



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis profesional

“INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO EN CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA EN LA EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS”

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

JOANA ENRÍQUEZ RAMÍREZ

Director de tesis:

DR. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Co-Director:

M.I. CARLOS URIEL ESPINO GONZÁLEZ

Morelia, Michoacán, Enero 2020.



RESUMEN

En la actualidad de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Concreto se entiende por concreto de alta resistencia aquel que tiene una resistencia a la compresión f'_c igual o mayor que 400 kg/cm^2 (40 MPa).

El ACI (Instituto Americano del Concreto) describe que el concreto de alta resistencia, es aquel que tiene una resistencia a la compresión, f'_c mayor o igual a 420 kg/cm^2 (42 MPa).

El presente trabajo muestra la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un concreto convencional, el cual nos servirá de base para evaluar comparativamente con tres mezclas: concreto adicionado con fibras de polipropileno, concreto adicionado con aditivo reductor de agua de alto rango y concreto adicionado con fibras de polipropileno y aditivo reductor de agua de alto rango, las pruebas a las que se sometieron fueron cinco: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a tensión indirecta; las dos primeras se clasifican como pruebas no destructivas y las tres últimas como pruebas destructivas.

Los resultados de estas pruebas se compararon con los valores que establecen las normativas correspondientes, verificando que cumplan con las condiciones mínimas para dichas características.

Se verificó que al diseñar con $f'_c=400 \text{ kg/cm}^2$ (40MPa), el cual es un concreto convencional, se es capaz de mejorar las propiedades reológicas del concreto con el uso de fibras de polipropileno y aditivo obteniendo como resultado un concreto de alta resistencia y demás beneficios como disminuir el costo del mismo.

En base a los resultados de las pruebas de resistividad se determinó el periodo de vida útil de las cuatro mezclas de concreto, el cual está en función del espesor de recubrimiento y del factor edad “q”.

Palabras clave: concreto convencional, concreto de alta resistencia, fibras de polipropileno, aditivo, vida útil.



ABSTRACT

At present, according to the Complementary Technical Standards of Concrete, high strength concrete is understood to be one that has a compressive strength f'_c equal to or greater than 400 kg / cm² (40 MPa).

The ACI (American Institute of Concrete) describes that high strength concrete is one that has a compressive strength, f'_c greater than or equal to 420 kg / cm² (42 MPa).

The present work shows the evaluation of the physical and mechanical properties of a conventional concrete, which will serve as a basis for comparatively evaluating with three mixtures: concrete added with polypropylene fibers, concrete added with high-range water reducing additive and concrete added With polypropylene fibers and high-range water reducing additive, the tests they underwent were five: electrical resistivity, ultrasonic pulse rate, compressive strength, flexural strength and indirect tensile strength; the first two are classified as non-destructive tests and the last three as destructive tests.

The results of these tests were compared with the values established by the corresponding regulations, verifying that they meet the minimum conditions for these characteristics.

It was verified that when designing with $f'_c = 400$ kg / cm² (40MPa), which is a conventional concrete, it is able to improve the rheological properties of concrete with the use of polypropylene fibers and additive, resulting in a concrete of high resistance and other benefits such as reducing the cost of it.

Based on the results of the resistivity tests, the useful life of the four concrete mixtures was determined, which is a function of the coating thickness and the age factor “q”.

Keywords: conventional concrete, high strength concrete, polypropylene fibers, additive, shelf life.



DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres Enrique Enríquez Villa y Clementina Ramírez Espinosa por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por confiar y creer en mí, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme en cada agotadora noche de estudio; gracias por siempre anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida y que siempre me apoyaron tanto en la parte moral como en la económica para poder llegar a ser una profesionista.

A mis hermanas por siempre estar ahí cada vez que las necesitaba, por darme su amor, sus consejos, por siempre preocuparse por mí y orientarme en cada paso, así como a mi demás familia por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria.

A mi compañero y bebé Antonio Maldonado Huante por apoyarme a lo largo de la carrera, por siempre estar incondicionalmente para mí y ayudarme en todo momento con esta investigación como fue a la hora de caracterizar, colar y a realizar todas las pruebas a los especímenes y por siempre motivarme a ser mejor persona e impulsarme a realizar todo lo que me proponga.



AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por este nuevo triunfo, a mis padres y a todas las personas que me apoyaron y creyeron en mi para la realización de esta tesis.

