



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Civil



Tesis Profesional

“EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MORTEROS CON
SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CENIZA DE ELABORACIÓN
DE LADRILLO”

Que para obtener el título de:
INGENIERO CIVIL

Presenta:
JOB DANIEL ALVAREZ PITA

Asesor:
DR. HUGO LUIS CHAVEZ GARCIA

Co – asesores:
M.I. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

M.I. CIPRIANO BERNABÉ REYES

Morelia Michoacán, Diciembre de 2016



Dedicatorias

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida, por acompañarme y guiarme por el mejor camino.

A mis padres, Daniel Alvarez Santoyo y Eloisa Pita Villa, porque sin ellos nada de esto sería posible. Son mi guía y mi inspiración a ser mejor cada día. He aquí un reflejo de su dedicación y empeño para hacer las cosas lo mejor posible, este trabajo no es solo mío, ustedes son la fortaleza de cada una de las acciones tomadas y reflejadas aquí. Los quiero mucho.

A mis hermanos, Yael Neftali y Magdiel Sinaí, son los mejores hermanos que pueden existir, son las dos manos que me ayudan a cargar todos los problemas, y aunque no siempre estemos juntos, ustedes son mi inspiración para ser mejor, intentando ser un ejemplo para ustedes, tanto de lo malo como de lo bueno se aprende. Los quiero mucho.

A mi compañera de vida, Carmen Estefanía por todas esas noches de desvelo que me acompañaste, por hacerme una mejor persona, un mejor hombre, un mejor padre, un mejor amigo, y por compartir conmigo cada momento de tu vida. Te quiero mucho.

A mi niña, Aylin Victoria, mi niña hermosa eres mi inspiración y mis ganas de salir delante de la mejor manera. La sonrisa que hace que un día muy pesado se fragmente y lo conviertas en un buen momento. Me alegraste la vida y me haces muy feliz compartir contigo cada minuto de vida. Te quiero mucho.



Agradecimientos

A dios por permitirme concluir tan ardua labor, y encaminada por el mejor sendero y con los mejores propósitos, por darme esa fuerza en momentos de debilidad.

A mis padres y mis hermanos, así como a mi pareja y a nuestra niña, y a toda mi familia en general; por brindarme su apoyo y darme animo en los momentos en los que es más susceptible desistir, por confiar en mí. ¡MUCHAS GRACIAS!

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por forjar en mí un ser de bien. A la Facultad de Ingeniería Civil por ser la institución que me formó profesionalmente, siempre te llevaré en mi corazón. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales, Corrosión y a todo su personal, por brindarme las instalaciones, material y equipo necesario para el desarrollo de la presente investigación.

A mi asesor, el Dr. Hugo Luis Chávez García, quien además fue mi profesor y un gran amigo, por ser tan humilde y brindarme todo su apoyo, por los consejos que me daba para mejorar la investigación y aumentar mis conocimientos y por todas enseñanzas.

A la Doctora Elia Mercedes Alonso Guzmán por motivarme a hacer esta investigación, por los consejos y aportaciones tanto a la investigación como personales, por su amistad.

Al M.A. Wilfrido Martínez Molina, por sus consejos y asesorías dadas con el fin de obtener mejores resultados, en la investigación y profesionalmente.

A todos aquellos que me brindaron su mano para que este proyecto se llevara a cabo de una manera más amena y fácil: Noel Días Gonzales, José Wilbert Viveros Torres, Arturo Zalapa, Marco Antonio Mondragón, Marco Antonio Navarrete Seras, José Alberto Guzmán Torres.



A los que me brindaron consejos y palabras de ánimo, regaños y alegres momentos: Sandra del Carmen Arguello Hernández, Cipriano Bernabé Reyes, Isaías Trujillo, Sergio Jacobo Jacobo, Mauricio Arreola Sánchez, Rosalía Ruiz Ruiz, Judith Alejandra Velázquez. ¡MUCHAS GRACIAS!

A mis compañeros de investigación: Oscar Cuellar Martínez y Jesús Daniel Rodríguez Palominos, por formar un grupo de trabajo, en apoyo de la persona que lo necesitara, con la finalidad de obtener una investigación completa.

A compañeros tesisistas: Luis Colín Velázquez, Fidel Bautista León, Marcos Ariel Villanueva Guzmán, Víctor Hugo Blancas Herrera, Fabián López Regalado, Bersain de León Ambrocio, Amirais Flores Ponce, Tranquilino Francisco Martínez, Sixto Albert Pineda Pineda, Antonio Guzmán Oropesa, Osiel Morales Ramírez, Emmanuel Gonzales Castro, Josué García Chávez, Mayra Alejandra Guiza, Laura Vaca Arciga, Oscar Geovanny Martínez, Sóstenes Alberto López Reyes.

A los compañeros de servicio social, Diri Nenet Gonzales, Andrea Paulina, Alonso Alejandro, a todos en general gracias por el apoyo brindado durante esta investigación.



INDICE DE CONTENIDO

Dedicatorias	I
Agradecimientos	II
INDICE DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XI
Resumen.....	XIII
Abstract	XIV
Objetivo.....	XV
Objetivo general:.....	XV
Objetivos específicos:.....	XV
Justificación	XVI
1. Introducción	1
2. Marco teórico.....	3
2.1 Cemento.....	3
2.1.1 Proceso de fabricación del cemento portland	3
2.1.2 Clasificación.....	5
2.1.3 Propiedades del cemento	7
2.1.3.1 Propiedades Químicas.....	7
2.1.3.2 Propiedades Físicas	12
2.1.3.3 Propiedades Mecánicas.....	14
2.1.4 Especificaciones.....	14
2.1.5 Cemento utilizado en la investigación.	18
2.2 Agregados.....	20
2.2.1 Origen de los agregados.....	20
2.2.2 Propiedades de los agregados.....	23
2.2.2.1 Físicas	23
2.2.2.2 Químicas.....	25
2.2.2.3 Mecánicas.....	25
2.2.3 Agregados utilizados en la investigación.....	27
2.3 Agua.....	27



2.3.1	Especificaciones.....	27
2.3.2	Agua utilizada en la investigación	30
2.4	Morteros	30
2.4.1	Tipos y usos	30
2.5	Material en estudio como sustitución parcial del cemento.....	32
2.5.1	Ceniza	32
2.5.1.1	Antecedentes	32
2.5.1.2	Clasificación	34
2.5.1.3	Ceniza de Elaboración de Ladrillo	34
	Actividad Puzolánica.....	34
2.6	Aditivos.....	35
2.6.1	Tipos y usos	35
2.6.2	Aditivo utilizado en la investigación.....	38
2.7	Durabilidad	38
2.7.1	Ataque por Sulfatos.....	43
2.7.2	Carbonatación.	44
2.7.3	Congelamiento y Deshielo.....	45
2.7.4	Absorción Capilar.	46
2.7.5	Penetración de Cloruros.....	49
2.7.6	Porosidad.....	50
2.7.7	Resistividad eléctrica.....	50
2.7.8	Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).....	50
2.8	Pruebas Destructivas.....	52
2.8.1	Resistencia a la Compresión Simple.....	52
3.	Metodología	55
3.1	Características y propiedades de los materiales.....	55
3.1.1.	Cemento	55
3.1.1.1	Consistencia.....	55
3.1.1.2	Fraguado por el método de Gillmore.....	58
3.1.2.	Arena	60
3.1.2.1.	Cuarteo.....	61



3.1.2.2.	Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.....	65
3.1.2.3.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS). ...	68
3.1.2.4.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).	70
3.1.2.5.	Granulometría en arenas.	71
3.1.2.6.	Colorimetría en arenas.....	76
3.1.2.7.	Sedimentación en arenas.....	79
3.1.2.8.	Material que pasa por la malla #200.....	81
3.1.2.9.	Terrones de arcilla.....	83
3.1.2.10.	Densidad de la arena.....	86
3.1.2.11.	Equivalente de arena.....	88
3.1.3.	Agua.....	91
3.1.4.	Aditivo	91
3.2	Pruebas realizadas al mortero fresco.....	93
3.2.1.	Fluidez.	93
3.2.2.	Elaboración de especímenes.....	96
3.2.2.1.	Cubos.....	96
3.2.2.2.	Prismas.	100
3.2.2.3.	Cilindros.....	101
3.2.3.	Curado.	102
3.3	Pruebas realizadas al mortero endurecido	103
3.3.1.	Actividad Puzolánica.....	103
3.3.2.	Durabilidad.....	103
3.3.2.1.	Ataque por Sulfatos.....	103
3.3.2.2.	Carbonatación.	106
3.3.2.3.	Congelamiento y deshielo.....	108
3.3.2.4.	Absorción Capilar	111
3.3.2.5.	Penetración de cloruros.	114
3.3.2.6.	Porosidad.....	119
3.3.2.7.	Resistividad eléctrica.....	120
3.3.2.8.	Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU).	122
3.3.3.	Destructivas.....	124



3.3.3.1. Resistencia a la compresión simple.....	124
4. Resultados y discusiones.....	127
4.1 Características y propiedades de los materiales.....	127
4.1.1 Cemento.....	127
4.1.1.1 Consistencia.....	127
4.1.1.2 Fraguado por el método de Gillmore.....	127
4.1.2. Arena.....	128
4.1.2.1. Cuarteo.....	128
4.1.2.2. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.....	128
4.1.2.3. Determinación de la masa volumétrica seca y suelto de una arena (MVSS)..	128
4.1.2.4. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV).	129
4.1.2.5. Granulometría en arenas.....	130
4.1.2.6. Colorimetría en arenas.....	132
4.1.2.7. Sedimentación en arenas.....	133
4.1.2.8. Material que pasa por la malla #200.....	134
4.1.2.9. Terrones de arcilla.....	135
4.1.2.10. Densidad de la arena.....	135
4.1.2.11. Equivalente de arena.....	136
4.2 Pruebas realizadas al mortero fresco.....	137
4.2.1 Fluidéz.....	137
4.2.2 Elaboración de especímenes.....	137
4.2.3 Curado.....	138
4.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido.....	138
4.3.1 Actividad Puzolánica.....	138
4.3.2 Durabilidad.....	139
4.3.2.1. Ataque por Sulfatos.....	139
4.3.2.2. Carbonatación.....	140
4.3.2.3. Congelamiento y deshielo.....	142
4.3.2.4. Absorción Capilar.....	143
4.3.2.5. Penetración de cloruros.....	148



4.3.2.6. Porosidad.....	149
4.3.2.7. Resistividad eléctrica.....	150
4.3.2.8. Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU).	153
4.3.3 Destructivas.....	156
4.3.3.1 Resistencia a la compresión simple.....	156
5. Conclusiones.....	159
6. Bibliografía	161



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. .Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997).....	10
Figura 2.2 .Resistencia de los componentes principales del cemento portland (Instituto del Concreto, 1997).....	11
Figura 2.3. Fallas Comunes en especímenes sometidos a Compresión. (M-MMP-2-02-058, 2004).....	53
Figura 3.1.Agregado de la muestra a través del divisor. (F. Lopez, 2016)	62
Figura 3.2. Mezclado del material. (F. Lopez, 2016)	63
Figura 3.3 . División de la muestra en cuartos iguales. (F. Lopez, 2016).....	64
Figura 3.4. Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico (F. Lopez, 2016).	67
Figura 3.5. Pesado del recipiente lleno con el material. (F. Lopez, 2016).....	69
Figura 3.6. Mallas colocadas en orden decreciente. (F. Lopez, 2016).....	72
Figura 3.7 . Material retenido en cada una de las mallas previamente pesado. (F. Lopez, 2016).	73
Figura 3.8 .Ejemplo de gráfica de composición granulométrica.	76
Figura 3.9. Muestras dejando reposar durante 24 horas. (F. Lopez, 2016).....	78
Figura 3.10. Tabla colorimétrica. (F. Lopez, 2016).....	78
Figura 3.11. Muestras en reposo. (F. Lopez, 2016).....	80
Figura 3.12. Lavado del material. (F. Lopez, 2016).....	82
Figura 3.13. Muestras representativas para la realización de la prueba de terrones de arcilla. (F. Lopez, 2016).....	85
Figura 3.14. Compactación de la mezcla (F. Lopez, 2016).	94
Figura 3.15. Expansión de la mezcla de forma manual, haciendo girar la leva. (F. Lopez, 2016).....	95
Figura 3.16.Toma de lecturas para obtener la fluidez. (F. Lopez, 2016).....	95
Figura 3.17. Etapas del llenado de cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm.	97
Figura 3.18. Llenado y enrazado de muestra. (J. D. Alvarez, 2016).....	98
Figura 3.19. Etiquetado de las muestras. (J. D. Alvarez, 2016)	99
Figura 3.20. Características de las muestras. (J. D. Alvarez, 2016).....	100
Figura 3.21. Elaboración de prismas de 6x6x26. (J. D. Alvarez, 2016).....	101
Figura 3.22. Curado de especímenes. (J. D. Alvarez, 2016)	103
Figura 3.23. Inmersión de muestras en sulfato de sodio. (J. D. Alvarez, 2016).....	105
Figura 3.24. Acomodo de las muestras. (J. D. Alvarez, 2016).....	107
Figura 3.25. Pigmentación de la zona no carbonatada. (J. D. Alvarez, 2016)	108
Figura 3.26. Inmersión de muestras en agua e introducidas en el refrigerador. (J. D. Alvarez, 2016).....	109
Figura 3.27. Evaluación de la frecuencia de resonancia. (J. D. Alvarez, 2016).....	110
Figura 3.28. Prueba de Flexión en la muestra. (J. D. Alvarez, 2016)	111



Figura 3.29. Aplicación de parafina. (J. D. Alvarez, 2016).....	112
Figura 3.30. Colocación de las Muestras. (J. D. Alvarez, 2016).....	113
Figura 3.31. Armado de las celdas. (ASTM C 1202, 2012).....	117
Figura 3.32. Llenado de las celdas con la solución correspondiente. (J. D. Alvarez, 2016)	118
Figura 3.33. Conectado de celdas y Equipo de medición. (J. D. Alvarez, 2016).....	118
Figura 3.34 . Colocado de las muestras en el equipo. (J. D. Alvarez, 2016).....	121
Figura 3.35. Acomodo de transductores. (J. D. Alvarez, 2016).....	123
Figura 3.36 . Aplicación de carga. (J. D. Alvarez, 2016).....	125
Figura 4.1. Gráfica de composición granulométrica de la arena de “Joyitas”.....	132
Figura 4.2. Comparación del resultado de la prueba con la tabla colorimétrica. (F. Lopez, 2016).....	133
Figura 4.3. Pérdida de masa 90 días.	139
Figura 4.4. Pérdida de masa 180 días.....	140
Figura 4.5. Profundidad de carbonatación en una proyección de 25 años evaluada en 90 días.	141
Figura 4.6. Profundidad de carbonatación en una proyección de 25 años evaluada en 180 días.	142
Figura 4.7. Frecuencia de resonancia.....	143
Figura 4.8. Resistencia a la penetración del agua 90 días.....	144
Figura 4.9. Porosidad efectiva 90 días.	145
Figura 4.10. Coeficiente de absorción capilar 90 días.	145
Figura 4.11. Sorción capilar 90 días.....	146
Figura 4.12. Resistencia a la penetración del agua 180 días.	146
Figura 4.13. Porosidad efectiva 180 días.	147
Figura 4.14. Coeficiente de absorción capilar 180 días.	147
Figura 4.15. Sorción capilar 180 días.	148
Figura 4.16. Permeabilidad de cloruros.....	148
Figura 4.17. Porosidad total 90 días.	149
Figura 4.18. Porosidad total 180 días.	150
Figura 4.19. Resistividad eléctrica 28 días.....	150
Figura 4.20. Resistividad eléctrica 90 días.....	151
Figura 4.21. Resistividad eléctrica 180 días.....	151
Figura 4.22. Resistividad eléctrica (Congelamiento y deshielo).	152
Figura 4.23. Resistividad a través de los ciclos de sulfato 90 días.	152
Figura 4.24. Comportamiento de la resistividad en los ciclos de sulfato 180 días.	153
Figura 4.25. Velocidad de pulso ultrasónico 28 días.	154
Figura 4.26. Velocidad de pulso ultrasónico 90 días.....	154
Figura 4.27. Velocidad de pulso ultrasónico 180 días.....	155
Figura 4.28. Velocidad de pulso ultrasónico (congelamiento y deshielo).	155
Figura 4.29. Comportamiento de la V.P.U en ciclos de sulfato 90 días.	156



Figura 4.30. Comportamiento de la V.P.U. en ciclos de sulfato 180 días	156
Figura 4.31. Esfuerzo 28 días.	157
Figura 4.32. Esfuerzo 90 días.	157
Figura 4.33. Esfuerzo 180 días.	158

INDICE DE TABLAS

Tabla 0.1. Producción y consumo de cemento en los últimos años en México. (CANACEM, s.f.).....	XVII
Tabla 2.1. Clasificación del Cemento por su uso (ASTM C 150, 2016).	5
Tabla 2.2. Clasificación del Cemento por su tipo (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	6
Tabla 2.3. Clasificación del Cemento por su resistencia. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)....	6
Tabla 2.4. Clasificación del Cemento por sus características especiales. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)	7
Tabla 2.5. Abreviaturas de los óxidos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).....	8
Tabla 2.6. Componentes principales del cemento (Shetty, 2005).....	8
Tabla 2.7. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).....	10
Tabla 2.8. Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	15
Tabla 2.9. Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	16
Tabla 2.10. Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	16
Tabla 2.11. Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	17
Tabla 2.12. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	18
Tabla 2.13. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).	28
Tabla 2.14. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (Instituto del Concreto, 1997).....	29
Tabla 3.1. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos.	60
Tabla 3.2. Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de granulometría.	74
Tabla 3.3. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M... 75	75
Tabla 3.4. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004).	79
Tabla 3.5. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).....	83
Tabla 3.6. Propiedades típicas del Crisotan R-5.....	92
Tabla 3.7. Criterios de evaluación. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000). 122	122
Tabla 3.8. Criterios de evaluación en Velocidad de Pulso Ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).	124
Tabla 3.9. Ejemplo de tabla de registro para resistencia a la compresión simple.	126
Tabla 4.1. Resultados de consistencia normal.....	127



Tabla 4.2 . Resultados de tiempos de fraguado.....	127
Tabla 4.3 . Resultados del porciento de humedad de absorción en la arena.....	128
Tabla 4.4 . Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta. (MVSS).....	129
Tabla 4.5 . Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada. (MVSV).....	130
Tabla 4.6 . Módulo de finura promedio.....	131
Tabla 4.7 .Resultados de colorimetría.....	132
Tabla 4.8. Porcentaje de material fino que contiene la arena.....	134
Tabla 4.9 . Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena...	135
Tabla 4.10 . Resultados de la densidad de la arena.....	136
Tabla 4.11 . Porcentaje del equivalente de arena.....	136
Tabla 4.12. Resultados de fluidez para cada mezcla.....	137
Tabla 4.13. <i>Índice de actividad puzolánica para las diferentes cenizas en sustitución, (utilizando el esfuerzo a compresión en cubos como parámetro)</i>	138
Tabla 4.14. Constante de carbonatación 90 días.....	140
Tabla 4.15. Constante de carbonatación 180 días.....	141



Resumen

La sustitución parcial de ceniza de elaboración de ladrillo (CEL) como puzolanas; a morteros base cemento Portland (CP), fue realizada para mejorar las propiedades de durabilidad, además de reducir la cantidad de cemento que se utiliza en la elaboración de éste.

Se utilizó un cemento Portland CPC 30R-RS, la arena utilizada en dicha investigación fue proveniente del banco de materiales llamado “Joyitas”, ubicado en la carretera Morelia-Jiquilpan en el kilómetro 14.5 en Michoacán, mientras que la CEL fue proveniente de una ladrillera ubicada en la región de Valle de Santiago en Guanajuato.

Se diseñaron 3 mezclas, un control y dos con sustituciones cuyas proporciones fueron del 2% y 5% de CEL con respecto a la masa del CP.

Se realizaron muestras en forma cúbica, prismática y cilíndrica, a las cuales se les realizaron pruebas por durabilidad como lo son ataque por sulfatos, carbonatación, congelamiento y deshielo, absorción capilar, penetración de cloruros, porosidad total, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. Así como la prueba de resistencia a la compresión simple. Las edades de prueba fueron de 90 y 180 días.

La caracterización de los materiales, así como el desarrollo de las pruebas no destructivas como de las pruebas de durabilidad se realizaron siguiendo las normativas ASTM y las normas mexicanas NMX.

Con los resultados de las pruebas se obtuvieron resultados favorables en la mezcla con sustitución mayor, incluso mayores que la mezcla control. La Mezcla de menor porcentaje de sustitución está dentro de los parámetros de la norma correspondiente. Y ambas sustituciones nos arrojan resultados mejores que la mezcla testigo.

Palabras Clave: Morteros, Ceniza, Ladrillo, Durabilidad, Puzolana.



Abstract

The partial substitution of brick making ash (CEL) as pozzolans; To Portland cement mortar (CP), was made to improve the durability properties, in addition to reducing the amount of cement used in the elaboration of this.

A Portland cement was used CPC 30R-RS, the sand used in this research came from the material bank called "Joyitas", located on the Morelia-Jiquilpan highway at kilometer 14.5 in Michoacán, while the CEL came from a brickyard Located in the Valle de Santiago region of Guanajuato.

Three mixtures, one control and two were designed with substitutions whose proportions were 2% and 5% of CEL with respect to the CP mass.

Samples were made in cubic, prismatic and cylindrical form, which were tested for durability such as sulfate attack, carbonation, freezing and thawing, capillary absorption, chloride penetration, total porosity, electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity . As well as the test of resistance to simple compression. Trial ages were 90 and 180 days.

The characterization of the materials as well as the development of nondestructive tests as well as the durability tests were carried out following the ASTM and Mexican NMX standards.

With the results of the tests favorable results were obtained in the mixture with greater substitution, even greater than the control mixture. The Mix of lower substitution percentage is within the parameters of the corresponding standard. And both substitutions yield better results than the control mixture.

Keywords: Mortars, Ash, Brick, Durability, Puzolana.



Objetivo

Objetivo general:

El objetivo de esta investigación es diseñar, elaborar y evaluar en una mezcla de mortero. La incorporación de materiales puzolánicos CEL como un sustituto parcial del cemento Portland (CP), utilizado comúnmente en obras de infraestructura. Esto con el fin de lograr la elaboración de un mortero con un mejor desempeño ante agentes corrosivos y de deterioro del mismo por la interacción con un medio ambiente abrasivo.

Se pretende obtener un producto final que logre atenuar los problemas de contaminación causados por la producción de CP, incorporando el desecho de la producción de ladrillo, el cual permita a su vez la utilización para construcción y/o reparación de obras con mayor durabilidad y un menor costo de elaboración y mantenimiento.

Objetivos específicos:

- * Estudiar las propiedades de materiales puzolánicos como lo es la ceniza de elaboración de ladrillo.
- * Determinar qué mezcla presenta un mejor comportamiento como sustituto parcial del cemento.
- * Determinar si es factible o no, el uso de dichos materiales puzolánicos en la elaboración de morteros, con el fin de incrementar su durabilidad.



Justificación

El 5% de toda la producción mundial de CO₂ se debe a la fabricación del cemento, y este es un porcentaje que, en años sucesivos, no solo se mantendrá, sino que se incrementará conforme se activen las economías emergentes asiáticas. Tengamos en cuenta que el cemento es el elemento fundamental del concreto y el mortero, y este es, junto con el acero y el aluminio, los productos más consumidos mundialmente en la construcción. Para cuantificar de una manera sencilla la aportación de cemento a la producción de CO₂ basta con echar un vistazo a los siguientes datos: Cada tonelada de cemento producida por el sistema convencional produce una tonelada de CO₂; si en vez de cemento convencional, producimos cementos especiales podemos llegar a reducir la cifra de emisiones de CO₂ a 0,4 toneladas por tonelada producida (Domoterra, 2013).

En general, es notable el incremento de la producción de cemento que han experimentado los países del tercer mundo en las últimas décadas. La producción global para el año 2012 se sitúa en 3196 millones de toneladas esto denota un elevado y sostenido crecimiento que se acompaña con un incremento en el impacto que se genera sobre el medio ambiente por las emisiones de CO₂. (Figura 1)

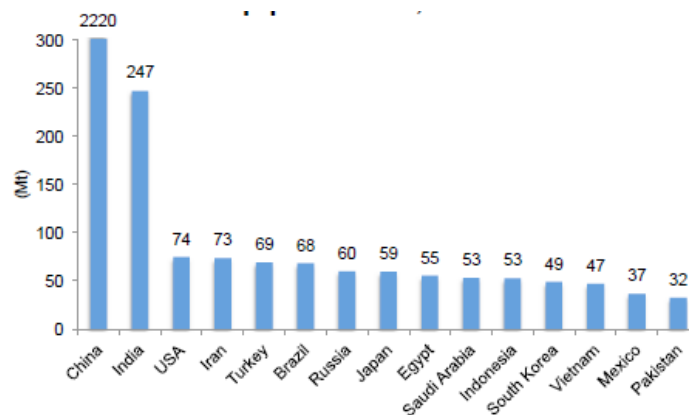


Figura 1. Producción Global de Cemento. (FICEM-APCAC, 2013)



Mientras que la cantidad en consumo se encuentra en 3084 millones de toneladas. Es notable el incremento en el uso del cemento a través de los años en México, para el año 2013, se registraba un consumo de 32.7 millones de toneladas, y para el año 2014 se registra un consumo de 35.2 millones de toneladas de cemento en el país, esto quiere decir, un 7.65% de aumento en el consumo en tan solo un año. Tabla 0.1.

