térmica, la cual se garantiza hasta los 150°C. La temperatura de descomposición es a los 380°C. En dosificaciones normales, el aditivo no impacta

en el proceso de calor de hidratación del concreto o mortero. No contribuye a la corrosión del acero, ni al desarrollo y crecimiento de microorganismos.

Para mejores resultados, el aditivo se debe añadir a la mezcla de concreto antes del colado, los periodos de mezclado deben ser de 1 a 2 minutos en mezcladoras eficientes, y de 5 a 7 minutos en revolvedoras, para el caso de esta experimentación se dejó reaccionar el aditivo durante 30 minutos en el agua, después de esto se realizó el mezclado (Villanueva Guzmán, 2016).

2.6. Mucílago de Nopal

Las pencas de nopal excretan una sustancia “viscosa” llamada mucílago. El mucílago del nopal es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol. Contiene aproximadamente de 35 a 40



% de arabinosa, 20 a 25% de galactosa y xilosa cada una, y de 7 a 8% de ramnosa y ácido galacturónico cada uno. Durán (como se citó en Garti, 1999) menciona que el mucílago de nopal tiene la capacidad de formar redes moleculares, retener fuertemente grandes cantidades de agua y reduce la tensión superficial en soluciones acuosas; así como de modificar propiedades como viscosidad, elasticidad, textura, retención de agua, además de que es un buen gelificante, espesante, y emulsificante (Rodríguez González, et al, 2011).

2.6.1. Nopal (*CACTUS OPUNTIA FICUS-INDICA*)

La ‘Opuntia Ficus-Índica’ que se denomina así de acuerdo con su nomenclatura binomial, es la llamada nopal, tuna o chumbera; pertenece al género Opuntia, de la



familia de las cactáceas, (Fig. 18). Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin espinas (Torres Acosta, et al, 2010). En

Figura 18. Nopal en su medio natural (www.bioenciclopedia.com)

sus bordes aparecen las flores en forma de corona que se transforman en frutos denominados tunos; mismos que poseen una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en semillas. Esta planta es originaria de México, donde es conocida desde tiempos prehispánicos.

El nopal y su fruto, la tuna, tienen en México evidencias fechadas desde hace 7,000 años. En excavaciones realizadas en Tehuacán, Puebla, se encontraron semillas y cáscaras de tuna y fibras de penca de nopales fosilizados. El nopal, es una planta propia del paisaje mexicano y uno de los símbolos más importantes de identidad de



México. Junto con el maíz y el maguey fueron los alimentos básicos de la antigua civilización mesoamericana.

Esta cactácea también se constituye en un elemento fundamental en la mitología histórica de la fundación de la gran Tecnochtitlán (“nopal sobre la piedra”). Los aztecas llamaban al nopal: nochtli o nopalli. Se sabe que desde tiempos prehispánicos las culturas mesoamericanas encontraron en el nopal cualidades alimenticias y medicinales en las cuales basaban muchas de sus costumbres. Actualmente, el nopal se ha convertido en una fuente inagotable de productos y funciones, inicialmente como una planta silvestre y después como un cultivo tanto para la subsistencia como para una agricultura orientada no solamente al mercado nacional sino también, en algunas variedades, al mercado internacional.

Asimismo, el nopal se ha convertido en un factor detonante de desarrollo en zonas rurales donde es explotada de forma inadecuada, dejándose perder gran parte de su potencial productivo y económico (Saravia Tasayco, 2010). El nopal se reproduce en climas donde exista buena insolación, cierta disponibilidad de agua y que el suelo no sea muy salino ni arenoso, su crecimiento óptimo se da en zonas áridas y semiáridas. En una hectárea se puede albergar entre 15 000 a 22 000 pencas.

La producción de nopal ha permitido que grupos marginados obtengan empleo, se arraiguen en el campo, produzcan alimentos y generen ingresos para sus familias. En la actualidad, el nopal ocupa en México un área de más de 3 millones de ha., mayoritariamente silvestre, del cual se extraen un conjunto numeroso de productos con una amplia gama de aplicaciones (SINAREFI, 2016).

México es el país líder en la producción de nopal, por tener la mayor superficie bajo cultivo (10,400 ha.), el único país competidor es E.U.A. con una superficie mucho menor de 100 ha., México es el principal exportador mundial, exporta alrededor de 1,500 Ton en fresco y unas 3,500 Ton procesadas a E.U.A. y cantidades menores a otros países. En la producción de nopal participan 18 estados, con 10,400 ha en total, el Distrito Federal aporta el 72% de la superficie y casi el 80% de la producción. Milpa Alta, en el Distrito Federal, es la mayor y más antigua zona productora. El nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de México. Se



produce 874.000 toneladas al año, con un rendimiento promedio de 67 ton/ha (Ramírez Arellanes, Cano Barrita, Julián Caballero, & Gómez Yáñez, 2012).

La superficie sembrada y cosechada se ha mantenido en un ligero aumento durante el periodo 2000-2010 (Fig. 19). En cuanto a la producción, ha tenido un aumento considerable en el mismo periodo, pasando de 404,459.79 Ton en el 2000 a 723,815.42 Ton en 2010, lo que representó un incremento en la Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) del 5.43%, con un rendimiento promedio por hectárea de 57.45 Ton.

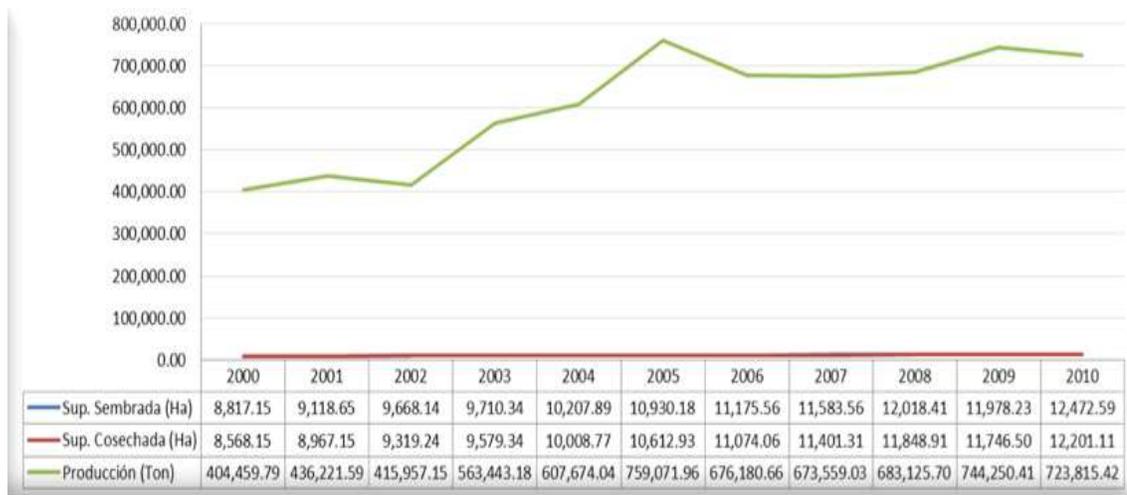


Figura 19. Datos estadísticos de la producción de Nopal en México durante el periodo 2000-2010 [SINAREFI (SIAP, 2012)]

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

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

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



Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo; y también como una barrera al agua en el estuco (García Favela, 2013). A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante (Fig. 20), el cual puede ser aplicado a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos (Torres Acosta, et al, 2010).



Figura 20. Elaboración de pintura a base de nopal (Expresión Fovissste, 2014)

La sustancia viscosa albergada en el interior de la hoja de este cactus comestible, se utiliza en innumerables prospecciones para conservar restos arqueológicos. Con el nopal se ha logrado una sustancia fácil de manipular, que no cambia el color de la superficie en la que se aplica. Algunos de estos edificios restaurados con esta técnica son la Parroquia de San Juan Bautista en Tiripetío, Morelia Michoacán, el Templo de San Nicolás Tolentino en Chucándiro, Morelia Michoacán. Este exitoso precedente ha extendido el uso del extracto de nopal a otros edificios históricos, como uno de los palacios ubicados en las pirámides arqueológicas de



Teotihuacán, en las cercanías de la capital mexicana, o en el recinto religioso de Ixtapalapa, en el sur de esta metrópolis.

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

El mucílago de nopal también se ha utilizado en la elaboración de mortero y concreto hidráulico, encontrando que el mucílago de nopal incrementa los tiempos de fraguado, disminuye la absorción de agua y aumenta la resistencia a la compresión. Asimismo, otras investigaciones han demostrado que el mucílago de nopal actúa como agente modificador de viscosidad de la pasta de cemento, con lo que se incrementa la resistencia a la segregación del concreto autoconsolidable, además de incrementar la resistencia a la compresión y reducir la absorción capilar de agua (Ramírez et al, 2012)

2.6.3. Aplicación de mucílago de nopal en morteros

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

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

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



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

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

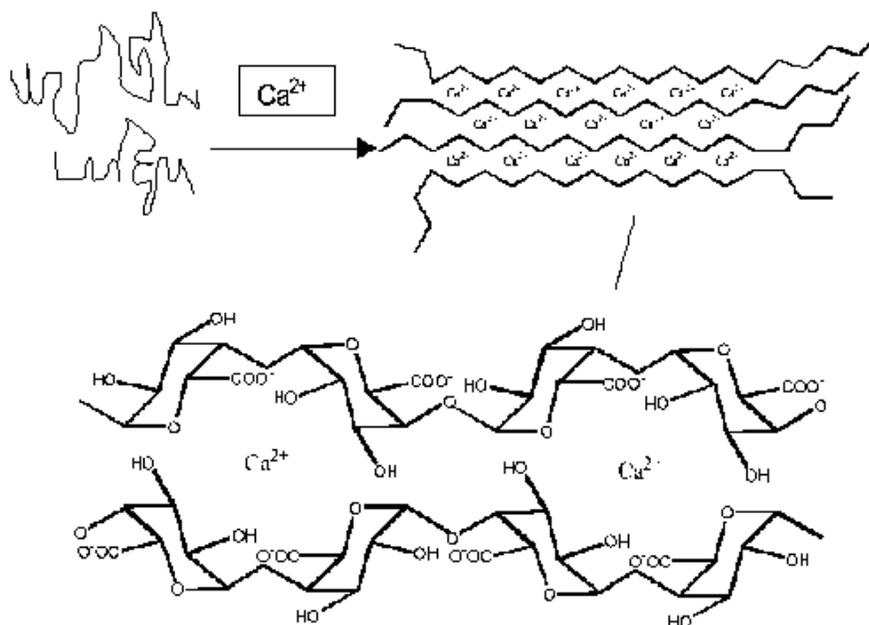


Figura 21. Representación esquemática para la gelificación de pectina de nopal en presencia de iones de calcio (Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, 2009)

hidróxido de calcio mejorando así el comportamiento mecánico de la muestra (Fig. 21).

Si aumenta la concentración de hidróxido de calcio las propiedades mecánicas aumentan también, debido a la formación de una red homogénea del mucílago



dentro de la base de hidróxido, sin sufrir ningún tipo de deformación en su estructura el polisacárido.

En 2008 se realizó una investigación donde se estudió el comportamiento mecánico de morteros de cal apagada artesanalmente, adicionados con mucílago de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales. Donde el mucílago fue un factor que permitió el incremento de la resistencia mecánica, pero también tuvo efecto sobre la trabajabilidad de la mezcla fresca de mortero, permitiendo mayor manejabilidad para el llenado de los especímenes (Martínez, y otros, 2008).



3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterización de los materiales

Determinar las características de los materiales es muy importante, primeramente verificar si cumple con la normativa, una vez que haya cumplido, hacer los ensayos correspondientes con determinados procedimientos y especificaciones. La caracterización del material es imprescindible y clave para un trabajo eficaz (Kröner, Mas i Barberá, Osete Cortina, & Guasch, 2015)

3.1.1. Caracterización del cemento

3.1.1.1. Densidad

La determinación de la densidad de cementantes hidráulicos se refiere al cálculo de la relación de la masa cementante en gramos entre el volumen en mililitros que desplaza al introducirse en un líquido, con el cual no se efectúe alguna reacción química (NMX-C-152-ONNCCE, 2010).

Equipo

- Matraz de Le Chatelier. El matraz debe ser de sección transversal circular (Fig. 22). Debe existir un espacio de por lo menos 10 mm entre la marca de la graduación más alta y el punto más bajo de la sección esmerilada donde se coloca el tapón. El vidrio debe ser químicamente resistente y de baja histéresis térmica. El cuello es graduado de 0 ml a 1 ml y de 18 ml a 24 ml en graduaciones de 0.1 ml, el error de cualquier capacidad indicada no debe de ser mayor de 0.05 ml. Cada matraz y tapón deben de tener su número de identificación permanente en el caso de que este último no se puede intercambiar, en caso contrario deben ser marcados con el símbolo “S”, seguido por la medida del tamaño designado. La temperatura estándar debe estar indicada, así como la unidad de medida de la capacidad por las letras “m” colocadas arriba de la marca más alta de la graduación.

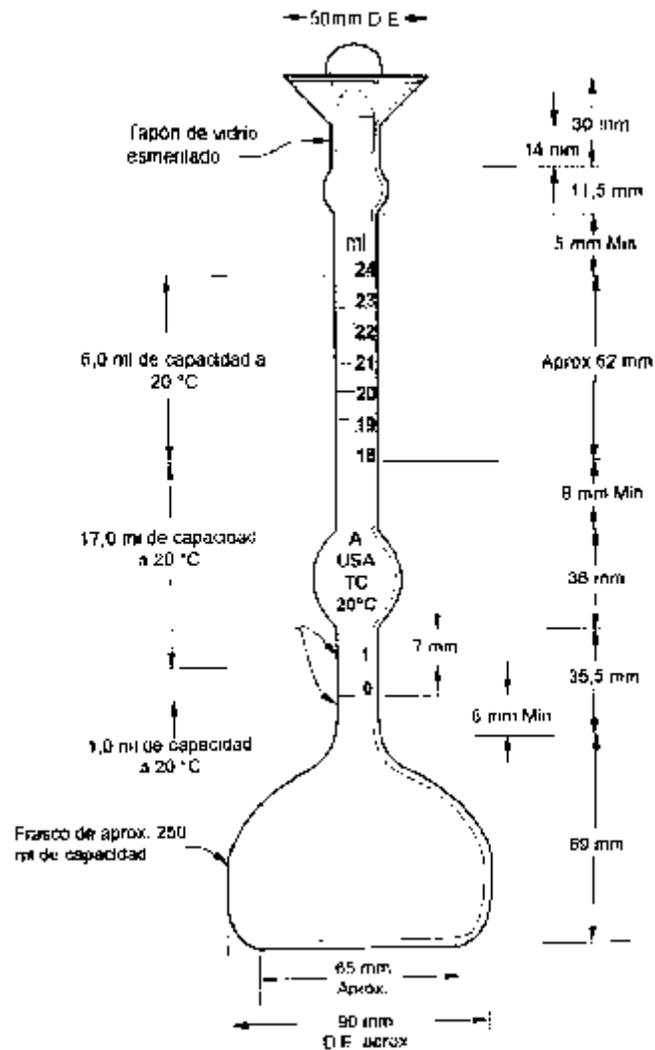


Figura 22. Matraz de Le Chatelier (NMX-C-152-ONNCCE, 2010)

Procedimiento

1. Llenar el matraz con el líquido especificado a un nivel medido entre 0 ml y 1 ml. Secar el interior del matraz arriba del nivel del líquido (para evitar la adherencia del cemento a las paredes internas). La primera lectura debe registrarse después de haberse sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio.
2. Debe tenerse la precaución de que la temperatura del baño sea constante durante el ensayo. De este modo se asegura que la variación de la



temperatura del líquido en el matraz no tenga una variación mayor a 0.2°C al momento de tomar la lectura inicial y final.

3. Colocar el cemento dentro del área de ensayo para que tome la temperatura ambiente. Pesar aproximadamente 60 g de cementante con una aproximación de 0.05 g e introducir en pequeñas porciones dentro del matraz. Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz, colocar el tapón al matraz y desalojar el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada, o bien, hágalo rodar en posición inclinada sobre una superficie plana que conviene cubrir con un material que proteja al matraz de una posible ruptura.
4. Sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura y después tomar la segunda lectura cuando el líquido en la parte graduada superior.

Cálculos

La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen del líquido por el peso de cementante empleado en el ensayo. La densidad se calcula con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\text{Masa del cementante (g)}}{\text{Volumen del líquido (ml)}} \quad (1)$$

Resultados

Los resultados obtenidos se debe aproximar al 0.01 g/cm³

Precisión

Se ha encontrado la desviación estándar, obtenida a través de las determinaciones efectuadas en ensayos multilaboratorio, son de 0.037. Por lo tanto los resultados de dos ensayos realizados correctamente en dos laboratorios diferentes, sobre la misma muestra, no debe diferir en más de 0.10 (NMX-C-152-ONNCCE, 2010).



3.1.1.2. Consistencia

La prueba de consistencia normal permite conocer la cantidad de agua que es necesaria agregar a una masa de cemento para llenar los vacíos que existen en el material cementante. La determinación de esta consistencia sirve como referencia para la realización de otras pruebas como: determinación de la resistencia a la tensión, tiempos de fraguado, sanidad del cemento, expansión en autoclave, y otras (Universidad Centroamericana "José Simeon Cañas", 2006).

La 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, 2010) (ASTM-C-187, 2004)

Equipo

- 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

1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre un recipiente con superficie liso e impermeable, formando una especie de cráter con el cemento ayudados con una espátula, (Fig. 23).
2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del



cráter (tomando el tiempo con el cronómetro al caer el agua sobre el cemento) (Fig. 24).



Figura 23. Formación de cráter en el cemento, (López Regalado, 2016)



Figura 24. Vertiendo el líquido de amasado al cemento, (Bautista León, 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. Haciendo esto en un máximo de 30 s.



Figura 25. Mezclado de cemento con líquido de amasado, (López Regalado, 2016)

4. En otro ciclo de 30 s consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice.
5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 min contados a partir de los anteriores.



6. En los primeros 30 s 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.

7. En otros 30 s se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 cm, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe de repetir 6 veces terminado lo anterior.

8. En los últimos 30 s de los 1.5 min, descansamos la bola en la palma de la mano, se introduce



Figura 26. Amasado de mezcla, (Bautista León, 2016)

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).

9. 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.

10. Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra de Vicat, 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 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 s).



11. Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30 s 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 está entre $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, 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.

3.1.1.3. Tiempos de Fraguado

El objetivo es determinar los tiempos de fraguado (inicial y final) del cemento por el método de la aguja de Vicat.

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 temperatura del agua de mezclado y la cámara de humedad no deben variar de $23^\circ \text{ C} \pm 2^\circ \text{ C}$. 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 aplana primero la pasta de



cemento sobre el vidrio moviendo la cuchara desde los bordes hacia el centro, aplanando a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo, salvo cuando vaya efectuarse determinaciones del tiempo de fraguado.

Determinación de los tiempos de fraguado

Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla (Fig. 27). 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 C266, 2015).



Figura 27. Determinación de tiempos de fraguado (Bautista León, 2016)

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 (NMX-C-177-ONNCCE, 2005).

3.2. Arena

3.2.1. Muestreo y cuarteo

El objetivo es obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado de la muestra obtenida del banco de material.

Equipo

- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.
- Brochas o cepillos de pelo.
- Balanza o báscula.
- Divisor de muestras.

Procedimiento

Existen varios procedimientos para el cuarteo de material, se puede hacer de manera manual, o sea, usando palas (NMX-C-170-ONNCCE, 1997) (ASTM C702, 2003) o por cuarteo mecánico usando un divisor de muestras, otro es usando un trozo de plástico, levantando los extremos del plástico se logra la homogeneidad del material. Para este trabajo se optó por el segundo procedimiento que se describe a continuación.

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

Especificaciones

Las muestras de campo de agregado fino deben estar superficialmente secas, y deben reducirse en tamaño por el método mecánico. Las muestras de campo que



se reduzcan por el método de palas deben encontrarse húmedas superficialmente, de no ser así se deben humedecer debiendo ser remezcladas.



Figura 28. Cuarteo de arena usando un divisor mecánico (Bautista León, 2015)

3.2.2. Humedad de absorción

Tiene como finalidad obtener el porcentaje de absorción que tiene el material, este dato es muy importante si se usara para diseño de concreto.

Equipo

- Muestra representativa de aproximadamente 2 kg.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Cono metálico (truncocónico).
- Pisón.
- Una espátula.

Procedimiento

1. Se pone a saturar los 2 kg de muestra durante 24 h como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras.



2. Al término de este tiempo, se seca superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico como se describe a continuación) (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) (ASTM C128, 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 troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo. Se llena el molde con la arena en cuatro capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 10 a la primera, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta. 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 29. Secado superficialmente de la arena (Bautista León, 2015)

3. Cuando la arena se haya secado superficialmente se pesa

una muestra de 300 g, registrando este peso como masa saturada y superficialmente seca (Mh).

4. La muestra de 300 g, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.



5. Para saber cuándo el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrarlo como masa seca del material (M_s), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material hasta secarlo completamente.

Cálculos

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad (2)$$

Donde:

M_h = Masa saturada y superficialmente seca (g)

M_s = Masa seca del material (g)

3.2.3. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)

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

Equipo

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

Procedimiento

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



2. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).
3. La masa obtenida (Fig. 30) se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.