Principalmente agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme aceptado ser parte de ella.

A la Facultad de Ingeniería Civil por abrirme las puertas para poder estudiar mi carrera.

Al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” en especial a los departamentos de Corrosión y Resistencia por las facilidades prestadas y el equipo utilizado.

Al Dr. Wilfrido Martínez Molina por ser mi tutor, quien se ha tomado el arduo trabajo de transmitirme sus diversos conocimientos, por todo el apoyo brindado a lo largo de esta investigación, así como el apoyo a lo largo de la carrera al igual que siempre nos motivó con las actividades del capítulo estudiantil del ACI.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán por todos sus consejos y enseñanzas, quien me ha ofrecido sabios conocimientos para lograr mis metas.

A los profesores: Noel Díaz, Cipriano Bernabé, Marco Antonio Ornelas, Sandra del Carmen Argüello, Carlos Uriel Espino, Luís Colín y a todos los que hicieron esto posible brindándome el apoyo necesario para dicha investigación.

Al Técnico académico Víctor Alfonso, que me ayudo en todo momento con las pruebas a realizar, así como el apoyo para utilizar los equipos necesarios.

A la empresa ELEMENT5 la cual fue patrocinadora de los aditivos y fibras utilizadas en dicha investigación, así como al Ing. Gonzalo quien fue el facilitador de éstos.

A Concretos ABCD por haberme permitido el uso de sus instalaciones para llevar a cabo las pruebas correspondientes.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT.....	III
DEDICATORIAS.....	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XIV
JUSTIFICACIÓN.....	XVI
OBJETIVO GENERAL.....	XVII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Estado del arte de materiales en estudio	5
2.1.1. Fibras de polipropileno	5
2.1.2. Antecedentes del estudio	5
2.2. Cálculo de la vida útil de una estructura de concreto reforzado con base en la resistividad eléctrica	9
2.2.1. Introducción	9
2.2.2. Fundamento del método	11
2.2.3. Deducción de la fórmula para el cálculo de la vida útil de estructuras de concreto a partir del valor de resistividad.	12
2.2.3.1. Factor de retardo (r_b).....	15
2.2.3.2. Resistividad aparente (ρ_{ap}).	16
2.2.3.3. Factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación (F_{exp}).	18
2.2.3.4. Resistividad efectiva (ρ_{ef}).....	19
2.2.3.5. Factor edad (q).....	21
2.3. Cemento	22
2.3.1. Producción del cemento Portland	23
2.3.2. Clasificación del cemento.....	24
2.3.3. Propiedades del cemento	25
2.3.3.1. Propiedades Físicas	25
2.3.3.2. Propiedades Químicas.....	27
2.3.3.3. Propiedades Mecánicas.....	28
2.3.4. Cemento usado en la Investigación	29



2.4. Agregados.....	30
2.4.1. Origen de los agregados.....	31
2.4.2. Propiedades de los agregados	32
2.4.2.1. Propiedades físicas	33
2.4.2.2. Propiedades Químicas.....	34
2.4.2.3. Propiedades Mecánicas.....	34
2.4.3. Agregados utilizados en la investigación	35
2.5. Agua	36
2.5.1. Especificaciones del agua en la construcción	36
2.5.2. El agua utilizada en la investigación.....	38
2.6. Concretos de alta resistencia	38
2.6.1. Antecedentes	38
2.6.2. Requisitos de los materiales para lograr una alta resistencia.....	39
2.6.3. Uso y aplicación de los Concretos de Alta Resistencia.....	40
2.7. Materiales en estudio como adición al concreto.....	41
2.7.1. Fibra de polipropileno	41
2.7.2. Antecedentes	41
2.7.3. Tipos y usos	42
2.7.4. Fibra de polipropileno utilizada en la investigación.....	43
2.7.4.1. Beneficios y características	43
2.7.4.2. Usos.....	44
2.7.4.3. Dosificación	44
2.8. Aditivos	44
2.8.1. Tipos y usos	45
2.8.2. Aditivo utilizado en la investigación.....	47
2.8.2.1. Beneficios	47
2.8.2.2. Aplicaciones principales	48
2.8.2.3. Dosificación	48
3. METODOLOGÍA.....	49
3.1. Características y propiedades de los materiales.....	49
3.1.1. Cemento.....	49
3.1.1.1. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento.	49
3.1.1.2. Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.	53
3.1.1.3. Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.55	
3.1.2. Arena	58
3.1.2.1. Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba (Cuarteo). 59	