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

Año	Producción	Consumo Nacional (Millones Tons.)	Habitantes	Kgs/Habitante
2009	35.1	34.4	107,550,697	321
2010	34.5	33.9	112,336,538	301
2011	35.4	34.4	114,975,406	299
2012	36.2	34.6	116,901,761	295
2013	34.6	32.7	118,395,054	276
2014	36.6	35.2	119,713,203	294
2015	39.6			

Con lo cual sitúa a nuestro país en la posición número 15 del ranking mundial en cuanto al consumo se refiere. (Figura 2)

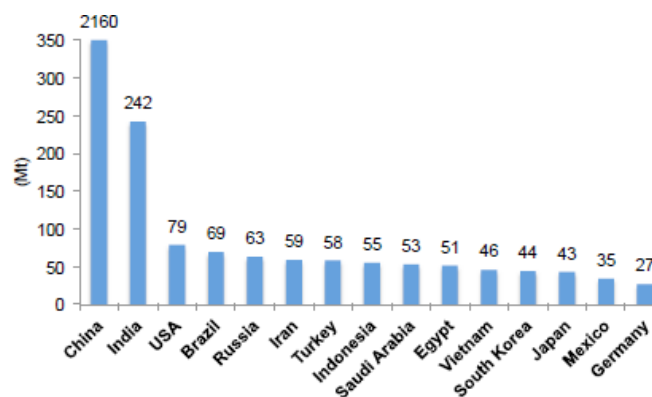


Figura 2. Consumo Global de Cemento. (FICEM-APCAC, 2013)



Sin embargo hasta el momento no existe otro material con las características del cemento para el área de la construcción, por lo que su producción es indispensable para la demanda de la población. Surge la necesidad de disminuir los efectos negativos que produce el uso del cemento. Para atenuar esta sustitución se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta y la de disminuir el consumo del cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto siendo esta última el área en la cual se desea favorecer.



1. Introducción

A lo largo de los últimos años se han buscado materiales que colaboren con la creación de concretos más resistentes y durables, capaces de resistir ataques agresivos del medio ambiente.

Un punto débil de los cementos normales es su deficiente durabilidad, por falta de resistencia química en ambientes agresivos, debiendo extenderse en el futuro el uso de cementos mixtos, binarios o ternarios, con este fin. (VERDU, s.f.)

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

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

- **Adiciones hidráulicas:** (o con hidraulicidad latente): son adiciones que poseen un potencial hidráulico natural, pero que requieren un activador para que puedan endurecer bajo agua; dicho activador puede ser: cal, Clinker de cemento portland, yeso o un activador químico. La adición típica de este grupo es la escoria.



- **Adiciones puzolánicas:** son adiciones que solo endurecen en presencia de Clinker de cemento portland debido a que la reacción ocurre entre los silicatos activos del materia puzolánico y el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado por el Clinker en el transcurso de la hidratación. Los materiales más comunes pertenecientes a este grupo son: la puzolana natural, por lo general de origen volcánico, y la ceniza volante ('fly ash').
- **Adiciones inertes:** son adiciones que no poseen actividad hidráulica ni puzolánica, pero que contribuyen al desarrollo de otras propiedades del cemento, diferentes de la resistencia. Se usa comúnmente el llenante calizo, en especial cuando se trata de la producción de cementos para mampostería.

La producción de los cementos adicionados se ha venido incrementando de modo importante en todo el mundo por múltiples razones, como son el mejoramiento de la propiedades del cemento y de su calidad, la posibilidad de producir cementos especiales para aplicaciones específicas, la conservación de energía térmica y de los recursos minerales, la necesidad de disminuir emisiones de CO_2 y de calor a la atmósfera, la posibilidad de usar subproductos de otras industrias así como el incremento de la productividad en la industria cementera.

El uso de los materiales puzolánicos, permite reducir la cantidad de desechos depositados en el medio ambiente, ya que muchos de los subproductos derivados en los procesos agroindustriales e industriales son cenizas y residuos con un gran potencial puzolánico. Por lo tanto, el uso de estos materiales como sustitutos del cemento redunda en un impacto ecológico y favorable al medio ambiente, aunado a la mejora de sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad.



2. Marco teórico

2.1 Cemento

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Portland, debido a que es el más común. El cemento portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación (Instituto del Concreto, 1997).

2.1.1 Proceso de fabricación del cemento portland

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

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



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

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



2.1.2 Clasificación

Debido a las necesidades particulares de cada construcción existen diversos tipos de cemento que deberán cumplir ciertas características físico-químicas por lo que se clasifica de la siguiente manera.

A. De acuerdo a la norma Americana ASTM C150

Tabla 2.1. Clasificación del Cemento por su uso (ASTM C 150, 2016).

NORMA ASTM C-150	Uso
Tipo I (Portland normal)	Cemento de uso general
Tipo II (Portland moderada resistencia a los sulfatos)	Se emplea donde sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de sulfatos además que genera menos calor.
Tipo III (Portland fraguado rápido, alta resistencia inicial)	Proporciona resistencias elevadas a edades tempranas normalmente a una semana o menos.
Tipo IV (Portland bajo calor de hidratación)	De menor cantidad y velocidad de generación de calor provocada por la hidratación.
Tipo V (Portland alta resistencia a los sulfatos)	De alta resistencia a los sulfato
Blanco	
Especial, bajo álcali; todos los tipos	

B. De acuerdo a la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014. (Tablas 2.2., 2.3. y 2.4.)



Tabla 2.2. Clasificación del Cemento por su tipo (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

Tabla 2.3. Clasificación del Cemento por su resistencia. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

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



Tabla 2.4. Clasificación del Cemento por sus características especiales. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

Nomenclatura	Descripción
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reacción Álcali-Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

2.1.3 Propiedades del cemento

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

2.1.3.1 Propiedades Químicas

El proceso de Clinkerización del cemento involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en la tabla 2.5. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 2.6.



Tabla 2.5. Abreviaturas de los óxidos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

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

Tabla 2.6. Componentes principales del cemento (Shetty, 2005).

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato Tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrito Tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

De esta forma se habla de las fases:

- **Halita, con alto contenido de C₃S:** es la fase principal de la mayoría de los clínkers portland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial (Instituto del Concreto, 1997).



- **Belita, a base de C_2S :** es usualmente la segunda fase en importancia del clínker. Su componente principal (C_2S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días. La fase belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suman aproximadamente de 70 a 80% del cemento. Se supone que de manera aproximada, el C_3S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas) y el C_2S a mediano y largo plazo (contribución al desarrollo de la resistencia de la cuarta semana en adelante).
- **Aluminato, rica en C_3A :** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO_2 y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto, propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento (Instituto del Concreto, 1997).
- **Ferrito C_4AF , solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de calcio:** este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del clínker (Neville, 1998).

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

En la tabla 2.7 se enumeran algunos valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cemento. En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente la contribución de los componentes principales del cemento, en calor de hidratación y en la Figura 2.2 la resistencia a la compresión (Instituto del Concreto, 1997).

Tabla 2.7. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

Cemento	Composición Química en %			
Portland	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Tipo I	48	27	12	8
Tipo II	40	35	5	13
Tipo III	62	13	9	8
Tipo IV	25	50	5	12
Tipo V	38	37	4	9

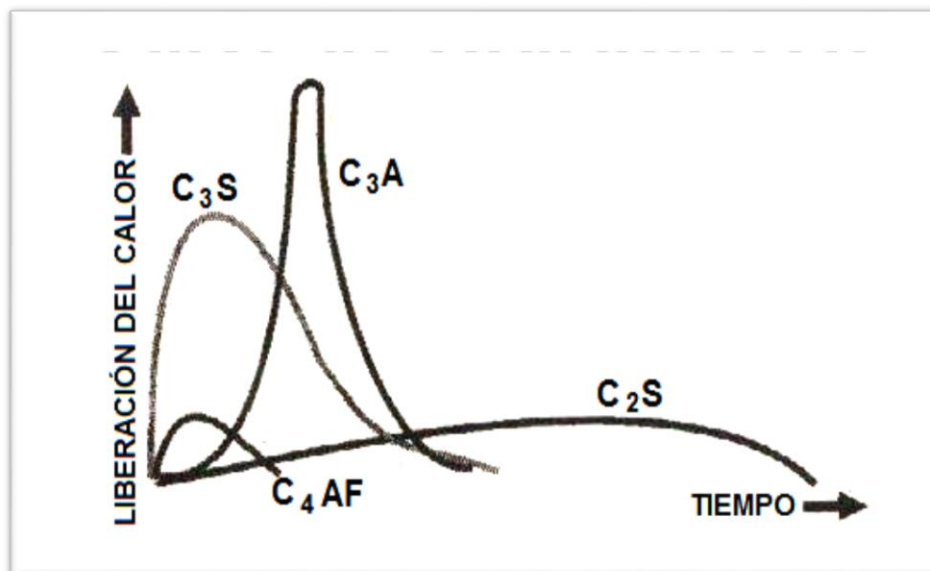


Figura 2.1. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

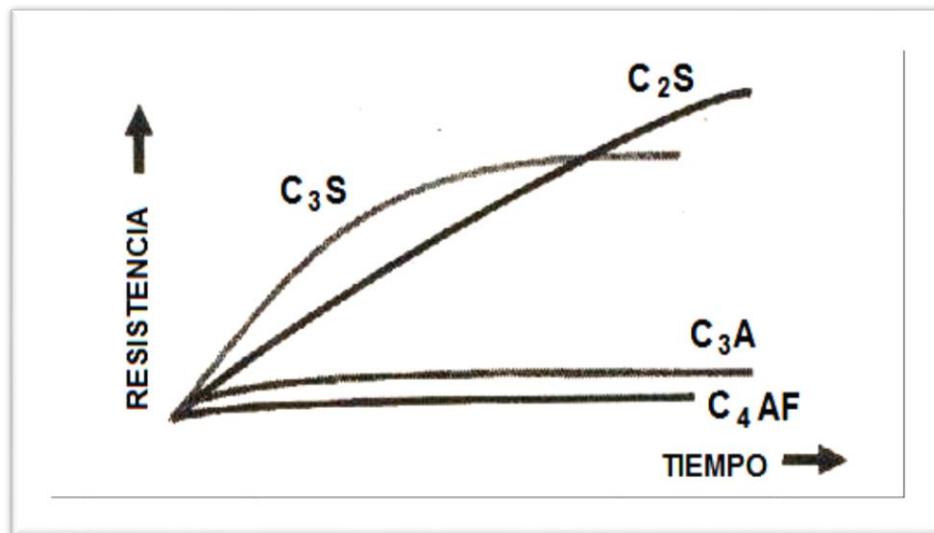


Figura 2.2 .Resistencia de los componentes principales del cemento portland (Instituto del Concreto, 1997).

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

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

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



hidratación de los compuestos individuales. El C_3A y el C_3S son los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor (Instituto del Concreto, 1997).

2.1.3.2 *Propiedades Físicas*

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

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



- **Tiempos de fraguado:**
 - **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
 - **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya está dura.
 - **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
 - **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.

- **Expansión en autoclave:** para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Las normas NMX-C-062 y ASTM-C-151, limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave. Este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 25.4 cm hechas de pasta de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.



2.1.3.3 *Propiedades Mecánicas*

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

- **Resistencia a la compresión:** este ensayo se realiza de acuerdo a las normas (NMX-C-061-ONNCCE, 2015) y (ASTM C 109 M, I., 2002) sobre cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) de 5.08 cm de arista.
- **Resistencia a la flexión:** con este ensayo se realiza de acuerdo a la norma (ASTM C 348, 1997) en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) cuando es sometido a esfuerzos de flexión en prismas de 40x40x160 mm (Instituto del Concreto, 1997).

2.1.4 Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites de la Tabla 2.8.



Tabla 2.8 .Componentes de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

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

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

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



Los requisitos que deben cumplir los componentes principales del cemento están mostrados en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 .Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R y 40 R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 . Especificaciones físicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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



Para los siguientes tipos de cemento y todas las clases resistentes se deben cumplir con las especificaciones químicas de la tabla 2.11.

Tabla 2.11 .Especificaciones químicas (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Propiedades	Tipos de cemento	Especificación (% en masa)
Pérdida por ignición	CPO, CEG	Max 5.0 %
Residuo insoluble	CPO, CEG	Max 5.0 %
Sulfato (SO₃)	Todos	Max 5.0 %

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, este debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 2.12.



Tabla 2.12 .Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

2.1.5 Cemento utilizado en la investigación.

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

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



En los Estados Unidos, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma (ASTM C 150, 2016): 78^a. Esta especificación limita el contenido de C_3A al 5% y también restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetrácalcico (C_4AF), a más del doble del contenido de C_3A al 20%. El contenido de óxido de magnesio está limitado aún 6%.

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

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

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

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



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

2.2 Agregados

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

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

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

2.2.1 Origen de los agregados



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

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

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

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

Rocas Sedimentarias. Las rocas ígneas o rocas metamórficas son sometidas a los agentes de la intemperie como el sol, la lluvia y el viento. Estos agentes descomponen, fragmentan, transportan y depositan las partículas de roca, muy por debajo del lecho marino donde se cementan entre sí por algún material cementante. Los materiales de cementación pueden ser carbonosos, silíceos o



arcillosos encontrados en la naturaleza. Al mismo tiempo, el depósito y el material cementante son sometidos a presión estática del agua y se convierten en la capa compacta de roca sedimentaria. La deposición, cementación y consolidación toman lugar capa por capa debajo del lecho marino.

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

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

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

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



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

2.2.2 Propiedades de los agregados

2.2.2.1 Físicas

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

- **Granulometría.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición. La malla No. 4 separa las gravas de las arenas. Los morteros se elaboran con todo el material que pasa la malla No. 4.



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



2.2.2.2 Químicas

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

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

2.2.2.3 Mecánicas

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



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

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



2.2.3 Agregados utilizados en la investigación

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

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

2.3 Agua

2.3.1 Especificaciones

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



Tabla 2.13 .Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

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



- emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.
- (b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.
- (c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl_2 como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

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

Tabla 2.14 .Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (Instituto del Concreto, 1997).

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencias	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire incluido	Hidratación
pH	X	X	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	X	X	X	X	X	---	---	---
Sulfatos	X	X	X	X	X	X	---	---
Cloruros	X	X	X	X	---	---	---	---
Hidratos de carbono	X	X	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas solubles en éter	X	X	---	---	---	---	X	X



x Causa efecto negativo

---- No causa efecto negativo

2.3.2 Agua utilizada en la investigación

El agua utilizada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

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

2.4 Morteros

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

2.4.1 Tipos y usos

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

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



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

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

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

Mortero hidráulico. Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento (Mendoza Anaya, et al., 2004).

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

De acuerdo al uso deseado, se debe utilizar diferente granulometría. En el reglamento de construcción del estado de Michoacán se especifica una resistencia mínima de 4 MPa para su uso estructural, para pegar, juntar y aplanados gruesos; en esta investigación se propone este uso; el cual se logra utilizando todos los tamaños de la arena para elaborar concreto.



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

2.5 Material en estudio como sustitución parcial del cemento

2.5.1 Ceniza

Un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión de carbón, con o sin materiales de cocombustión, que tiene propiedades puzolánicas. (UNE-EN 450-1, 2013) (ASTM-C-618, 2015)

2.5.1.1 Antecedentes

Estos morteros en base a ceniza volante activada alcalinamente vinieron siendo desarrollados por Joseph Davidovits, como uno de los pioneros de la polimerización, quien empezó a hablar en los 70 de geopolímeros también conocidos como aluminosilicatos inorgánicos para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la química conocida como geopolimerización, donde se forma un material compacto caracterizado por sus excelentes propiedades ligantes y el buen desarrollo de propiedades mecánicas. (A.F-J, 2004)

Entre 1940 y 1970, científicos e inventores alternativos dieron pasos en la implementación de aluminosilicatos y residuos (escoria) para la invención de materiales alternativos, descubrieron que la adición de álcali produce una nueva forma de endurecimiento rápido ligante, propuso que el mecanismo de endurecimiento de una escoria (basada en un 41% de CaO, 30% de SiO₂ y 20.5% de Al₂O₃) activada alcalinamente con NaOH (del 5.5% al 7.5%) involucrando la disolución de Si y Al y precipitación de silicato cálcico hidratado o aluminatos hidratados, se obtendrían resistencias de 27 MPa a un día y de 72 MPa a 5 años. Cementos de escoria activada alcalinamente (llamados cementos Trief) se utilizaron en la construcción a gran escala en la década de 1950.



Al igual que el científico Victor Glukhovsky, quien estudio los efectos de la activación álcali en las escorias aglomeradas y dio su mayor contribución al sentar las bases del cementos alcalinos con alto contenido de Calcio (Escorias de Alto Horno), este noto que las rocas y la arcilla reaccionaba durante el proceso alcalino formando Zeolitas (Sodio Silico-aluminato Hidratado), llamándolo “Concretos de Suelo Silicato” y a los aglutinantes “Suelo Cementos”.

Una de las primeras aplicaciones constructivas se desarrollaron por el científico Davidovits en 1972-1976, donde utilizó geopolímeros para paneles de virutas de madera resistentes al fuego, constituido por un núcleo de madera y dos revestimientos de geopolímeros, durante la fabricación de estos paneles se observó una característica inusual, el endurecimiento del material orgánico, se produjo simultáneamente con el ajuste del mineral silico-aluminato, al aplicar los mismos parámetros termo-endurecibles, de 150-180 ° C de temperatura. (Davidovits, 1993),este desarrolló sistemas de activación alcalina de materiales basados en caolín y Metacaolín, la mezcla de este alumino-silicato sólido con una solución cáustica altamente alcalina constituida con hidróxidos y/o silicatos produce un material sintético, identificando que las propiedades ligantes de los geopolímeros son atribuidas a que las especies disueltas tras la activación alcalina son polimerizadas, de manera que se produce una red tridimensional amorfa de los aluminosilicatos, que endurece rápidamente y presenta buenas propiedades mecánicas.

En este sentido, el aprovechamiento de cenizas en la elaboración de materiales alternativos de construcción se ha venido contemplando como una de las alternativas de sustitución del cemento convencional, se han llevado a cabo estudios e investigaciones para la evaluación de las distintas propiedades de los materiales.

Empezando con la sustitución parcial del cemento hidráulico hasta llegar a la geopolimerización, con sustitución total del cemento hidráulico.



2.5.1.2 Clasificación

Actualmente, la normativa americana (ASTM-C-618, 2015) clasifica la ceniza volante de acuerdo a su composición química:

Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para la clase, como algunas tierras de diatomeas; lutitas, tobas y cenizas volcánicas y materiales diversos que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y lutitas.

Clase F: Este tipo de Ceniza posee propiedades puzolanica, son Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de antracita¹, carbón bituminoso², a partir de carbón sub-bituminoso y lignito³.

Clase C: Esta clase de Ceniza además de tener propiedades puzolanicas, posee propiedades cementantes, Cenizas con alto contenido de carbón proveniente de la quema de carbón sub-bituminoso⁴ o lignito y que a su vez puede presentar propiedades hidráulicas.

2.5.1.3 Ceniza de Elaboración de Ladrillo

La fabricación artesanal de ladrillo es considerada una de las principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmosfera (SEMARNAT-INE-CEC-USEPA-WGA, 2006).

En el Estado de Guanajuato, de acuerdo al inventario estatal 2008 (IEE, 2010), existen 2,362 ladrilleras artesanales en las cuales se utilizan principalmente combustibles como madera, aserrín, combustóleo, gas LP, diesel y aceites residuales.

Se recabo material de una ladrillera ubicada en el municipio de Valle de Santiago.

Actividad Puzolánica

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico, a la temperatura ordinaria, en presencia de agua, originando



productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica. Esta propiedad puzolánica es la más importante de las cenizas silicoaluminosas, que en mayor que en muchas puzolanas naturales y artificiales y depende del contenido del material silico-aluminoso soluble. Esta es una de las principales razones para su empleo, pues las cenizas son capaces de reaccionar con el hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberando en las reacciones de hidratación del cemento.

2.6 Aditivos

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

2.6.1 Tipos y usos

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

1. Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire).

Se usan para introducir y estabilizar de propósito, burbujas microscópicas de aire en el concreto. El aire incorporado mejora la resistencia del concreto contra el descascaramiento de la superficie causado por los productos químicos deshelantes. El concreto con aire incluido, contiene diminutas burbujas de aire distribuidas uniformemente en toda la pasta de cemento. La inclusión de aire en el concreto, se puede producir usando un cemento incluso de aire, o con la introducción de un aditivo incluso de aire, o combinación de ambos.

2. Aditivos reductores de agua.



Se usan para disminuir la cantidad de agua de mezcla necesaria para la producción de un concreto con un revenimiento específico, para reducir la relación agua-cemento, para disminuir el contenido de cemento y para aumentar el revenimiento. Los reductores de agua típicos disminuyen el contenido de agua aproximadamente del 5% al 10%. Con los aditivos reductores de agua normalmente se obtiene un aumento de la resistencia porque se disminuye la relación agua-cemento.

3. Plastificantes (fluidificantes).

Estos aditivos se adicionan al concreto de revenimientos y relación agua-cemento de bajo a normal para producir un concreto fluido, con alto revenimiento. El concreto fluido o plástico es un concreto con consistencia bien fluida, pero trabajable, y que se puede colocar con poca o ninguna vibración o compactación. Algunas aplicaciones para el concreto fluido son: colado de concreto en secciones muy delgadas, áreas con poco espaciamiento del acero de refuerzo, colado bajo el agua, concreto bombeado, para reducir la presión del bombeo, áreas donde no se pueden usar los métodos convencionales de consolidación y para la reducción de los costos de manejo.

4. Aditivos aceleradores (acelerantes).

Se usan para acelerar la tasa de hidratación (fraguado) y el desarrollo de la resistencia del concreto en edades tempranas. El desarrollo de la resistencia del concreto se puede acelerar por otros métodos, usando el cemento de alta resistencia inicial, bajando la relación agua cemento, usando un reductor de agua o curando el concreto a altas temperaturas.

5. Aditivos retardadores (retardantes).

Los aditivos retardantes se usan para retrasar la tasa de fraguado del concreto. Son muy útiles para extender el tiempo de fraguado del concreto, pero también se



usan para disminuir la pérdida de revenimiento y extender la trabajabilidad, especialmente antes de la colocación del concreto en ambientes con altas temperaturas.

Además de los aditivos mencionados existen una gran variedad a continuación se mencionan algunos de los aditivos:

6. Aditivos de control de la hidratación.
7. Inhibidores de corrosión.
8. Reductores de retracción.
9. Inhibidores de reacción álcali-agregado.
10. Aditivos colorantes.
11. Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

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

Las razones principales para el uso de aditivos son:

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



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

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

2.6.2 Aditivo utilizado en la investigación

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

2.7 Durabilidad

La durabilidad del concreto se puede definir como la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto. (H.Kosmatka, 2004)

La durabilidad de una estructura de concreto a menudo viene determinada por la velocidad a la que el concreto se descompone como resultado de una reacción química. En todas estas reacciones, las sustancias agresivas (iones y moléculas) se trasladan de algún lugar, principalmente desde el ambiente, hasta encontrar la correspondiente sustancia reactiva en el concreto. No obstante, incluso si la



sustancia agresiva ya está presente en el concreto, tal sustancia ha de ser transportada hasta donde se encuentra el producto reactivo para que puedan combinarse; es decir, si no hay transporte, no hay reacción (GEHO, 1993)

Factores que afectan la Durabilidad del Concreto.

Los factores que afectan la durabilidad del concreto, son aquellos que producen el deterioro del mismo. Estos factores se clasifican en los siguientes grupos:

Fisuras, Grietas y otros defectos.

Entre los defectos más frecuentes se encuentran las fisuras por retracción plástica y de asentamiento plástico.

Ataque Físico.

Es el conjunto de acciones del medio ambiente causantes del deterioro del concreto debidos por ejemplo a la acción del congelamiento y deshielo, al fuego, la abrasión y la erosión.

La acción de las bajas temperaturas cercanas a la de congelación del agua puede afectar la durabilidad del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Cuando el concreto se somete a estas temperaturas, el agua en el sufre una expansión debida a su congelamiento, generando vacios y microgrietas que afectan la resistencia del concreto.

Ambiente químicamente agresivo

Existen agentes que incrementan la posibilidad de deterioro como son: las temperaturas elevadas, mucha absorción y permeabilidad, el curado deficiente y los ciclos de humedecimiento y secado.



Los compuestos que producen la mayoría de casos de ataque químico al concreto están constituidos por cloruros y sulfatos.

Cloruros. Se hallan en el ambiente, en las zonas cercanas al mar, en el agua marina, y en ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial.

Sulfatos. Se encuentran usualmente en el suelo en contacto con el concreto, consisten en Sulfatos de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio.

Corrosión de metales en el concreto.

El concreto por ser un material con alcalinidad muy elevada y alta resistividad eléctrica, es ideal para proteger al acero de refuerzo; solo que si se produce el proceso electroquímico de la corrosión se generan compuestos de óxidos de hierro.

Una forma de mitigar el avance de la corrosión de metales en el concreto es mediante la realcalinización electroquímica (REA) es un método utilizado para detener la corrosión de concreto reforzado carbonatado. Resultados experimentales muestran que la conductividad de los electrolitos tiene influencia en las mediciones de los parámetros electroquímicos en el sistema acero-concreto. La repasivación del acero de refuerzo con moderada corrosión ($0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ - $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) no puede ser alcanzada aún con periodos largos de aplicación de la técnica. En relación con el pH alrededor del acero, se alcanza un valor promedio de 12.5, y en la superficie de los especímenes de 11, esto indica condiciones favorables para que el fenómeno de la corrosión no se incremente. También se observa que en especímenes fabricados con cemento puzolánico y realcalinizados con electrolito de Na_2CO_3 , la velocidad de depolarización es mayor y los valores del potencial de corrosión tienden a ser menos negativos. (F. González, 2008)



Reacciones químicas en los agregados.