Figura 30. Determinación del peso + material (Bautista León, 2015)

Cálculos

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

Dónde:

MVSS. = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³)

M = Masa de la arena (g)

V = Volumen del recipiente (cm³)



3.2.4. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Tiene como propósito obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Equipo

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

Procedimiento

1. Se llena el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 cm, 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).
2. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
3. Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Cálculos

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

Dónde:

MVSS. = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³)

M = Masa de la arena (g)

V = Volumen del recipiente (cm³)



3.2.5. Análisis granulométrico

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

Equipo

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

Procedimiento

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 g
2. Se secó la muestra hasta peso constante, a una temperatura no mayor de 110 °C.
3. Cuando el material estaba seco y frío, se tomaron 500 g, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocaron las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se dejó pasar el material para obtener los pesos retenidos (Fig. 31).



Figura 31. Pase de material por las mallas (Bautista León, 2015)



- Se procedió a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente (Fig. 32).



Figura 32. Peso de los retenidos de cada una de las mallas (Bautista León, 2015)

Se coloca los registros de la manera siguiente:

Tabla 14. Ejemplo de tabla de registro de los pesos de retenido después de cribar el material

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Malla	Peso Retenido	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
Charola				

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

$$\% \text{ Retenido} = \left(\frac{\text{Masa retenida}}{\text{Suma de la masa retenida}} \right) 100 \quad (5)$$

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



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

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

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

10. Módulo de finura:

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

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. En la tabla 15, se muestran especificaciones granulométricas de la ASTM, donde el porcentaje referido de dos mallas sucesivas no debe ser mayor a 45%.

Tabla 15. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation ASTM

Malla	% Que pasa
3/8 "	100
No. 4	95 - 100
8	80 - 100
16	50 - 85
30	25 - 60
50	10 - 30
100	2 - 10

3.2.6. Colorimetría

Se realiza para determinar el contenido de materia orgánica en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal.

Equipo

- Dos botellas iguales de vidrio incoloro de 250 a 350 cm³ con marcas a cada 25 cm³ (frasco de biberón).
- Charolas, parrillas de secado, espátulas, balanza, vasos de precipitado.



- Material para las soluciones y tabla colorimétrica. Solución de sosa cáustica 30 g/L de solución de normal en agua destilada.

Preparación de solución

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

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

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

Procedimiento



1. Se toma una muestra representativa de arena de 500 g aproximadamente.
2. Se seca hasta peso constante a una temperatura no mayor a 110 °C.
3. Se coloca la arena seca y fría (Fig. 34) en el frasco de biberón hasta 133 cm³ adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 206 cm³.

Figura 33. Elaboración de color normal (Bautista León, 2015)



4. Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo, posteriormente se dejará reposar 24 horas.
5. Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica (Fig. 35). Si no se tiene esta, se compara con el color de la solución normal que se haya hecho en la otra botella idéntica.



Figura 34. Colocación de la arena dentro del biberón (Bautista León, 2015)

Recomendaciones

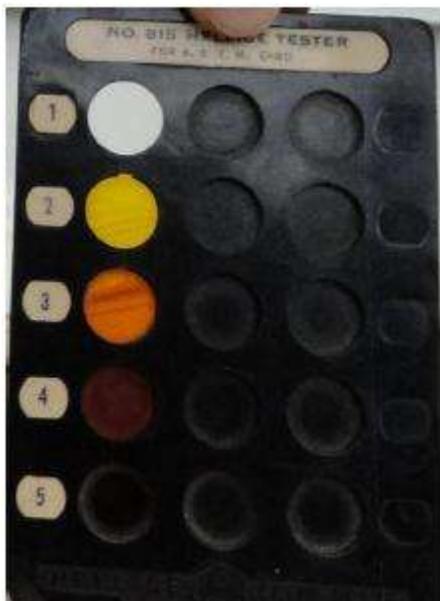


Figura 35. Tabla colorimétrica (Bautista León, 2015)

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.



3.2.7. Sedimentación

Tiene como finalidad determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto.

Equipo

- Frasco graduado con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444 ml y la tercera a los 828 ml.
- Muestra de arena seca de 2 kg aproximadamente.
- 1 litro de agua de preferencia destilada.

Procedimiento

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca agua hasta la marca de 828 ml (Fig. 36).
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.
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 (Fig. 37).



*Figura 36. Llenado del recipiente con material
(Bautista León, 2015)*



Figura 37. Reposo de material durante 24 h (López Regalado, 2015)

3.2.8. Material que pasa la malla No. 200

Tiene como propósito determinar la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla N° 200.

Equipo

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

Procedimiento

1. Se toma una muestra representativa de 600 g de arena, se seca a una temperatura no mayor de 110 °C.
2. La muestra seca y fría se coloca en la balanza y se pesa al décimo de gramo (Mi).
3. Se coloca el material en un recipiente y se le agrega agua hasta saturar.
4. Se agita enérgicamente la muestra con agua y se vierte inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).



5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua quede completamente clara.
6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.
7. Se seca el material completamente, se deja enfriar y se obtiene la masa (Mf).

Cálculos

$$A = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) 100 \quad (9)$$

Dónde:

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

M_i = masa seca inicial (g)

M_f = masa seca después de lavar (final) (g)

Recomendaciones

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 16. Parámetros permisibles que pasa la malla no. 200

Concepto	Material máximo permisible en masa de la muestra total en %	
	NMX-C-111-ONNCCE-2014	ASTM C33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.0 ⁽¹⁾	3.0 ^(A)
En concretos presforzados	8.0 ⁽¹⁾	-
En otros concretos	15.0	5.0 ^(A)



(1) En caso de agregados triturados, si el material que pasa por la criba 0.075 mm (malla N. 200) es el resultado de la pulverización de rocas extensas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 6 % y 10 %, respectivamente.

(A) En caso de agregados triturados si el material que pasa por la criba 0.075 mm (malla N. 200) es el resultado de la pulverización de rocas extensas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 5 % y 7 %, respectivamente

3.2.9. Terrones de arcilla

Se realiza para 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

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

Procedimiento

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente un kilogramo, se seca a una temperatura no mayor de 110 °C, teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla (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 g y se anota como Mi, pesados al décimo de gramo. En este caso, se obtuvo un promedio de tres muestras realizadas.
3. Se colocan los 100 g de arena en una charola y se le adiciona agua hasta cubrir la muestra, se deja saturar durante 24 h.



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 (Fig. 38).



Figura 38. Desintegración de los terrones de arcilla en la muestra (Bautista León, 2015)

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 Mf.

Cálculo

$$\% \text{ de terrones de arcilla} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) 100 \quad (10)$$

Donde:

M_i = masa inicial, 100 g.

M_f = masa seca sin terrones (g)

Especificaciones

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 C142, 1997).



3.2.10. 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

Muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 gramos.

- Charolas, parrilla eléctrica, espátulas.
- Molde troncocónico, pisón, probeta, frasco
- Vidrio, balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento (utilizando la probeta)

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

$$DA = \frac{M_a}{V_f - V_i} \quad (11)$$

Donde:

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



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

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

Precisión

Al momento de realizar la norma que rige estos procedimientos no se contó con los datos necesarios en México para establecer la precisión del método (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) (ASTM C128, 2004).

3.2.11. Equivalente de arena

Es una prueba que permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en el concreto o en mezclas asfálticas. En otras palabras sirve para 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 (NMX-C-480-ONNCCE, 2014).

Equipo

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule, tubo irrigador, tramo de manguera.
- Pisón metálico de 1000 ± 5 g, cápsulas de 85 ± 5 mi (metálicas).
- Embudo, cronómetro, dos frascos de 3.785 L.
- 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 g de cloruro de calcio en 1.89 L de agua destilada, se deja enfriar la solución y se hace pasar a través del papel filtro, se le agregan 47 g de formaldehído en solución volumétrica al 40 % y 2050 g de glicerina USP (normalizada), mezclando el total, finalmente se le agrega agua destilada hasta completar los 3.785 L y agitando toda la solución para uniformizarla.

Preparación de la solución de trabajo

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



Procedimiento

1. Se toma una muestra de material de aproximadamente 500 g que pasa la malla N° 4, procurando que no se pierdan finos.
2. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa.
3. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de 4 ± 0.1 de pulgada y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material. Se deja reposar 10 ± 1 min procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.
4. 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 cm (8 pulg) hasta completar 90 ciclos en 30 s.
5. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con este 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 min, 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.
6. Se introduce el pisón lentamente en la probeta ajustando hasta que el pisón se apoye en la arena (Fig. 40), el nivel donde se apoya en la arena se denominará lectura de arena.



Figura 39. Agitado de material, 90 ciclos en 30 s (Bautista León, 2015)



Figura 40. Introducción de tubo agitador para obtener la lectura de arena (Bautista León, 2015)

Cálculos

$$\text{Equivalente de arena} = \left(\frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \right) 100 \quad (12)$$



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



Figura 41. Pruebas de equivalente de arena donde se observa el nivel de arena (Bautista León, 2015)

Causa de error

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

3.3. Preparación del mucílago de nopal



Figura 42. Nopal obtenido de la central de abastos de la ciudad de Morelia, Michoacán

La obtención del mucílago de nopal es todo un proceso, el nopal se consiguió del mercado de abastos de la ciudad de Morelia (Fig. 42). Se pidió que fueran nopales de edad avanzada, pues son los que tienen más mucílago de nopal. La preparación se realizó dentro del laboratorio de materiales “Ing. Luis



silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.



Figura 43. Picado de nopal de 1 a 1.5 cm de lado de cada trozo (Bautista León, 2015)

Como primer paso fue quitar las espinas que tienen estas cactáceas para poder hacer el picado (Fig. 43). Seguidamente, es formar trozos de nopal de 1 a 1.5 cm de lado aproximadamente.

Después se sometió a la cocción el cual duró 1h 45 min en el fuego, del tiempo anterior, 30 min fue de hervido, se tuvo que mantener tapada el recipiente para evitar la evaporación. La primera proporción fue 1 kg de nopal por 2 L de agua (MN 1:2), la otra fue 1 kg de nopal por 3 L de agua (MN 1:3). Luego de la cocción, se dejó hasta temperatura ambiente y se hizo el macerado manual.



Figura 44. Macerado del nopal después de 3 h de cocción.



Figura 45. Mucílago de nopal



En la investigación se necesitó tres líquidos de amasado, para el mortero **CONTROL** se usó solamente agua, sin aditivo. Para el mortero con **MN 1:2** se usó 1 % de aditivo y para el mortero con **MN 1:3** se usó 0.3 % de aditivo.

3.4. Aditivo

El porcentaje de aditivo que se usó para cada mezcla se definió mediante tanteos hasta obtener la fluidez de 110 ± 5 , sin utilizar cantidades mayores a 0.66 % respecto al cementante (especificación de la ficha técnica del aditivo).

Se agregó el porcentaje de aditivo en el agua de mezclado que se utilizó para el colado, se dejó reposar durante 30 min para después agregar el agua a la mezcla y realizar el colado de los especímenes. El aditivo reaccionaba de diferente manera dependiendo del tiempo que estuviera en contacto con el agua, por ello, el aditivo se dejó reposar el mismo tiempo para las mezclas con mucílago de nopal.

El aditivo Crisotan R-5 empleado produce una mayor fluidez que facilita el llenado de moldes y cuando se desmoldan los especímenes quedan con superficies lisas.

3.5. Pruebas realizadas al mortero fresco

3.5.1. Fluidez

Es la prueba que se le realiza al mortero para determinar de manera indirecta el contenido mínimo del agua que requiere para que la mezcla sea lo suficientemente fluida para su uso como mortero de pega o de relleno.

Permite medir la plasticidad y trabajabilidad del mortero

Equipo

- 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

1. Lubricación de la mesa. El eje vertical se mantiene limpio y se lubrica con aceite SAE-10. No debe haber aceite entre las caras de apoyo de la saliente del eje y el soporte. El aceite sobre la cara de la leva disminuye el desgaste y facilita la uniformidad del funcionamiento, se recomienda levantar la mesa y dejarla caer doce veces.
2. El molde para colar el espécimen para el ensaye es de bronce o latón con diámetro de la boca superior de 70 mm, las superficies definidas por la base y el borde superior serán perpendiculares entre si y al eje del cono vertical.
3. El calibrador se usa para medir el diámetro del mortero después de que haya extendido, tiene una exactitud tal que la distancia entre las quijadas debe ser de 102 mm cuando el indicador se encuentre en cero.
4. Se debe de humedecer la parte superior de la mesa, se limpia del material arenoso, y se elimina el exceso de agua con una franela húmeda, todo para poder realizar el ensaye, se centra el molde en la mesa, después se ajusta y se llena en dos capas, que en total 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, al finalizar se enrasa con una llana el exceso de mortero y se retira, limpiando el área de la mesa donde se encuentra al molde, el molde se remueve con un



Figura 46. Expansión de la mezcla manualmente girando la leva (Bautista León, 2015)



Figura 47. Toma de medidas distribuidas simétricamente para la obtención de fluidez (Bautista León, 2015)



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 (Fig. 46), el diámetro del mortero extendido es el promedio de seis medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas a 0.5 cm (Fig. 47).

Cálculos

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:

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

3.5.2. pH

Para obtener el Potencial de Hidrógeno (pH) de las mezclas se usó papeles indicadores, haciendo contacto con el mortero fresco durante 1 min (Fig. 48). Después de ello se comparó los colores obtenidos con la tabla de valores y se determinó la alcalinidad de las mezclas (Fig. 49).



Figura 48. Determinación de pH mediante papel indicador (López Regalado, 2015)



Figura 49. Determinación de pH de las mezclas (Bautista León, 2015)

3.5.3. Temperatura

Las propiedades del estado fresco de un mortero como la temperatura son determinantes, pues influirán en gran medida en las prestaciones finales que ofrecerá el mortero. Se utilizó un termómetro infrarrojo para la determinar la



temperatura sin afectar la mezcla por el posible tiempo que tarda un termómetro normal de mercurio en registrar la temperatura. La temperatura de la mezcla no debe estar muy lejos de la temperatura ambiente.

3.6. Elaboración de especímenes

Para elaborar las probetas a ensayar se necesitan moldes que deben cumplir ciertas características, como el tipo de material y las dimensiones (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), 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.

3.6.1. Elaboración de probetas cúbicas

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes mezclas (Control, MN 1:2 y MN 1:3), se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para la elaboración de cubos (ASTM C109, 2002).

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes con aceite quemado mezclado con diesel, esto con la finalidad de facilitar el descimbrado al día siguiente sin despostillar los especímenes. Después de tener engrasado los moldes se procedió al llenado.

El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C109, 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 (Fig. 50). 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 (Fig. 51).

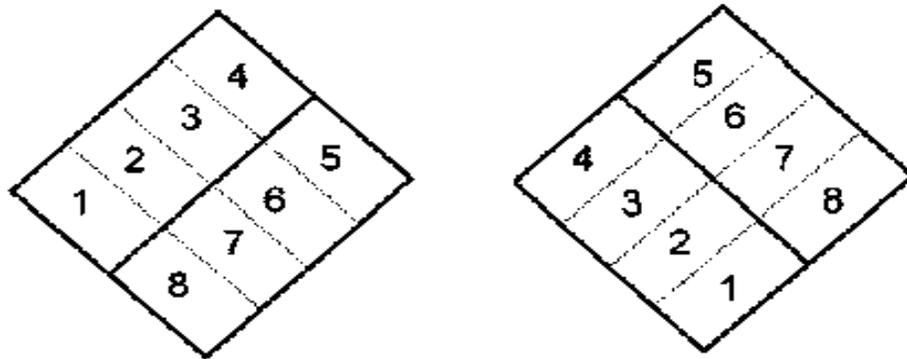


Figura 50. Sentido de golpes con el pisón de acrílico para el llenado de moldes (NMX-C-061-ONNCCE, 2004)



Figura 51. Enrasado del cubo (López Regalado, 2015)

Una vez fabricado el número de cubos correspondientes a las edades de prueba especificadas y con la mezcla correspondiente, se dejaron fraguar en sus moldes. Los cubos de la mezcla control fueron desmoldados después de 24 h aproximadamente y los de mucílago de nopal se dejaron durante una semana, ya que el nopal actúa como retardante de fraguado (Fig. 53). Se etiquetaron las probetas con un marcador permanente para poder identificarlas, dicha nomenclatura contiene la fecha de elaboración del cubo, el tipo de líquido de amasado (MN 1:2 ó MN 1:3).

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 C515, 2003).



Figura 52. Curado de especímenes (Bautista León, 2015)

3.6.2. Elaboración de probetas prismáticas

Las probetas prismáticas 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



Figura 53. Elaboración de probetas prismáticas (Bautista León, 2015)

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



3.6.3. Elaboración de briquetas

Para la elaboración de briquetas se utilizó un molde de bronce y se siguió el mismo procedimiento de los especímenes anteriores, es decir, se limpió, se engrasó para evitar que el material se adhiriera a las paredes y se procedió a llenar.



Figura 54. Elaboración de probetas en forma de maní con molde de bronce que se puede desmoldar al instante (Villanueva Guzmán, 2015)

El llenado de briquetas consiste en llenar el molde, comprimiendo la mezcla con el dedo pulgar, procurando que sean 25 compresiones por lado de la briqueta, y engrasado con la ayuda de una espátula, como el molde no tiene una base en la que se pueda quedar la mezcla, el molde se pone sobre una superficie de cristal, la cual fue engrasada previamente para evitar que la mezcla se adhiriera. (Navarro

Sánchez, et al, 2011).

Al terminar la elaboración del número correspondiente para las edades de prueba especificadas (7, 28, 45, 90, 120, 150, 180 y 300 días), se dejaron fraguar 24 h las probetas control y las de mucílago de nopal se dejaron fraguar durante una semana; transcurrido el tiempo de fraguado, se procedió a etiquetar cada una de ellas.

3.6.4. Elaboración de probetas cilíndricas

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.



Para la elaboración de cilindros se sigue el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de cubos, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

El llenado de cilindros se hizo en dos capas de igual espesor (aproximadamente), en cada capa se le dieron de 25 golpes con una varilla punta de bala de 1/4” de diámetro, y se les quitó el aire proporcionando 15 golpes por capa con el mazo de goma, después de haberles aplicado la segunda capa y haberlos llenado, se engrasaron utilizando la varilla punta de bala.

Después de haber elaborado los cilindros con la mezcla correspondiente, los morteros control se dejaron fraguar por 24 h aproximadamente y los de mucílago se descimbraron después de una semana. Transcurrido el tiempo de fraguado, en la cara lateral (perímetro) de cada cilindro se etiquetaron poniendo la fecha de colado, mezcla del espécimen (Control, MN 1:2 o MN 1:3), después de esto se procedió a curar los cilindros de mortero. El curado que se le dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C511, 2013).

3.7. Curado de especímenes

El almacenaje inicial de los especímenes debe ser en el lugar donde fueron elaborados, después de haber hecho el acabado de la superficie se debe cubrir para evitar la pérdida de agua (NMX-C-148-ONNCCE, 2010) (ASTM C515, 2003).

El desmolde de especímenes debe efectuarse en no menos de 20 h, ni más de 48 h, para el caso de los morteros elaborados con mucílago de nopal, se dejaron por más de 48 h, ya que se esperó a que el cementante terminara su hidratación y que finalmente el mortero alcanzara dureza. El lugar donde se curaron las probetas, fueron cubetas de 19 L para los morteros Control, y en una pileta para los morteros de mucílago, se mantuvieron sumergidos en agua hasta el día de prueba.

3.8. Evaluaciones al mortero endurecido

Las pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido se pueden clasificar en no destructivas y destructivas. En esta investigación las no destructivas fueron: Densidad, Resistividad eléctrica, Medidas de propagación del pulso ultrasónico y las destructivas corresponden a Compresión simple, Flexión, Tensión directa y



Tensión por compresión diametral. Todos los morteros (Control, MN 1:2 y MN 1:3) se probaron a 90 y 180 días en pruebas no destructivas; a 7, 28, 45, 90, 120, 150, 180 y 300 días, para pruebas destructivas.

3.8.1. Pruebas no destructivas

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

3.8.1.1. Densidad

La prueba de densidad se realizó en cinco especímenes cúbicos de cada mezcla (Control, MN 1:2, MN 1:3), se siguió el procedimiento que marca el manual de Análisis de Materiales, de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH (Navarro Sánchez, et al, 2011).

Equipo

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



Procedimiento

1. Los especímenes se sacan de los recipientes de curado y se enumeran, posteriormente se secan superficialmente con una franela, se pesa y se registra su masa como (M).
2. Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana, se deja 10 min para la estabilización del agua, posteriormente se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada



Figura 55. Determinación de la densidad (Villanueva Guzmán, 2016)

hasta que se escurra totalmente (Fig. 56); transcurridos 10 min de desalojo del agua, se anota el volumen de agua desalojado como el volumen (V) del espécimen.

Cálculos

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

Donde:

D = densidad en g/cm^3

M = masa del espécimen en g

V = volumen del espécimen en cm^3

3.8.1.2. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una prueba no destructiva que se realiza a los especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos. La resistividad eléctrica (también conocida como resistividad, resistencia eléctrica específica o resistividad de volumen) cuantifica la fuerza con la que se opone un material dado al flujo de corriente eléctrica. Una resistividad baja indica un material que permite fácilmente



el movimiento de carga eléctrica, es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad (Glosario Técnico, 2016).

Equipo

- Resistómetro
- Flexómetro o Vernier
- Esponjas

Procedimiento

1. Se mide la muestra. A los cubos se les 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 ajusta el amperímetro y el voltímetro y se monta la probeta en el resistómetro. Los cubos se acomodan de acuerdo al lado que tenga menos imperfecciones, no por la cara de colado (Fig. 57). En los prismas y los cilindros se colocan las placas a cada extremo de su longitud.
3. Se verifica que haya contacto de los caimanes con las placas metálicas, y que las placas hagan buen contacto con la probeta a ensayar.
4. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente específica, (I).
5. Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato.