3.1.2.2. Método de prueba estándar para la humedad superficial y humedad de absorción en arenas.	63
3.1.2.3. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica suelta). 65	
3.1.2.4. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa compacta).	66
3.1.2.5. Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos.	68
3.1.2.6. Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino.	73
3.1.2.7. Sedimentación en arenas.	76
3.1.2.8. Método de prueba estándar para materiales que pasan la malla N°200 en agregados por lavado. 77	
3.1.2.9. Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	79
3.1.2.10. Método de prueba estándar para densidad relativa de la arena.	81
3.1.2.11. Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos.	83
3.1.3. Gravas.	86
3.1.3.1. Muestreo en gravas.	86
3.1.3.2. Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas “Cuarteo en gravas”.	87
3.1.3.3. Contenido de agua por secado “Humedad actual en gravas”.	88
3.1.3.4. Densidad en gravas.	90
3.1.3.5. Determinación de la masa volumétrica seca y suelta en gravas (M.V.S.S.)	91
3.1.3.6. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada en gravas (M.V.S.V.)	92
3.1.3.7. Análisis granulométrico o Granulometría.	93
3.1.4. Agua.	95
3.1.5. Aditivo.	95
3.2 Pruebas realizadas al concreto en estado fresco.	96
3.2.1. Elaboración de especímenes.	96
3.2.1.1. Elaboración de cubos.	98
3.2.1.2. Elaboración de cilindros.	99
3.2.1.3. Elaboración de vigas.	101
3.2.2. Curado.	101
3.3 Pruebas realizadas al concreto en estado endurecido.	102
3.3.1. Pruebas no destructivas.	102
3.3.1.1. Método de prueba estándar para la velocidad de pulso ultrasónico (VPU).	103
3.3.1.2. Resistividad eléctrica.	105
3.3.2. Pruebas destructivas.	107
3.3.2.1. Resistencia a la compresión.	107
3.3.2.2. Resistencia a la flexión.	109
3.3.2.3. Resistencia a la tensión indirecta.	111
3.4. Diseño de mezcla de concreto por método ACI 211.1.	113
3.4.1. Proporcionamiento para 1 m ³	116
3.5. Proporcionamiento del diseño de mezclas.	117



3.5.1. Datos del proporcionamiento	118
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	120
4.1. Cemento.....	120
4.2 Caracterización del agregado fino.....	120
4.3 Caracterización del agregado grueso	122
4.4. Pruebas realizadas al concreto en estado fresco.....	122
4.5 Pruebas realizadas al concreto en estado endurecido	127
4.5.1. Pruebas no destructivas.....	127
4.5.1.1. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	127
4.5.1.2. Resistividad eléctrica	128
4.5.2. Pruebas destructivas	129
4.5.2.1. Resistencia a compresión	129
4.5.2.2. Resistencia a la flexión	130
4.5.2.3. Resistencia a la tensión indirecta	131
4.6. Proyección de la vida útil del concreto	132
5. CONCLUSIONES	140
6. BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXO A (Informativo).	146



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores simplificados del factor de retardo (PNE 83994-2, 2016).....	16
Tabla 2. Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (PNE 83994-2, , 2016).	19
Tabla 3. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	24
Tabla 4 Clasificación de los cementos con la norma actual (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	25
Tabla 5 Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	27
Tabla 6 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas,(NMX-C-122-ONNCCE, 2014).....	37
Tabla 7 Normas nacionales e internacionales que rigen las prácticas de caracterización del agregado.	58
Tabla 8. Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría.....	70
Tabla 9. Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation ASTM.....	72
Tabla 10. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004)	75
Tabla 11. Materiales finos que pasa por la criba 0.0075 mm (No 200).	79
Tabla 12. Formato de registro y cálculo para análisis granulométrico.	94
Tabla 13. Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleados para moldear especímenes de prueba	97
Tabla 14. Número de penetraciones de la varilla para el moldeado de especímenes cilíndricos.	98
Tabla 15. Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998).....	105
Tabla 16. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998)	107
Tabla 17. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.	114
Tabla 18. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto. .	114
Tabla 19. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	115
Tabla 20. Características de los materiales.	116
Tabla 21. Cálculo de cemento.	116
Tabla 22. Cantidades para un metro cúbico de concreto.	116
Tabla 23. Ajuste por humedad del agregado.....	117
Tabla 24. Cantidades de materiales corregidas para un metro cúbico.....	117
Tabla 25. Dimensionamiento de vigas.....	118
Tabla 26. Proporcionamiento para vigas.....	118
Tabla 27. Dimensionamiento de cubos.....	119
Tabla 28. Proporcionamiento para cubos.....	119
Tabla 29. Dimensionamiento de cilindros.....	119
Tabla 30. Proporcionamiento para cilindros.....	119
Tabla 31. Proporcionamiento total por colada.....	120
Tabla 32. Pruebas al cemento.....	120
Tabla 33. Pruebas realizadas al agregado fino.....	121
Tabla 34. Pruebas realizadas al agregado grueso.....	122
Tabla 35. Pruebas realizadas a mezcla “Testigo” al concreto en estado fresco.....	122
Tabla 36. Pruebas realizadas a mezcla “Fibra” al concreto en estado fresco.....	124
Tabla 37. Pruebas realizadas a mezcla “Fibra-Aditivo” al concreto en estado fresco.....	125
Tabla 38. Pruebas realizadas a mezcla “Aditivo” al concreto en estado fresco.....	126