Estudios realizados en los EE. UU., Europa y Japón han demostrado que el biodeterioro del concreto en sistemas de alcantarillado es un problema grave ya que las bacterias que producen ácido sulfúrico a partir de azufre reducido pueden disminuir el PH del Concreto de 9 a 2; por lo que se genera una acidificación del concreto; los productos típicos encontrados en el concreto son el yeso y la etringita los cuales se asocian al deterioro del concreto. (Le Borgne, 2008)

Las reacciones químicas que se presentan en estos agregados están constituidos por la llamada reacción Sílice-Álcalis y la reacción Carbonatos-Álcalis.

Reacción sílice-álcalis.

Se produce con algunos agregados del tipo ópalo, calcedonia, ciertas formas de cuarzo, andesita, dacita que reaccionan con los hidratos de calcio del cemento ocasionando compuestos expansivos.

La reacción propicia el desarrollo de un gel expansivo en la interface agregado-pasta, que rompe la estructura interna del concreto provocando fisuración y desintegración.

Reacción carbonatos-álcalis.

Se produce en algunas piedras calcáreas dolomíticas con un mecanismo aún no perfectamente definido pero que aparentemente difiere del anterior pues no se produce ataque a la sílice siendo el patrón de fisuración similar.

Mediante el análisis petrográfico y rayos X es posible establecer en cierto modo el riesgo de reactividad.



Modelo de Durabilidad de Torres y Martínez.

Se enunciarán a continuación algunas de las definiciones de los términos utilizados en este modelo de Torres y Martínez (SCT, 2001):

A. Funcionalidad y Durabilidad.

La funcionalidad es una cantidad cuantificable que está en la función de la capacidad de carga de la estructura.

B. Degradación.

El concepto de degradación es, por definición el decremento gradual de la funcionalidad de la estructura con el tiempo, y se puede cuantificar como el inverso de la funcionalidad.

C. Vida Útil.

Es el periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad, y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.

D. Vida Residual.

Es el tiempo a partir del momento que la estructura alcanza al anterior límite aceptable (fin de la vida útil).

Es decir es el tiempo que se tiene para reparar o rehabilitar la estructura antes que la degradación avance al límite de posible colapso.

E. Estado Límite de Servicio y Estado de Límite Último.

Se han definido dos estados límites durante el proceso de degradación de una estructura por corrosión del acero de refuerzo (SCT, 2001).

El primero llamado Estado Límite de Servicio, ELS, correspondería al tiempo en el cual la estructura ha llegado a su vida útil. El segundo, el Estado Límite Último o



ELU, es el tiempo en el cual la estructura llega a un estado de degradación inaceptable antes de que sufra un colapso inminente.

F. Probabilidad de Falla.

Es la probabilidad de exceder cierto estado límite ELS o ELU. Esta se da cuando existe una falla por degradación del material en una estructura o elemento estructural, en comparación con la falla mecánica la cual es causada por cargas mecánicas externas. Cabe mencionar que la falla por durabilidad podría ocasionar una falla mecánica (SCT, 2001)

2.7.1 Ataque por Sulfatos.

Los Sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (de calcio, de sodio, de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en la desintegración del concreto.

El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado y forma etringita y yeso.

El mayor daño producido por estas sales ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables, expuestos a estas condiciones de humedad y secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por acción capilar y posteriormente como resultado de la evaporación en la superficie, la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, generando presiones suficientes para causar la fisuración (PCA, 2004)



El procedimiento de prueba de ataque por sulfatos en concreto se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-452-95 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate (ASTM-C-452, 2015).

2.7.2 Carbonatación.

La carbonatación es la pérdida de alcalinidad del concreto, este fenómeno actualmente afecta a muchas estructuras del país; se lleva a cabo cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio $CaCO_3$ que tiene un pH menos alcalino.

El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K) por su alta alcalinidad, forma en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro $Fe(OH)_2$, que lo cubre y protege de la corrosión.

La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierda su capa pasiva, se considera un pH menor a 11 para que se inicie este efecto (Tuutti, 1982).

Los factores que afectan durante la carbonatación son:

- El contenido de humedad.
- El contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico.
- La permeabilidad del concreto.

El contenido de humedad relativa es un ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 – 70% aproximadamente ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso (Montani, 2000).



El contenido de dióxido de carbono en la atmosfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en la zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación en el concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO₂ que normalmente se encuentra en la atmosfera en el rango de 0.03% (ACI 222, 2002). El objetivo de la prueba es determinar el avance de la carbonatación del concreto por el método de la vía húmeda, con solución de indicador ácido-base.

La profundidad o el grado de carbonatación se pueden determinar por técnicas petrográficas a través de la observación del carbonato de calcio; también se puede utilizar la prueba de color de fenolftaleína para estimar la profundidad de carbonatación a través de la prueba de pH del concreto (la carbonatación reduce el pH). Con la aplicación de la solución de fenolftaleína en la superficie recién fracturada o cortada, las áreas no carbonatadas se vuelven rojas o moradas, mientras que las carbonatadas no cambian de color.

2.7.3 Congelamiento y Deshielo.

El concreto debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo mientras el concreto está más húmedo. El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos.

Con el empleo de aire incluido, el concreto es altamente resistente a este tipo de deterioro. Durante la congelación, el agua desplazada por la formación de hielo en la pasta se acomoda, no siendo perjudicial; las burbujas microscópicas de aire en la pasta ofrecen cámaras para que el agua entre y entonces alivie la presión hidráulica generada.



Cuando la congelación ocurre en el concreto que tiene agregado saturado, presiones hidráulicas perjudiciales se pueden crear también en el agregado. El agua, desplazada de las partículas de agregado durante la formación de hielo, no se puede escapar hacia la pasta circundante suficientemente rápido para el alivio de presión. Sin embargo, para la mayoría de las condiciones de exposición, una pasta de buena calidad, es decir de baja relación agua-cemento va a prevenir la saturación de la mayoría de los agregados.

2.7.4 Absorción Capilar.

Esta prueba se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en estado líquido y en contacto con el agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (ϵ) porosidad efectiva; (k) absorción capilar; y (m) resistencia a la penetración del agua; el valor de m esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

Poros de gel. Son de menor tamaño ($<15-25 \text{ \AA}$) y corresponden a espacios intersticiales del gel de la cal apagada. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades $< 20\%$ Estos poros de tamaño reducido impiden el transporte capilar del agua, que sólo puede atravesarlo en estado gaseoso. Los materiales de microporosidad alta son, por lo tanto, casi impermeables a nivel capilar.

Poros capilares. Son de forma variable y tamaño del orden de 2 nm a 1 μm .



Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cal apagada endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad.

Permiten el transporte capilar de agua; en estos casos, la cantidad absorbida depende de la capilaridad del material.

Poros de aire. Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de 0.05 mm. Aunque afectan a la resistencia mecánica, en cuando a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos benéficos, este tipo de poro grande tampoco favorece el transporte de capilar de agua.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales.

Factores que influyen en la absorción capilar.

-Estructura porosa del material.

Lógicamente, la absorción va a estar muy ligada a los factores que determinan la distribución de tamaño de poros.

Esta propiedad, varía con el tipo de la mezcla y el grado de compactación, siendo esta propiedad muy sensible a este último factor. La absorción aumenta con la relación agua/cal y disminuye en materiales bien curados. El límite inferior de esta propiedad está en torno a 0.1 mm/min0.5 en morteros.

-Contenido inicial de agua.



En la práctica, ninguna estructura de concreto o mortero está completamente seca, por lo que el extrapolar los datos de laboratorio a situaciones reales puede ser bastante complejo.

El contenido de agua que inicialmente existía en la probeta debe estar uniformemente repartido para que se cumpla la relación con la raíz cuadrada del tiempo.

-Temperatura.

La absorción es proporcional a $\sigma \eta^{0.5}$, siendo σ la tensión superficial y η la viscosidad del fluido absorbido. Este valor se duplica si pasamos de 5°C a 35°C, por lo que la absorción se incrementa con la temperatura, aunque muy despacio.

-Fluido absorbido.

La capacidad de absorber de un material varía con el tipo de fluido según la relación $\sigma \eta^{0.5}$. Añadiendo sales al agua se observa una ligera variación en cuando a la velocidad de absorción [San Juan Barbudo, 1992], posiblemente debido a los pequeños cambios de viscosidad y tensión superficial con el agua pura. En general, cualquier sal disuelta puede difundirse a través de los poros hacia el interior pudiendo recristalizar y producir tensiones y fisuración.

La permeabilidad está íntimamente relacionada con la estructura porosa del material en cuestión, en particular, con los poros capilares. Como ya se ha visto, la porosidad capilar decrece con el tiempo y por lo tanto, la permeabilidad.

La influencia de los áridos, en función de su tamaño, en la permeabilidad del agua. Se puede considerar a nivel práctico, que el árido es impermeable debido a su baja permeabilidad (10^{-8} – 10^{-12} cm/s); cuando mayor sea la proporción de árido se obtendrá un coeficiente de permeabilidad mayor. (Reyes., 2012)



2.7.5 Penetración de Cloruros.

La prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido usada frecuentemente en la evaluación de la durabilidad en las estructuras de concreto, ya que se puede establecer, en un tiempo relativamente corto, la determinación de la permeabilidad del material, dentro de un nivel de calidad que permite comparar concretos en cuanto a esta característica. (Martínez Sánchez B., 2003)

A partir de 1983 la prueba fue adoptada por la American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO T 277, 2015) y por la American Society for Testing and Materials, (ASTM C 1202, 2012), este método, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” determina la resistividad que presenta el concreto al paso del ion cloruro en tan solo 6 horas, al inducir un voltaje que polariza dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruro a penetrar en el concreto (Martínez Sánchez B., 2003).

La edad de prueba es un factor importante en los resultados de la prueba, a pesar que las normas para pruebas de permeabilidad no indican una edad de manera estricta, es recomendable que se hagan a edades tardías de 90 días o más, debido a que en este período la reacción del Ca(OH)_2 con los cementantes, alcanzado un desarrollo óptimo, sobre todo cuando se contemplan adiciones minerales. Cuando son probados concretos a edades menores a los 28 días, se pueden producir incrementos súbitos en el amperaje y, con ellos, en la temperatura de las soluciones, modificando la velocidad de hidratación de los C-H-S y la naturaleza de la estructura porosa (Martínez Sánchez B., 2003).

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 (Martínez Sánchez B., 2003).



2.7.6 Porosidad.

La porosidad es uno de los factores principales que influyen en la resistencia y durabilidad del concreto; mientras más poroso sea el concreto menor es su resistencia mecánica y tendrá mayor vulnerabilidad ante la agresividad del medioambiente (Mehta K. y Monteiro P., 1998)

En general, cuando la relación a/c es alta y el grado de hidratación es bajo, la pasta de cemento tendrá una alta porosidad capilar; contendrá un número relativamente grande de poros amplios y bien conectados, y por lo tanto, su coeficiente de permeabilidad será alto. En cuanto avanza la hidratación, la mayoría de los poros serán reducidos a un tamaño pequeño (100 nm o menos) y también perderán sus interconexiones, de manera que la permeabilidad se abatirá. (ERIC I. MORENO, 2006)

2.7.7 Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, et al., 2010).

2.7.8 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).

El pulso de las vibraciones horizontales (ondas longitudinales y transversales) es producida por un transductor electro-acústico, este transductor (emisor) a su vez se mantiene en contacto con la superficie del concreto bajo prueba. Se utiliza un



copulante o elemento de unión entre el concreto y el transductor (grasas, vaselina, jabones líquidos, o alguna otra sustancia recomendada por el instructivo del equipo que se utilice), cuya función es asegurar una correcta transmisión del pulso.

Las primeras ondas en llegar al otro transductor (receptor) son las ondas longitudinales (ondas de compresión) y estas son convertidas en una señal eléctrica que registra el tiempo “T” de viaje de la onda de un transductor a otro. La velocidad del pulso (de las ondas de compresión) está dada por la siguiente ecuación fundamental de la física:

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

Donde:

v = es la velocidad del pulso longitudinal

L = es la longitud del camino

T = es el tiempo que le toma al pulso atravesar el medio

La determinación de la velocidad de transmisión de una onda longitudinal en concreto tiene entre otras las siguientes aplicaciones:

- Determinación de la uniformidad del concreto en una zona o varias zonas, así como encontrar defectos en el mismo.
- Estimación de espesores de concreto mediante el método indirecto.
- Correlación entre la velocidad y la resistencia (como por ejemplo resistencia a la compresión y flexión), como una medida de aseguramiento de la calidad.
- Estimación del módulo de elasticidad y el módulo de Poisson para el concreto.
- Determinación de la resistencia residual después de daño por incendio, entre otros.
-



Factores en el concreto que afectan la velocidad del pulso: Hay algunos factores que se pueden encontrar en el concreto que afectan la lectura de la velocidad del pulso, entre ellos tenemos:

- Humedad y temperatura del concreto.
- La distancia (trayectoria o camino de tránsito).
- Forma y tamaño del espécimen.
- Efectos de las barras de refuerzo.
-

Hay que tomar en cuenta los factores anteriores con el fin de corregir los valores de velocidad, según sea el caso.

2.8 Pruebas Destructivas.

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

2.8.1 Resistencia a la Compresión Simple

La resistencia a compresión del concreto es la medida más común de desempeño empleada por los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras.

Esta resistencia se mide fracturando probetas en una máquina de ensayos de compresión; esta resistencia se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste la carga.

El objetivo de esta prueba es la determinación de la capacidad de carga del concreto a una edad establecida, mediante la aplicación de fuerza axial a un

elemento de dimensiones conocidas, basándose en la norma (ASTM C 109, 2016).

A continuación se presentan las fallas más comunes después de realizada la prueba:

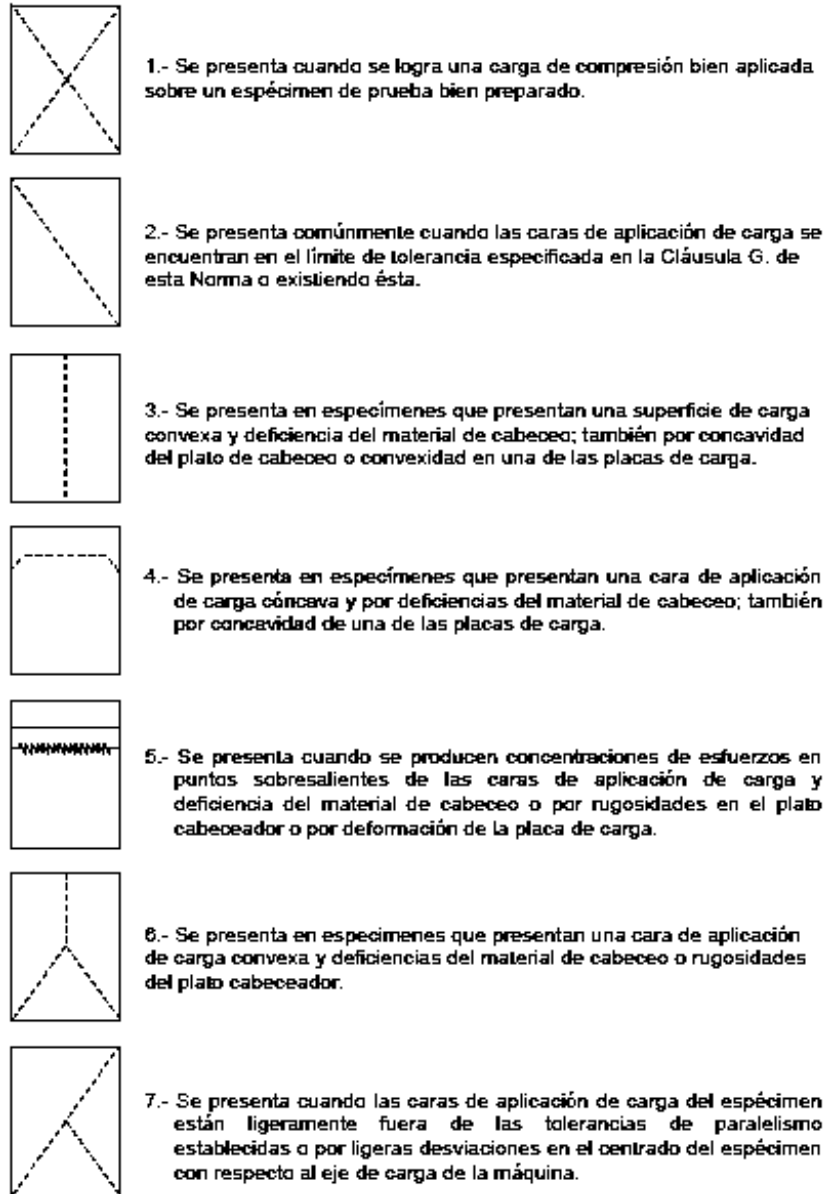


Figura 2.3. Fallas Comunes en especímenes sometidos a Compresión. (M-MMP-2-02-058, 2004)

El concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales puede ser de dos clases: clase 1, con peso volumétrico en estado fresco superior a 22 kN/m³



(2.2t/m^3) y clase 2 con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 19 y 22 kN/m^3 (1.9 y 2.2 t/m^3).

Los concretos clase 1 tendrán una resistencia especificada, $f'c'$, igual o mayor que 25 MPa (250 kg/cm^2). La resistencia especificada de los concretos clase 2 será inferior a 25 MPa (250 kg/cm^2) pero no menor que 20MPa (200 kg/cm^2).



3. Metodología

3.1 Características y propiedades de los materiales

3.1.1. Cemento

3.1.1.1 Consistencia

Es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato de Vicat, penetre dentro de la pasta de cemento elaborada con dicha agua, 10 mm \pm 1 mm bajo la superficie libre, durante 30 segundos después de haber iniciado la prueba

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

Equipo a utilizar.

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

Procedimiento.



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

- a) Obtención de la muestra representativa de cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.
 1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.
 2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje. Respecto al peso del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).
 3. Con la espátula se lleva el material de la orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
 4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
 5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
 - a. En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
 - b. En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 centímetros,



este ciclo de pasar de una mano a otra se debe de repetir 6 veces terminado lo anterior.

- c. En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansamos la bola en la palma de la mano, se introduce a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se sostiene con la otra mano llenado completamente el anillo con pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).

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

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



Referencia.

(NMX-C-057-ONNCCE, 2015); (ASTM-C-187-04, 2004)

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

3.1.1.2 Fraguado por el método de Gillmore

El objetivo es determinar el tiempo de fraguado inicial y final del cemento hidráulico mediante las agujas de Gillmore.

Equipo.

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

Temperatura y humedad.

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

Preparación de la pasta de cemento.



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

Moldeado del espécimen.

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

Determinación de los tiempos de fraguado.

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

Recomendaciones.

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



3.1.2. Arena

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

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

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



Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02

3.1.2.1. Cuarteo

El objetivo es obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado, para la prueba de que se trate, de la muestra obtenida en el campo.

Equipo.

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

Procedimiento.

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

Método “A”. Cuarteo Mecánico.

- Procedimiento para divisor de muestras.

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

Figura. 3.1



Figura 3.1. Agregado de la muestra a través del divisor. (F. Lopez, 2016)

El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.

Método “B”. Cuarteo Manual.

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



2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto. Figura 3.2..



Figura 3.2. Mezclado del material. (F. Lopez, 2016)

3. En el último cambio se traslapa la muestra entera dentro de una pila cónica depositando cada palada sobre la punta superior de la pila.
4. Se aplanar la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala.
5. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con la pala, trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie del material, removiendo y eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona. Figura 3.3.



Figura 3.3. División de la muestra en cuartos iguales. (F. Lopez, 2016).

6. Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.
 7. Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.
- Procedimiento con el trozo de plástico.

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

1. Se coloca el trozo de plástico sobre la superficie de una mesa, posteriormente se coloca el material en la parte central del plástico.
2. Se levantan los dos extremos opuestos del plástico y se unen a continuación, se regresa a la posición original del trozo de plástico. Enseguida se levantan los otros dos extremos opuestos y se unen, posteriormente se regresa a su posición original. Este proceso se repite varias veces hasta obtener una muestra homogénea.



3. Se elimina la mitad del material ya revuelto, para lo cual se lleva el trozo de plástico con el material, hasta el borde de la mesa, de tal manera que la mitad del plástico quede sobre la muestra y la otra mitad en el aire sujeta con una de las manos, cogiendo el extremo que esta sobre la mesa, se suelta el extremo que está en el aire con lo cual se elimina la mitad del material. Este deberá ser recibido en un recipiente.

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

Especificaciones.

Las muestras de campo de agregado fino se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método "A". Las muestras de campo que se reduzcan por el método "B" deben encontrarse húmedas superficialmente de no ser así se deben humedecer y después deben ser remezcladas.

Referencia.

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

3.1.2.2. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.

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

Equipo a utilizar.

- Una muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.



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

Procedimiento de la prueba.

1. La muestra de 2 kilogramos se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras.
2. Al término de este tiempo, se seca superficialmente la arena, por medio del molde truncocónico como se describe a continuación.
 - 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. Figura 3.4.

Para saber cuándo la arena está seca superficialmente se coloca el molde truncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en cuatro capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 10 a la primera, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse, quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que la arena todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que



realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Figura 3.4. Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico (F. Lopez, 2016).

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

Cálculos.



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

Donde:

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

Ms = Masa seca del material. (Gramos).

Referencia.

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

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

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

Equipo a utilizar.

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

Procedimiento de la prueba.

Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros,



distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo. Figura 3.5.



Figura 3.5. Pesado del recipiente lleno con el material. (F. Lopez, 2016).

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

Cálculos.

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

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).



Referencia.

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

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

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

Equipo a utilizar.

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

Procedimiento de la prueba.

Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material.

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



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

Cálculos a realizar.

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

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Referencia.

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

3.1.2.5. Granulometría en arenas.

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

Equipo a utilizar.

- Un juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola con su respectiva tapa.
- Una balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.



- Charolas, espátulas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

Procedimiento de la prueba.

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.
3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa. Figura 3.6.



Figura 3.6. Mallas colocadas en orden decreciente. (F. Lopez, 2016).

5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap).
- 6.
7. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.
8. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error. Figura 3.7.



Figura 3.7. Material retenido en cada una de las mallas previamente pesado. (F. Lopez, 2016).



El registro debe hacerse en una tabla como la siguiente.

Tabla 3.2 .Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de granulometría.

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

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

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

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

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



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

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

5. Módulo de finura:

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

Recomendaciones y especificaciones.

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

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

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

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



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

Gráfica.

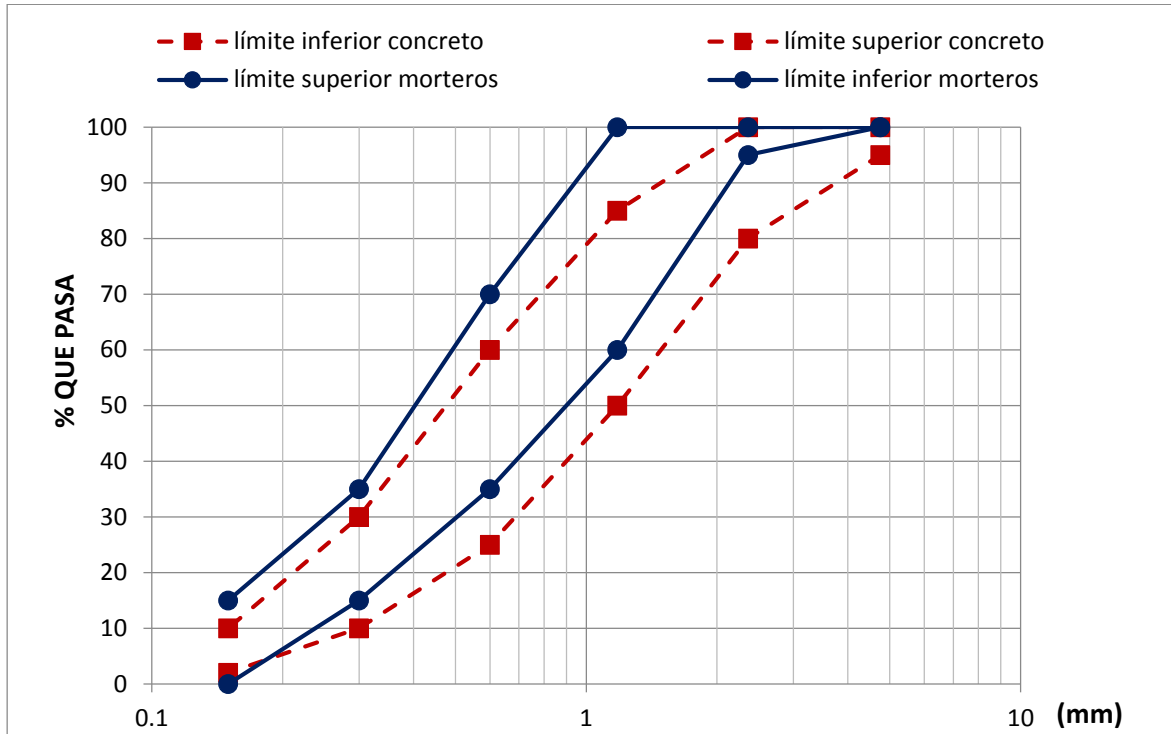


Figura 3.8 .Ejemplo de gráfica de composición granulométrica.

3.1.2.6. Colorimetría en arenas.

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

Equipo a utilizar.

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



Procedimiento de la prueba.

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

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

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).

Después de 24 horas se comparan los colores.

- Se toma una muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
- Se seca hasta peso constante a una temperatura no mayor a 110 ° C.
- Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 133 cm³ adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 206 cm³.
- Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo posteriormente se dejará reposar 24 horas Figura 3.9.