Figura 56. Determinación de la resistividad eléctrica (Villanueva Guzmán, 2016)



Cálculos

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

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

Donde:

ρ = resistividad eléctrica (ohm-cm)

R_e = resistencia eléctrica (Volts)

A = área transversal del espécimen (cm²)

L = longitud del espécimen (cm)

Especificaciones

Tabla 17. Parámetros de evaluación (Red Durar, Durabilidad de la armadura, 2000)

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

3.8.1.3. Medidas de propagación de pulsos ultrasónicos o Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Se realiza ésta prueba para determinar la homogeneidad del mortero en este caso y determinar la presencia de vacíos (fallas internas). Primeramente se determina las dimensiones y las masas de las probetas para usarlos posteriormente.

La propagación de pulso ultrasónicos 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 (ASTM C597, 2009). Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad



promedio de la propagación de la onda (RED DURAR (Durabilidad de la armadura, 2000).



Figura 57. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico (González Castro, 2016)

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de

conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9µs; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1µs; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor (Fig. 58), 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.

Para la realización de la prueba, solo son necesarias 10 pulsaciones y el equipo realiza el promedio. Las probetas tienen que estar humedecidas para que no haya variación de los resultados. La velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

Tabla 18. Parámetros de evaluación en propagación de pulso ultrasónicos (Red Durar, Durabilidad de la armadura, 2000)

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



3.8.2. Pruebas destructivas

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

3.8.2.1. Resistencia a la compresión simple

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

Se probaron probetas cúbicas de 5 cm de lado utilizando la maquina Tinius Olsen. Se probaron 5 especímenes de cada mezcla (Control, MN 1:2, MN 1:3) a las edades de 7, 28, 45 y 90 días, promediando los 5 resultados obtenidos. Las edades tardías (120, 150, 180 y 300 días) se probaron en una prensa hidráulica con capacidad de carga de 50 ton, ubicada en la parte de corrosión.

Procedimiento

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



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

Figura 58. Compresión simple en morteros
(Bautista León, 2015)



Cálculos

$$R = \frac{W}{A} \quad (16)$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión (kgf/cm²)

W = Carga de ruptura de la muestra (kgf)

A = Área de la muestra (cm²)

3.8.2.2. Resistencia a la flexión

Se realiza este ensayo para conocer el comportamiento del mortero bajo esfuerzos de flexión (ASTM C348, 1997), en prismas de 40 x 40 x 160 mm (NMX-C-159-ONNCCE, 2004). La longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de $\pm 2\%$. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, etcétera (NMX-C-191-ONNCCE, 2015).

Se probaron 5 especímenes de cada mezcla (Control, MN 1:2, MN 1:3) a las edades de 7, 28, 45, 90, 120, 150, 180 y 300 días, promediando los 5 resultados obtenidos.

Procedimiento

1. Se marcó cada prisma a 2 cm de cada extremo y se aplicó la carga en el centro del claro (Fig. 59).
2. Se colocaron los prismas sobre los soportes adecuados para esta prueba y se aplicó carga de manera gradual para evitar el impacto (ASTM C293, 2002) (ASTM C348, 1997).



Figura 59. Aplicación de carga al centro de la viga (Bautista León, 2015)



Cálculos

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

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (17)$$

Donde:

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

P = Carga máxima aplicada (N) ó (kgf)

L = Distancia entre apoyos (cm)

b = Ancho promedio del espécimen (cm)

d = Peralte promedio del espécimen (cm)

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en liornas del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará con la ecuación 18.

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

Donde:

R = Módulo de ruptura (kgf/cm²)

P = Carga de ruptura (kgf)

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

b = Ancho promedio (cm)

d = Peralte promedio (cm)

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



3.8.2.3. Resistencia a la tensión directa

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

Procedimiento

1. Se tomaron las medidas de la sección media de la briqueleta (ancho y espesor).
2. Se niveló el equipo y se colocó la briqueleta en las mordazas.
3. Se aplica la carga en velocidad constante, poniendo municiones y otros elementos para hacer la tensión hasta que la briqueleta fallara (Fig. 60).
4. Después de que el espécimen haya fallado, se retiraron las municiones y se procede a tomar la lectura de su masa, con una balanza o báscula que tenga una aproximación de 0.1 g, para conocer la carga que soportó la sección media de la briqueleta.



Figura 60. Ejecución de la prueba de tensión directa (Bautista León, 2015)

Cálculos

$$R = \frac{Mm * 50}{Sm} \quad (19)$$

Donde:

R = resistencia a la tensión (kgf/cm²)

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

Sm = Sección media de la briqueleta (cm²)

50 = constante del equipo



3.8.2.4. Resistencia a la tensión indirecta

Esta prueba se realizó en los especímenes de forma cilíndrica (5 cm x 10 cm). Fueron 5 probetas por cada edad y mezcla, se realizó esto después de las evaluaciones no destructivas.

Equipo

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

Procedimiento

1. Se sacan las probetas de los recipientes de curado, en cada extremo de los especímenes se trazan líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure estén en el mismo plano axial.
2. Se toman las medidas de cada una de las probetas (longitud y diámetro).
3. Se coloca el cilindro de forma perimetral sobre la platina, en la parte inferior del cilindro se pone una tira de cuero y también en la parte superior, encima va la placa de acero para que la carga se aplique de manera uniforme a toda la superficie del cilindro (Fig. 61).
4. Se aplica una velocidad lenta y constante de carga para evitar que la falla sea por impacto (Fig. 62) y se toma la lectura de la carga de falla.



Figura 61. Prueba de tensión indirecta (López Regalado, 2015)



Figura 62. Fallas de las probetas evitado que sea por impacto (Bautista León, 2015)



Cálculos

$$T = \frac{2P}{dL\pi} \quad (20)$$

Donde:

T = resistencia a tensión indirecta (kgf/cm²)

P = carga aplicada máxima (kgf)

L = longitud (cm).

d = diámetro (cm).

3.8.2.5. Adherencia

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



Figura 63. Determinación de la resistencia al despegue con el equipo Pull-off (Bautista León, 2015)

Para llevar a cabo esta prueba se tuvo que diseñar una losa de concreto de 1 m² x 7 cm, que sirvió como base para colocar las diferentes mezclas. Cuando llegó el momento de prueba se tenía que hacer perforaciones en las mezclas colocadas en la losa de concreto, se pudo realizar esto con ayuda de una cortadora en forma cilíndrica de 5 cm de diámetro. Después se usó un adhesivo epóxico (Sikadur 31-

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

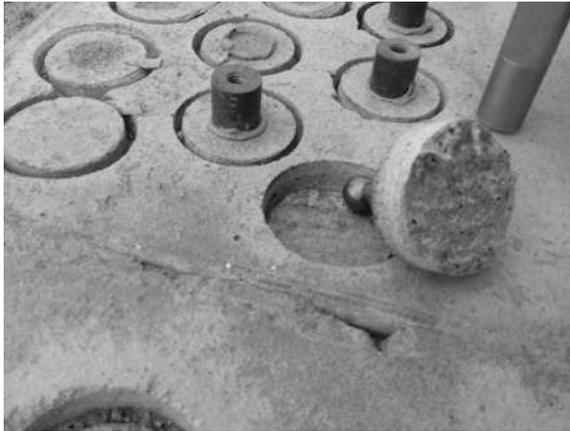


Figura 64. Falla de la base donde el mortero está pegado (Bautista León, 2015)

El procedimiento es sencillo, se nivela el equipo, se acopla un tornillo con pequeña esfera en la parte superior al Dólis, y se comienza a aplicar la carga haciendo girar una palanca acoplada al Pull-off (Fig. 64), después de varios segundos, puede apreciarse que el mortero o la base a la que está pegada ha fallado (Fig. 65). El equipo da los resultados en MPa.

Existen cuatro tipos de fallas que puede obtenerse (ASTM C1583, 2004). Tienen que presentarse tres fallas iguales para poder determinar la resistencia.

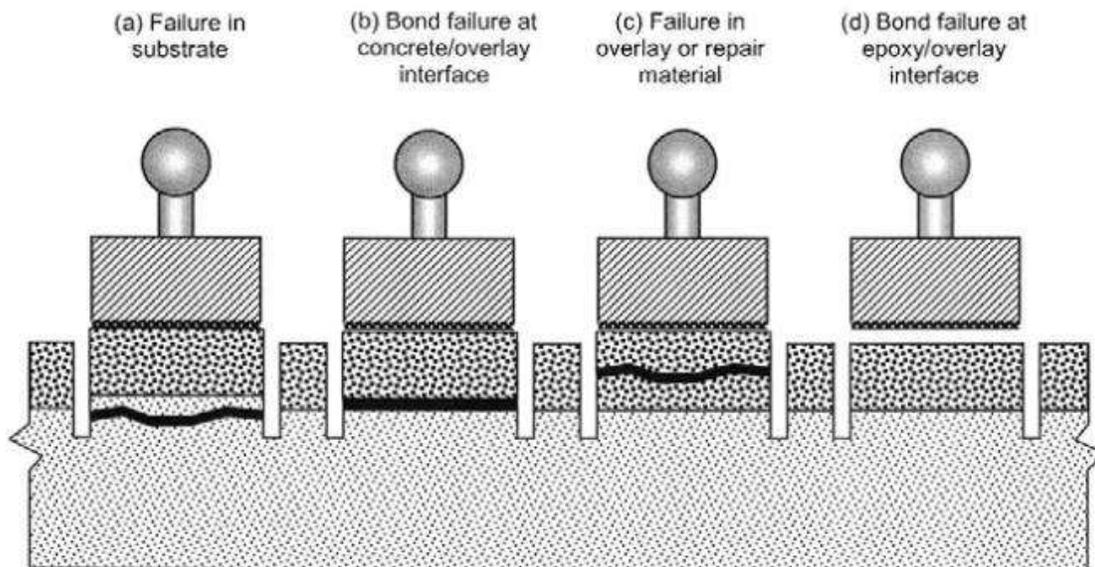


Figura 65. Posibles fallas de adherencia (ASTM C1583, 2004)

3.8.3. Pruebas de durabilidad

La infraestructura de concreto reforzado actualmente está sufriendo un deterioro acelerado, en muchos casos sin haber cumplido con la vida útil para la cual fue diseñada, todo esto conlleva a un impacto económico negativo significativo (Ramirez Arellanes, et al, 2012). Es por ello que resulta necesario calcular tanto el



tiempo en que pueden llegar a un riesgo de falla, así como decidir el momento óptimo para iniciar su rehabilitación. A la vez es importante establecer el tipo de mantenimiento al que debe someterse la infraestructura, sujeta a ciertas condiciones ambientales, ya que el ambiente es un factor muy importante para su durabilidad (López Celis, y otros, 2006).

Las causas químicas: ataque por sulfatos, ácidos, mar, agua, y también por cloruros, que inducen corrosión electroquímica del refuerzo de acero, tiene lugar con la masa de concreto, el agente atacante debe ser capaz de penetrar en todo el concreto, que por lo tanto tiene que ser permeable. La permeabilidad es, por lo tanto, de interés crítico. El ataque es ayudado por el transporte interno de agentes por difusión debido a gradientes internos de temperatura y por ósmosis (Neville, 2010).

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

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

El ataque por sulfatos se manifiesta por la pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Los productos expansivos generan agrietamientos por donde posteriormente ingresan otros agentes que pueden acelerar el deterioro, como por ejemplo, los iones cloruro.

Equipo

- Botes de 19 L
- Horno, mezclador eléctrico
- Sulfato de sodio (Na_2SO_4)
- Agua
- Cucharones, balanzas
- Charolas, recipientes
- Probetas cúbicas de 5 cm x 5 cm x 5cm



Procedimiento

1. Se secan las probetas cúbicas a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 24 h.
2. Se preparó la solución de sulfato de sodio, mezclando 350 g de sulfato y 1 litro de agua. Se agitó constantemente durante 1 h, y se dejó enfriar por 24 h (Fig. 66). Se prepararon dos botes de 19 L de solución, para poder llevar a cabo 5 ciclos de inmersión.
3. En esta prueba son sometidos 18 cubos, se registró el peso inicial de todos, a tres se les hizo pruebas físico-mecánicas (Resistividad eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Gravedad específica, Densidad y compresión), estos fueron testigos de la mezcla, ya que no fueron sometidos a sulfato.
4. En una charola se colocaron todos los cubos, incluyendo los probados, para que se secaran a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Después de 24 h, se llevó a cabo la inmersión de las 15 probetas restantes.
5. En un recipiente se puso una rejilla, sobre esta, se colocaron los 15 cubos, y se le añadió la solución de sulfato de sodio, dejando el nivel 2 cm arriba de los cubos, durante menos de 16 h y no más de 18 h (NMX-C-075-ONNCCE, 2006).
6. Transcurrido el tiempo de inmersión se sacaron los cubos y se dejaron escurrir 15 min, para posteriormente se hicieran las pruebas físico-mecánicas nuevamente. Después de las pruebas se introducen al horno todos los especímenes, después de 24 h se obtuvo su peso, y se sometieron a inmersión.
7. Fueron 5 ciclos de inmersión y secado, sin contar los cubos testigos de la mezcla.



Figura 66. Preparación de solución de sulfato de sodio (Bautista León, 2015)



8. Al término de los ciclos las probetas sufrieron afectación en las orillas.

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



Figura 67. Probetas de la mezcla “Control” en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015)



Figura 68. Probetas de la mezcla “MN 1:2” en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015)



Figura 69. Probetas de la mezcla “MN 1:3” en el último ciclo, después de la prueba de compresión (Bautista León, 2015)

3.8.3.2. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros

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

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

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



Procedimiento

1. Se elaboraron cilindros de mortero de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, cumplida la edad de prueba (180 días), se cortaron en pastillas de 5 cm de espesor manteniendo el diámetro. Paralelo a esto, se hierve la cantidad de agua necesaria para la prueba, durante 15 min con el objetivo que esté libre de aire. Se procede a dejarla enfriar y colocarla a un lado del desecador.
2. Se proceden a poner 3 pastillas dentro del desecador. Se limpia el sello o empaque del desecador y se procede a humedecerlo completamente con vaselina. Se coloca la tapa al desecador, en seguida se conecta una manguera con un extremo conectado a una bomba de vacío y el otro a una de las válvulas del desecador. Se extrae el vacío entre 10 a 15 min.
3. En seguida se cierra la válvula conectada a la bomba, y se deja la experimentación durante 3 h.
4. Se preparó solución con 1 L de agua destilada por 30 g de NaCl de grado técnico.
5. Se preparó solución con 1 L de agua destilada por 12 g de NaOH de 97% de pureza.
6. Se procede a introducir el agua libre de aire conectando una segunda manguera a la válvula opuesta del desecador y colocando el otro extremo de la manguera dentro del recipiente. Se procede a abrir la válvula, lo que generará que el agua fluya hacia el desecador (por el vacío generado dentro del desecador) hasta cubrir totalmente las muestras, dejando un tirante de agua por encima de ellas. Esto se hace sin permitir que entre aire al desecador.
7. Se revisa que estén cerradas ambas válvulas antes de prender la bomba, con el motivo de que no absorba agua la bomba de vacío. Se abre la válvula de la manguera que está conectada a la bomba para generar vacío por 1 h.



8. Se desconecta la bomba y se quitan las mangueras, para inmediatamente después abrir una de las válvulas lentamente para que entre aire al desecador. Dejando los especímenes dentro del desecador durante 18 h.
9. Transcurridas las 18 h se extraen las muestras del desecador para colocarlas en las celdas de cloruros, colocando los empaques en los bordos del espécimen recubiertos con vaselina, para que no haya desprendimiento de sustancias al momento de probarlas. Las celdas se sujetan con tornillos que están en las cuatro orillas para confinar el espécimen.
10. Con ayuda de un embudo, se llenan completamente las celdas. Se conectan las terminales (positivo y negativo) a la fuente de carga, además, de conectar un cable que servirá como medidor de temperatura, en donde está contenido el Hidróxido de Sodio (NaOH).
11. Se conecta la fuente de carga y se inicia el programa en la computadora para tomar las medidas de cada espécimen.
12. El proceso se lleva a cabo y será hasta transcurrido las 6 h cuando el programa mismo muestre los resultados en los diferentes íconos que contiene.

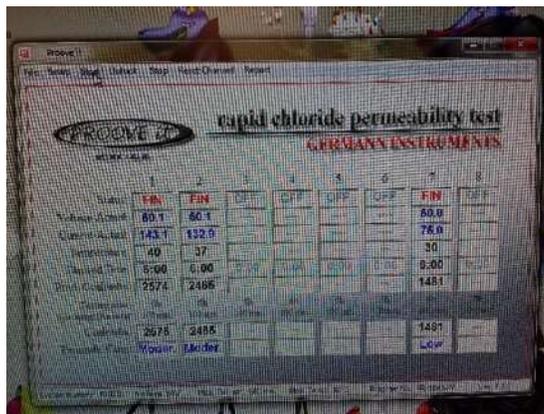


Figura 70 Esquema del programa PROOVE it, análisis de resultados.

Tabla 19. Tipos de permeabilidad (ASTM C1202)

Coulombs	Tipo de permeabilidad	Tipo de relaciones a/c
>4000	Alta	Relaciones a/c altas
4000 – 2000	Moderada	Relaciones a/c de 0.4 a 0.5



2000 – 1000	Baja	Relaciones a/c menores de 0.4
1000 – 100	Muy baja	Concreto modificado con látex
< 100	Despreciable	Concreto polimérico

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

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

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

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

Se debe tener controlados las temperaturas cuando se estén probando las



Figura 71. Pruebas después de hielo-deshielo (Bautista León, 2015)

muestras; deberán bajar de 4°C a -18°C, y para el caso de deshielo deberán de incrementarse de -18°C a 4°C, en no menos de 5 h.

Los especímenes empleados para esta prueba deberán de ser de forma de prisma o cilindro, elaborados y curados conforme a lo que rige la norma (ASTM C192/C192M, 2016) y (ASTM C490, 2011). Los



especímenes utilizados no deberán de ser menores a 75 mm ni mayor a 125 mm de ancho, espesor o diámetro, tampoco podrán de ser menores de 275 mm o ni mayores de 405 mm de longitud (ASTM C666, 2015).

Procedimiento



Figura 72. Prueba de frecuencia de resonancia (Bautista León, 2016)

1. Se elaboraron probetas prismáticas de 6 cm x 6 cm x 26 cm (sin especificación de norma), ya que fueron las del único tamaño que se pudo realizar en el laboratorio. Fueron tres prismas por mezcla y se mantuvieron curados durante 180 días (edad de prueba para esta investigación).
2. Días antes se monitoreó el refrigerador industrial que se utilizó para que cumpliera a -18°C .
3. Cumplidos los 180 días, se inició con el ciclo cero, haciéndoles evaluaciones de: masa superficialmente seca, resistividad eléctrica, velocidad de pulso, frecuencia de resonancia, así también lecturas de ancho, espesor y longitud (Fig. 72 y Fig. 73).



Figura 73. Probetas listas para ser introducidos al frigorífico durante 4 h (Bautista León, 2016)



4. Se colocaron las probetas en un recipiente (tres de cada mezcla, tres recipientes) y se llenaron con agua hasta tener un tirante de 2 cm por encima de los especímenes (Fig. 74).
5. Se introdujeron los recipientes al refrigerador durante 4 h, transcurrido este tiempo se sacan los especímenes del refrigerador y se toma su temperatura, se tomaran de nuevo sus medidas y las pruebas del ciclo cero.
6. Después se introdujeron al refrigerador por 4 h, enseguida se les hacen las mediciones y así sucesivamente, durante 15 ciclos (ciclo 0 al ciclo 14).

Entre el ciclo 5 y 8, surgía acumulación de hielo, se retiraba del recipiente y se sustituía por agua. Los resultados a analizar fueron la linealidad de la frecuencia de resonancia.

Por otro lado, el dato obtenido de frecuencia de resonancia, se puede utilizar para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el módulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en prismas o cilindros de concreto, es decir, para la detección de cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámico de las muestras de



Figura 74. Probetas envueltas de hielo en el ciclo seis (Bautista León, 2016)

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

3.8.3.4. Carbonatación

El fin de esta prueba es cuantificar el daño que sufren por contaminante ambientales, como el CO_2 , las estructuras de concreto armado y/o con recubrimiento de mortero (Villanueva Guzmán, 2016). Desde el punto de vista químico, la carbonatación del concreto origina la disminución de pH que ocurre cuando el CO_2 del medio ambiente penetra por la red de poros capilares



reaccionando con la humedad presente y convirtiendo el hidróxido de calcio (de pH elevado) a carbonatos, los cuales son neutros, reduciendo por consiguiente, la alcalinidad del concreto.

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

La fenolftaleína (C₂₀H₁₄O₄) es un indicador de color (de rojo a incoloro) al pasar de pH alcalino a neutro. En caso concreto de los morteros, la aplicación de fenolftaleína produce color rojo vinoso intenso cuando el mortero está fresco y predomina como base mineral la portlandita (medio alcalino) e incoloro cuando la fase predominante es la calcita (medio neutro). Así el proceso de carbonatación se manifiesta como una corona incolora que avanza hacia el núcleo desde la parte externa de la probeta.