<i>Tabla 39. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla “Testigo”</i>	132
<i>Tabla 40. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla “Fibra”</i>	133
<i>Tabla 41. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla “Fibra-Aditivo”</i>	133
<i>Tabla 42. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla “Aditivo”</i>	133
<i>Tabla 43. Tiempo de iniciación para una estructura de concreto con un recubrimiento de 5 cm.</i>	137
<i>Tabla 44. Tiempo de iniciación para una estructura de concreto con un recubrimiento de 6 cm.</i>	137
<i>Tabla 45. Tiempo de iniciación para una estructura de concreto con un recubrimiento de 6.5 cm.</i>	138
<i>Tabla 46. Valores de recubrimiento obtenidos para una vida útil de 100 años para estructura durable</i>	139



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1. Esquema del proceso de producción del cemento (Fundación Laboral del Cemento y Medio ambiente, 2013).</i>	24
<i>Ilustración 2. Vertido de agua en el centro del cráter (Fotografía Joana Enríquez).</i>	50
<i>Ilustración 3. Mezclado de la pasta con las manos (Fotografía Joana Enríquez).</i>	51
<i>Ilustración 4. Penetración de la aguja (Fotografía Joana Enríquez).</i>	53
<i>Ilustración 5. Aparato de Gillmore (Fotografía Joana Enríquez).</i>	55
<i>Ilustración 6. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento (Norma I.N.V. E-307-07).</i>	57
<i>Ilustración 7. Agregando el material al divisor de muestras mecánico (Fotografía Joana Enríquez).</i>	59
<i>Ilustración 8. Colocación del agregado en una superficie limpia (Fotografía Joana Enríquez).</i>	60
<i>Ilustración 9. Homogenización del material (Joana Enríquez).</i>	61
<i>Ilustración 10. Aplanado de la parte superior del material (Fotografía Joana Enríquez).</i>	61
<i>Ilustración 11. División de la muestra en 4 partes iguales (Fotografía Joana Enríquez).</i>	61
<i>Ilustración 12. Secado superficial del agregado con ayuda del cono troncocónico (Fotografía Joana Enríquez).</i>	64
<i>Ilustración 13. Llenado de la muestra en M.V.S.S (Fotografía Joana Enríquez).</i>	65
<i>Ilustración 14. Llenado y varillado de MVSV (Fotografía Joana Enríquez).</i>	67
<i>Ilustración 15. Mallas ordenadas en orden decreciente (Fotografía Joana Enríquez).</i>	69
<i>Ilustración 16. Agitado mecánico (Raf-tap) (Fotografía Joana Enríquez).</i>	69
<i>Ilustración 17. Separación de los retenidos en cada malla (Fotografía Joana Enríquez).</i>	70
<i>Ilustración 18. Colorimetría en arenas (Fotografía Joana Enríquez).</i>	74
<i>Ilustración 19. Tabla de colorimetría (Fotografía J. M.).</i>	75
<i>Ilustración 20. Llenado del recipiente con material y agua hasta las marcas establecidas (Fotografía Joana Enríquez).</i>	76
<i>Ilustración 21. Se agita el frasco durante dos minutos (Fotografía Joana Enríquez).</i>	76
<i>Ilustración 22. Lavado del material (Fotografía J.M.).</i>	78
<i>Ilustración 23. Frascos y vidrios utilizados (Fotografía Joana Enríquez).</i>	83
<i>Ilustración 24. Llenado de capsula (Fotografía L. C.).</i>	85
<i>Ilustración 25. Se deja reposar el material en la probeta durante 20 minutos (Fotografía L. C.).</i>	86
<i>Ilustración 26 Cuarteo del material para obtener una muestra lo más homogénea posible (Fotografía Joana Enríquez).</i>	88
<i>Ilustración 27 Pesado de la muestra representativa de grava (Fotografía Joana Enríquez).</i>	89
<i>Ilustración 28 Secado de la muestra representativa de grava (Fotografía Joana Enríquez).</i>	89
<i>Ilustración 29. Utilización del picnómetro para la determinación de la densidad en gravas (Fotografía Joana Enríquez).</i>	90
<i>Ilustración 30. Material cuarteado para la determinación de masas volumétricas (Fotografía Joana Enríquez).</i>	91
<i>Ilustración 31. Determinación del peso total de la muestra (Fotografía Joana Enríquez).</i>	92
<i>Ilustración 32. Proceso de varillado del material (Fotografía Joana Enríquez).</i>	93
<i>Ilustración 33. Cribado del material para la determinación de la granulometría (Fotografía Joana Enríquez).</i>	95
<i>Ilustración 34. Aditivo utilizado (Fotografía Joana Enríquez).</i>	96
<i>Ilustración 35. Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Fotografía Joana Enríquez).</i>	104
<i>Ilustración 36. Equipo utilizado en la determinación de resistividad eléctrica (Fotografía Joana Enríquez).</i>	106
<i>Ilustración 37. Aplicación de carga para prueba de compresión en especímenes prismáticos. (Fotografía Joana Enríquez).</i>	109