Figura 3.9. Muestras dejando reposar durante 24 horas. (F. Lopez, 2016).

- Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica. Si no se tiene esta, se compara con el color de la solución normal que se haya hecho en la otra botella idéntica Figura 3.10.



Figura 3.10. Tabla colorimétrica. (F. Lopez, 2016).



Tabla 3.4 . Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004).

Carta Colorimétrica				
1	2	3 (Color Límite)	4	5

Recomendaciones a seguir.

Si el color obtenido es más oscuro que el color normal, podemos sospechar de un exceso de materia orgánica en la arena.

Para comprobarlo debemos hacer otra prueba de colorimetría con la misma arena pero lavada ya que ocasionalmente se presentan materiales de origen inorgánico que reaccionan con la solución de sosa cáustica dando un color oscuro sin existir materia orgánica. Esta es la razón por la cual debe de repetirse la prueba y si esta vuelve a dar un color oscuro debemos completar la prueba de colorimetría con un análisis químico.

3.1.2.7. Sedimentación en arenas.

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

Equipo a utilizar.

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

Procedimiento de la prueba.



1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca agua hasta la marca de 828 ml.
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 es que durante el tiempo de reposo el material se va sedimentar y hay que observar si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml. Figura 3.11.



Figura 3.11. Muestras en reposo. (F. Lopez, 2016).

Reporte.

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



3.1.2.8. Material que pasa por la malla #200.

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

Equipo a utilizar.

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

Procedimiento de la prueba.

1. Se toma una muestra representativa de 600 gramos de arena, se seca a una temperatura no mayor de 110°C.
2. La muestra seca y fría se coloca en la balanza y se pesa al décimo de gramo (Mi).
3. Se coloca el material en un recipiente y se le agrega agua hasta saturar.
4. Se agita enérgicamente la muestra con agua y se vierte inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).
5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua quede completamente clara. Figura 3.12.



Figura 3.12. Lavado del material. (F. Lopez, 2016).

6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.
7. Se seca el material completamente, se deja enfriar y se obtiene la masa (Mf).

Cálculo.

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

Dónde:

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

M_i = masa seca inicial, gramos.

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

Recomendaciones y especificaciones a seguir.



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

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

Tabla 3.5 . Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).

Concepto	Material Máximo permisible en Masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2014	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 ⁽¹⁾	3.00 ^(A)
En concretos presforzados	8.00 ⁽¹⁾	-
En otros concretos	15.00	5.00 ^(A)

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

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

3.1.2.9. Terrones de arcilla.

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



Equipo a utilizar.

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

Procedimiento de la prueba.

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente un kilogramo, se seca una temperatura no mayor de 110° C teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla. Figura 3.13.
2. Se deja enfriar la muestra y se pasa por la malla N° 16, del retenido se toma una muestra de 100 gramos y se anota como Mi pesados al décimo de gramo. En este caso, se utilizaron tres muestras a las cuales se les hizo la prueba y se tomó un promedio.



Figura 3.13. Muestras representativas para la realización de la prueba de terrones de arcilla. (F. Lopez, 2016).

3. Se colocan los 100 gramos de arena en una charola y se le adiciona agua hasta cubrir la muestra, se deja durante 24 horas.
4. Posteriormente se escurre el agua libra y se extiende la arena en el fondo de una charola para romper, con los dedos, los terrones de arcilla que aún existan.
5. A continuación se hace pasar el material por la malla N° 30, lavándola con mucho agua, el retenido en esta malla se recoge en una charola y se seca totalmente, se deja enfriar y se pesa nuevamente al décimo de gramo anotándose como M_f .
6. Cálculo del porcentaje de terrones de arcilla:

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



Dónde:

Mi = masa inicial, 100 gramos.

Mf = masa seca sin terrones en gramos.

Especificaciones y recomendaciones a seguir.

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

3.1.2.10. Densidad de la arena.

El objetivo es determinar el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

Equipo a utilizar.

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



Procedimiento de la prueba.

- Utilizando la probeta.
 1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.
 2. En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial V_i en cm^3 . Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena (M_a) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.
 3. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua porque esto no ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua y vamos a registrar este valor como volumen final V_f .

Cálculos a realizar.

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

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

Dónde:

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

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

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



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

Cálculos a realizar.

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

3.1.2.11. Equivalente de arena.

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

Equipo a utilizar.

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule.



- Tubo irrigador.
- Un tramo de manguera.
- Un pisón metálico de 1000 ± 5 gramos.
- Cápsulas de 85 ± 5 mi (metálicas).
- Embudo.
- Cronómetro.
- Dos frascos de 3.875 litros.
- Malla N° 4.
- Papel filtro N° 12.
- Solución de reserva.
- Solución de trabajo.

Preparación de la solución de reserva.

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

Preparación de la solución de trabajo.

En un frasco de 3.875 litros se colocan 85 ± 5 cm³ de la solución de reserva completando con agua destilada hasta el nivel de 3.785 litros.

Procedimiento de la prueba.

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



1. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa.
2. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de 4 ± 0.1 de pulgada y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material. Déjese reposar 10 ± 1 minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.
3. A continuación se coloca el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo y agítase con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos.
4. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedo en las paredes de la probeta, se llena con solución de trabajo hasta la marca de 15 y se deja reposar 20 minutos al término de este tiempo en la escala de la probeta se lee el nivel superior de la arcilla en suspensión la cual se denominará lectura de arcilla.
5. Se introduce el pisón lentamente en la probeta ajustando hasta que el pisón se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará lectura de arena.

Procedimiento para calcular el equivalente de arena:

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

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

Causa de error.



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

3.1.3. Agua

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

3.1.4. Aditivo

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

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

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



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

Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150° C. Su temperatura de descomposición es a los 380° C. En dosificaciones normales, el Crisotan R-5 no afecta al calor de hidratación del concreto. No contribuye a la corrosión del acero, ni al crecimiento de microorganismos. Tabla 3.6.

Tabla 3.6 . Propiedades típicas del Crisotan R-5.

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

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

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

La forma en la cual se utilizó el aditivo fue mezclando el porcentaje requerido en el agua que se utilizó para el colado (cabe mencionar que el porcentaje requerido para cada mezcla se definió antes de cada prueba, por medio de tanteos hasta llegar a obtener la fluidez de 110 ± 5 , sin utilizar cantidades mayores a las que especifica la ficha técnica), ahí se dejó reposar durante 30 minutos para después agregar el agua a la mezcla y realizar el colado de los especímenes, se llegó a la conclusión de que el aditivo reaccionaba de diferente manera dependiendo del tiempo que estuviera en contacto con el agua, por eso, en todas las coladas, el aditivo se dejó reposar el mismo tiempo.



3.2 Pruebas realizadas al mortero fresco

3.2.1. Fluidez.

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

Equipo a utilizar.

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

Procedimiento de la prueba.

1. Lubricación de la mesa. El eje vertical se mantiene limpio y se lubrica con aceite SAE-10. No debe haber aceite entre las caras de apoyo de la saliente del eje y el soporte. El aceite sobre la cara de la leva disminuye el desgaste y facilita la uniformidad del funcionamiento, se recomienda levantar la mesa y dejarla caer doce veces.
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 den el volumen del molde, se compacta cada una de las capas con 20 golpes, las cuales se distribuyen en la sección transversal, teniendo cuidado de no penetrar la capa subyacente Figura 3.14., al finalizar se enrasa con una llana el exceso de mortero se retira, limpiando el área de la mesa que se encuentra al molde, el molde se remueve con un tirón firme hacia arriba. La mesa se eleva y se deja caer 1.3 cm, 25 veces durante 15 segundos Figura 3.15., haciendo girar la leva a una velocidad uniforme, el diámetro del mortero extendido es el promedio de seis medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas al 0.5 cm Figura 3.16..



Figura 3.14. Compactación de la mezcla (F. Lopez, 2016).



Figura 3.15. Expansión de la mezcla de forma manual, haciendo girar la leva. (F. Lopez, 2016)



Figura 3.16. Toma de lecturas para obtener la fluidez. (F. Lopez, 2016)

Cálculos a realizar.



Se registra como el porcentaje en que se incrementa el diámetro del mortero extendido con respecto al diámetro original de la base del mortero moldeado, ósea:

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

Referencia.

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

3.2.2. Elaboración de especímenes.

Según la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), los moldes para la elaboración de los especímenes deben cumplir ciertas características, entre ellas están que los moldes deber ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material que no sea absorbente y que no sea reactivo con el cemento portland, dichos moldes deben tener las dimensiones que la misma norma nos cita y deben mantenerlas bajo condiciones severas de trabajo, deben ser no permeables durante su empleo y si es necesario se les puede agregar algún material de sello por la parte externa, tales como grasa, plastilina o parafina. Deben tener los elementos necesarios para la fijación correcta a la base. Si el molde es de uso repetitivo, se le puede agregar algún desmoldante que facilite la extracción del espécimen del molde.

3.2.2.1. Cubos.

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



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

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

El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109 M, I., 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se le dieron 8 golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, lo cual se ilustra en la Figura 3.17 y 3.18., el pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5 cm x 1.25 cm, después del llenado de la última capa, se tenía el cuidado de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula o similar.

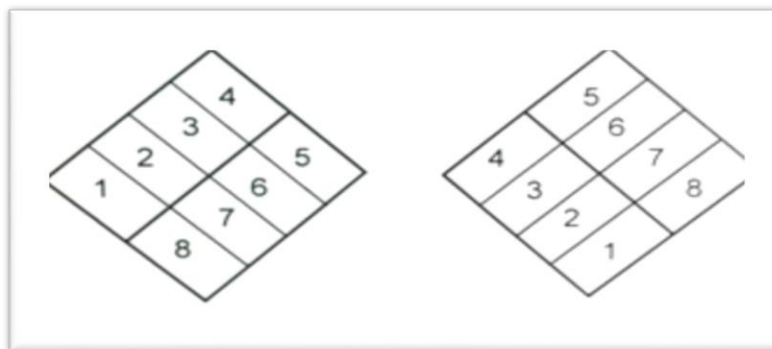


Figura 3.17. Etapas del llenado de cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm.



Figura 3.18. Llenado y enrazado de muestra. (J. D. Alvarez, 2016)

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

En la superficie de cada cubo se les puso con ayuda de un marcador indeleble su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura que se le puso a todos los especímenes como son: cubos, cilindros y prismas fue la misma), en dicha nomenclatura llevaba la fecha de elaboración del cubo, la sustitución, el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró y el material de dicha sustitución. Figura 3.19..



Figura 3.19. Etiquetado de las muestras. (J. D. Alvarez, 2016)

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

Después de hacer lo anterior se limpiaron cada uno de los moldes para la fabricación de cubos, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar especímenes de la correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes cúbicos requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente.

3.2.2.2. Prismas.

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 4cm x 4cm x 16cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable. El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (2cm), cada capa se compactó con 12 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos Figura 3.20.



Figura 3.20. Características de las muestras. (J. D. Alvarez, 2016)

Transcurridas 24 horas de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes para iniciar el proceso de curado por inmersión.

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 6cm x 6cm x 26cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable. El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (3cm), cada capa se compactó con 48 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos. Figura 3.21.



Figura 3.21. Elaboración de prismas de 6x6x26. (J. D. Alvarez, 2016)

Transcurrida 1 semana de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes para iniciar el proceso de curado por inmersión. Cuidando siempre que las muestras tuvieran la hidratación adecuada.

3.2.2.3. Cilindros.

Una vez que ya se tiene la mezcla, es necesario aceitar el interior de los moldes que se van a utilizar para evitar que el concreto se adhiera al metal.

El cilindro se llena en dos capas de igual altura (10cm) y cada capa se apisona con una varilla lisa de 5/8 de diámetro con uno de sus extremos redondeados, la cual se introduce 25 veces por capa tratando de abarcar la totalidad de la superficie del concreto, teniendo en cuenta de que la varilla solo atraviese la capa que se está compactando, sin pasar a la capa siguiente. Una vez que ya se realizó la compactación con la varilla punta de bala, se dan 15 golpes con un martillo de caucho a las paredes de este, hasta que la superficie del concreto cambie de mate



a brillante, con el objeto de eliminar considerablemente las burbujas de aire que se queda atrapado en el concreto. (Jacobo, 2014)

Al final de la compactación se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda de la varilla punta de bala.

Los cilindros recién colados deben quedar en reposo, en un sitio cubierto y protegidos de cualquier golpe o vibración, después de 24 horas se desmoldan cuidadosamente y se procede a marcarlos y someterlos a curado en una pila con agua cuidando que queden totalmente sumergidos.

3.2.3. Curado.

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

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

Todos los especímenes fueron curados sumergiéndolos en agua dentro de botes de plástico, a la cual se le monitoreo la temperatura para poder cumplir con la normatividad (NMX-C-148-ONNCCE, 2010). Figura 3.22.



Figura 3.22. Curado de especímenes. (J. D. Alvarez, 2016)

3.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido

Las pruebas realizadas al mortero endurecido se pueden clasificar en dos: no destructivas y destructivas.

3.3.1. Actividad Puzolánica.

La evaluación del índice de actividad puzolánica se realizó conforme la norma (ASTM C 311, 2013).

3.3.2. Durabilidad.

3.3.2.1. Ataque por Sulfatos

Las sales en estado sólido no atacan al mortero, pero cuando se encuentran en solución puede reaccionar con la pasta del mortero endurecido. Algunas arcillas contienen, por ejemplo álcalis y sulfatos de calcio y de magnesio, y las aguas freáticas con este tipo de arcilla son una solución de sulfatos. Por lo



tanto puede haber un ataque a la matriz de cemento, al reaccionar el sulfato con el Ca(OH)_2 y con el C_3A . El mortero atacado por sulfatos tiene un aspecto blanquecino y característico. El daño suele iniciarse en los bordes y los ángulos, va seguido por agrietamientos y descascaramientos progresivos que reducen el mortero a un estado frágil o incluso blando (Rivera, 2016).

Procedimiento:

1. Como primer paso debe realizarse una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) con una concentración de 350 g de sulfato por cada litro de agua destilada. La cantidad debe ser suficiente para llevar a cabo 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes. En la experimentación se preparan 10 litros de solución. El proceso de preparación de la solución consiste en disolver el sulfato en el agua a una temperatura no mayor a 40°C y mezclar dicha solución por un tiempo mínimo de 1 hora. Se debe evitar que quede polvo al final del proceso o material contaminante en el recipiente del mismo.
2. Los especímenes deberán de secarse hasta masa constante antes de iniciar la prueba. Para esto se utilizaron cubos de 5x5, los cuales fueron secados a una temperatura de 50°C hasta masa constante.
3. Se pesan los especímenes para obtener la masa seca o masa inicial de cada uno y se prepara un recipiente capaz de contener todas las muestras para cada mezcla, durante el tiempo de prueba procurando mantener un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la superficie de los especímenes, estos deberán ir apoyados sobre una rejilla que evite su reposo directo sobre el fondo del recipiente y asegure el contacto con la solución en todas sus caras, por lo que deben estar separados 2 cm entre sí. Figura 3.23.



Figura 3.23. Inmersión de muestras en sulfato de sodio. (J. D. Alvarez, 2016)

4. Los especímenes deberán de permanecer en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniéndose a una temperatura en promedio de 21 °C.
5. Concluidas las 16 horas se sacan y se dejan escurrir durante 15 minutos para después hacerle pruebas físico-mecánicas a 3 cubos, las cuales incluyen: Resistividad Eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico y compresión.
6. después colocarlos en un horno previamente calentado a una temperatura constante de 50°C hasta conseguir masa constante nuevamente.
7. Pasado el tiempo de secado se sacan las muestras del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener masa seca.



8. Se ensayan las muestras a compresión y se comparan con los resultados de aquellas muestras que no se hallan sometido a los ciclos de humedecimiento y secado. Cada uno de los pasos del 3 al 6 se repiten hasta completar 5 ciclos de prueba.

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

3.3.2.2. Carbonatación.

La carbonatación es la pérdida de alcalinidad del concreto, este fenómeno actualmente afecta a muchas estructuras del país; se lleva a cabo cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino, con valores de 9 o menos.

El contenido de humedad relativa del ambiente es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50%–70% aproximadamente ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso (Montani, 2000)

La prueba fue realizada a 3 muestras prismáticas de 4cm x 4cm x 16cm de cada mezcla. Los especímenes se dejaron a la intemperie a partir de los 28 días de su elaboración, hasta la fecha de la prueba (90 y 180 días).

Procedimiento:

1. Las muestras se marcan en la cara sur ya que es la dirección de los vientos dominantes en la ciudad de Morelia, y por lo tanto la dirección más favorable para sufrir carbonatación. Figura 3.24.



Figura 3.24. Acomodo de las muestras. (J. D. Alvarez, 2016)

2. Las muestras deben de cortarse para tener una sección longitudinal en la dirección sur - norte. En el caso de la investigación el corte se llevó a cabo a la mitad del espécimen.
3. Después de que se realiza el corte longitudinal se limpia inmediatamente la cara interna de todo el material que queda suelto o polvo.
4. Se le aplica con un atomizador de manera uniforme a cada una de las caras del corte la solución de fenolftaleína, el tiempo que deberá transcurrir después de realizado el corte no deberá ser mayor de 15 min.
5. Después de realizado el corte se debe de tomar la profundidad de la carbonatación midiendo esta en cada lado del corte, obteniendo un valor promedio de la profundidad de carbonatación de cada lado para cada espécimen. La profundidad de carbonatación es la longitud que no se pigmenta. Figura 3.25.



Figura 3.25. Pigmentación de la zona no carbonatada. (J. D. Alvarez, 2016)

Cálculo:

El cálculo de la constante de carbonatación se hace de acuerdo la ecuación.

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}} \quad (14)$$

Donde:

K_{CO_2} = Constante de carbonatación en mm/ (año) 0.5.

X_{CO_2} = Profundidad de carbonatación en mm.

t = Tiempo de Exposición en años.

3.3.2.3. Congelamiento y deshielo.

Los efectos adversos producidos por congelamiento y deshielo son unos de los problemas principales de la durabilidad. El deterioro puede ser producido por la dilatación del agua de la pasta, la dilatación de algunas partículas del agregado o la combinación de ambas (Rivera, 2016).



Constituyen una condición de servicio durante la vida útil del mortero, por la repetición de ciclos de congelamiento y posterior deshielo, estando saturado el mortero. En ambos casos, la causa básica del deterioro puede asociarse con la expansión de volumen que sufre el agua al congelarse, pero los mecanismos de prevención del deterioro y las consecuencias del daño son diferentes.

Procedimiento:

1. Dos días antes se prepara el refrigerador industrial que se utilizara para la prueba, se monitorea la tempera para que cumpla a -18°C
2. Se sacan los especímenes de curado, se enumeran, se pesan, se toman sus medidas y se registran en la bitácora, además se les hacen las pruebas de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia y resonancia.
3. Se introducen en un recipiente los tres especímenes y se llena con agua hasta tener un tirante de 2 cm por encima del espécimen. Figura 3.26.

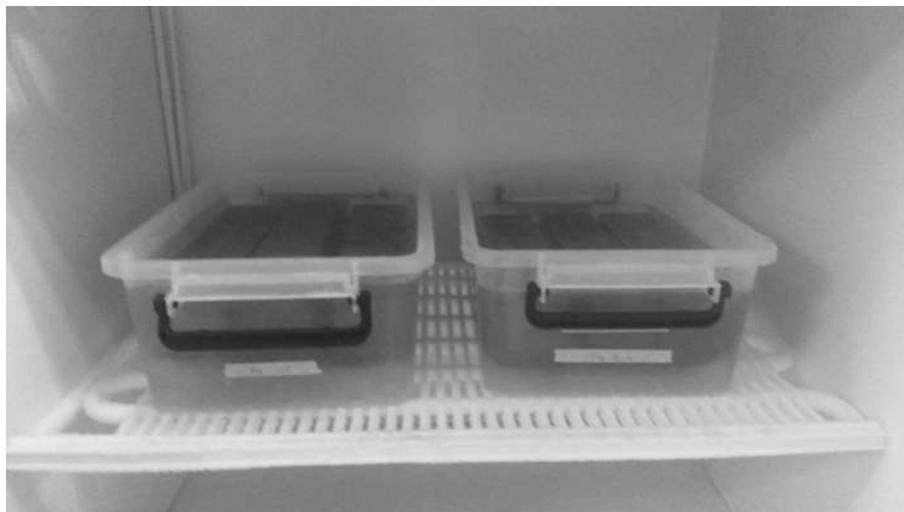


Figura 3.26. Inmersión de muestras en agua e introducidas en el refrigerador. (J. D. Alvarez, 2016)

4. Se introduce el recipiente al refrigerador durante 4 horas, transcurrido este tiempo se sacan los especímenes del refrigerador y se toma su temperatura, se toman de nuevo sus medidas, se obtiene su masa, se les

realiza resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia y resonancia y estos valores se registran como el ciclo uno. Figura 3.27.



Figura 3.27. Evaluación de la frecuencia de resonancia. (J. D. Alvarez, 2016)

5. Después de realizarle las pruebas se vuelven a introducir en el recipiente y toma su temperatura, se introducen en el refrigerador nuevamente durante 4 horas.
6. Se sigue el mismo procedimiento durante 15 ciclos.
7. Si en algunos de los ciclos los recipientes tienen mucho hielo hay que retirarlo y llenarlo de agua.
8. Después de los 15 ciclos sometidos a congelamiento y deshielo se procede a hacerle la prueba de flexión para conocer el efecto en cuanto a su resistencia. Figura 3.28.



Figura 3.28. Prueba de Flexión en la muestra. (J. D. Alvarez, 2016)

3.3.2.4. Absorción Capilar

Esta prueba se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en estado líquido y en contacto con el agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (ϵ_e) porosidad efectiva; (k) absorción capilar; y (m) resistencia a la penetración del agua; el valor de m esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

Procedimiento:

1. El ensayo se realiza en especímenes de espesor aproximado de $H=50$ mm. Los especímenes se pre-acondicionan mediante un secado a 60°C por 48 horas o hasta masa constante.



2. Posteriormente se dejan enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
3. Se coloca resina o parafina en las caras laterales del espécimen para garantizar que el agua solo se absorba por la cara inferior. Figura 3.29.



Figura 3.29. Aplicación de parafina. (J. D. Alvarez, 2016)

4. Se registra su masa inicial, W_0 .
5. El espécimen se coloca sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, con un tirante de agua de 3 a 5 mm por encima de la parte inferior del espécimen. Figura 3.30.



Figura 3.30. Colocación de las Muestras. (J. D. Alvarez, 2016)

6. El recipiente se deberá mantener cerrado durante la prueba para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.
7. Se registra la masa del espécimen a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48...horas, hasta lograr masa constante.

Cálculo:

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (m).

$$m = \frac{t}{z^2}, \quad \left(\frac{s}{m^2}\right) \quad (15)$$

Donde:

z = representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo "t".

Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(W_t - W_o)/A}{\sqrt{t}}, \quad \left(\frac{kg}{m^2 s^{1/2}}\right) \quad (16)$$



$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000}, (\%) \quad (17)$$

Donde:

Wo = Masa inicial de la probeta (Kg o g).

Wt = Masa final de la probeta (Kg o g).

A = Área expuesta de la probeta (m o cm).

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

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior, es decir cuando $z=H$

Con la anterior información se obtienen la Sorción Capilar (S):

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}}, \quad \left(\frac{mm}{h^2} \text{ ó } \frac{m}{s^2} \right) \quad (18)$$

3.3.2.5. Penetración de cloruros.

La prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido utilizada, ya que se puede establecer en un tiempo relativamente corto, la determinación de la permeabilidad del material, dentro de un nivel de calidad que permite comparar concretos en cuanto a esta característica.

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

El ataque por cloruros al mortero puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla (por ejemplo: áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al concreto, entre otros (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).



Objetivo:

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

Procedimiento:

Preparación de los especímenes:

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



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

Colocación de los especímenes en las celdas:

9. Después de preparar las dos soluciones: hidróxido de sodio al cero punto tres normal ($\text{NaOH } 0.3\text{N}$) y cloruro de sodio al 3% ($\text{NaCl } 3\%$) ambas con un 100% de pureza. Y transcurridas las 18 horas se extraen las muestras del desecador para colocarlas en las celdas de cloruros, colocando los empaques en los bordos del espécimen recubiertos con vaselina, para que no haya desprendimiento de sustancias al momento de probarlas. Las celdas se sujetan con tornillos que están en las cuatro orillas para confinar el espécimen. Figura 3.31.

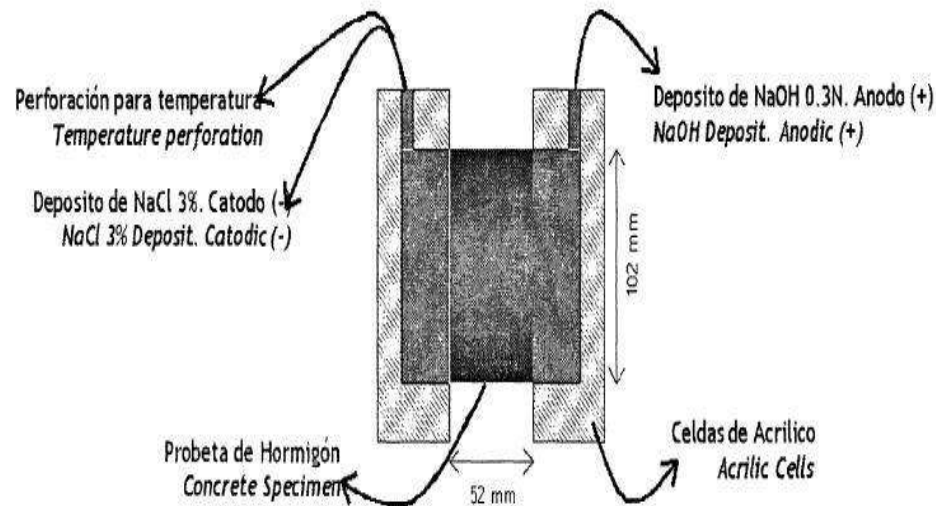


Figura 3.31. Armado de las celdas. (ASTM C 1202, 2012)

10. En cada extremo las celdas tienen un orificio para colocar en cada uno la solución que marca.
11. Con ayuda de un embudo, para no derramar líquido, se llenan completamente las celdas. Se conectan las terminales (positivo y negativo) a la fuente de carga, además, de conectar un cable que servirá como medidor de temperatura, en donde está contenido el Hidróxido de Sodio (NaOH).Figura 3.32.