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

Procedimiento

Se realizó una solución de trabajo reactiva, la cual está constituida por 1 g de Fenolftaleína, 49 g de alcohol grado 96 y 60 g de agua destilada. Se parte el espécimen (prisma de 4x4x16 cm) con un mazo para obtener el resultado de una parte que no estuvo expuesta su cara de manera directa (Fig. 75). Después se le rocía la solución sobre el espécimen y se deja reaccionar por 1 min. La parte que no se tiñe de color purpura es la que se encuentra “carbonatada” (Fig. 76), nos



indica que su valor de pH está por debajo de 9, por lo cual ya se podría generar a esa profundidad el fenómeno de corrosión. Se toman 4 lecturas de las profundidades de carbonatación para obtener un promedio del espécimen y se hace por triplicado esta prueba.

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

$$\text{Carb} = \frac{\text{Prof}_{\text{prom}}}{\sqrt{T_{\text{cte}}}} \quad (21)$$

Donde:

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

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

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

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

$$T_{\text{cte}} = \frac{T_{\text{Prueba}}}{T_{\text{Año}}} \quad (22)$$

Donde:

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

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

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

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

$$\text{Carb}_n = \text{Carb} * T_n \quad (23)$$

Donde:

Carb_n = carbonatación proyectada al año “n”, en mm

Carb = proyección de carbonatación promedio, en mm/año



T_n = edad “n”, en años



Figura 75. Exposición de probetas a la intemperie (Bautista León, 2015)



Figura 76. Aplicación de fenolftaleína para verificar la carbonatación (Bautista León, 2015)

3.8.3.5. Absorción capilar

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

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



Procedimiento

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



Figura 77. Sumergido de probetas para iniciar la prueba (Bautista León, 2015)



Figura 78. Probetas en prueba de absorción capilar.

2. Después de esto se cubrieron las caras laterales (cuatro caras) con parafina de un espesor aproximado de 3 mm, para evitar que absorbieran agua por estas caras y sólo fuera por la cara inferior, se pesaron los especímenes con parafina y esta se nombró como masa seca inicial (W_0), para después sumergirlos en un recipiente sobre una esponja (Fig. 79), con un tirante aproximado de 2 a 3 mm, referenciado desde la parte inferior de las probetas.
3. Se tomaron las primeras lecturas de la masa a 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, después se tomaron las lecturas de la masa por el periodo de 24 h. Se deja de hacer esto hasta haber logrado masa constante.



Figura 79. Toma de lecturas de peso, procurando usar siempre el mismo equipo (Bautista Leon, 2015)



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

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

Cálculos

$$K = \frac{\sum \frac{(w_t - w_0)}{A_0}}{\sum \sqrt{t}} \quad (24)$$

Donde:

W_t = masa del espécimen en el tiempo en dónde se nota un cambio de pendiente, (kg)

W_0 = masa del espécimen seco, (kg)

A_0 = área de contacto del cubo, (m^2)

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

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

$$m = \frac{t}{Z^2} \quad (25)$$

Donde:

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

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

m = pendiente de los primeros valores de absorción capilar, (s/m^2)



$$\varepsilon = \frac{K \times \sqrt{m}}{10} \quad (26)$$

Donde:

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

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

ε = porosidad efectiva, (%)

Con la información anterior la absorción capilar, S, se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (27)$$

3.8.3.6. Porosidad total

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

Procedimiento

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

Cálculos

$$\varepsilon = \left(\frac{M_{\text{Húmedo}} - M_{\text{Seco}}}{M_{\text{Húmedo}} - M_{\text{Sumergido}}} \right) 100 \quad (28)$$

Donde:

ε = Porosidad total (%)



4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Agua

El agua empleada para la elaboración del mucílago, fue obtenida del Laboratorio Ing. Luis Silva Ruelas. En 2014 se le realizó un análisis el cual muestra que es apropiada para la elaboración de líquido de amasado y la realización del curado, ya que no posee un componente que pueda llegar a alterar la composición del mismo (Bernabé Reyes, 2015).

Tabla 20. Resultados de análisis de prueba

Muestra:	Red de agua potable de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo			
Sitio de muestreo:	Laboratorio de Materiales			
Fecha de muestreo:	Mayo 18, 2014			
Norma de referencia:	NMX-C-122-ONNCCE-2004			
Parámetro	Resultado	Límite permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidad	Método utilizado
pH	7.86	> 6	U pH	NMH-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-	°C	NMH-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-	ms/cm	NMH-AA-093-SCFI-2000
Sólidos disueltos totales	352	3500	mg/L	NMH-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno disuelto	3.37	-	mg/L	NMH-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMH-AA-074-SCFI-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMH-AA-073-SCFI-2001
Dureza cálcica	21	-	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico



4.2 Caracterización del cemento

4.2.1. Densidad

El valor obtenido de densidad del cemento empleado en esta investigación se mantiene en el valor estándar de la norma (NMX-C-152-ONNCCE, 2010).

Generalmente la densidad del cemento Portland es de aproximadamente 3.15. El cemento Portland con escoria de alto horno y los cementos Portland-puzolánicos pueden tener valores de densidad de aproximadamente 2.90. La densidad de un cemento no es indicador de la calidad del cemento; su uso principal se tiene en los cálculos de proporcionamiento de mezclas.

Tabla 21. Resultado de densidad del cemento (Bautista León, 2015)

Cemento	Densidad (g/cm ³)	Estándar (límites de aceptación)
CPC-30R-RS	3.05	2.9 - 3.15

4.2.2. Consistencia normal

Las mezclas que se estudiaron tienen una consistencia aceptable, es decir, se puede regular la cantidad de agua en las pastas y morteros, respectivamente, para que se utilicen en ensayos subsecuentes.

Tabla 22. Datos obtenidos de Consistencia normal (Bautista León, 2015)

Mezcla	Consistencia normal (%)	Consistencia normal (%)
Control	31	Valores frecuentes 23 - 33
MN 1:2	31.5	
MN 1:3	29	

4.2.3. Tiempos de fraguado

Los tiempos de fraguado indican si la pasta está o no sufriendo reacciones normales de hidratación, es decir, que el fraguado inicial no debe ser tan pronta y el fraguado final no debe ser muy tarde. Las tres mezclas estudiadas cumplieron con el estándar, pero la mezcla Control tiene valores menores, esto es porque no se le incluyó aditivo.



Tabla 23. Valores de tiempos de fraguado (NMX-C-177-ONNCCE, 2005)

Mezcla	Inicial	NMX-C-177-ONNCCE	Final	NMX-C-177-ONNCCE
Control	150	Inicial 90 mínimo	390	Final 1080 máximo
MN 1:2	570		900	
MN 1:3	315		840	

4.3 Arena

Se obtuvo la muestra representativa mediante el uso del cuarteador de arenas. En todas las pruebas realizadas a la arena durante esta investigación se ha homogeneizado totalmente. Los resultados mostrados en la Tabla 23 fueron promedios de tres muestras.

La arena estudiada es de absorción media, cumple con las reglas para uso ingenieril óptimo, son partículas durables, limpias, duras, libre de productos químicos, recubrimientos de arcilla y no son susceptibles a resquebrajarse, por lo tanto no afectan en la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

Se comportó como una arena con contenido de material fino aceptable y se obtuvo el resultado de colorimetría de 3, según la tabla de colorimetría no contiene mayor cantidad de materia orgánica.

Tabla 24. Resultados de la evaluación de la arena del banco “Joyitas” (Bautista León, 2015)

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

Análisis granulométrico

La granulometría cumple con lo que establece la norma mexicana, obteniendo un Módulo de finura de 2.54, lo cual está en el rango de 2.5 – 3. Esta arena tuvo



comportamiento aceptable en otras investigaciones, por lo tanto fue ideal para usarla en esta investigación.

Tabla 25. Análisis granulométrico de la arena del banco “Joyitas”

Malla	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
4	1	0	0	100
8	25	6	6	94
16	82	21	27	73
30	126	31	58	42
50	73	18	77	23
100	36	9	86	15
200	20	5	90	10
Charola	38	10	100	0
Suma	400	100	254.23	

Módulo de finura (MF) = 2.54

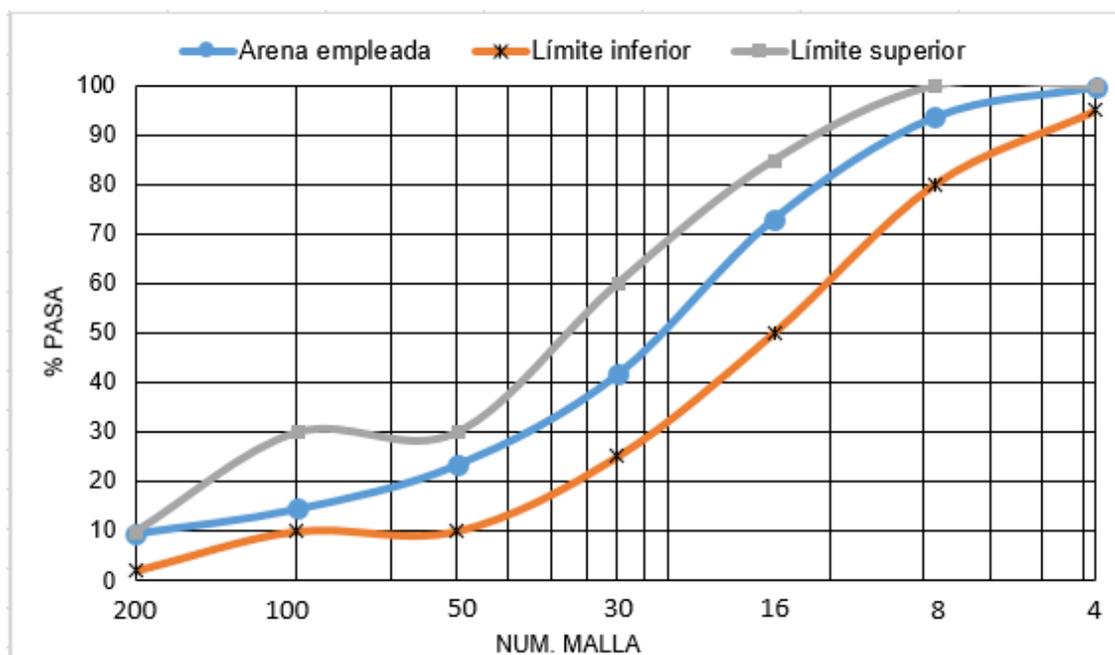


Figura 80. Distribución granulométrica de la arena empleada en la investigación (Bautista León, 2015)



4.4 Pruebas en mortero fresco

4.4.1. Fluidéz

La trabajabilidad de una mezcla de mortero tiene que ver con la facilidad de manejar la mezcla sin que produzca segregación, tiene que ver el tiempo en que la mezcla se puede trabajar sin que se seque, la facilidad de colocación y la capacidad que posee la mezcla para retener el agua aun estando en contacto con los tabiques u otros elementos constructivos absorbentes.

La prueba de fluidéz se relaciona más concretamente con lo fluido de la mezcla, como se muestra en la Tabla 24. A la mezcla que se agregó más aditivo fue el mortero MN 1:2, esto para alcanzar una trabajabilidad adecuada.

Tabla 24. Resultados de prueba de fluidéz

Mezcla	Cemento (g)	Arena (g)	Líquido de amasado (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluidéz (%)
Control	163.6	450	111.5	0.68	0	99
MN 1:2	163.6	450	111.5	0.68	1.64	96
MN 1:3	163.6	450	111.5	0.68	0.5	93

4.4.2. pH y temperatura

Los tres morteros mostraron valor de pH mayor a 7, lo que indica que tienen cierta alcalinidad, indicando que no existe presencia de bicarbonato (HCO_3) ni de Dióxido de carbono (CO_2), esto de acuerdo a las especificaciones de la Red Durar. Así también tuvieron una temperatura relativamente igual al del ambiente.

Cabe mencionar que se tomaron estos resultados al medio día al estar elaborando las mezclas.

Tabla 26. Alcalinidad de morteros y temperatura

Mezcla	pH	Temperatura (°C)
Control	13	15
MN 1:2	12	20.9
MN 1:3	12	20.3



4.5 Evaluaciones en el mortero endurecido

4.5.1 Pruebas no destructivas

4.5.1.1 Densidad

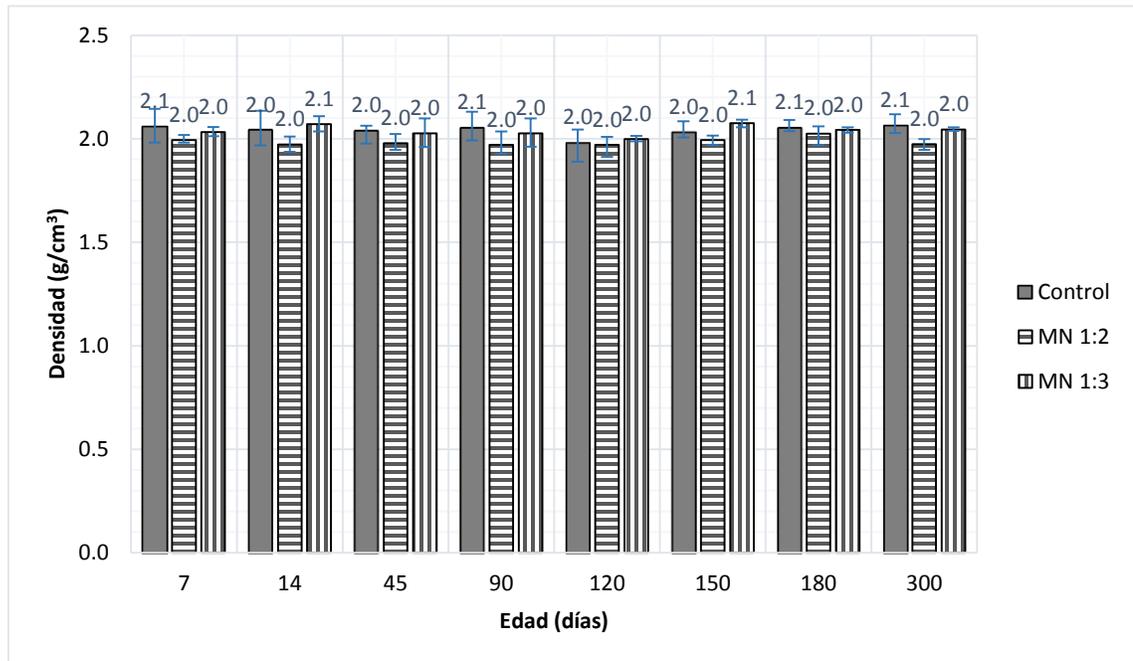


Figura 81. Densidad de los diferentes morteros estudiados

La densidad es la propiedad de flotabilidad de los materiales. El valor de densidad en morteros de buena calidad es de 2.1 g/cm^3 aproximadamente. Los morteros analizados tienen densidades arriba de 2 g/cm^3 . Los morteros Control y MN 1:3, fueron los que podríamos llamar materiales de buena calidad. Si se usaran en aplanados los morteros de mucílago, serían idóneos, ya que por ejemplo, los muros de ladrillo tienen densidades en el orden de 1.8 g/cm^3 .

4.5.1.2 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de durabilidad del material, cuanto más bajo es, indica un material que permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica. Desde el punto de vista de la construcción significa que puede penetrar cualquier agente que cause corrosión. Como criterio general se tiene que: $\rho < 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ alto riesgo de corrosión, $10 \text{ k}\Omega\text{-cm} < \rho < 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ riesgo moderado y $\rho > 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ poco riesgo.



De las mezclas estudiadas, el mortero MN 1:3, muestra buen comportamiento hasta la edad más tardía, superando a la mezcla control con 23 kΩ-cm (Fig. 84), clasificando a este mortero como un material con riesgo moderado a la corrosión.

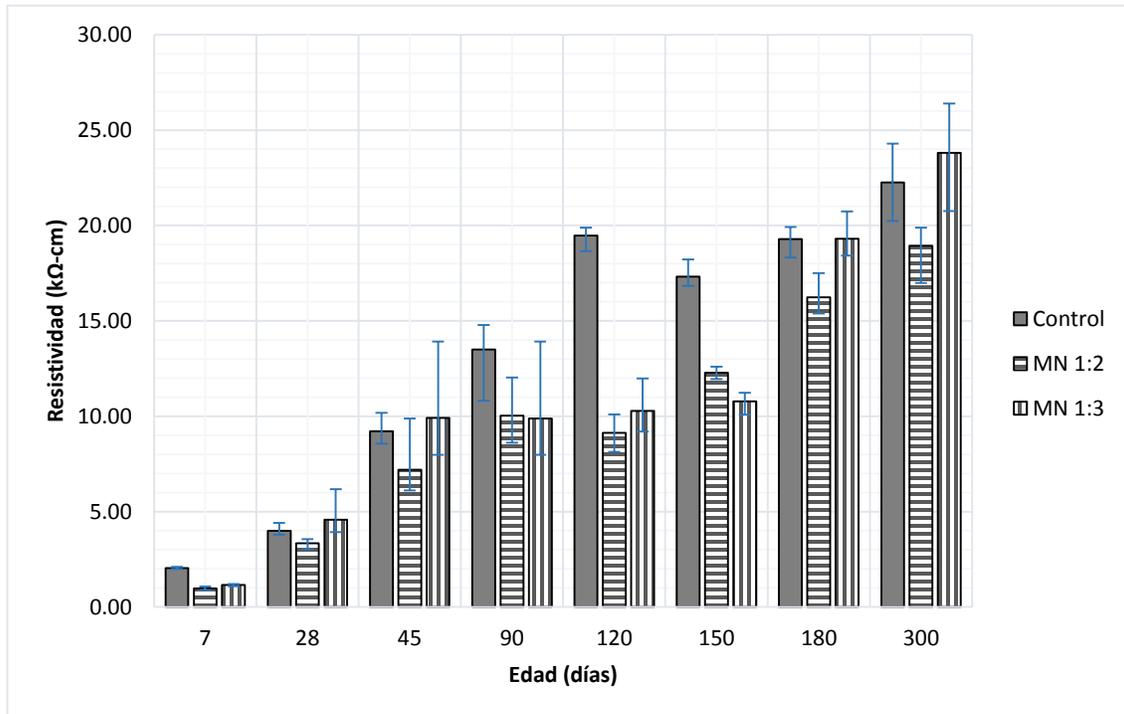


Figura 82. Resistividad en probetas cúbicas de todas las edades estudiadas

4.5.1.3 Velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos

Esta propiedad indica la porosidad del material, entre más alto sea el valor de velocidad de propagación significa que los componentes del material están bien distribuidos, tiene buena homogeneidad. Los parámetros de evaluación del concreto en la “Red Durar” establecen que la velocidad de pulso ultrasónico (v) depende de manera proporcional a la calidad del material, y las clasifica como, calidad deficiente $v < 2000$ m/s, calidad normal $2001 < v < 3000$ m/s, calidad alta $3001 < v < 4000$ m/s y como durable $v > 4000$ m/s.



Los valores de VPU de las tres mezclas fue ascendente hasta los 90 días, siempre por delante el MN 1:3. Se esperaba que los valores fueran creciendo pero tendió a ser lo contrario. Finalmente podemos decir que las mezclas de mucílago son durables, ya que superan los 4000 m/s de velocidad de propagación.

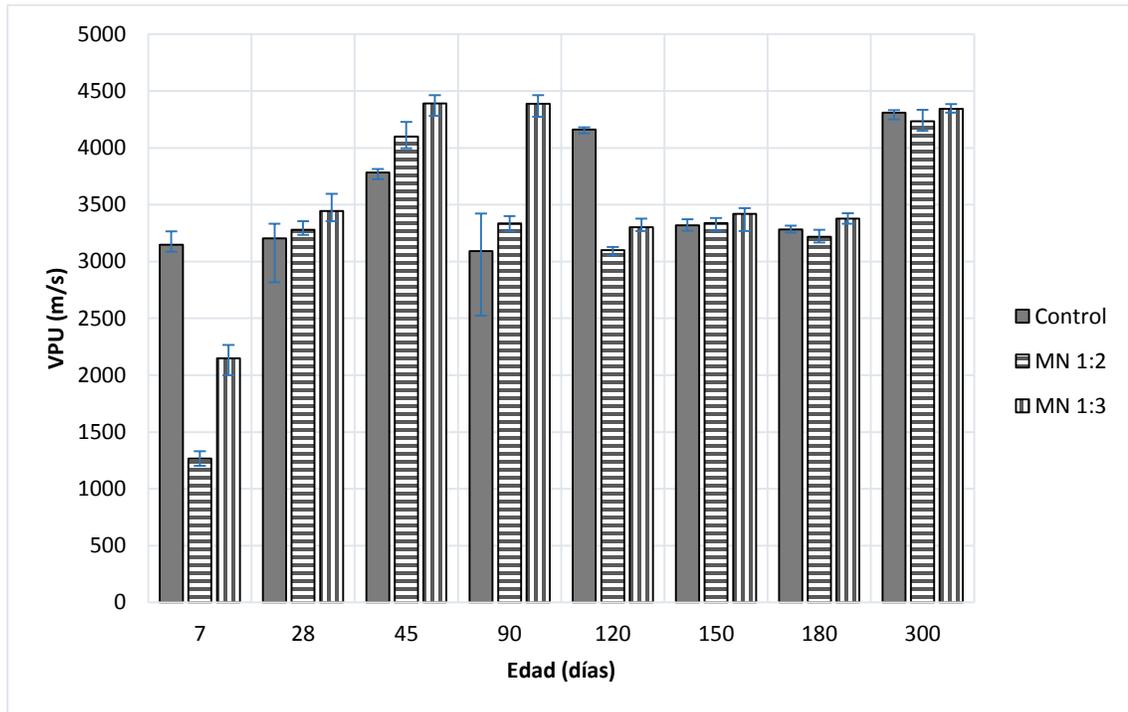


Figura 83. Velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos de las mezclas estudiadas

4.5.2 Pruebas destructivas

Un mortero bien hecho es un material naturalmente resistente y durable. La resistencia del concreto y/o mortero en el estado endurecido generalmente se mide por la resistencia a la compresión usando la prueba de resistencia a la compresión.