Figura 3.32. Llenado de las celdas con la solución correspondiente. (J. D. Alvarez, 2016)

12. Se conecta la fuente de carga y se pone a trabajar, posteriormente se inicia el programa en la computadora para tomar las medidas de cada espécimen.

Figura 3.33.



Figura 3.33. Conectado de celdas y Equipo de medición. (J. D. Alvarez, 2016)



13. El proceso requiere de 6 horas para llevarse a cabo y será hasta transcurrido ese tiempo cuando se apague el programa y se desconecte la fuente de carga.

3.3.2.6. Porosidad.

OBJETIVO

Establecer los métodos de ensayo para la determinación de vacíos presentes en el mortero endurecido

Se utilizaron 5 especímenes cúbicos de cada mezcla y para la edad correspondiente.

PROCEDIMIENTO

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

CÁLCULOS



Porcentaje de volumen de poros permeables (vacíos)

$$\frac{M_{ss} - M_s}{M_{ss} - M_a} \times 100 \quad (19)$$

REFERENCIAS

(ASTM-C-642, 2013)

(RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000)

3.3.2.7. Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, et al., 2010).

Procedimiento de la prueba.

1. Se toman las dimensiones de la muestra.
2. Se garantiza la conexión del amperímetro y voltímetro.
3. Se monta la muestra en el equipo correspondiente.

4. Los cubos se colocan de acuerdo al lado que tenga más plano, nunca por la cara donde fueron colados.
5. Se corrobora el contacto de los pines con las placas metálicas que se colocan sobre el espécimen Figura 3.34.

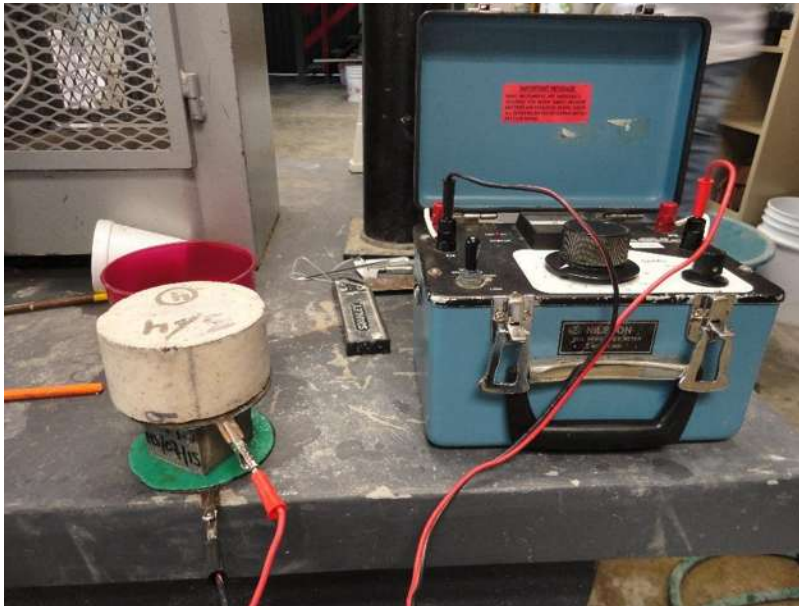


Figura 3.34 . Colocado de las muestras en el equipo. (J. D. Alvarez, 2016)

6. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada.
7. Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato lo más preciso posible.

Cálculos a realizar.

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

$$\rho = R_e \frac{A}{L} \quad (20)$$

Donde:



ρ = resistividad eléctrica, en ohm-cm.

R_e = resistencia eléctrica, en Volts.

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

L = longitud del espécimen, en cm.

Especificaciones.

Tabla 3.7 . Criterios de evaluación. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

Resistividad Eléctrica ($\text{k}\Omega\text{-cm}$)	Riesgo de Corrosión
< 10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo

3.3.2.8. Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU).

La velocidad de pulso ultrasónico se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar por lo cual se empleó

un medio conductor, en este caso un gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel comercial para el cabello, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, por lo que se decidió aceptar el empleo del gel para el cabello para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones que se iban a llevar a cabo, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados. Figura 3.35.



Figura 3.35. Acomodo de transductores. (J. D. Alvarez, 2016)

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

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



Tabla 3.8 . Criterios de evaluación en Velocidad de Pulso Ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

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

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

3.3.3. Destructivas.

3.3.3.1. Resistencia a la compresión simple.

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

La prueba se le realizó a especímenes cúbicos de 5 cm por lado utilizando la maquina Forney. Se le aplicó a 5 especímenes de cada mezcla a la edad correspondiente. Se tomó un promedio de los resultados de los 5 cubos el cual se tomó como resistencia a la compresión simple de dicha mezcla, cabe mencionar que también se le realizó la prueba a 5 especímenes cúbicos sin sustitución de materiales, es decir, a 5 especímenes testigo.

Procedimiento de la prueba.

En la fecha señalada, una vez que las muestras hayan cumplido la edad correspondiente, se sacan del lugar en donde han llevado el proceso de curado y



se seca cada espécimen hasta que su superficie haya quedado completamente seca. Se miden las dimensiones de la cara que va a estar en contacto con la platina móvil de la máquina universal de pruebas. Se llevan las muestras a la máquina debiendo poner en la platina fija una cama de arena fina, colocándose el cubo sobre esta. Sobre la cara superior de la muestra se puso también una cama de arena, esto con la finalidad de que la carga se distribuya uniformemente en toda el área y se aplica la carga en forma lenta hasta la falla de la muestra. Figura.



Figura 3.36 . Aplicación de carga. (J. D. Alvarez, 2016)

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

Cálculos.

$$R = \frac{W}{A} \quad (21)$$

Donde:

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

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

A = Área de la muestra, en cm².



Tabla de registro.

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

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

Referencia.

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



4. Resultados y discusiones.

4.1 Características y propiedades de los materiales

4.1.1 Cemento

4.1.1.1 Consistencia

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

Tabla 4.1 . Resultados de consistencia normal.

Material		Consistencia Normal
		%
Testigo		31
CEL	2%	31.5
	5%	33.8

4.1.1.2 Fraguado por el método de Gillmore

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

Tabla 4.2 . Resultados de tiempos de fraguado.

Materiales	Tiempos de fraguado	
	Inicial (min)	Final (min)
TESTIGO	150	390



4.1.2. Arena

4.1.2.1. Cuarteo

El cuarteo se realizó combinando dos métodos, se revolvió la arena con las palas, se dividió el material y después se usó el divisor de muestras para obtener la muestra representativa.

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

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

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

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

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

4.1.2.3. *Determinación de la masa volumétrica seca y suelto de una arena (MVSS).*

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



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

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

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

La masa volumétrica seca y suelta (MVSS) de la arena es de 1.46 g/cm³.

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

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

Los resultados fueron los siguientes:



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

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

La masa volumétrica seca y varillada (MVSV) de la arena es de 1.54 g/cm³.

4.1.2.5. Granulometría en arenas.

Esta prueba se le realizó a tres muestras de arena, se hizo un promedio de las tres muestras, obteniendo así el módulo de finura, que es igual a 2.539, el cual, según la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) y de acuerdo a parámetros de calidad, está dentro de los rangos que nos dicen que debe estar entre 2.5 y 3.



Tabla 4.6 . Módulo de finura promedio.

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

La gráfica de composición granulométrica resulto como sigue:

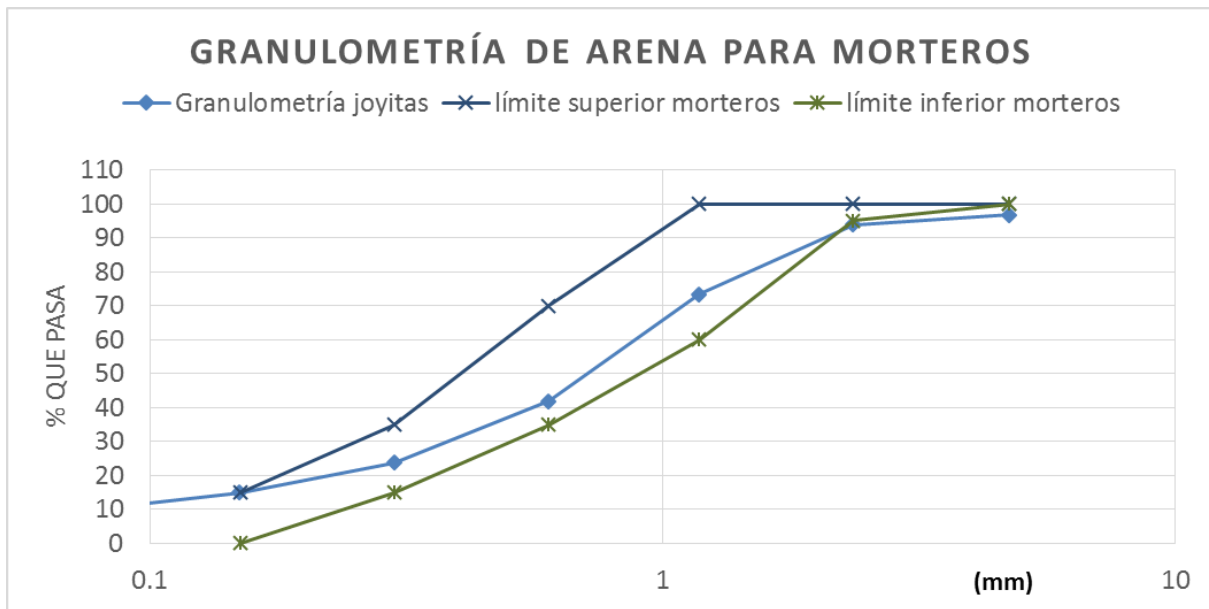


Figura 4.1. Gráfica de composición granulométrica de la arena de “Joyitas”.

4.1.2.6. Colorimetría en arenas.

Se tomaron 3 muestras de arena a las cuales se les efectuó la prueba de colorimetría, estos fueron los resultados Figura 4.7.:

Tabla 4.7 .Resultados de colorimetría.

Muestra	Colorimetría
1	Escala 2
2	Escala 2
3	Escala 2



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

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

4.1.2.7. Sedimentación en arenas.

Se le realizó la prueba a tres muestras representativas de arena, dos de ellas cumplieron con lo establecido en las especificaciones del manual de prácticas, por lo cual podemos decir que la muestra se acepta.



Resultados de la prueba de sedimentación. (F. Lopez, 2016)

4.1.2.8. Material que pasa por la malla #200.

Tabla 4.8. Porcentaje de material fino que contiene la arena.

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

De acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014), está dentro del límite para concretos presforzados, en nuestro caso, un mortero sometido a compresión, este límite es de 8%.



4.1.2.9. Terrones de arcilla.

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

Tabla 4.9 . Determinación del porcentaje de terrones de arcilla que contiene la arena.

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

Se tomó el promedio de las muestras, este es de 0.83 %. Lo que nos indica que la arena tiene un bajo y aceptable contenido de terrones de arcilla. Esta dentro de los rangos que indica la norma (ASTM C 142, 1997), los cuales son 0.6 y 1.2 %.

4.1.2.10. Densidad de la arena.

Los resultados de la prueba de densidad se muestran en la siguiente tabla 4.10:



Tabla 4.10 . Resultados de la densidad de la arena.

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

El promedio indica que la densidad del material es alta, es decir, es de buena calidad (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

4.1.2.11. Equivalente de arena.

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

Tabla 4.11 . Porcentaje del equivalente de arena.

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

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



4.2 Pruebas realizadas al mortero fresco.

4.2.1 Fluidez

Los resultados obtenidos de fluidez se describen a continuación en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Resultados de fluidez para cada mezcla.

Mezcla	Cemento (g)	CEL (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluidez (%)
Testigo	163.64	0	450	111.27	0.68	0	99
CEL 2%	160.37	3.27	450	111.27	0.68	0.2	108
CEL 5%	155.46	8.18	450	111.27	0.68	0.5	107

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

4.2.2 Elaboración de especímenes.

Todos los especímenes se realizaron de acuerdo a las normas que rigen cada uno, en el caso de los cubos, se elaboraron conforme a la norma (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), el llenado de los moldes, el apisonado y el desmoldado se realizaron correctamente.



4.2.3 Curado.

Como ya se mencionó, en el apartado 3.2.4, los especímenes fueron curados en recipientes de plástico, sumergiéndolos totalmente en agua, fueron colocados inmediatamente después de desmoldarlos, permanecieron ahí hasta que cumplieron la edad para ser probados.

4.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido

4.3.1 Actividad Puzolánica

La evaluación del índice de actividad puzolánica se realizó conforme la norma ASTM C311. Como se observa en la tabla 4.13, evaluado mediante la prueba a compresión en cubos a una edad de 28 días. La actividad puzolánica se incrementa en un 10.27% para la mayor sustitución.

Tabla 4.13. *Índice de actividad puzolánica para las diferentes cenizas en sustitución, (utilizando el esfuerzo a compresión en cubos como parámetro)*

Esfuerzo (MPa)	Testigo	27.1073122
	CEL 2%	24.7098989
	CEL 5%	29.8936213
Índice de actividad puzolánica (%)	CEL 2%	91.155843
	CEL 5%	110.27881

Para los dos porcentajes de sustitución, el porcentaje de índice de actividad puzolánica se encuentra por encima de 75%, límite inferior establecido en la norma ASTM C618. Por lo tanto los materiales en estudio son adecuados para realizar sustituciones de cemento en los morteros.

Para morteros de albañilería sin adiciones la norma mexicana establece que la resistencia a compresión de los morteros a 7 días debe ser de 4.4 MPa, y de 7.8 MPa a 28 días, como mínimo en ambos casos (NMX-C-021-ONNCCE, 2015).



4.3.2 Durabilidad.

4.3.2.1. Ataque por Sulfatos

El comportamiento de las muestras va de acuerdo a lo visto en la literatura, el ciclo cero que es en el cual aún no se han atacado las muestras, no puede haber ni pérdida ni ganancia de peso en estas. Sin embargo al paso de los ciclos se puede observar Figura 4.3. y 4.4. que existe una pérdida de masa y posteriormente dicha pérdida disminuye, incluso en llega a haber ganancias de estas. Esto debido a que las sales se solidifican dentro de la matriz y dan lugar a dicha ganancia en masa. Para después el incremento de volumen esta sal haga que la muestra se disgregue y de lugar a la pérdida de masa mostrada en las ultimas columnas.

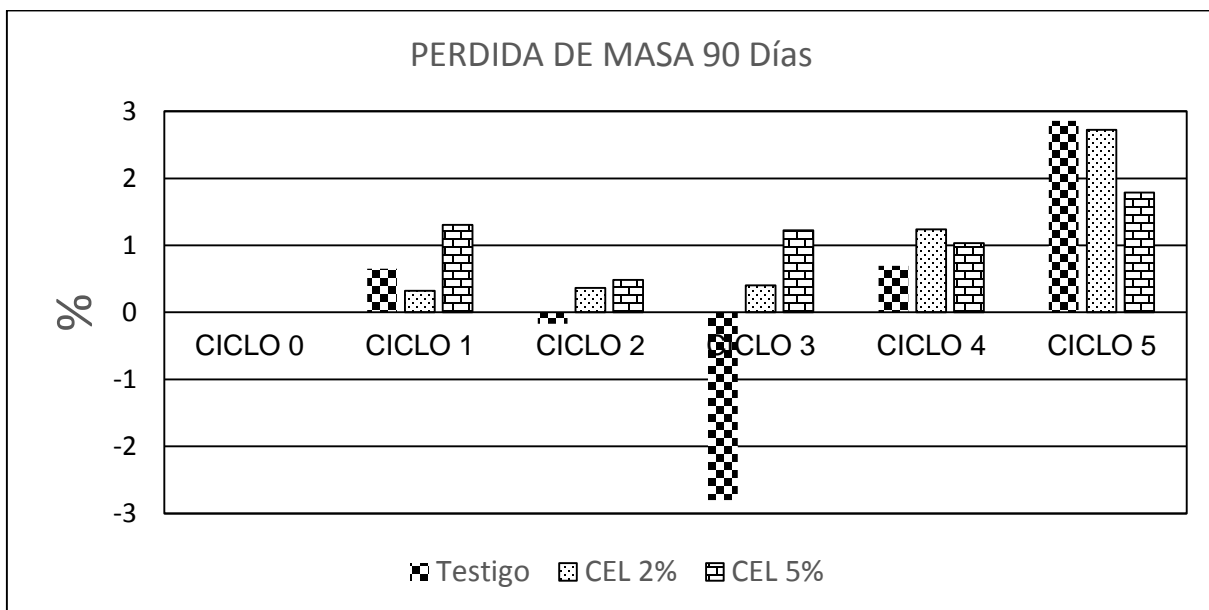


Figura 4.3. Pérdida de masa 90 días.

La norma establece que la pérdida permisible de masa es del 5% por lo cual se observa que la mezcla testigo se encuentra fuera de este parámetro. Figura 4.4

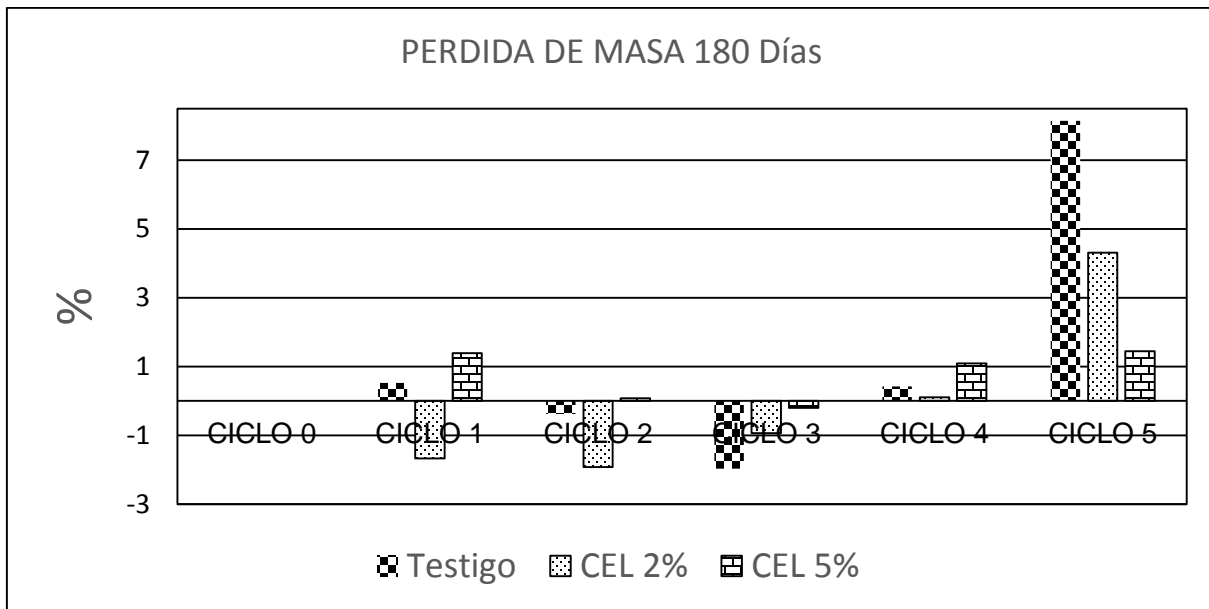


Figura 4.4. Pérdida de masa 180 días

4.3.2.2. Carbonatación.

Mientras que para las muestras de 90 días se tienen constantes de carbonatación:

Tabla 4.14. Constante de carbonatación 90 días.

Mezcla	Testigo	CEL 2%	CEL 5%
Constante de carbonatación $K_{CO_2}(\text{mm/año}^{0.5})$	4.64	2.02	1.01

La norma establece valores de K_{CO_2} 2 a 3 $\text{mm/año}^{0.5}$ como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación y valores mayores de 6 $\text{mm/año}^{0.5}$ para indicar una resistencia baja.

La mezcla de mayor sustitución se presenta los mejores resultados, obteniendo valores menores de 2 $\text{mm/año}^{0.5}$ lo cual es indicativo que tiene un muy buen comportamiento ante la carbonatación, mientras que la menor sustitución presenta valores indicativos de una elevada resistencia. La mezcla testigo es considerada como una mezcla de moderada resistencia.



Se presenta una proyección de la carbonatación de acuerdo a los datos obtenidos Figura 4.5.

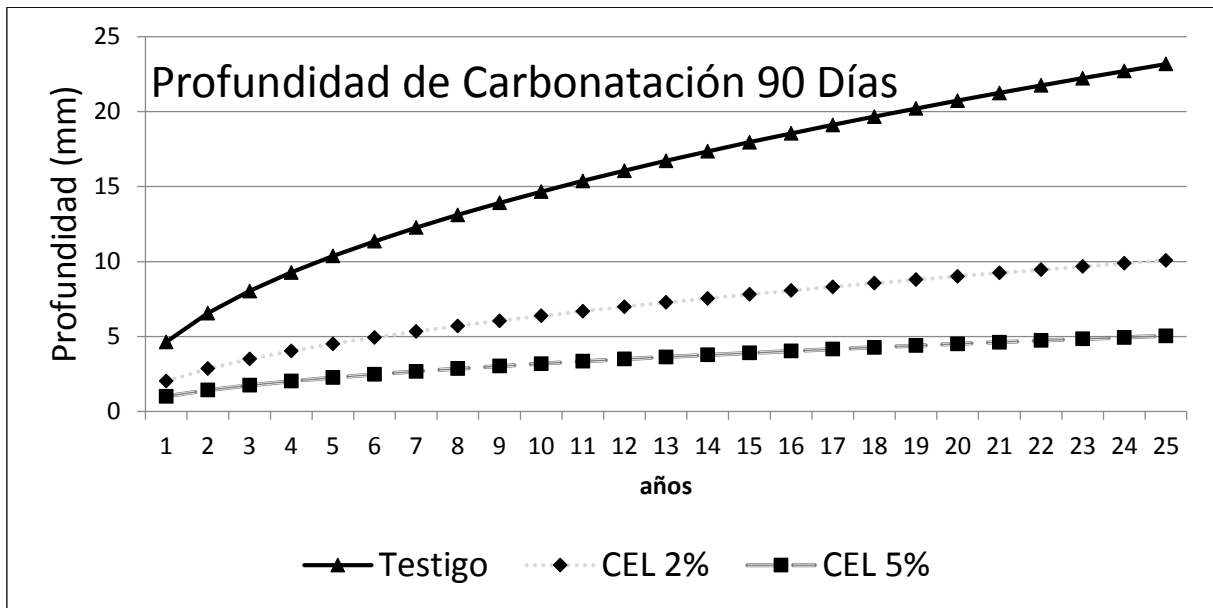


Figura 4.5. Profundidad de carbonatación en una proyección de 25 años evaluada en 90 días.

Los datos de la constante de carbonatación están dados de acuerdo a la tabla 4.15. siguiente.

Tabla 4.15. Constante de carbonatación 180 días.

Mezcla	Testigo	CEL 2%	CEL 5%
Constante de carbonatación $K_{CO_2}(mm/año^{0.5})$	7.06	5.04	4.03

A esta edad se puede observar que los valores se incrementaron pero aun así el comportamiento es el mismo, la mezcla testigo presenta valores que indican que tiene una baja resistencia a la carbonatación. Mientras que las dos sustituciones presentan valores dentro de los parámetros para considerarse como una resistencia moderada de carbonatación. La mezcla de mayor sustitución presenta valores más apegados a una resistencia alta, por lo cual se podría decir que es la que presenta un mejor comportamiento a esta edad.

Se realizó una proyección de la profundidad de carbonatación con los valores de la constante Figura 4.6.

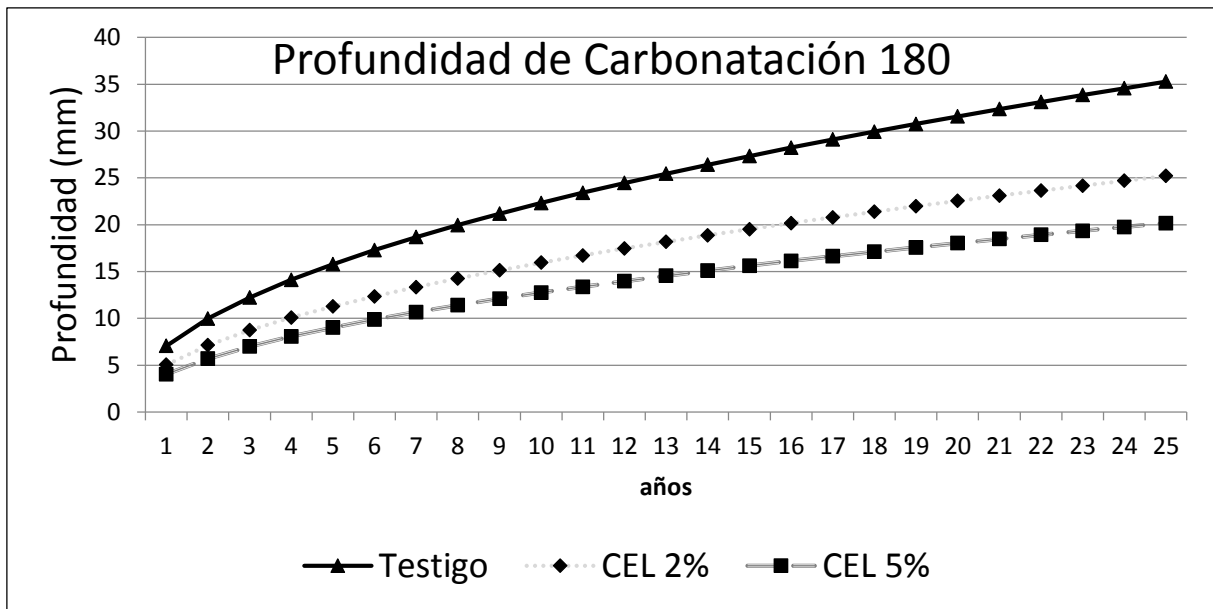


Figura 4.6. Profundidad de carbonatación en una proyección de 25 años evaluada en 180 días.

4.3.2.3. Congelamiento y deshielo.

Los valores mostrados en la figura 4.7. presentan los resultados obtenidos en la prueba mencionada, donde el mejor comportamiento lo presenta la mezcla de menos porcentaje de sustitución, al comportarse de una manera más uniforme, los valores picos tanto favorables como desfavorables lo presenta la mezcla testigo.

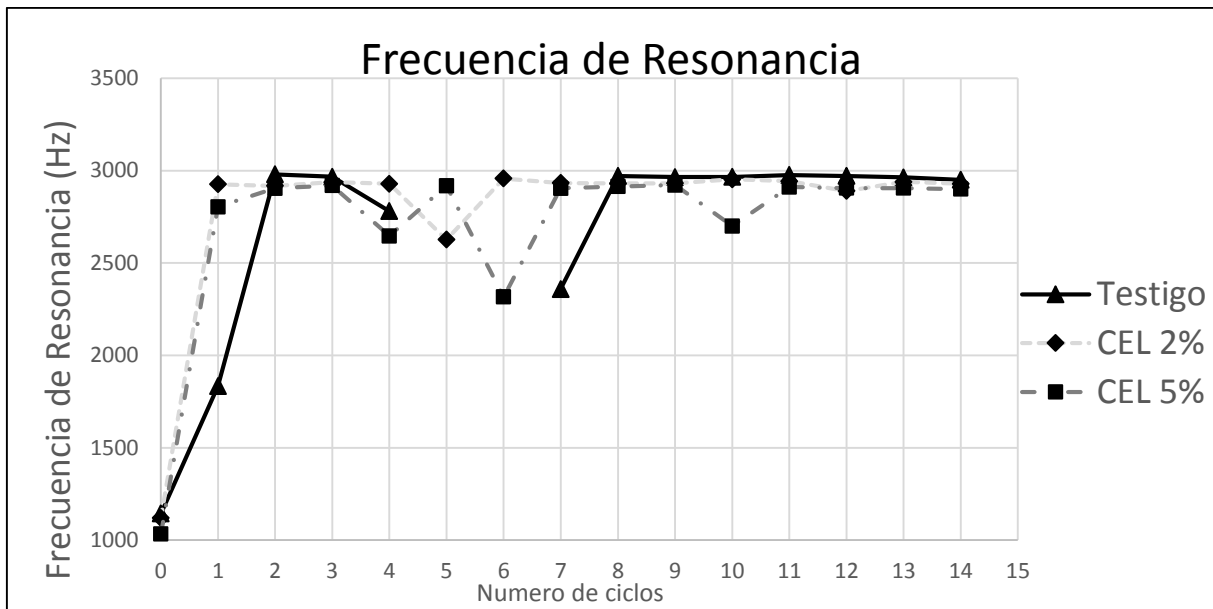


Figura 4.7. Frecuencia de resonancia.

4.3.2.4. Absorción Capilar.

La resistencia a la penetración del agua es superior en la mezcla de menor sustitución, posteriormente la mezcla testigo, y la mezcla de mayor sustitución tienen una menor resistencia. Por lo cual es significativo que se debe de cuidar la mezcla de mayor porcentaje, ya que es la que presenta una mayor vulnerabilidad. Figura 4.8.

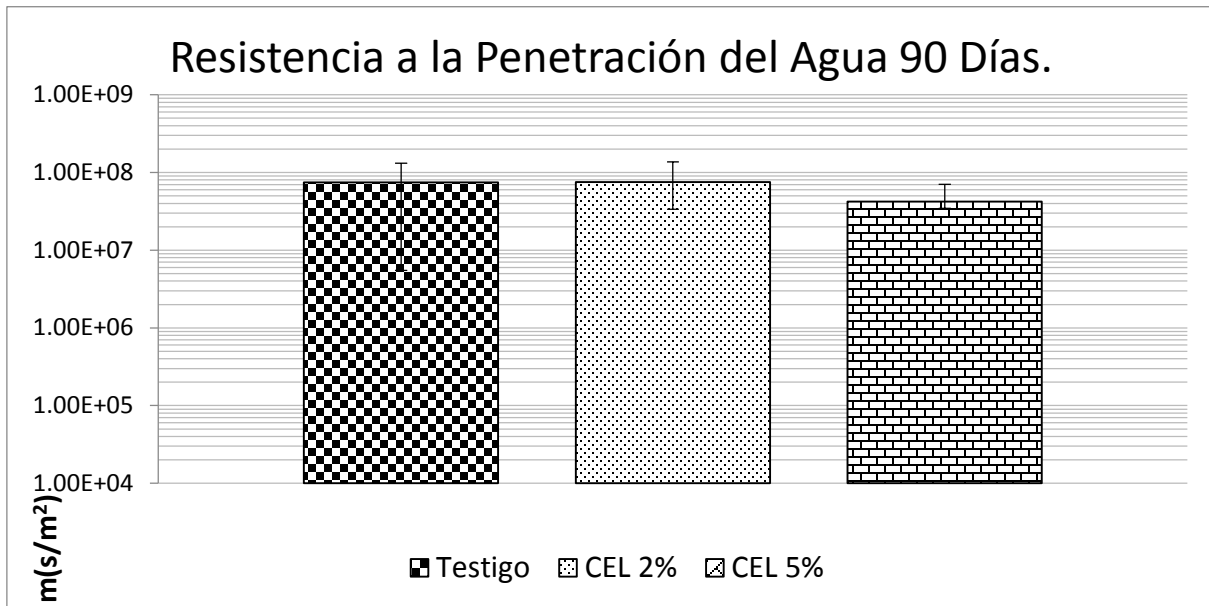


Figura 4.8. Resistencia a la penetración del agua 90 días.

La figura siguiente muestra los resultados promedio obtenidos para la porosidad efectiva, que en base a la Red DURAR valores menores del 10% indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10 y el 15% es indicativo de un concreto de calidad moderada, y un concreto mayor del 15% indica un concreto de durabilidad inadecuada.

Por lo cual se puede observar que la mezcla de menor sustitución se considera como una mezcla de calidad moderada. Mientras que las otras mezclas se encuentran dentro de una buena calidad y compacidad.

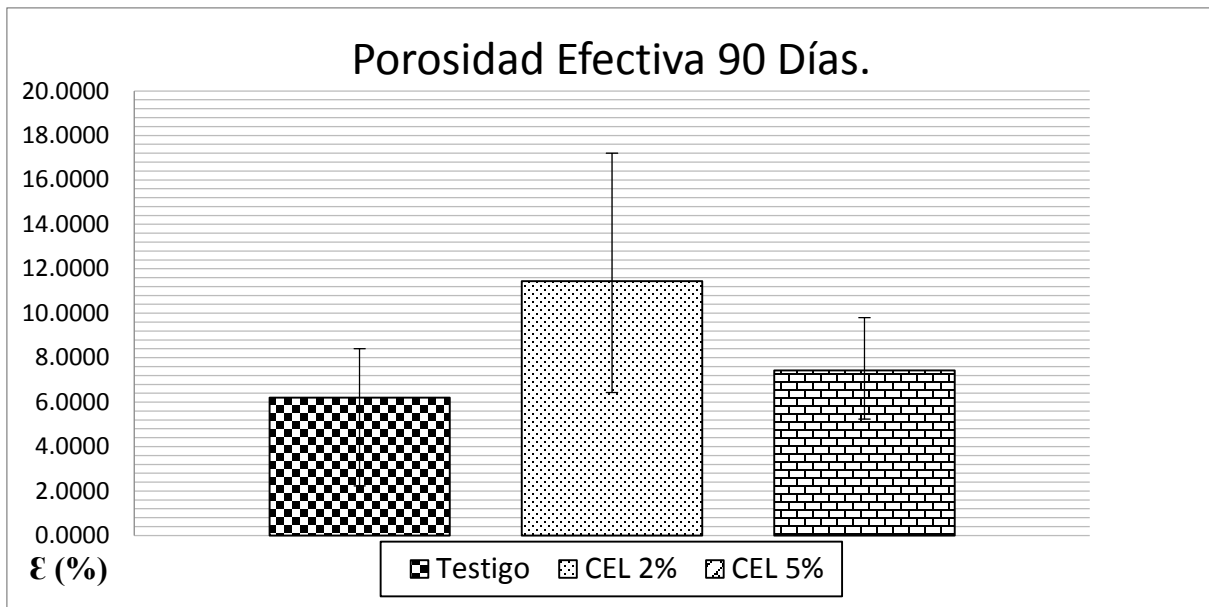


Figura 4.9. Porosidad efectiva 90 días.

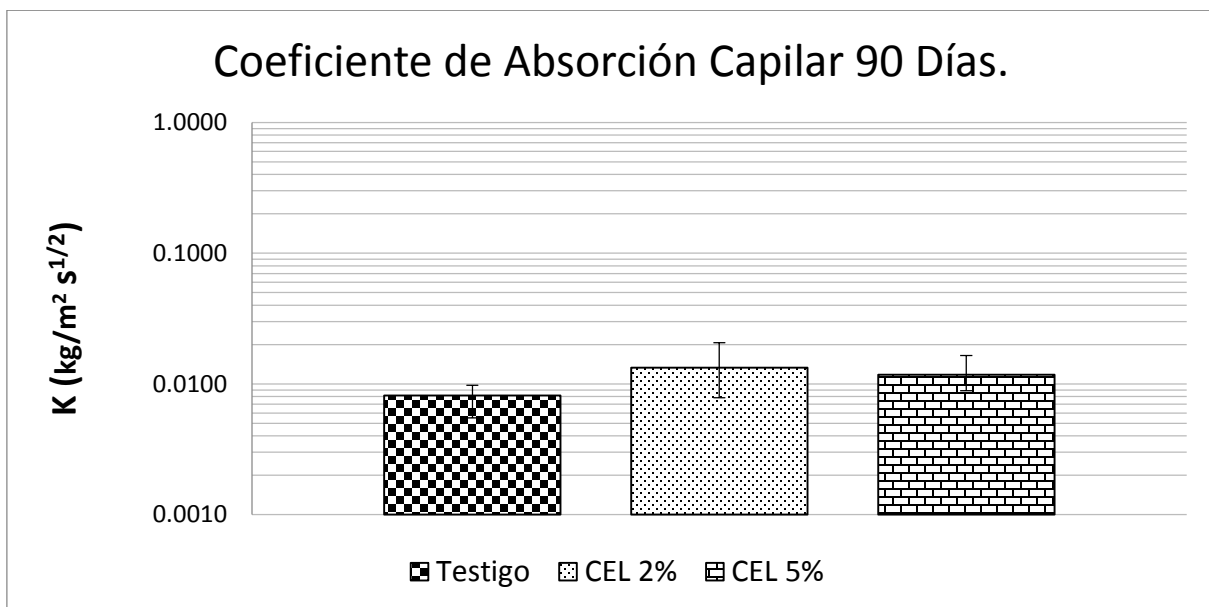


Figura 4.10. Coeficiente de absorción capilar 90 días.

De acuerdo a la Red DURAR un valor de Sorción de 5×10^{-5} es apto para ser colocado en exposiciones severas y para condiciones menos severas se adoptan valores de 10^{-4}

La mezcla testigo presenta un valor de Sorción más elevado que las mezclas con sustituciones, posteriormente la mezcla de mayor sustitución. Todos los valores



rondan dentro de 1×10^{-4} por lo cual es conveniente colocarlos en condiciones menos severas. Figura 4.11.

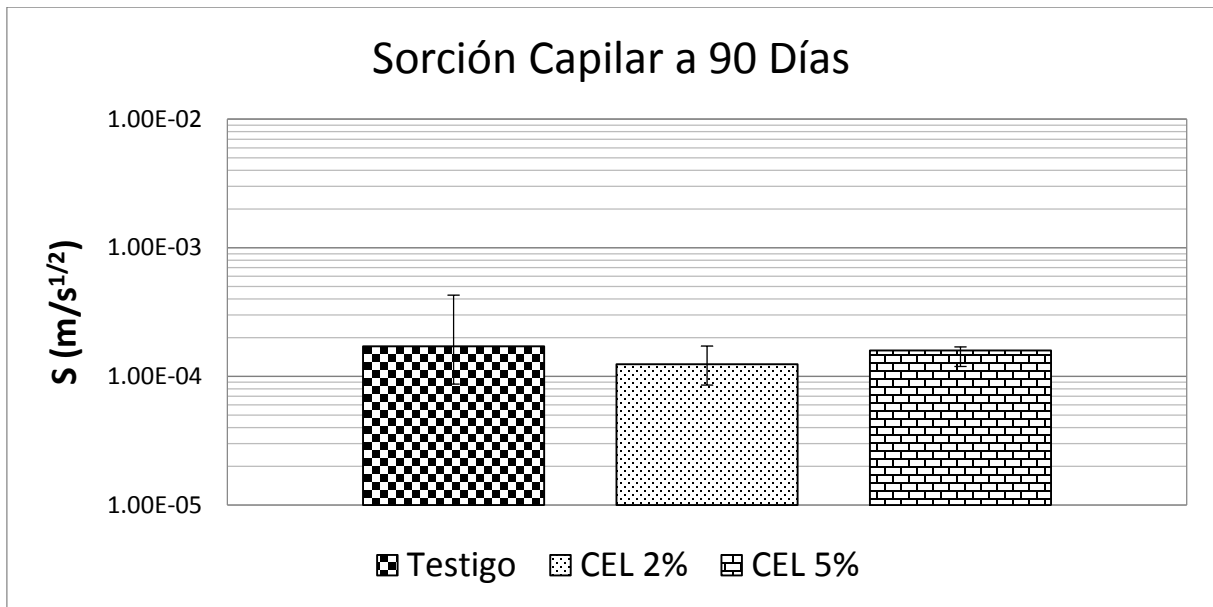


Figura 4.11. Sorción capilar 90 días.

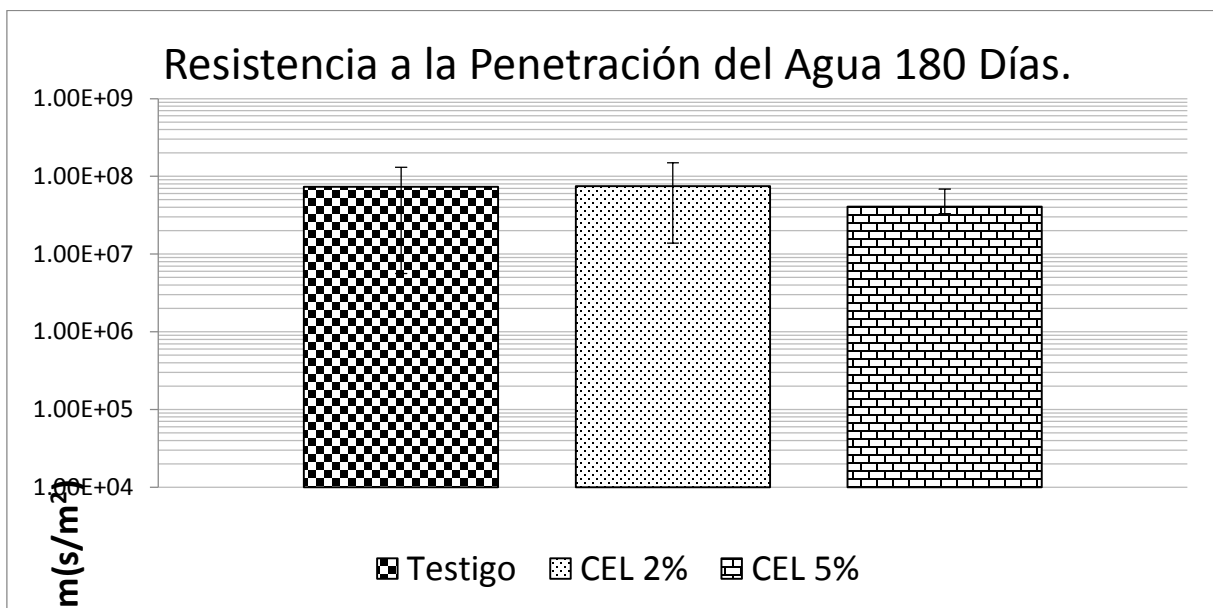


Figura 4.12. Resistencia a la penetración del agua 180 días.

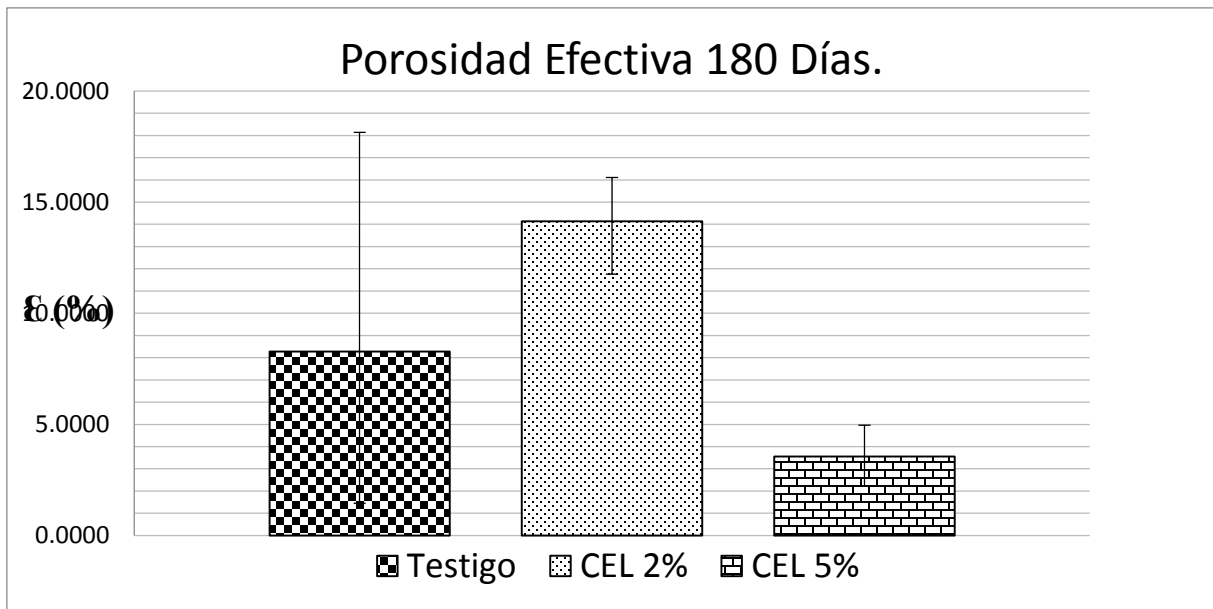


Figura 4.13. Porosidad efectiva 180 días.

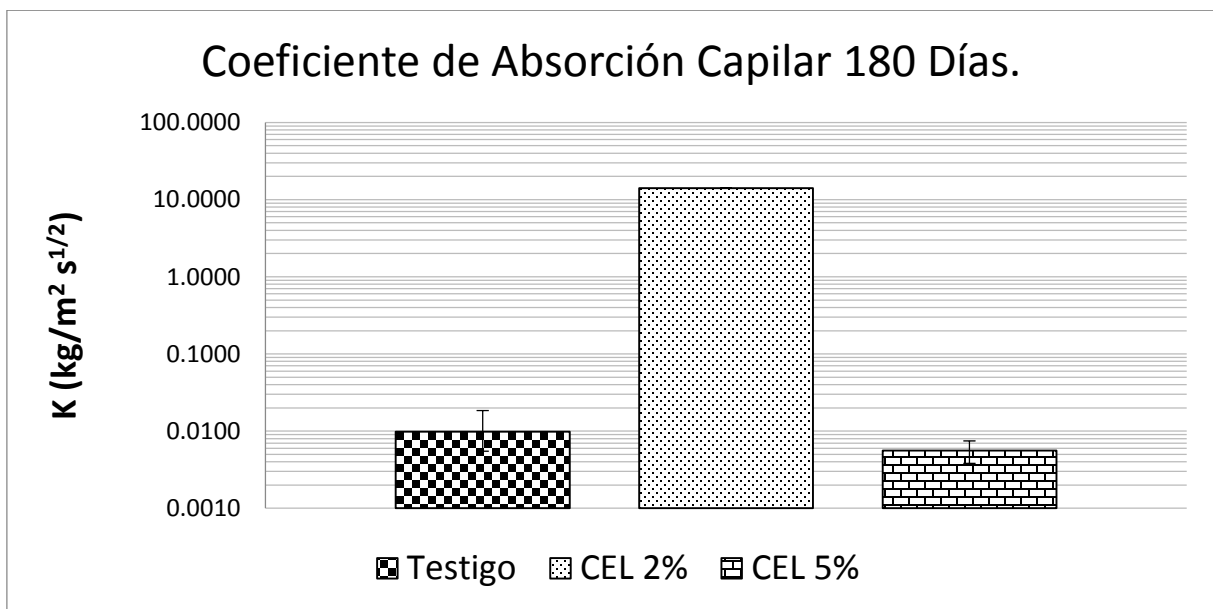


Figura 4.14. Coeficiente de absorción capilar 180 días.

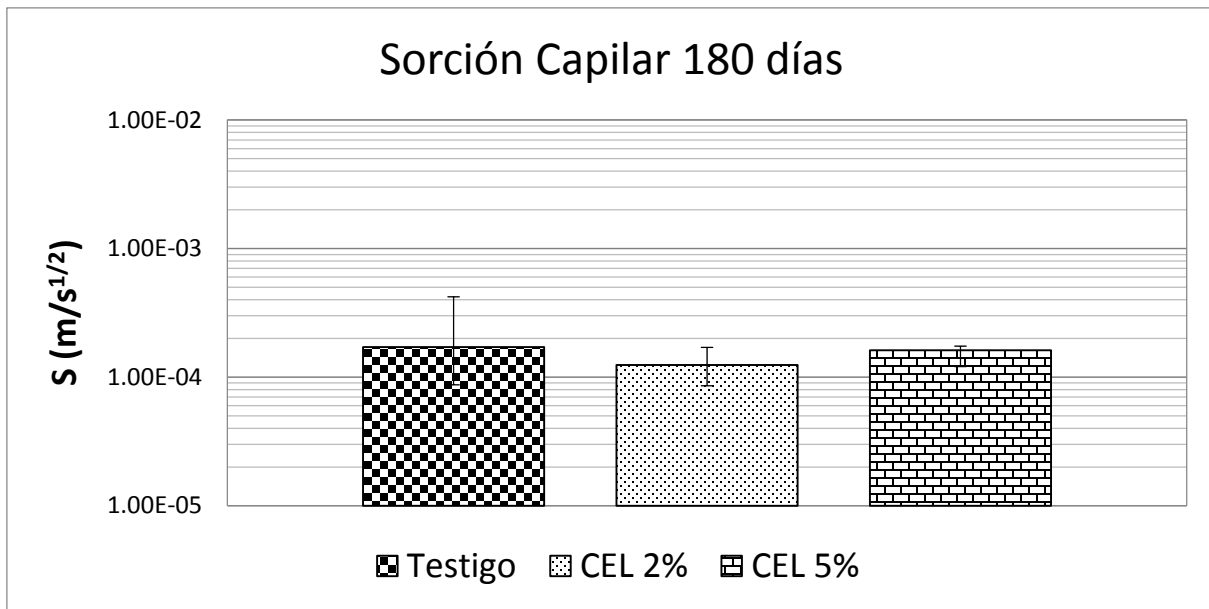


Figura 4.15. Sorci3n capilar 180 d3as.

4.3.2.5. Penetraci3n de cloruros.

La norma ASTM-C-1202 establece los valores para determinar la calidad del material, de acuerdo a 3sta, los resultados obtenidos se encuentran dentro de una calidad moderada, a excepci3n de la mezcla de sustituci3n mayor la cual dentro de la clase de permeabilidad baja. Figura 4.16.