4.5.3.1 Resistencia a la compresión simple

La normativa establece que los morteros de albañilería sin adiciones deben alcanzar 4.4 MPa a 7 días, y 7.8 MPa a 28 días, como mínimo en ambos casos (NMX-C-021-ONNCCE, 2004).

La resistencia a compresión es una ubicación preferencial como método de valoración del concreto, ya que este es sobrellevado a esfuerzos de compresión. En las especificaciones del concreto la resistencia a los 7 días normalmente se



estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días.

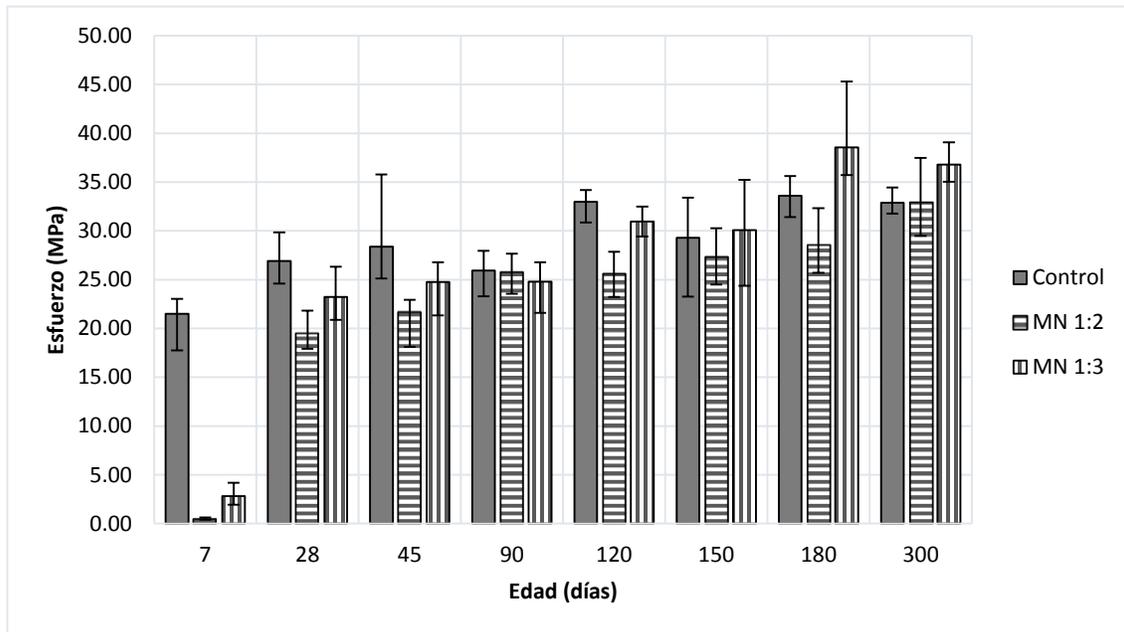


Figura 84. Compresión simple en probetas cúbicas

En la figura anterior puede observarse que los morteros están cumpliendo con lo establecido por la norma mexicana, pues todas las mezclas superan el valor de 7.8 MPa a los 28 días.

Hasta la edad de 90 días, las mezclas de mucílago fueron superadas por la mezcla Control, posteriormente la mezcla MN 1:2 adquiere un comportamiento ascendente llegando a los 33 MPa a los 300 días, mientras que la mezcla MN 1:3 tiende a descender a los 300 días, pero aun así, todavía supera con 4 MPa a la otra mezcla de mucílago. De acuerdo a la Figura 88, el mortero MN 1:3, mecánicamente es el mejor de las tres mezclas estudiadas,



4.5.3.2 Resistencia a la flexión

Existen especificaciones del concreto donde menciona que el esfuerzo a la flexión es de 0.7 a 0.8 por la raíz cuadrada del esfuerzo a compresión (Nasville, 1999). Las mezclas superan ese rango, el cual significa que tiene un alto grado de flexibilidad. El mejor comportamiento se presenta desde 150 hasta 300 días, por delante del mortero MN 1:3. Es importante mencionar que el mucílago en los morteros tarda en reaccionar con la matriz cementicia, es por eso que llegan a adquirir altas resistencias a edades tardías.

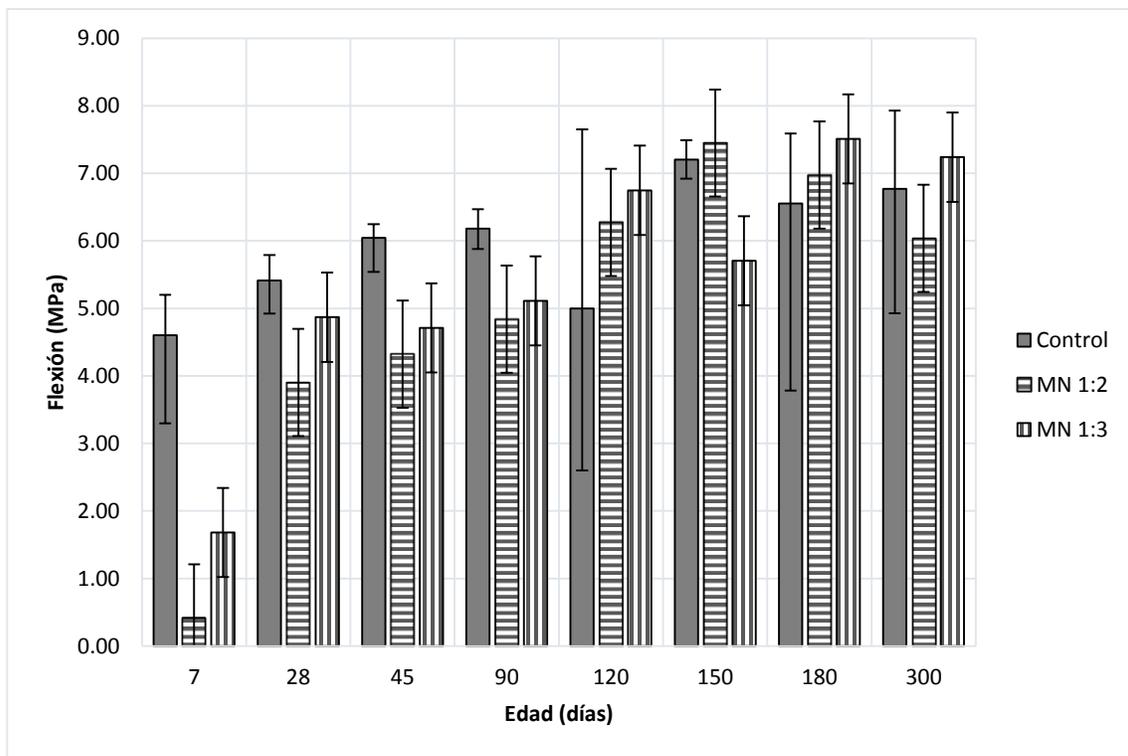


Figura 85. Esfuerzo de flexión en probetas prismáticas



4.5.3.3 Resistencia a la tensión directa

Este ensayo se realiza muy pocas veces, variando mucho la forma de las probetas según la máquina que se emplee, no estando normalizado en casi ningún país. La resistencia a la tensión directa del concreto varía entre 0.4 y 0.7 de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. Referenciando esto para los morteros estudiados, están superando ese rango, a partir de los 28 días empiezan a incrementarse los valores de las tres mezclas. Algo curioso es que el mortero MN 1:3 supera al mortero testigo por 0.4 MPa a la edad de 90 días, pero se invierte esto a los 150 días, superando la mezcla control con 1 MPa; se esperaba que la tendencia fuera ascendente. Esto tiene mucho que ver en la elaboración, las probetas de mucílago de 90 días pudieron tener buena compactación que las probetas de 150 días, otro caso pudo a ver sido que los nopales usados para 90 días tenían más mucílago que los de 150 días. Finalmente se puede aceptar que el MN 1:3 presenta mejor comportamiento en la prueba de tracción.

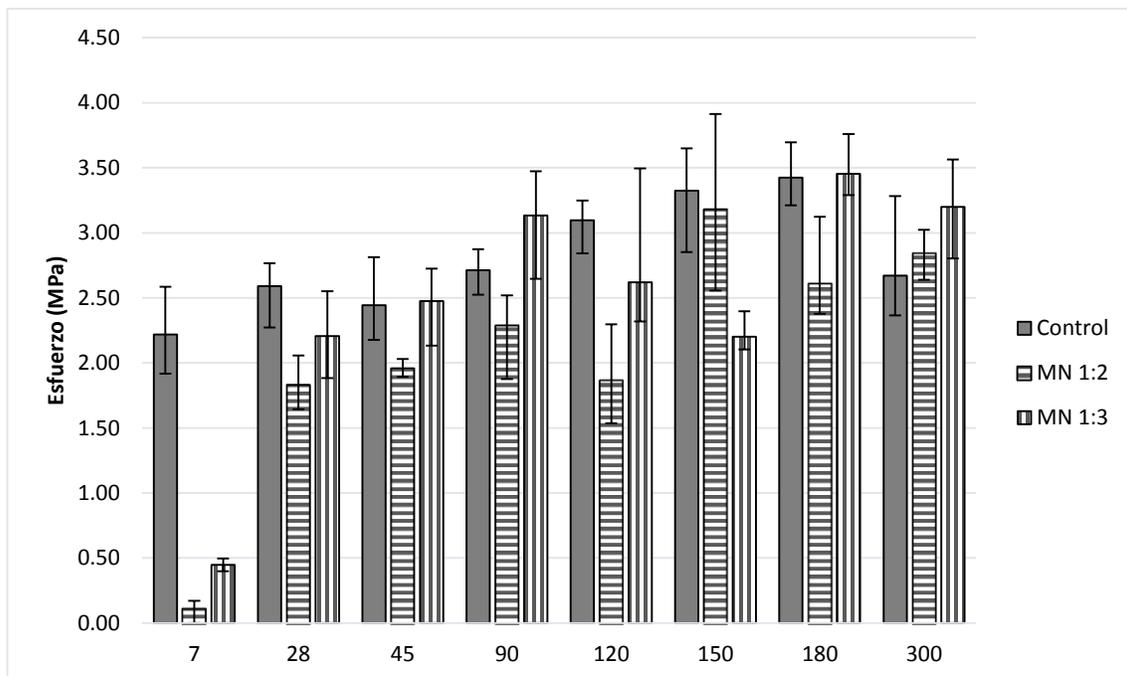


Figura 86. Gráfica de resultados de la prueba de tensión directa en probetas de mortero en forma de cacahuete.



4.5.3.4 Resistencia a la tensión indirecta

Los resultados en esta prueba debieron ser prácticamente similares a la de tensión directa, y en efecto, los valores resultantes están entre 2.5 y 3.5 MPa en general. La resistencia a tensión indirecta de acuerdo a especificaciones del concreto debe estar entre 0.4 y 0.7 de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. La única mezcla que cumple con este rango es la de Control, en todas las edades de prueba. Los morteros con mucílago, en la edad de 7 días, no cumplen con el rango. Esto, como se ha mencionado, el mucílago retarda el fraguado, por lo tanto, tarda en adquirir resistencia. De nueva cuenta, el mortero MN 1:3 a la edad de 90 días, sigue superando al mortero control y el otro mortero de mucílago. Después de los 90 días puede observarse que existe un ascenso y descenso de esfuerzos del mortero MN 1:3, esto debió ser por el cambio de equipo de prueba o la determinación peculiar de quien hacía las lecturas.

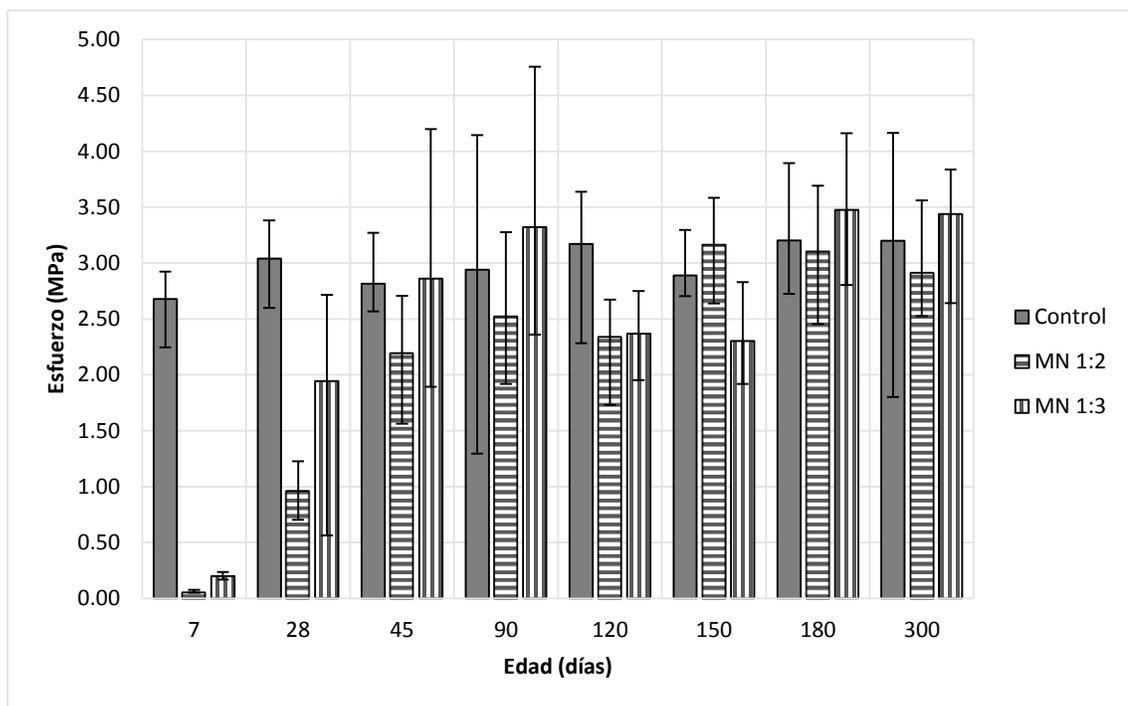


Figura 87. Resistencia a la tensión indirecta

4.5.3.5 Adherencia

La adherencia es tan importante ya que permite determinar la resistencia de morteros, es lógico que al transcurrir el tiempo, el mortero vaya perdiendo la



propiedad de permanecer adherido al ladrillo, roca, etcétera. Se tiene que a la edad de 120 días, el mortero Control y el mortero MN 1:3, presentan una resistencia arriba de 2 MPa, pero más tarde, a los 180 días, la mezcla Control reduce su resistencia a 0.55 MPa, mientras que los morteros con mucílago también reducen sus valores, pero se siguen manteniendo por encima de la mezcla Control.

En teoría, el mortero MN 1:2, debería tener buena adherencia ya que el líquido con el que fue elaborado era más viscoso, pero la red intermolecular que se forma en él, retiene mayor cantidad de agua y eso lo hace débil; en cambio el MN 1:3 retiene agua en menor cantidad permitiendo que alcance su rigidez total, entonces al intentar despegar el mortero se resistirá más, y esta resistencia se disminuirá lentamente a lo largo del tiempo.

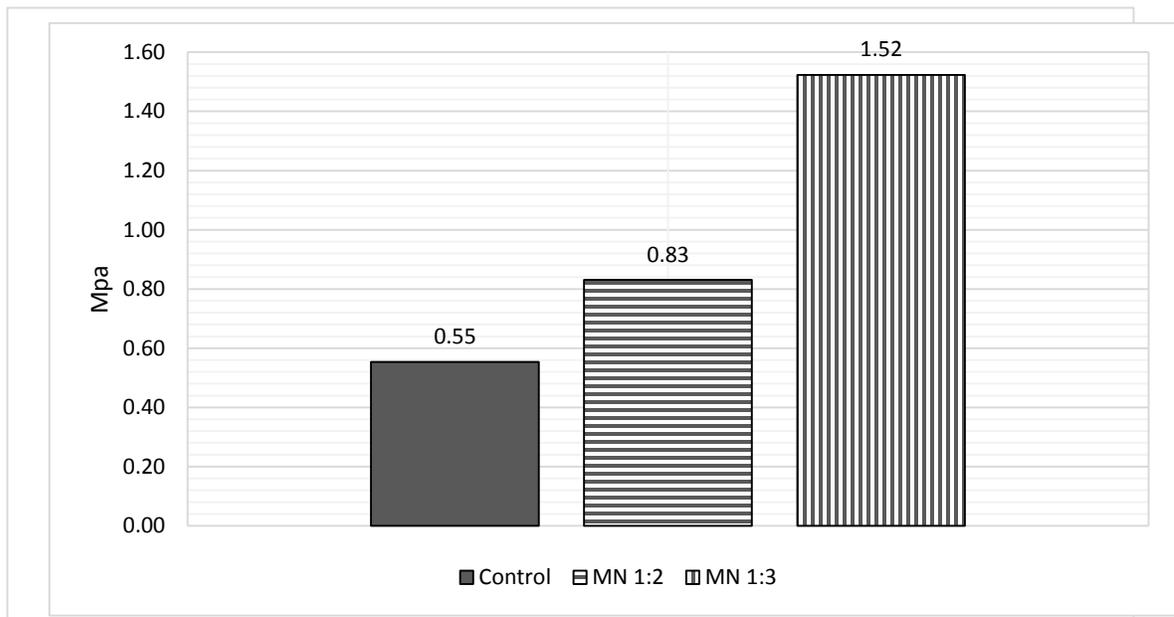


Figura 89. Adherencia a 180 días

4.6 Pruebas de durabilidad

La durabilidad es la resistencia de los elementos de concreto o mortero a la meteorización, los ataques químicos o cualquier otro proceso de deterioro. Un



elemento durable tiene en su matriz interna los agregados bien distribuidos, esto hará que conserve su calidad aunque este expuesto al medio ambiente.

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

Los sulfatos de sodio o potasio que están en la naturaleza, hará que los elementos de construcción se deterioren muy rápidamente, aún más los que están constituidos de agregados y cemento. Un ejemplo claro, son los elementos que están en contacto con el agua de mar (pilotes de concreto), estos deben tener el menor deterioro posible para poder resistir las cargas; que estén forrados con un material resistente a las sales para tener alta durabilidad. Si los materiales de protección o los elementos que tienen función estructural pierdan su masa, no podrá seguir haciendo su función, significa que los procesos de deterioro han avanzado.

Los morteros empleados tienen un comportamiento variable, ganan y pierden masa, lo que sucede es que por ejemplo, si la gráfica tiende a ser negativo, los poros internos se han llenado de sales, las probetas ganan masa; si tiende a ser positivo, esas sales se rompen porque las sales fueron cristalizadas, los morteros pierden masa.

La normativa mexicana hace referencia que los materiales sometidos a intemperismo acelerado no deben perder masa en más del 5 %. Se puede observar en el ciclo 5, para las dos edades de prueba, específicamente el MN 1:3, es el que pierde menos masa respecto a los otros morteros, es decir, la estructura interna de

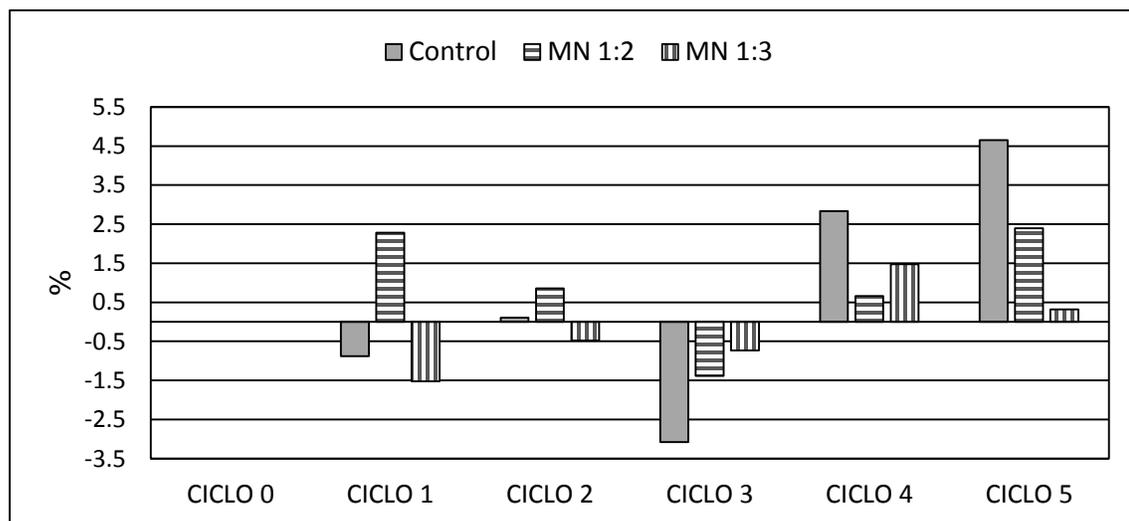


Figura 90. Pérdida de masa en probetas sometidas a intemperismo acelerado, 90 días



este mortero no es tan fácil de debilitar estando en contacto con agentes que deterioran.