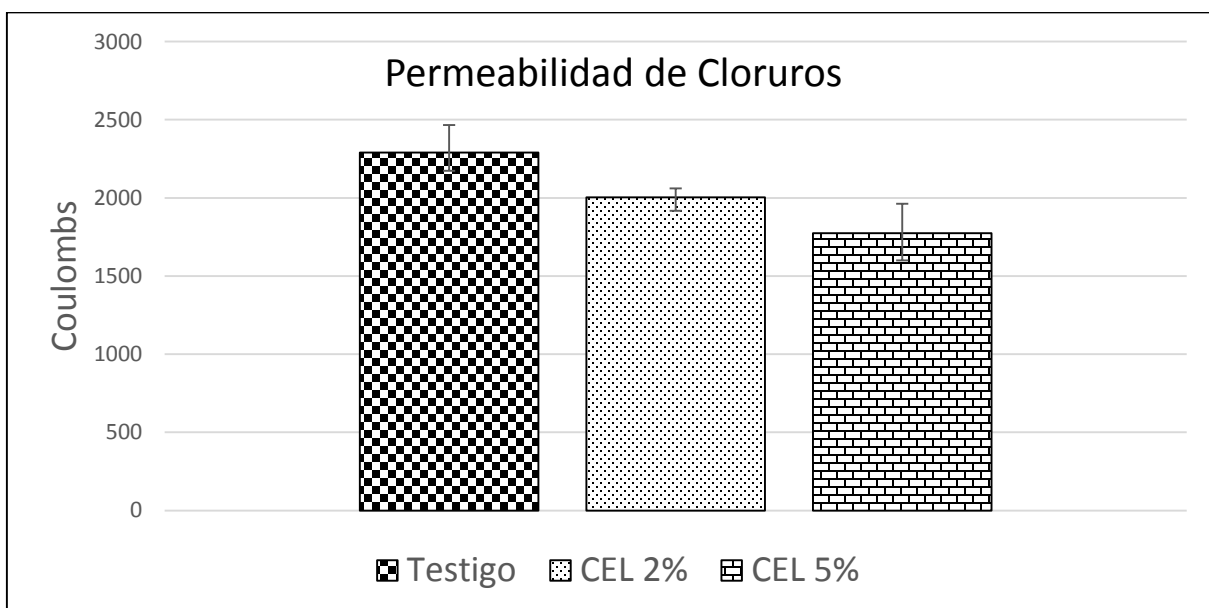


Figura 4.16. Permeabilidad de cloruros.



4.3.2.6. Porosidad.

De acuerdo a los parámetros establecidos en el manual de la Red DURAR, valores menores del 10% indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10 y el 15% es indicativo de un concreto de calidad moderada, y un concreto mayor del 15% indica un concreto de durabilidad inadecuada.

Los resultados obtenidos en esta prueba no fueron los esperados, debido a que el comportamiento para la mayoría de las pruebas la mezcla de mayor sustitución tiene el mejor comportamiento, y para esta prueba se predecía que se comportara similarmente. En los resultados mostrados en la figuras 4.17. y 4.18. se observa que la mezcla con un mejor comportamiento es la mezcla testigo, y en cuanto a las mezclas con sustitución, el mejor comportamiento lo presenta la mezcla de mayor sustitución.

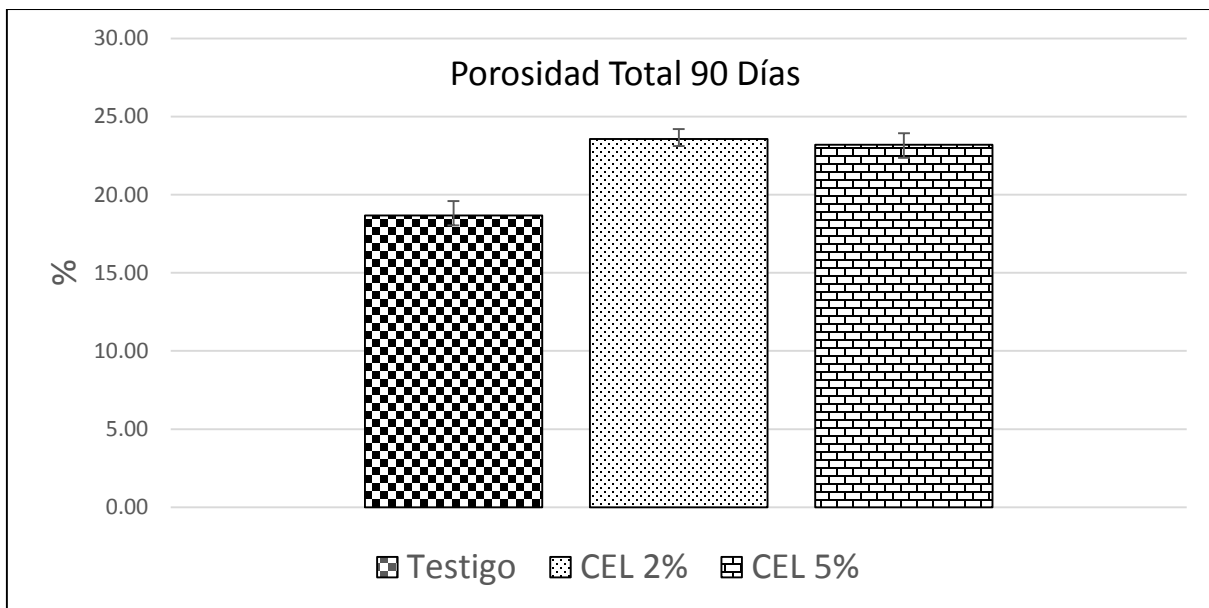


Figura 4.17. Porosidad total 90 días.

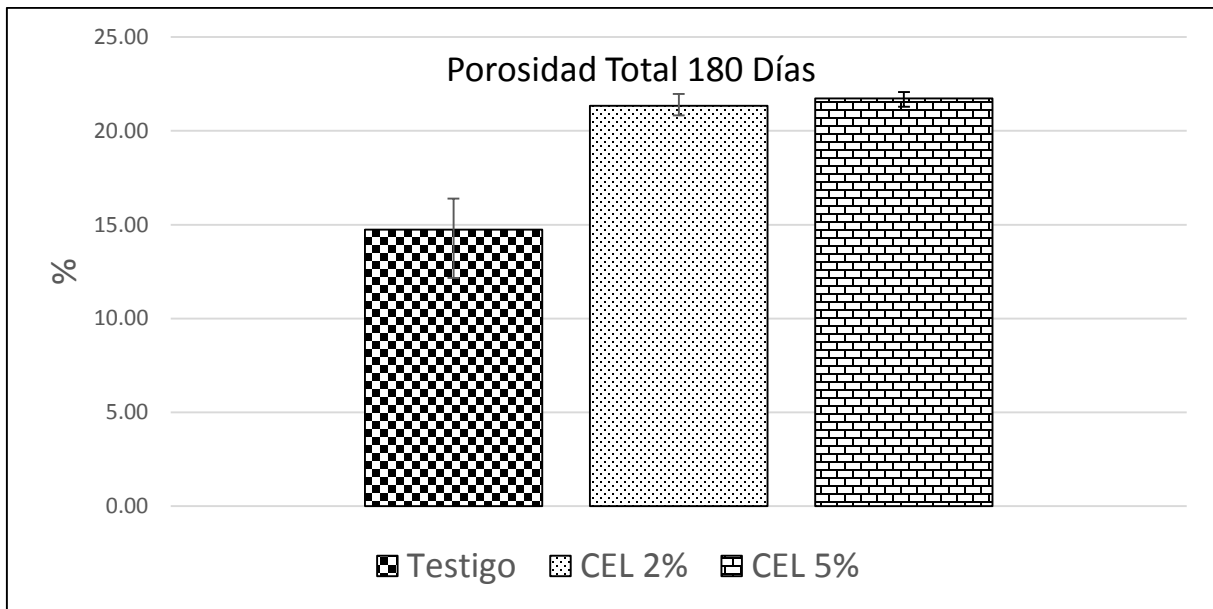


Figura 4.18. Porosidad total 180 días.

4.3.2.7. Resistividad eléctrica.

Se puede observar que la resistividad eléctrica a través del paso de la edad va en aumento Figuras 4.19., 4.20. y 4.21.

Dando un mejor resultado y un mejor comportamiento en la mezcla de mayor sustitución.

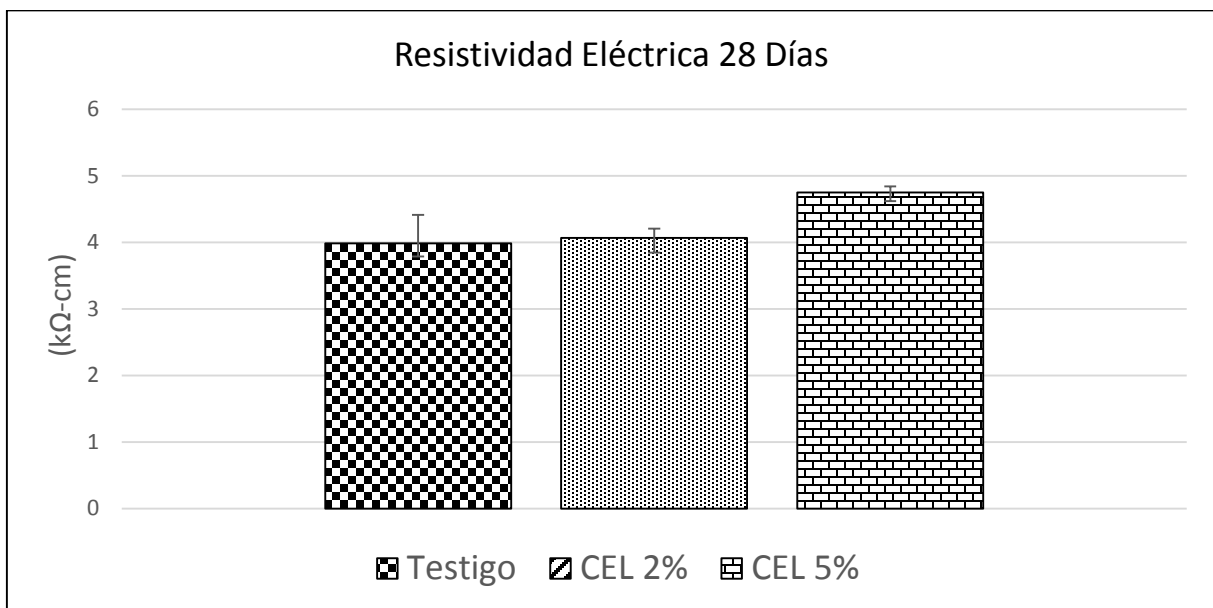


Figura 4.19. Resistividad eléctrica 28 días.

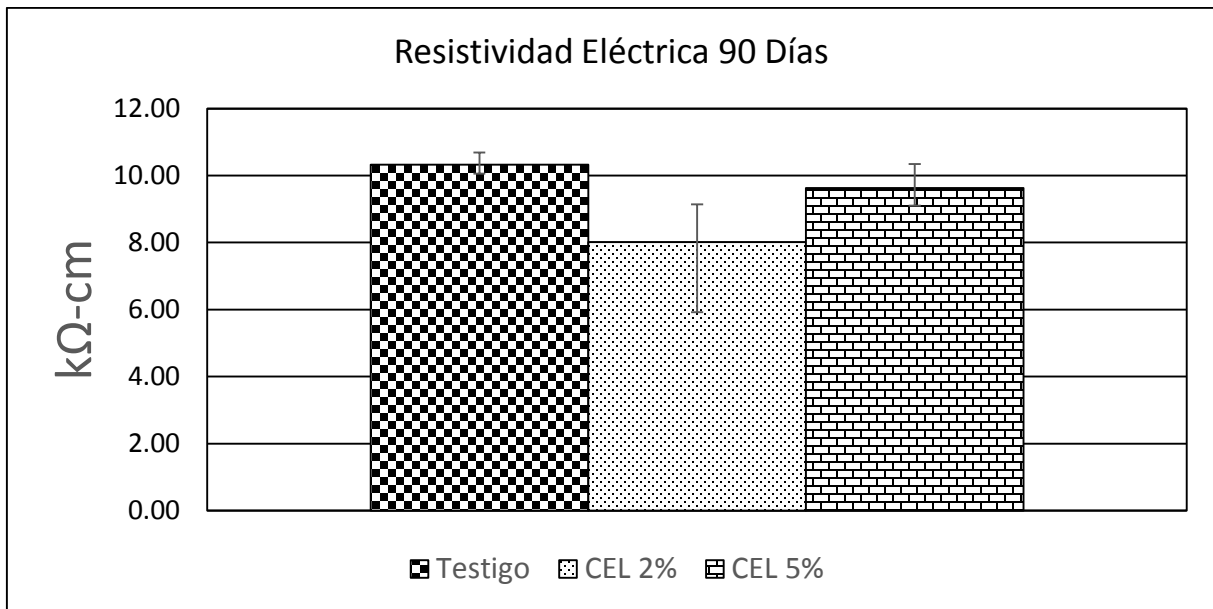


Figura 4.20. Resistividad eléctrica 90 días.

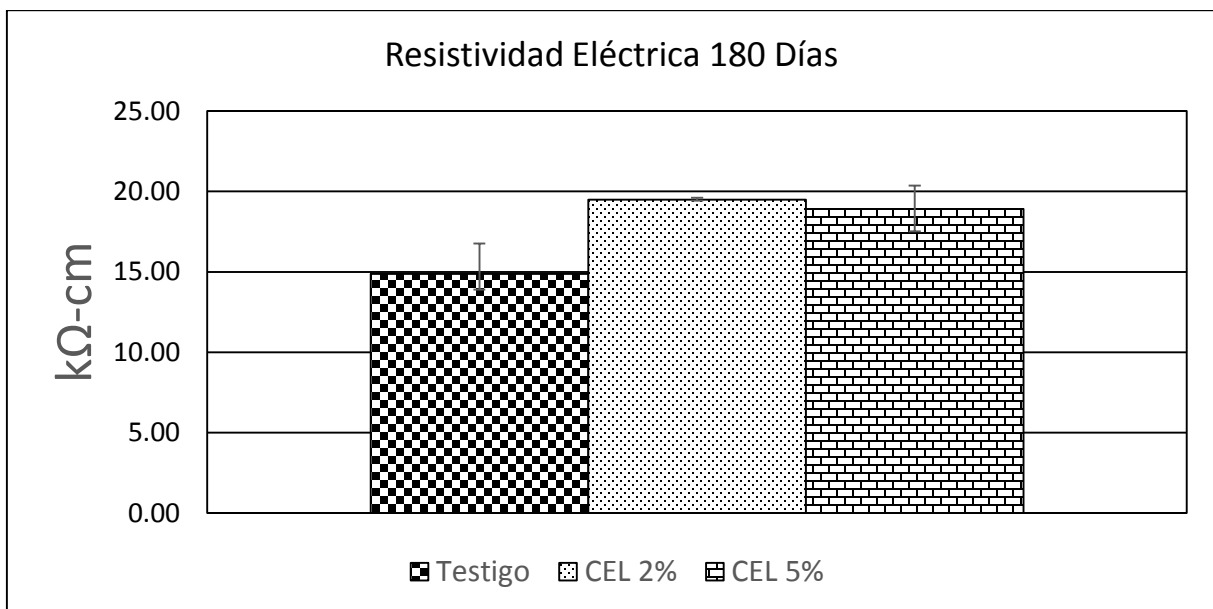


Figura 4.21. Resistividad eléctrica 180 días

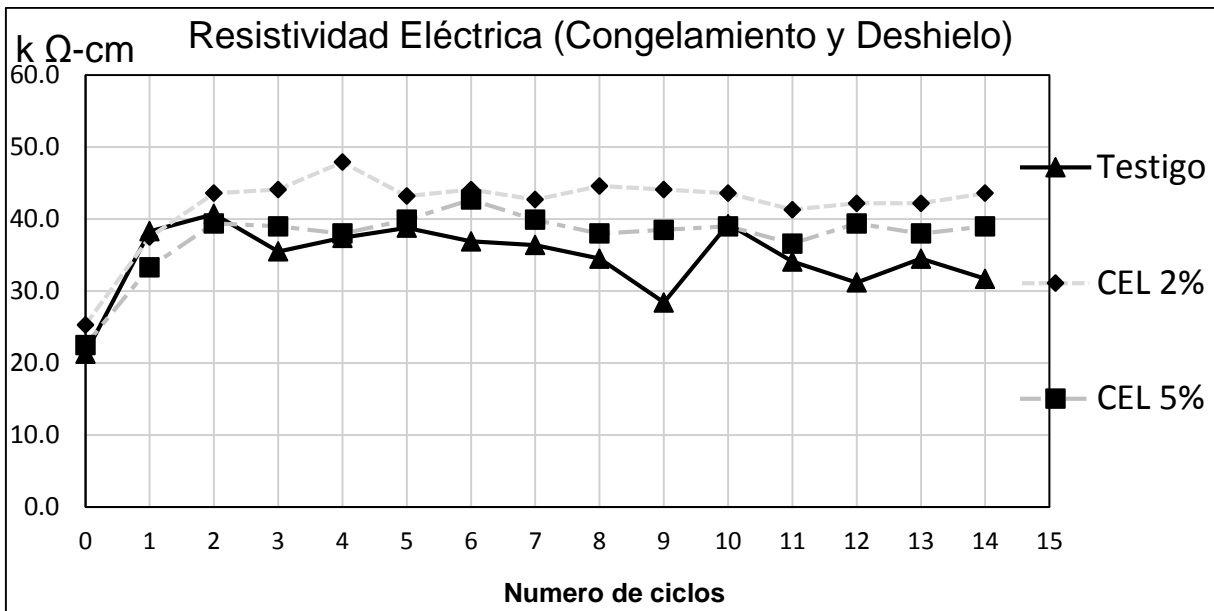


Figura 4.22. Resistividad eléctrica (Congelamiento y deshielo).

La resistividad eléctrica se va manteniendo al paso de los ciclos de congelamiento y los datos se encuentran de acuerdo a la Red DURAR con un riesgo moderado a la corrosión. Figura

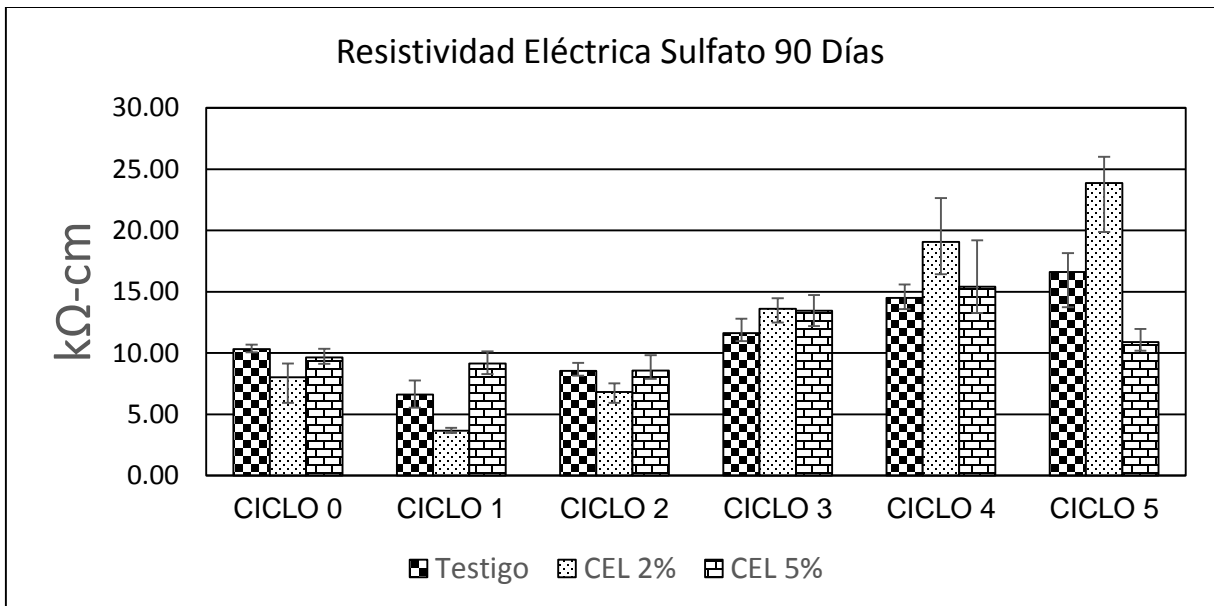


Figura 4.23. Resistividad a través de los ciclos de sulfato 90 días.

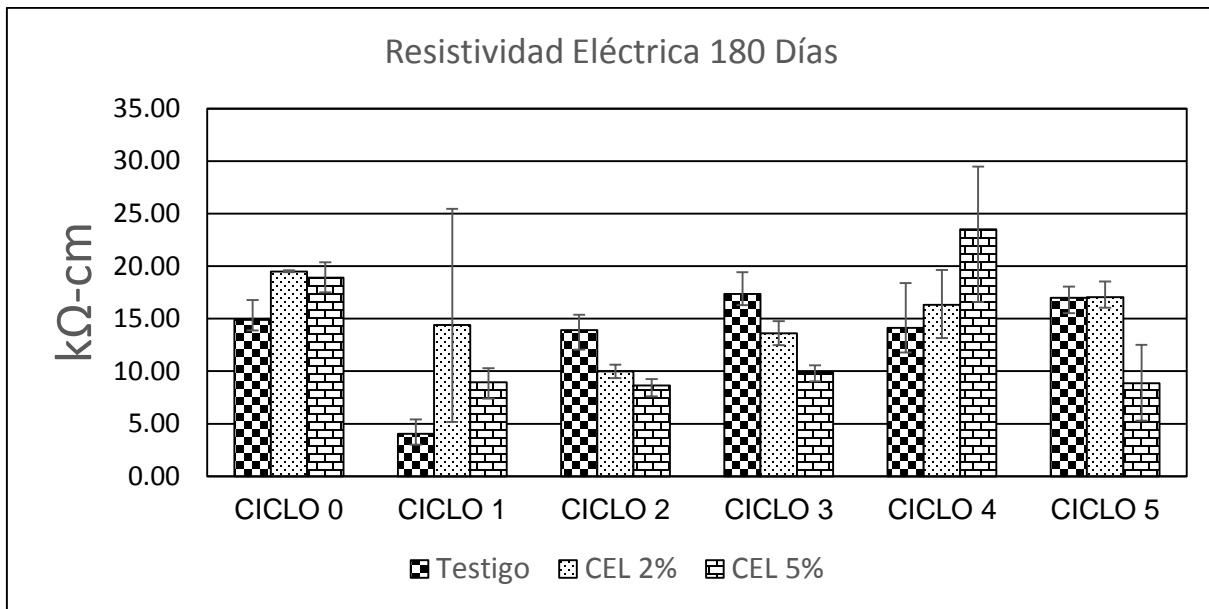


Figura 4.24. Comportamiento de la resistividad en los ciclos de sulfato 180 días.

4.3.2.8. Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU).

Al paso del tiempo la velocidad de pulso ultrasónico va en aumento, esto se puede observar en las Figuras 4.25., 4.26. y 4.27.

Aun con esto los valores de las mezclas se encuentran de acuerdo a la Red DURAR con una calidad alta. Siendo la mezcla de mayor porcentaje de sustitución la que nos da un mejor comportamiento.

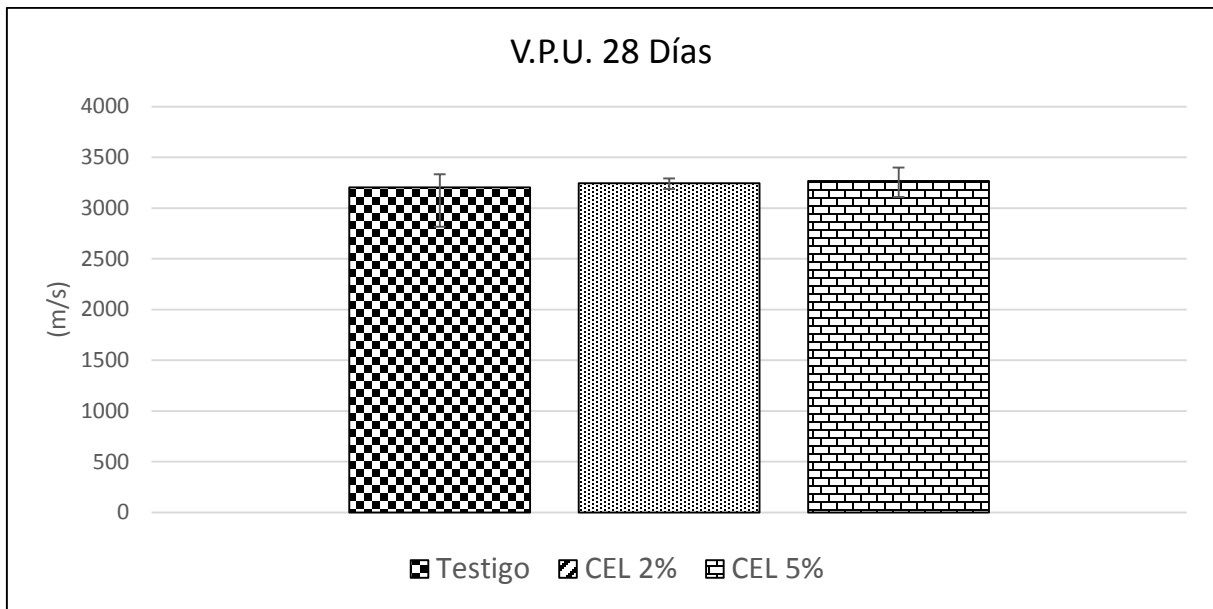


Figura 4.25. Velocidad de pulso ultrasónico 28 días.