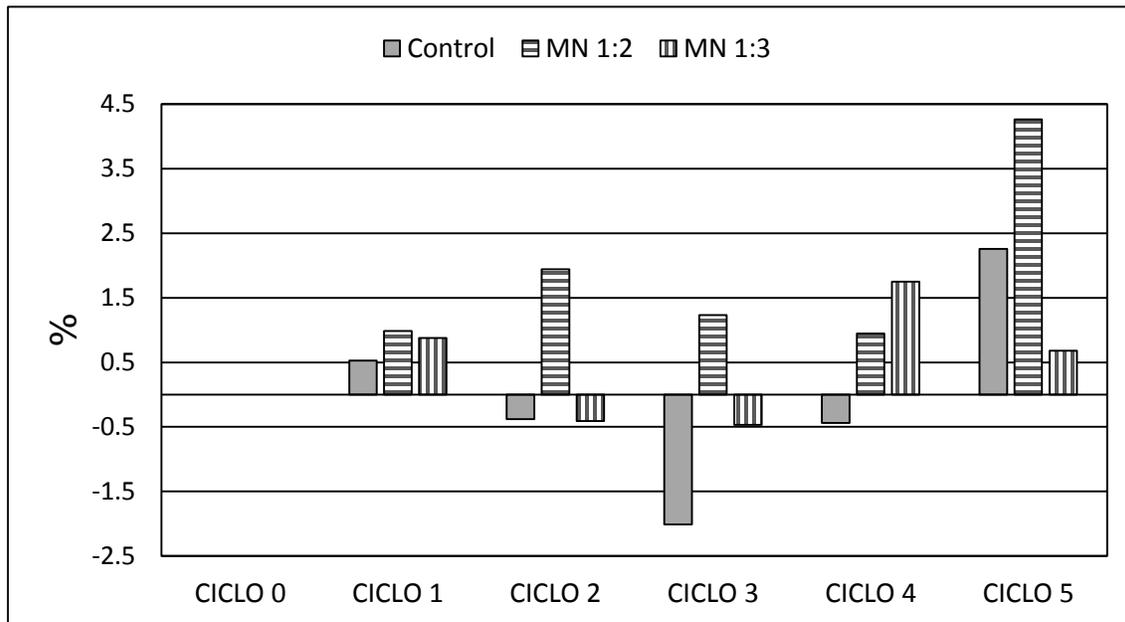


Figura 91. Pérdida de masa en probetas sometidas a intemperismo acelerado, 180 días

4.6.2. Permeabilidad rápida de cloruros

Se evaluó los morteros mediante la prueba de penetración de iones cloruro a través de un potencial eléctrico; los iones cloruro cargados negativamente (NaCl) migran hacia la solución de NaOH cargada positivamente. Entre más permeable sea el elemento en estudio, más iones cloruro viajarán a través del espécimen, y una mayor corriente será medida, la carga total después de 6 h de prueba es dada en Coulombs (C).

De acuerdo a las especificaciones del sistema PROOVE'it, para relaciones $a/c > 0.5$ presentan alta permeabilidad, con carga de más de 4000 C; $0.4 < a/c < 0.5$ son de moderada permeabilidad con carga de 2000 a 4000 C; para relaciones $a/c < 0.4$ son de baja permeabilidad con carga de 1000 a 2000 C; para concretos modificados con



látex son de baja permeabilidad con carga de 100 a 1000 C; los concretos poliméricos son de permeabilidad despreciable con menos de 100 C.

Referenciando este a los morteros estudiados, la mezcla Control y la mezcla MN 1:3 son de permeabilidad moderada, la mezcla MN 1:2 es de alta permeabilidad.

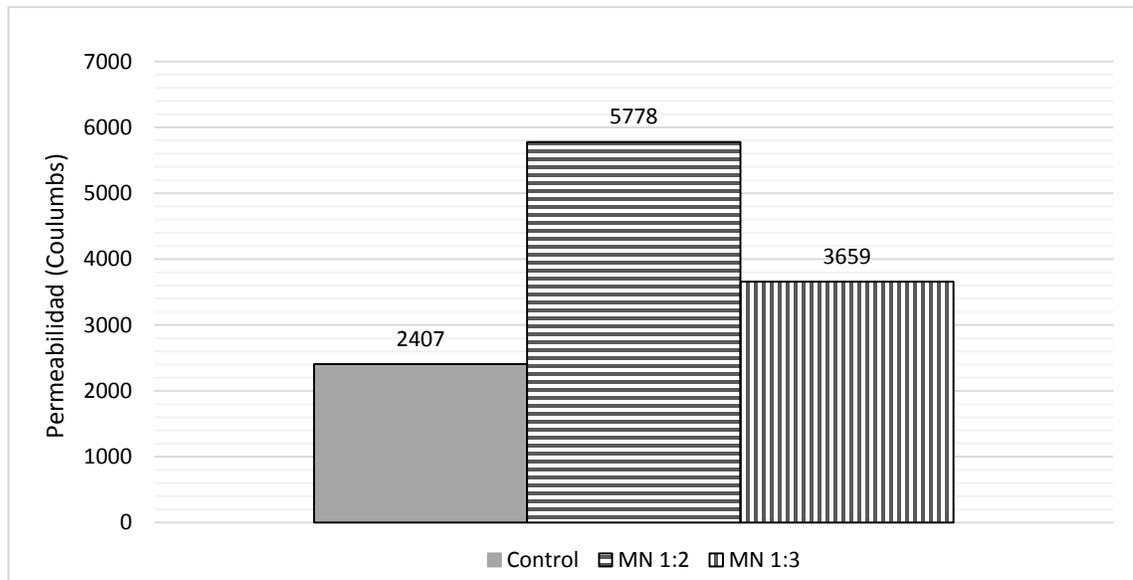


Figura 92. Permeabilidad rápida a la penetración de cloruros, edad de 180 días.

4.6.3. Ciclos acelerados hielo-deshielo en primas de 6cm x 6cm x 24 cm

Mediante esta prueba se pudo analizar el comportamiento de los materiales sometidos a ciclos sucesivos de hielo-deshielo, así es posible determinarles la durabilidad sometida en variaciones de humedad y temperatura, al congelarse el agua entra en los poros y en las fisuras, el material aumenta el volumen produciendo desprendimiento del material.

Los especímenes se excitaron a vibración mediante ondas sonoras de banda audible, las vibraciones de resonancia resultantes se utilizaron para determinar las frecuencias fundamentales transversales.

Se observa que el mortero MN 1:3 tuvo un comportamiento más lineal que las otras mezclas, significa que no posee muchos poros, no hubo llenado de agua en los posibles poros o fisuras; en cambio, los morteros Control y MN 1:2, mostraron



variaciones severas, dándose a conocer como materiales permeables con riesgo de desprendimiento.

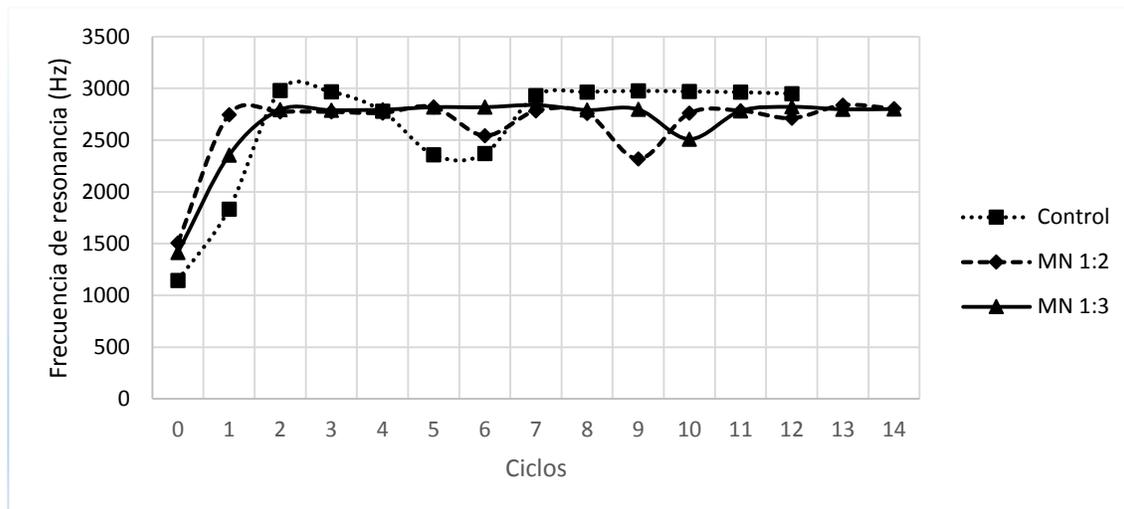


Figura 93. Vibraciones de resonancia resultantes para determinar las frecuencias fundamentales transversales.

4.6.4. Carbonatación

La carbonatación es un fenómeno que produce cambios microestructurales en los morteros, se produce carbonato cálcico cuando el mortero está en contacto con el dióxido de carbono de la atmósfera.

Si el material es muy poroso se difundirá en menor tiempo el CO_2 , que en un mortero menos poroso. El CO_2 diluirá la portlandita presente en el cemento en un proceso lento, y esa dilución genera vapores que hará sobrepresión en las paredes internas de los microporos del mortero, ocasionando fisuras y seguidamente la disminución de la resistencia mecánica del mortero.

Se puede observar que los morteros de mucílago retardan el proceso de carbonatación. La Red Durar indica elevada resistencia a la carbonatación cuando los coeficientes están entre 2 y 3 $\text{mm/año}^{0.5}$, baja resistencia a la carbonatación cuando el coeficiente supera los 6 $\text{mm/año}^{0.5}$. Los morteros estudiados ninguno se clasifica como de alta resistencia, pero de acuerdo a las especificaciones anteriores, el mortero Control es el más vulnerable, y el MN 1:2 vendría siendo con el de mejor resistencia, por tener un coeficiente bajo respecto a los otros morteros.



Al multiplicar el coeficiente de carbonatación por la raíz del tiempo de prolongación, se obtiene la profundidad. Específicamente el mortero de MN 1:2, que en la proyección de 25 años alcanza solo 18 mm aproximadamente la profundidad, mientras que el MN 1:3 alcanza 23 mm y el mortero Control llega hasta 25 mm, es importante señalar que la determinación de la profundidad de carbonatación se realizó a la edad de 225 días.

Tabla 27. Comparación de coeficientes de carbonatación

Coeficientes de carbonatación evaluados a 225 días ($\text{mm/año}^{0.5}$)		
Control	MN 1:2	MN 1:3
5.096	3.950	4.459

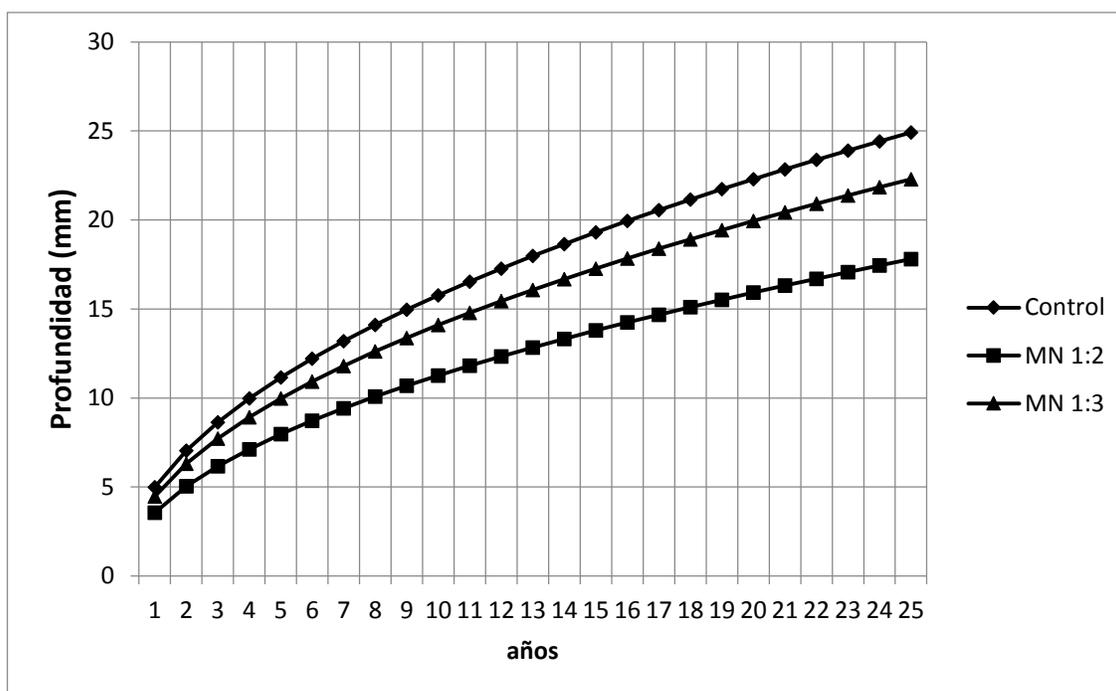


Figura 94. Profundidad de carbonatación, evaluada a los 225 días

4.6.5. Absorción capilar

Esta prueba sirvió para tener conocimiento sobre el porcentaje de poros cuando las probetas están en contacto con el agua o los agentes agresivos ambientales. La absorción capilar (S), el coeficiente de absorción capilar (k), la resistencia a la



penetración del agua (m), y la porosidad efectiva (ϵ), son parámetros para evaluar el desempeño por durabilidad de los concretos o morteros.

Se presenta una serie de resultados para la porosidad de acuerdo al procedimiento de la sección 3.8.3.5. Estos datos pertenecen a la probeta MN 1:3 (2/5).

Tabla 28. Resultados de prueba de capilaridad de una probeta de MN 1:3

Wo (kg) =	0.23970		Ao (m ²) =	0.00251472
Tiempo	Raíz cuadrada	Altura (z)	Wt	Wt -Wo/Ao
(s)	(s) ^{1/2}	(m)	(kg)	(kg/m ²)
0	0.000	0.000	0.23970	0.000
300	17.321	0.0496	0.24000	0.119
600	24.495	0.0496	0.24020	0.199
900	30.000	0.0496	0.24020	0.199
1800	42.426	0.0496	0.24050	0.318
3600	60.000	0.0496	0.24100	0.517
7200	84.853	0.0496	0.24150	0.716
14400	120.000	0.0496	0.24240	1.074
21600	146.969	0.0496	0.24310	1.352
86400	293.939	0.0496	0.24600	2.505
172800	415.692	0.0496	0.24780	3.221
259200	509.117	0.0496	0.24870	3.579
345600	587.878	0.0496	0.24970	3.977
432000	657.267	0.0496	0.25010	4.136
518400	720.000	0.0496	0.25050	4.295
604800	777.689	0.0496	0.25120	4.573
691200	831.384	0.0496	0.25150	4.692
777600	881.816	0.0496	0.25170	4.772
864000	929.516	0.0496	0.25210	4.931
950400	974.885	0.0496	0.25240	5.050
1036800	1018.234	0.0496	0.25250	5.090
1123200	1059.811	0.0496	0.25270	5.170
1209600	1099.818	0.0496	0.25290	5.249
1296000	1138.420	0.0496	0.25310	5.329
1382400	1175.755	0.0496	0.25330	5.408

Con los datos de la tabla anterior se elaboró una gráfica, colocando en las abscisas la raíz cuadrada del tiempo y en las ordenadas el cambio de peso (Wt-Wo/Ao) (Fig. 102).



Se observa que conforme el tiempo pasa, la tendencia de los puntos es en forma no lineal, significa que tiene resistencia a la absorción de agua y menor cantidad de poros, por lo tanto, si la tendencia fuera más curvo, la resistencia de absorción es todavía mejor, la probeta absorbería más lento.

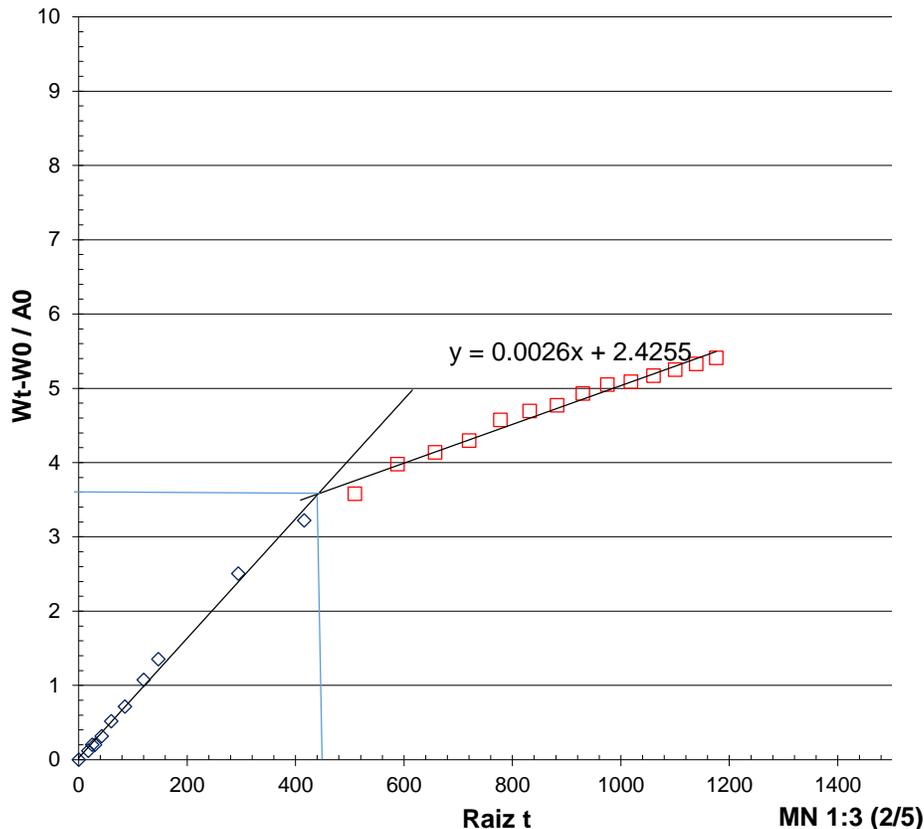


Figura 95. Absorción de agua de la probeta MN 1:3 (2/5)

El coeficiente de penetración (m), se obtiene tomando el tiempo y la altura (z) de la probeta donde se intersectan ambas pendientes. En la tabla 27, se muestran los resultados de los parámetros de porosidad obtenidos de la tabla 26 y las ecuaciones de la sección 3.8.3.5 para la resistencia a la penetración del agua (m); coeficiente de absorción capilar (k); porosidad efectiva (ϵ_e), y absorción capilar (S), de la probeta MN 1:3 (2/5).



Tabla 29. Parámetros de porosidad de la probeta MN 1:3 (2/5)

Número de espécimen		Resistencia a la penetración del agua (m)	Coefficiente de absorción capilar (k)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	Absorción Capilar (S)
MN 1:3	2	7.02E+07	0.0080	6.70	1.19E-04

Todo esto se realizó para cada probeta de las mezclas: Control, MN 1:2 y MN 1:3, por lo tanto, con el fin de resumir los resultados, a continuación se muestran en la tabla 28 los promedios (de 5 cubos) de los cálculos de los parámetros a edades de 90 y 180 días de prueba.

Coeficiente de absorción capilar (k)

Permite determinar la capacidad de absorción del agua de los especímenes. Se observa que en la mezcla Control no hay variación en las edades estudiadas, mantienen la cantidad de agua absorbida; mientras que en los morteros con mucílago si existe variación, específicamente se observa muy claro en el MN 1:3, significa que este mortero disminuye su porosidad al reducir la capacidad de absorción.