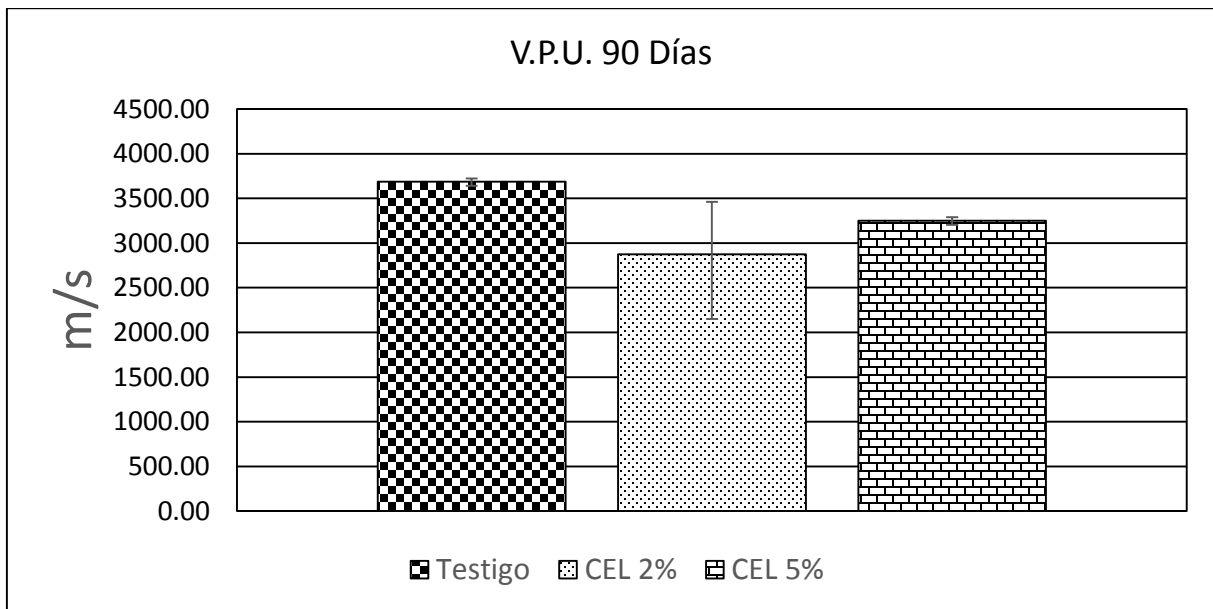


Figura 4.26. Velocidad de pulso ultrasónico 90 días.

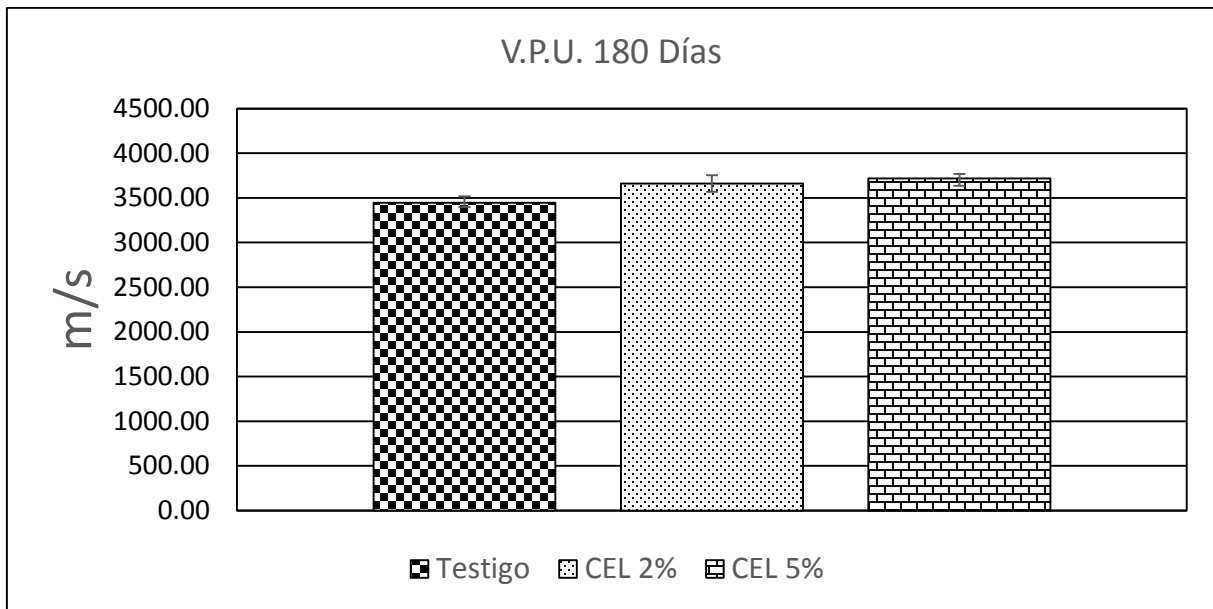


Figura 4.27. Velocidad de pulso ultrasónico 180 días.

El comportamiento en la figura 4.28. de la velocidad de pulso en especímenes sometidos a congelamiento y deshielo muestran que las mezclas se encuentran entre una calidad alta y una calidad durable, de acuerdo a los criterios establecidos en el manual de la Red DURAR.

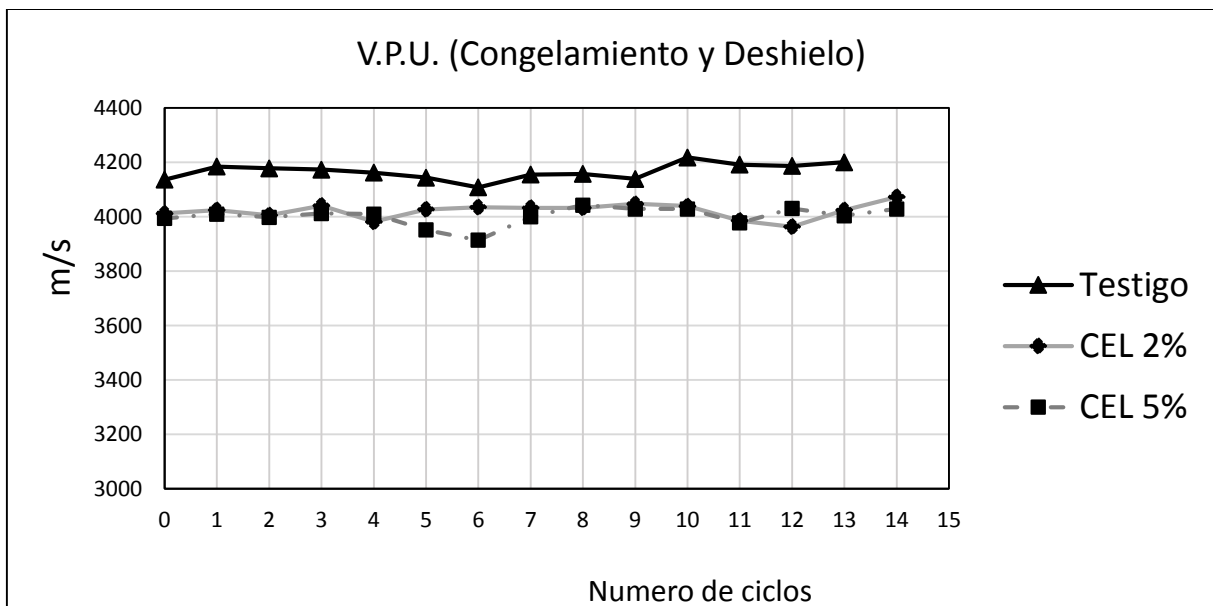


Figura 4.28. Velocidad de pulso ultrasónico (congelamiento y deshielo).

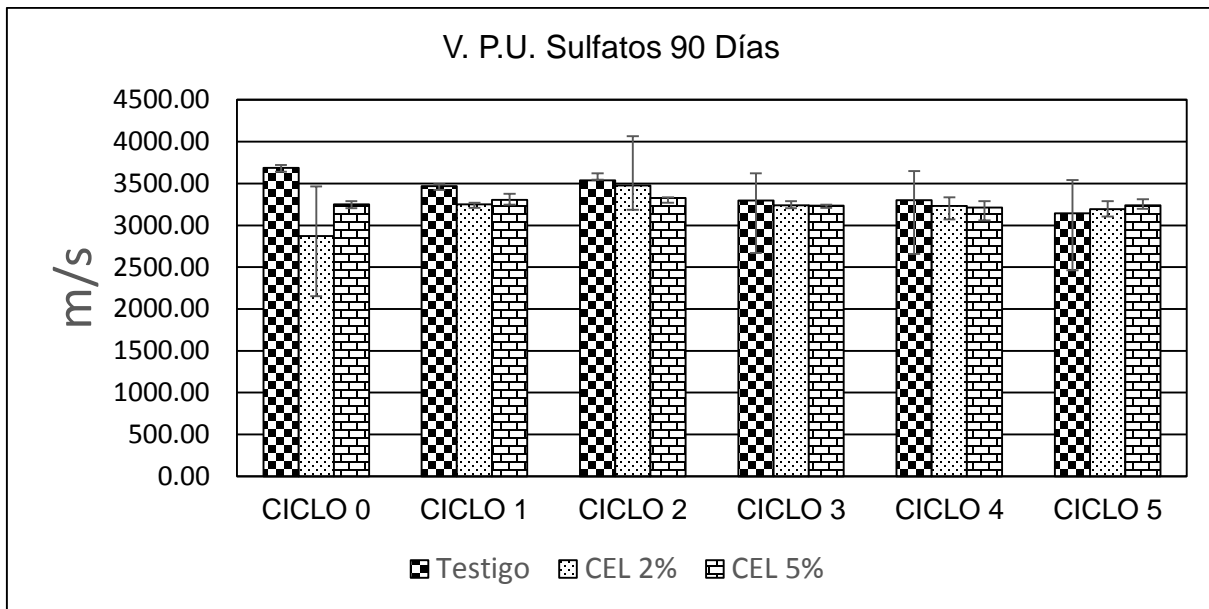


Figura 4.29. Comportamiento de la V.P.U en ciclos de sulfato 90 días.

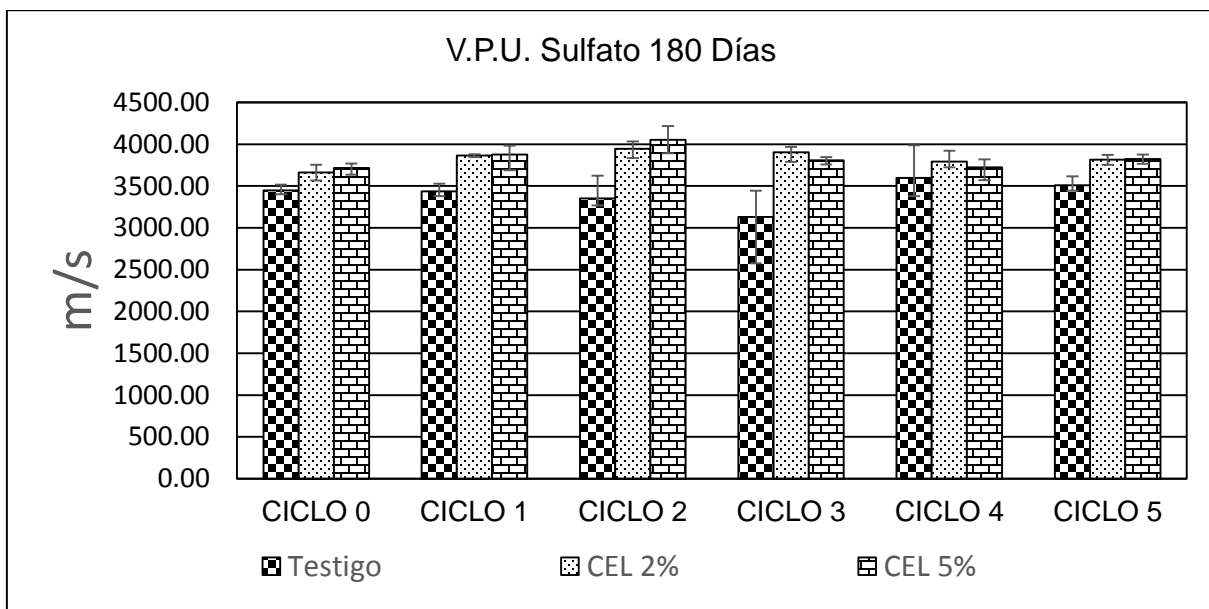


Figura 4.30. Comportamiento de la V.P.U. en ciclos de sulfato 180 días

4.3.3 Destructivas.

4.3.3.1 Resistencia a la compresión simple.

En las figuras 4.31, 4.32. y 4.33, se muestran resultados de la compresión simple y como los valores van en aumento en función de la edad en la que se está probando.



Cabe mencionar que la mezcla con un mejor comportamiento es la de mayor sustitución. Dando resultados mejores en la mayoría de las los especímenes probados.

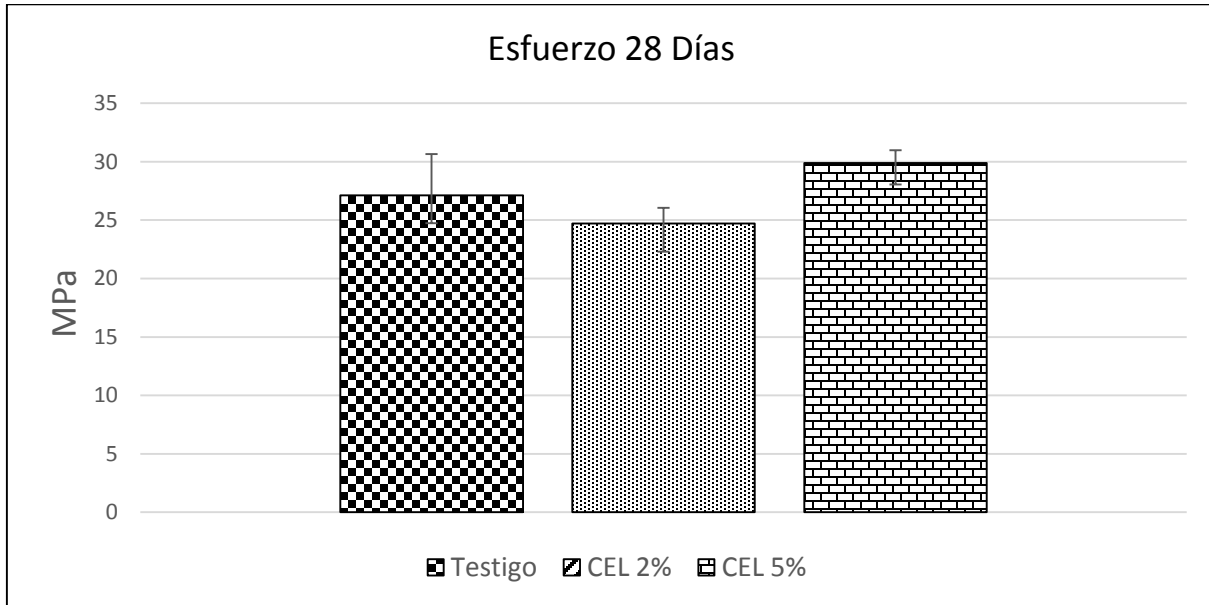


Figura 4.31. Esfuerzo 28 días.

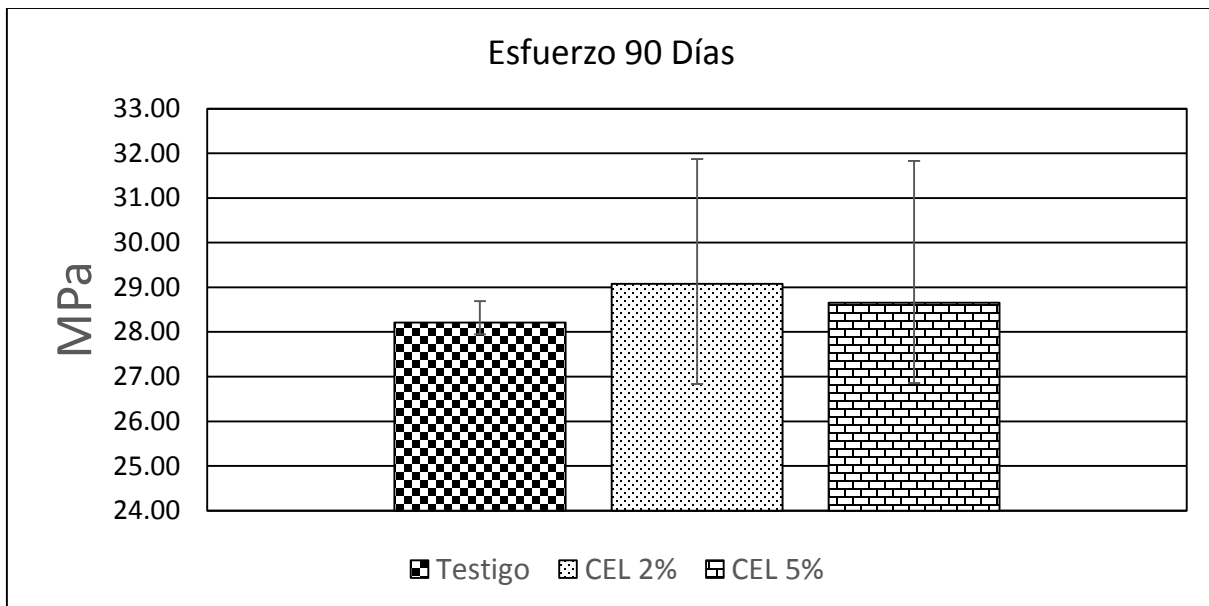


Figura 4.32. Esfuerzo 90 días.

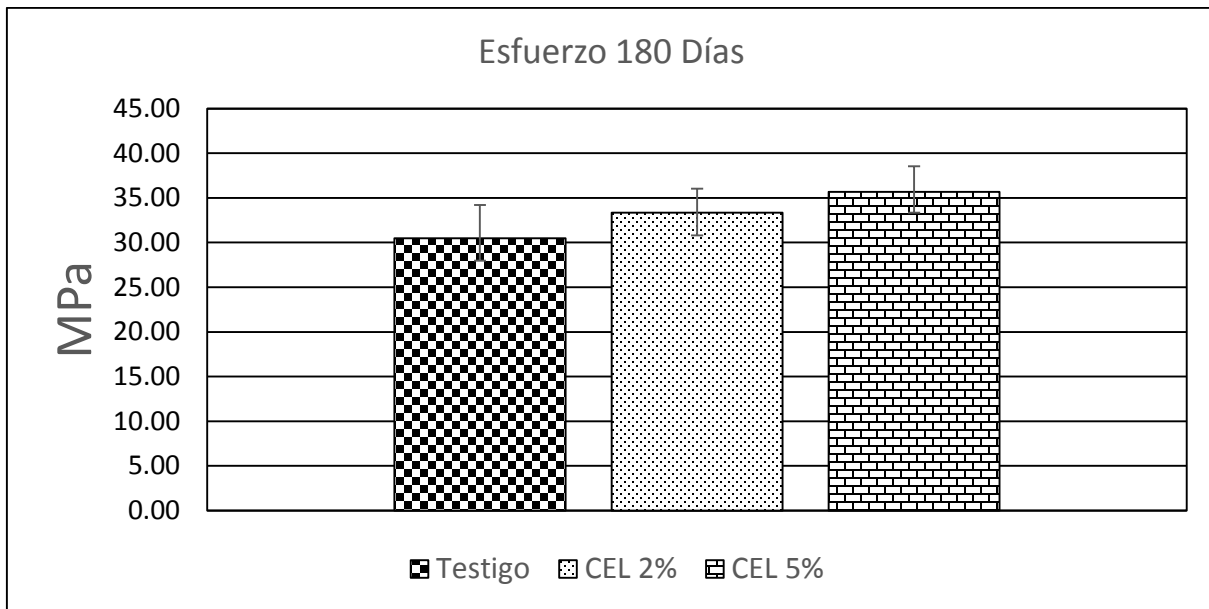


Figura 4.33. Esfuerzo 180 días.



5. Conclusiones.

Los objetivos de esta investigación se cumplen ya que la creación de una mezcla eficiente en cuanto a una alta resistencia y a un grado de durabilidad alto se da a través de las buenas características de los materiales empleados.

La arena utilizada, de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización, presenta parámetros físicos muy favorables para su uso en la construcción.

La mezcla de mayor sustitución presentó mejores resultados durante la mayoría de las pruebas, dichas pruebas fueron: ataque acelerado por sulfatos de sodio, ataque por carbonatación y absorción capilar. Sin embargo, en la mezcla de sustitución menor (2%) se muestran mejores resultados en la prueba de porosidad total y en congelamiento y deshielo.

El comportamiento de las mezclas en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico es ascendente respecto al tiempo, dando un mejor comportamiento en la mezcla de mayor porcentaje en sustitución.

La prueba que se ha determinado por mayor tiempo como la prueba más significativa, la de resistencia a la compresión, los resultados mostrados anteriormente muestra que el mejor comportamiento lo presenta la mezcla de mayor sustitución (5%), teniendo un mejor comportamiento a través del tiempo.

Se presentan algunas variaciones, las cuales pueden ser debido a que las mezclas se realizaron en fechas diferentes y en horas diferentes, por lo cual las condiciones ambientales y de trabajo eran diferentes. Además, también pueden ser debido a la operación y mano de obra del fabricante, el cansancio y el error humano es un aspecto muy considerable para las variaciones en los resultados.



De igual manera los equipos utilizados en algunas ocasiones presentan variaciones, esto debido a la fallo el equipo.

El ladrillo es la forma más común de construcción, en especial en el área de edificación, por lo cual la producción de este es basta, sin embargo los datos de producción no cuenta con un registro detallado, dicho registro se desconoce desde la cantidad de empresas que lo fabriquen.

Con base a lo mostrado en las pruebas anteriores, el acomodo y la cantidad de los poros, es lo que densifica o no a la mezcla. La densificación de ésta se ve reflejada en los resultados de durabilidad, una muestra que presenta una matriz más densa, arroja valores de durabilidad altos.

Finalmente se logró el objetivo principal de conseguir una mezcla de mortero con buenas propiedades y un grado de durabilidad alto, utilizando un residuo como lo es la ceniza de elaboración de ladrillo. El uso como material cementante en la industria de la construcción provocaría un gran impacto ecológico positivo, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO₂ producto de la industria del cemento.



6. Bibliografía

A.F-J, P., 2004. "Geopolimeros": una única base química y diferentes micro estructuras.. *Materiales de Construcción*, 54(275), pp. 77-91.

AASHTO T 277, 2015. *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. s.l.:s.n.

ACI 222, 2002. *Protection of metals in concrete against corrosión*, EUA: American Concrete Institute.

Aguirre, A. R. & Mejía de Gutiérrez, R., 2013. Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de construcción*, pp. 7-38.

ASTM C 109 M, I., 2002. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.. EE. UU.: s.n.

ASTM C 109, 2016. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. s.l.:s.n.

ASTM C 1202, 2012. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. s.l.:s.n.

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

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

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

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

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

ASTM C 311, 2013. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. s.l.:s.n.

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

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

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



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

ASTM-C-452, 2015. *Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate*. s.l.:s.n.

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

ASTM-C-618, 2015. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. s.l.:s.n.

ASTM-C-642, 2013. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. s.l.:s.n.

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

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

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

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

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

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

Davidovits, J., 1993. Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement.. *Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrees in the Global Environment*, p. 21.

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

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

ERIC I. MORENO, 2006. Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 21(3).



F. González, G. F. G. A. C. J. G. E., 2008. Realcalinización electroquímica de concreto reforzado carbonatado utilizando electrolitos DE K_2CO_3 Y Na_2CO_3 . *XVII International Materials Congress*, Volumen S157.

F. Lopez, 2016. *DENSIFICACIÓN DE MATRICES CEMENTICIAS A BASE DE ADICIONES ORGÁNICAS*. Morelia: s.n.

GEHO, 1993. Durabilidad de estructuras de hormigón - Guía de diseño. *Grupo Español del Hormigón*, Issue Boletín N° 12.

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

H.Kosmatka, S., 2004. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. s.l.:Portland Cement Association..

IEE, 2010. *Inventario de Emisiones del Estado de Guanajuato 2008*, Guanajuato: s.n.

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

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

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

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

Le Borgne, V. -. M. G. M., 2008. Biodeterioration of concrete in the deep sewage system of Mexico city. *XVII International Materials*, Volumen S6, p. 38.

Martínez Sánchez B., F. M. J. J. U. A. R. y. M. H. O., 2003. *La prueba de permeabilidad rápida a cloruros como índice de la durabilidad de la estructuras de hormigón*, s.l.: Centro de Tecnología, Cemento y Concreto. CEMEX.

Mehta K. y Monteiro P., 1998. *Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales*. 1ª edición ed. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C..

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

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

Montani, R., 2000. La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Construcción y Tecnología*.



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

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

NMX-C-021-ONNCCE, 2015. *Industria de la construcción- Cemento para albañilería (Mortero)- Especificaciones y Métodos de ensayo*. México: s.n.

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

NMX-C-165-ONNCCE, 2014. *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C..

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

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

NMX-C-191-ONNCCE, 2015. *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C..

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

NMX-C-414-ONNCCE, 2014. *Industria de la construcción -cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C..

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

PCA, B. d. I. E., 2004. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*.

QuimiNet, 2016. *QuimiNet*. [En línea] Available at: http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-la-fecula-de-maiz-2653824.htm?mkt_medium=2552671&mkt_term=&mkt_content=&mkt_campaign=1&mkt_source=174

[Último acceso: 5 Agosto 2016].



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

Reyes., G. A. M., 2012. *Diseño por Durabilidad de Mezclas de Concreto Hidráulico variando los agregados pétreos. Evaluación de Resultados mediante Pruebas Destructivas y no Destructivas*. Morelia: s.n.

Rivera, G., 2016. *Durabilidad del concreto*. [En línea] Available at: <ftp://ftp.unicauca.edu.co>

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

SCT, 2001. *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*, s.l.: s.n.

Secretaria de Turismo, 2016. *Comunicado 73*, s.l.: s.n.

SEMARNAT-INE-CEC-USEPA-WGA, 2006. *Inventario nacional de emisiones de México*, México: s.n.

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

Torres Acosta, A. A., Celis Martínez, C. E., Maartínez Molina, W. & Lomelí González, M. G., 2010. *Mejora de la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cetáceas*. Querétaro: Publicación Técnica #326, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.

Tuutti, K., 1982. *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm: CIB.

UNE-EN 450-1, 2013. *Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*. AEN/CTN 83 - HORMIGÓN ed. s.l.:s.n.

VERDU, D. F. A. Y., s.f. *materconstrucc*. [En línea] Available at: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1167/1300> [Último acceso: 14 11 2016].