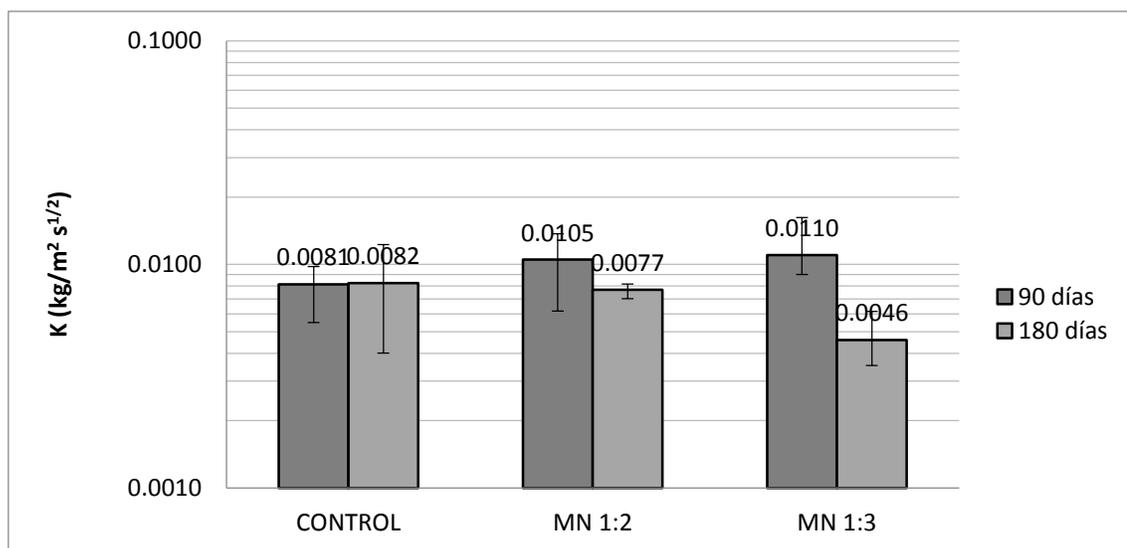


Figura 96. Coeficiente de absorción de agua (k)



Absorción capilar (S)

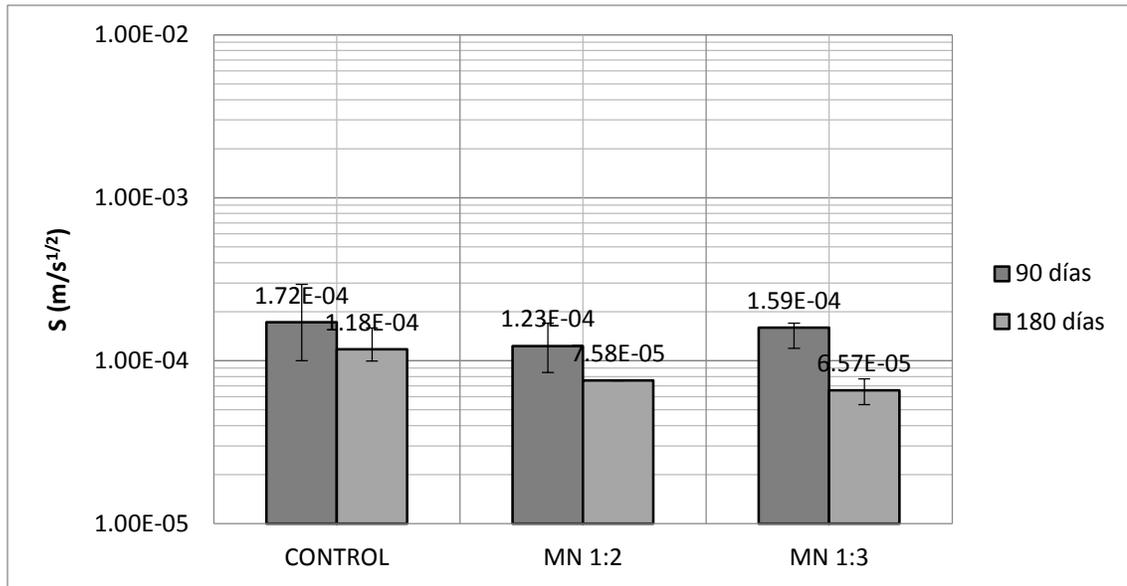


Figura 97. Absorción capilar (S)

Se observa que a la edad de 90 y 180 días, la mezcla que más absorbe es el Control. La mezcla MN 1:3 tuvo un menor coeficiente de absorción, por lo tanto, era de esperarse la cantidad de agua absorbida fuera baja también. La Red Durar especifica que para ambientes severos un concreto debe tener de sorción o absorción capilar $S \leq 5 \times 10^{-05} \text{ m/s}^{1/2}$ y para ambientes menos severos puede ser hasta $10 \times 10^{-04} \text{ m/s}^{1/2}$. Las mezclas podrán funcionar para ambientes menos severos.



Resistencia de penetración al agua (m)

Este valor es un parámetro que se comporta inversamente a los anteriores, entre más alto sea el valor es mejor, ya que es la oposición a que el agua se introduzca hacia el interior de los morteros. Por ejemplo, la mezcla Control presenta baja resistencia, indica esto, que es un material poroso y que tiene alta absorción de agua. El mortero MN 1:3 sigue presentándose como la mejor mezcla, ya que su resistencia es alta superando a las otras dos mezclas y en las dos edades de prueba evaluada.

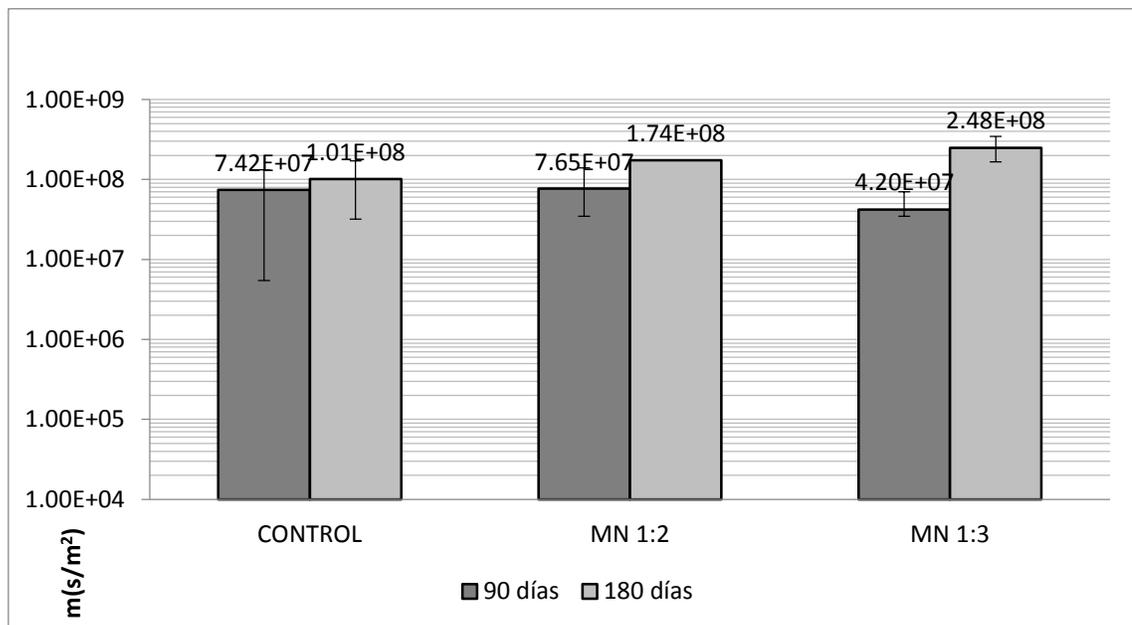


Figura 98. Resistencia de penetración al agua (m)

Porosidad efectiva (ϵ_e)

Este es el estado poroso capilar de los concretos y/o morteros, es decir, es la porosidad interconectada y conectada a su vez con el exterior. La Red Durar indica que materiales con porosidad con menos del 10 % son concretos de buena calidad y compacidad, porosidad entre el 10 % y 15 % son concretos de calidad moderada, y si tienen porosidades más del 15 % indica que es un concreto de durabilidad inadecuada.



De acuerdo a la clasificación anterior, a la edad de 90 días, se presentaron como materiales de buena calidad, pero a los 180 días el mortero MN 1:2 se mostró como material de calidad moderada. Las mezclas Control y MN 1:3 mantuvieron muy similares los valores en las dos edades de prueba.

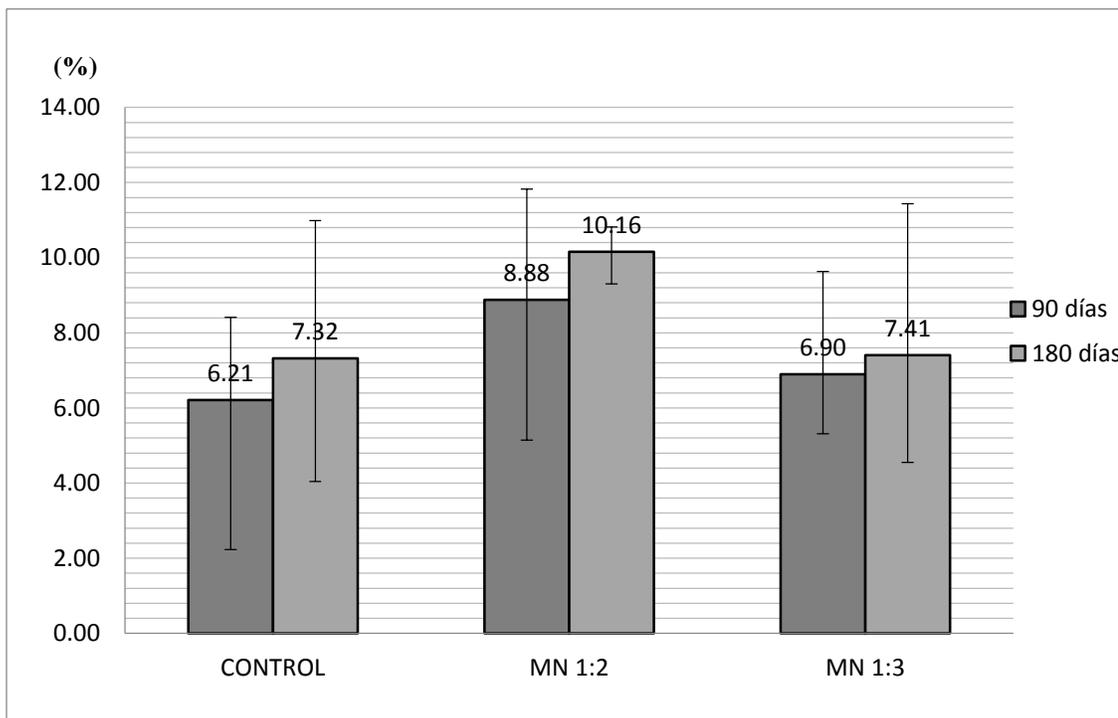


Figura 99. Porcentaje de porosidad efectiva (ϵ_e)

Tabla 30. Resumen de resultados de porosidad

Edad (días)	Mezcla	Coefficiente de absorción capilar, K ($\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}$)	Absorción Capilar, S ($\text{m/s}^{1/2}$)	Resistencia a la penetración del agua, m (s/m^2)	Porosidad efectiva, ϵ_e (%)
90	CONTROL	0.0081	1.72E-04	7.42E+07	6.21
	MN1:2	0.0105	1.23E-04	7.65E+07	8.88
	MN1:3	0.0110	1.59E-04	4.20E+07	6.90
180	CONTROL	0.0082	1.18E-04	1.01E+08	7.32
	MN 1:2	0.0077	7.58E-05	1.74E+08	10.16
	MN 1:3	0.0046	6.57E-05	2.48E+08	7.41



4.6.6. Porosidad total

En esta evaluación no solo se tomaron en cuenta los poros interconectados y conectados con el exterior, sino también los espacios intersticiales del gel de cemento y los espacios producidos por las burbujas de aire en la masa del mortero. Referenciando con la Red Durar, la mezcla Control y MN 1:2, se presentan como materiales inadecuados, pues su porosidad sobrepasa el 15 % en todas las edades; el mortero MN 1:3 se coloca como un material de calidad moderada a la edad de 90 y 180 días, manteniendo su porosidad a estas edades entre 10 % y 15 %.

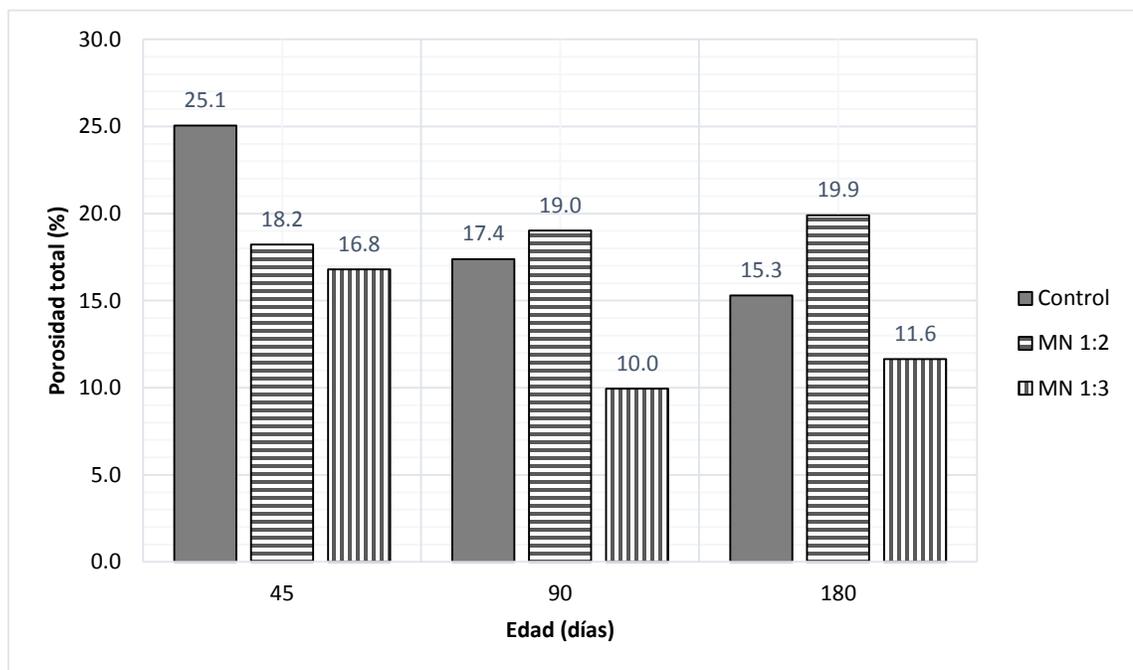


Figura 100. Porosidad total (mediante el método de inmersión)

4.7 Correlación entre las propiedades evaluadas

Analizar correlaciones es centrarse en dos objetivos: comparar grupos y estudiar sus relaciones entre sí mismas, en este caso, es comparar el comportamiento de los morteros con mucílago de nopal contra el mortero que está exento de mucílago, con esto se podrá definir cuál mortero tiene mejores características.



4.7.1 Resistividad eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico

En la figura 108 se observa que la dispersión de puntos se asemeja a una línea recta ascendente, indicando esto, que mientras la Resistividad es alta, también la VPU, lo anterior se puede comprobar con el mortero Control a la edad de 120 días, mantiene su resistividad hasta casi 20 k Ω -cm y su VPU supera a los morteros con mucílago. Finalmente los mejores morteros ante estas propiedades son Control y MN 1:3, así como se aprecia a la edad de 300 días.

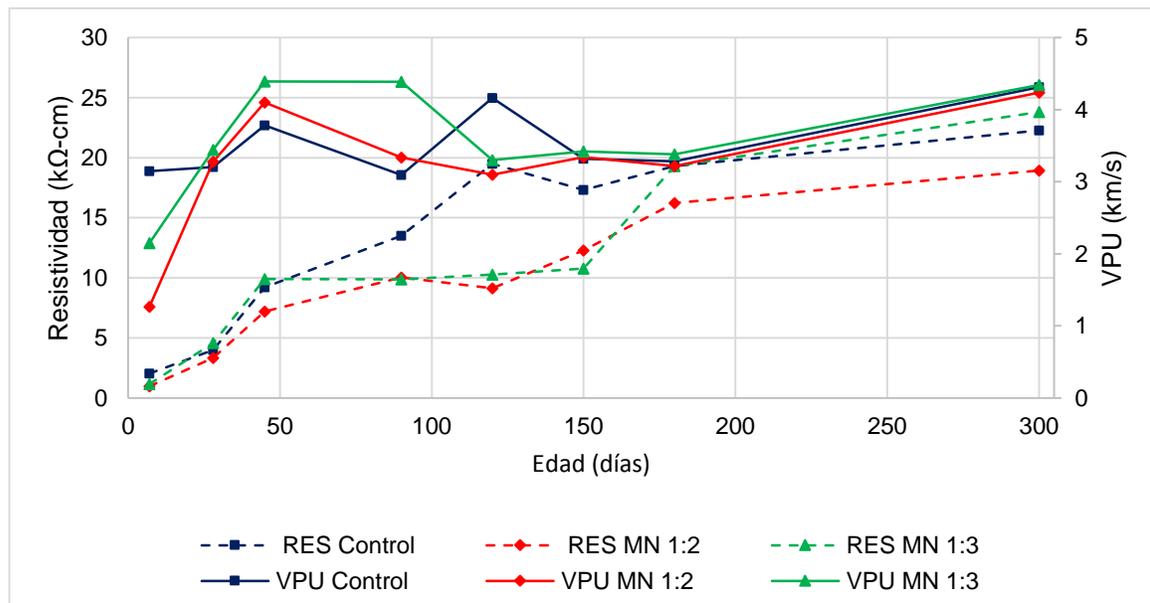


Figura 101. Correlación entre Resistividad eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico

4.7.2 Resistencia a la Compresión y Resistividad eléctrica

La figura 109 indica que cuando la resistividad eléctrica es alta, da a entender que existe una menor cantidad de poros, como se demostró con los datos de la sección 4.6.6. Porosidad Total.

Claramente se aprecia que a la edad de 180 días, el mortero MN 1:3 tiene una resistencia arriba de 35 MPa y su resistividad se iguala con el mortero Control, pero supera al otro mortero con mucílago. Se puede observar muy claramente que el MN 1:2 desde las primeras edades siempre mantuvo propiedades bajas, describiéndose como un material de baja calidad frente al mortero Control y MN 1:3.

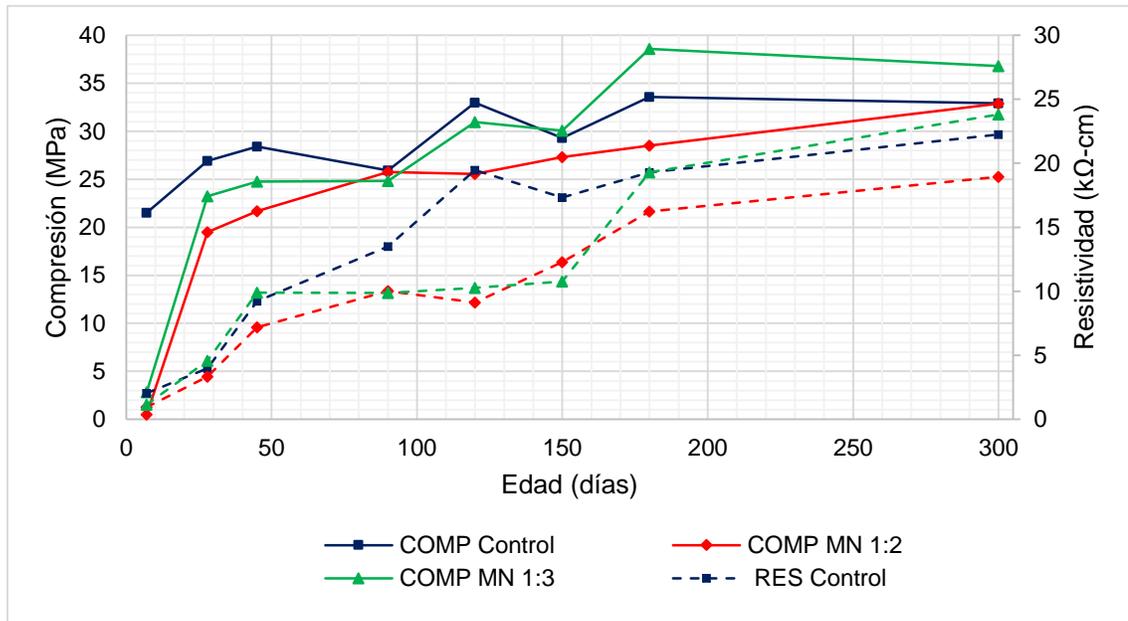


Figura 102. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Resistividad

4.7.3 Resistencia a la Compresión y Velocidad de Pulso Ultrasónico

La relación entre Compresión y VPU, debe asemejarse al de la figura 109 de la sección 4.7.2. Conforme incrementa la velocidad de pulso también la Compresión lo hace, es decir, la cantidad de vacíos se va reduciendo.

A partir de la edad de 150 días, se puede ver que el mortero MN 1:2 se presenta como un material de baja calidad en cuanto a resistencia de compresión y su velocidad de pulso ultrasónico está ligeramente debajo de las mezclas Control y MN 1:3.

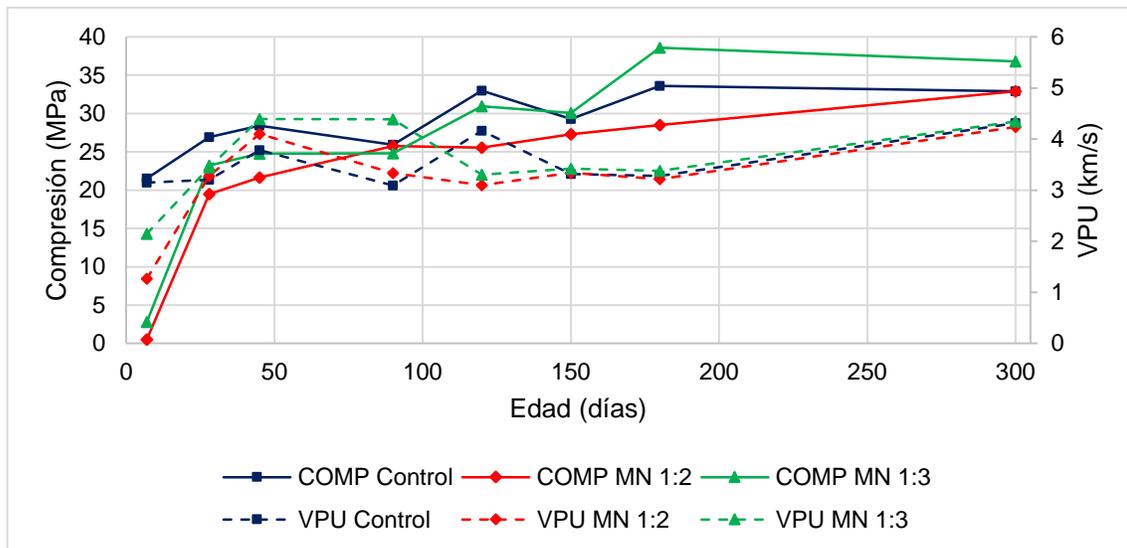


Figura 103. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Velocidad de Pulso Ultrasónico

4.7.4 Resistencia a la Compresión y Porosidad total

En la figura siguiente, se observa que cuando la porosidad es alta, la resistencia a la compresión esta disminuida, se comprueba esto ejemplificando con la mezcla MN 1:3 el cual ha sido de buena calidad respecto al mortero Control y MN 1:2. A la edad de 180 días el mortero MN 1:3 es el más alto en resistencia a la compresión con 39 MPa y es el más bajo en porosidad con 11 %; a esa misma edad, el mortero MN 1:2 presenta caso inverso, su resistencia a la compresión es la más baja con 29 MPa y con porosidad de 20 %; el mortero Control se comporta de manera intermedia respecto a los valores de los morteros con contenido de mucílago.

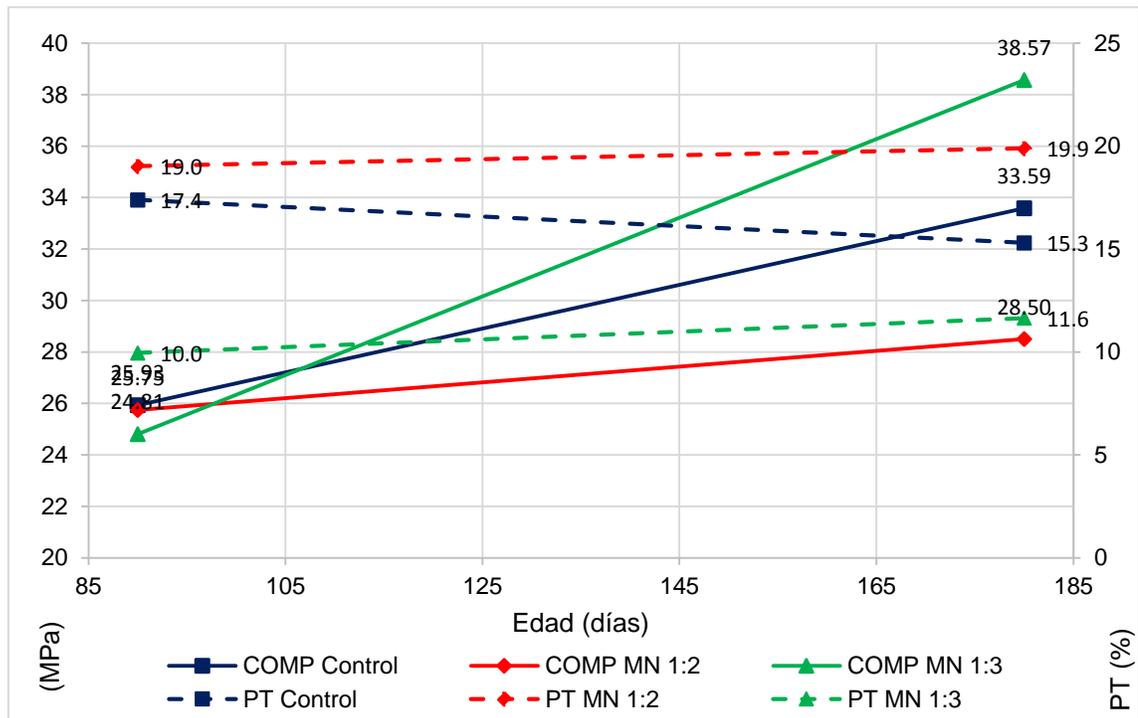


Figura 104. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Porosidad total a la edad de 90 y 180 días

Después de haber analizado y discutido los resultados de todas las pruebas, se determinó si las mezclas cumplen con los criterios de calidad de manera general, esto en base a la Red Durar y normas mexicanas, así también, con lo anterior elegir cuál de las mezclas analizadas es la mejor para el uso ingenieril. De acuerdo al criterio del autor de esta investigación, la calidad de los morteros se determina a continuación:

Tabla 31. Determinación de la calidad de los morteros

Pruebas/Mortero	Control	MN 1:2	MN 1:3
No destructivas			
Densidad	Bueno	Bueno	Bueno
Resistividad eléctrica	Bueno	Regular	Excelente
VPU	Bueno	Regular	Excelente
Destructivas			
Compresión	Bueno	Regular	Bueno
Flexión	Bueno	Bueno	Bueno
Tensión directa	Bueno	Regular	Bueno
Tensión indirecta	Regular	Regular	Bueno



“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND,
CON ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL”



Adherencia	Regular	Bueno	Excelente
Durabilidad			
Ataque por sulfatos	Regular	Bueno	Excelente
Ion cloruro	Bueno	Regular	Bueno
Hielo-deshielo	Regular	Regular	Bueno
Carbonatación	Regular	Bueno	Bueno
Absorción	Regular	Bueno	Bueno
Porosidad total	Bueno	Regular	Excelente



5. CONCLUSIONES

La sustitución de agua por mucílago de nopal de la especie *Opuntia ficus-indica blanco* en morteros de construcción es muy poco estudiada. Al unir el líquido de esta cactácea con la arena y cemento portland, se producen reacciones muy lentas y se forma en la matriz cementante una red que absorbe humedad, permitiendo que los morteros a edades tempranas queden debilitados, sufriendo fisuras y agrietamientos, porque la hidratación del cemento no alcanza a realizarse al 100 %, y que en el transcurso del tiempo vayan adquiriendo rigidez, densificándose hasta alcanzar buena resistencia y durabilidad.

Para obtener un buen mucílago se debe de extraer de las pencas de edad avanzada, ya que las que no son, producen mucílago menos viscoso y menos denso. Así también, la arena debe estar libre de materia orgánica, sin recubrimiento de arcillas y que sean resistentes para que no afecten en la hidratación y adherencia de la pasta de cemento. Con estas características de los materiales para la elaboración de mortero y con la ayuda de un aditivo plastificante, se logró buena consistencia y fluidez lo cual repercute en una mejora en la manejabilidad y colocación del mortero en estado fresco.

Se sometieron los morteros a evaluaciones no destructivas en el estado endurecido; de las más importantes fueron resistividad eléctrica y VPU. La resistividad eléctrica del MN 1:3 fue alta (24 k Ω -cm), en segundo lugar al mortero Control con 22 k Ω -cm y en último el mortero MN 1:2 con 19 k Ω -cm, todos a 300 días de edad de prueba; los resultados ponen al mortero MN 1:3 como un material de riesgo moderado de corrosión de acuerdo a la Red Durar; respecto a la propagación de pulsos ultrasónicos, el mortero MN 1:3 se pone por delante de los otros morteros, ahora quedando en segunda posición el mortero MN 1:2 y en tercero el mortero Control, de acuerdo a la Red Durar, colocan a los morteros con mucílago de nopal como materiales durables.

La resistencia mecánica de los concretos y/o morteros depende de los agregados. En cuanto a morteros no existe un estándar para ver si cumple con la resistencia mínima, pero las comparaciones realizadas siguen siendo válidas.



Tabla 32. Comparación de resistencias respecto a la Compresión

Mezcla	Edad	Compresión	$0.7\sqrt{Comp}$	Flexión	$0.8\sqrt{Comp}$	$0.4\sqrt{Comp}$	Tensión directa	Tensión Indirecta	$0.7\sqrt{Comp}$
	días	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
Control	7	22	3.2	4.6	3.7	1.9	2.2	2.7	3.2
	28	27	3.6	5.4	4.2	2.1	2.6	3.0	3.6
	45	28	3.7	6.0	4.3	2.1	2.4	2.8	3.7
	90	26	3.6	6.2	4.1	2.0	2.7	2.9	3.6
	120	33	4.0	5.0	4.6	2.3	3.1	3.2	4.0
	150	29	3.8	7.2	4.3	2.2	3.3	2.9	3.8
	180	34	4.1	6.6	4.6	2.3	3.4	3.2	4.1
	300	33	4.0	6.8	4.6	2.3	2.7	3.2	4.0
MN 1:2	7	1	0.5	0.4	0.6	0.3	0.1	0.1	0.5
	28	19	3.1	3.9	3.5	1.8	1.8	1.0	3.1
	45	22	3.3	4.3	3.7	1.9	2.0	2.2	3.3
	90	26	3.6	4.8	4.1	2.0	2.3	2.5	3.6
	120	26	3.5	6.3	4.0	2.0	1.9	2.3	3.5
	150	27	3.7	7.4	4.2	2.1	3.2	3.2	3.7
	180	28	3.7	7.0	4.3	2.1	2.6	3.1	3.7
	300	33	4.0	6.0	4.6	2.3	2.8	2.9	4.0
MN 1:3	7	3	1.2	1.7	1.3	0.7	0.4	0.2	1.2
	28	23	3.4	4.9	3.9	1.9	2.2	1.9	3.4
	45	25	3.5	4.7	4.0	2.0	2.5	2.9	3.5
	90	25	3.5	5.1	4.0	2.0	3.1	3.3	3.5
	120	31	3.9	6.7	4.5	2.2	2.6	2.4	3.9
	150	30	3.8	5.7	4.4	2.2	2.2	2.3	3.8
	180	39	4.3	7.5	5.0	2.5	3.5	3.5	4.3
	300	37	4.2	7.2	4.9	2.4	3.2	3.4	4.2

La resistencia a la compresión es una propiedad que indica si el material es apto ante esfuerzos axiales; se observa que el mortero Control a la edad de 7 días alcanza el 80 % de la resistencia de 28 días, cumple con las especificaciones, sin embargo los morteros de mucílago no alcanzan ni el 75 %, esto es porque la hidratación del cemento no ha progresado, tal como se dijo anteriormente.

En las otras pruebas mecánicas sucedió algo similar, solo el mortero Control supera los rangos permisibles en todas las edades de prueba; en cambio los morteros con contenido de mucílago comienzan a elevar sus valores a partir de los 28 días.

Lo importante de un material, además de ser resistente, debe durar y dar frente a los agentes agresivos, como el ión cloruro o la carbonatación. Entre más densos sean los morteros, los agentes tardarán más tiempo en introducirse; los morteros con contenido de mucílago tienen una estructura interna resistente que retarda el paso de los agentes deletéreos. El mortero que tiene mejor comportamiento respecto a las pruebas de durabilidad fue el MN 1:3, su capacidad de absorción es baja y eso lo mantiene resistente, en seguida está el mortero sin mucílago, y finalmente el MN 1:2.

Finalmente se lograron los objetivos, pues se concluyó que en menor proporción de nopal en la elaboración de mucílago, el líquido de amasado presenta mejores



propiedades como sustituto del agua; el mucílago óptimo se podrá emplear en la elaboración de concretos, ya que el uso de mucílago de esta cactácea del género *Opuntia*, eleva la resistencia mecánica de los morteros y los hace más durables, cabe decir, que no será posible usarlo en restauración de monumentos patrimoniales coloniales construidos con rocas locales y morteros de cal, ya que la dureza del cemento afecta el material original de los monumentos, el cual posee diferente naturaleza; sin embargo se puede usar como material de restauración en estructuras de concreto en ambientes severos, tales como zonas costeras e industriales, o monumentos artísticos construidos en el siglo XX con concreto hidráulico reforzado.



BIBLIOGRAFÍA

- Acha Palomares, A. (2009). *Efecto del mucílago de cactus opuntia adicionado en morteros de cal, en la absorción capilar por el método de fagerlund*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Alvarado Alcaraz, N. d. (2010). *Influencia de la Morfología de Pétreos: Volcánicos, Triturados y Cantos Rodados; Correlacionando Matemáticamente los Módulos de Elasticidad Estático y Dinámico en Cilindros de Concreto de 10 cm x 20 cm*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- ARQHYS. (23 de Noviembre de 2012). *Cemento tipo portland*. Obtenido de ARQHYS.com: <http://www.arqhys.com/arquitectura/cemento-tipo-portland.html>
- ASTM C109. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C1202. (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C128. (2004). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C142. (1997). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C1583. (2004). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C192/C192M. (2016). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.



- ASTM C266. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. México: ASTM.
- ASTM C348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C490. (2011). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C511. (2013). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C515. (2003). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C597. (2009). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C666. (2015). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM C702. (2003). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. West Conshohocken, PA, EE.UU: ASTM.
- ASTM-109. (2016). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50-mm] Cube Specimens)*. Pennsylvania, EE.UU: ASTM.
- ASTM-C-136. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Pennsylvania, EE.UU: ASTM.
- ASTM-C-150-02. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. Pennsylvania, EE.UU.
- ASTM-C-151. (2015). *Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement*. Philadelphia, EE.UU.
- ASTM-C-187. (2004). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*.



- ASTM-C-191. (2013). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Pennsylvania, EE.UU: ASTM.
- ASTM-C-496. (2011). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Pennsylvania, EE.UU: ASTM.
- Bernabé Reyes, C. (2015). *Evaluación de morteros de cementos sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- BS-12. (1996). *Specification for Portland Cement*. British Standards Institution.
- BS-4027. (1996). *Specification for sulfate-resisting Portland cement*. British Standards Institution.
- Burgos Núñez, A., Olmo García, J. C., & Sáez Pérez, M. P. (2014). Hornos y fábricas de cemento natural en Andalucía oriental. *III Jornadas Andaluzas de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública* (pág. 3). Málaga: Fundación Patrimonio Industrial de Andalucía.
- Calleja, J., & Del Olmo, C. (1971). La cal libre de los cementos y la expansión en autoclave. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, 25-29.
- Cazalla Vázquez, O. (2002). *Morteros de Cal. Aplicación en el Patrimonio Histórico*. Universidad de Granada: Departamento de Mineralogía y Petrología.
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *INGENIERÍA REVISTA ACADÉMICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN*, 39-46.
- como se citó en Garti, I. (1999). *Mucílago de nopal como reductor de retracción en concreto auto-consolidable*. Maceió, Alagoas, Brazil: 54° Congresso Brasileiro do Concreto.
- como se citó en Pedraza Pérez, A. C. (2014). *Tesis: Comportamiento físico-mecánico de morteros de abañilería para la construcción*. Morelia, Michoacán, México.
- Durán-Herrera, A., Fajardo-San Miguel, G., Valdez-Tamez, P., & Juárez-Alvarado, C. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de



- cemento pórtland y ceniza volante. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 39 - 49.
- EUITA, C. (12 de Enero de 2017). *Cátedra de Ingeniería Rural*. Obtenido de Cátedra de Ingeniería Rural: http://www.ingenieriarural.com/Trans_const/Tema9.pdf
- García Favela, B. (2013). *MUCÍLAGO DE NOPAL (Opuntia spp.) SOBRE PROPIEDADES MICROMORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DE SUELO EN TRIGO*. Montecillo, Texcoco, Edo. de México: Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Glosario Técnico. (24 de Febrero de 2016). *AMADA MIYACHI AMERICA*. Obtenido de AMADA MIYACHI AMERICA: <http://spanish.amadamiyachi.com/glossary/glosselectricalresistivity>
- González Castro, E. (2016). *Mezcla de Concreto Hidráulico con Ceniza de Bagazo de Caña como Sustituto del Cemento: Evaluación de las Propiedades Físico-Mecánicas y la Durabilidad*. Morelia, Michoacán: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Guy , A. (1980). *Deterioro de los materiales*. México: Mc Graw Hill.
- Howland, J., & Martín, A. (2013). Study about the capillary absorption and the sorptivity of concretes. *Materiales de Construcción*, vol. 63, 515 - 527.
- IMCYC. (2006). Los aditivos para concreto. *TECNOLOGÍA*, 32-38.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO).
- J.J., H., & A. R., M. (2013). *Study about the capillary absorption and sorptivity of concretes with cuban limestone aggregates*. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE).
- Jacobo Jacobo, S. (2014). *Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanocílize y almidón*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Kosmatka et al. (2004). *Producción del Cemento Portland*. Skokie, Illinois, EE.UU: Diseño y Control de Mezclas de Concreto.



- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarase, W., & Tanesi, J. (2004). *Producción del Cemento Portland*. Skokie, Illinois, EE.UU: Diseño y Control de Mezclas de Concreto .
- Kröner, S., Mas i Barberá, X., Osete Cortina, L., & Guasch, F. (2015). *Identificación y caracterización de materiales pétreos en patrimonio histórico-artístico*. Valencia, España: Iniversidad Politécnica de Valencia.
- López Celis, R., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M., Martínez Molina, W., Ariza Aguilar, L. E., . . . Valdez Salas, B. (2006). *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*. Sanfdila, Querétaro, México: Publicación Técnica No. 292.
- Madrigal Valencia, J. A. (2013). *Evaluación del desempeño de un aditivo antiaglomerante en las propiedades físico-química-mecánicas de un concreto premezclado elaborado con 5 arenas de la región de Puruándiro, México*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Martínez, W., Alonso, E., Rubio, J., Bedolla, J., Velasco, F., & Torres, A. (2008). Comportamiento mecánico de morteros de cal apagada artesanalmente, adicionados con mucílago de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales. *Revista de la Construcción*, 93-101.
- Moctezuma, C. (2016). *Un México nuevo en construcción*. Obtenido de Un México nuevo en construcción: <http://www.cmoctezuma.com.mx/mobile/cementos/producto/8/cemento-portland-compuesto-cpc-30-r/rs>
- Monsalvo Vázquez , R., & Girón García, P. (2008). Industrias y sus Tecnologías. Industria del cemento en México. *Reporte Final*, 29-38.
- Nasville, A. (1999). *Tecnología del Concreto*. CDMX: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.
- Navarro Sánchez, et al. (2011). *Análisis de materiales*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.



- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, A. (2011). *Análisis de Materiales*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
- Neville, A. (2010). *Concrete Technology (Permeability and Durability)*. England: Pearson.
- NMX-061-C-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes hidráulicos*. México: ONNCCE.
- NMX-C-003-ONNCCE. (2009). *Industria de la Construcción - Cal Hidratada - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Cemento para Albañolería-(Mortero)-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-057-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Determinación de la Consistencia Normal*. México: ONNCCE.
- NMX-C-062-ONNCCE. (2010). *Cementos hidráulicos - Determinación de la sanidad de Cementantes Hidráulicos*. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Método de Prueba Estándar para la Masa Unitaria*. México: ONNCCE.
- NMX-C-075-ONNCCE. (2006). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Sanidad por Medio de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio*. México: ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: ONNCCE.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agua para el Concreto - Especificaciones*. México: ONNCCE.
- NMX-C-148-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento para las*



Pruebas de Cementantes y Concretos Hidráulicos - Especificaciones.
México: ONNCCE.

NMX-C-152-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Densidad.* México: ONNCCE.

NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio.* México: ONNCCE.

NMX-C-160-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado en Obra de Especímenes de Concreto.* México: ONNCCE.

NMX-C-163-ONNCCE. (2005). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto.* México: ONNCCE.

NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo .* México: ONNCCE.

NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Práctica Estándar para Reducir Muestras de Agregados a Tamaños de Prueba.* México: ONNCCE.

NMX-C-177-ONNCCE. (2005). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación del Tiempo de Fraguado de Mezclas de Concreto, Mediante la Resistencia de Penetración.* México: ONNCCE.

NMX-C-191-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro.* México: ONNCCE.

NMX-C-414-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo.* México: ONNCCE.

NMX-C-480-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Geotecnia - Equivalente de Arena de Agregados Finos - Método de Ensayo.* Querétaro: ONNCCE.

Páez Moreno, D. F., Leal Moreno, V. E., & Restrepo Burgos, M. (2009). Influence of Freeze-That Cycles in the Resistance Concrete (Tunja Case). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín vol. 8, no. 15, 95 - 110.*



- Pérez Castellanos, N. A. (2009). Formulación de un mortero de inyección con mucílago de nopal para restauración de pintura mural. *Asesoría científica, Seminario-Taller de Pintura Mural ECRO*, 16-20.
- Ramírez Arellanes, et al. (2012). *Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*. Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.
- Ramírez Arellanes, S., Cano Barrita, P., Julián Caballero, F., & Gómez Yáñez, C. (2012). *Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*. Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.
- Ramírez et al. (2012). *Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*. Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.
- RED DURAR (Durabilidad de la armadura). (2000). *Manual de inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. México: Tercera Edición CYTED.
- Rodríguez González, et al. (2011). *Optimización de la extracción del mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica)*. Morelia, Michoacán, México: XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- Sanjuán, M. A., & Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Sant Vicent del Raspeig, Alacant, España: UNE.
- Saravia Tasayco, P. L. (2010). *Agrupamientos productivos (CLUSTER) del nopal*. México: Contactopyme.
- SINAREFI. (10 de Diciembre de 2016). *Red Nopal*. Obtenido de Red Nopal: http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_nopal.html#cajalnformes
- Torres Acosta, et al. (2010). *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas*. Sanfandila, Querétaro, México: Publicación Técnica No. 326.



- Universidad Centroamericana "José Simeon Cañas", U. (2006). *Determinación de la consistencia normal del cemento portland*. San Salvador, El Salvador: Materiales de construcción.
- Universidad Nacional del Nordeste [UNN]. (s.f.). Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/cemento>
- Valencia, G., Mejía de Gutierrez, R., Barrera, J., & Delvasto, S. (2012). Durability and Corrosion Study of reinforced blended mortars with tuff and sugar cane bagasse ash. *Revista de la Construcción vol. 11 no. 2*, 112 - 122.
- Vázquez, R., & Girón, P. (2008). Industrias y sus tecnologías. La industria del cemento en México. *Reporte final*, 29.
- Vidaud Quintana, E., & Vidaud Quintana, I. (2016). ULTRASONIDO: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *TECNOLOGÍA*, 32 - 35.
- Villalobos Onchard, J. (15 de Diciembre de 2016). *Departamento de Geología UNIVERSIDAD DE CHILE*. Obtenido de Departamento de Geología UNIVERSIDAD DE CHILE: <http://www.geologia.uchile.cl/las-rocas-y-sus-procesos-de-formacion>
- Villanueva Guzmán, M. A. (2016). *Cerámicos Base Cemento Portland con Substituciones Parciales de Materiales Orgánicos Para Incremento de la Durabilidad*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.