<i>Ilustración 38. Espécimen sometido a la prueba de flexión. (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 39. Ensayo de espécimen a tensión indirecta. (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 40. Revenimiento de mezcla "Testigo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 41. Temperatura de mezcla "Testigo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 42. pH de mezcla "Testigo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 43. Revenimiento de mezcla "Fibra" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 44. Temperatura de mezcla "Fibra" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 45. pH de mezcla "Fibra" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 46. Revenimiento de mezcla "Fibra-Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>125</i>
<i>Ilustración 47. Temperatura de mezcla "Fibra-Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>125</i>
<i>Ilustración 48. pH de la mezcla "Fibra-Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>125</i>
<i>Ilustración 49. Revenimiento en mezcla "Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 50. Temperatura en mezcla "Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 51. pH en mezcla "Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).</i>	<i>127</i>



ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Valores de conductividad en los tiempos t_0 y t_n (escala logarítmica).</i>	21
<i>Gráfica 2. Valores de conductividad en los tiempos t_0, t_n y factor edad “q” (escala logarítmica).</i>	22
<i>Gráfica 3. Límites de granulometría para morteros y concreto (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).</i>	73
<i>Gráfica 4. Análisis granulométrico en arenas</i>	121
<i>Gráfica 5. Análisis granulométrico en gravas</i>	122
<i>Gráfica 6. Velocidad de pulso ultrasónico</i>	128
<i>Gráfica 7. Resistividad eléctrica</i>	129
<i>Gráfica 8. Resistencia a la compresión</i>	130
<i>Gráfica 9. Resistencia a la flexión</i>	131
<i>Gráfica 10. Resistencia a la tensión indirecta</i>	132
<i>Gráfica 11. Factor edad “q” de la mezcla Testigo</i>	134
<i>Gráfica 12. Factor edad “q” de la mezcla Fibra</i>	135
<i>Gráfica 13. Factor edad “q” de la mezcla Fibra-Aditivo</i>	135
<i>Gráfica 14. Factor edad “q” de la mezcla Aditivo</i>	136



ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Tiempo de vida útil.....</i>	<i>10</i>
<i>Ecuación 2. Coeficiente de difusión efectivo</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 3. Conductividad</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 4. Coeficiente de difusión efectivo (involucrando la conductividad).....</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 5. Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 6. Constante dependiente del concreto y del medio</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 7. Constante dependiente del concreto y del medio (involucrando la velocidad de penetración del frente de cloruros).....</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 8. Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 9. Velocidad de penetración del frente de cloruros</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 10. Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros (involucrando el coeficiente de difusión efectivo).....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 11. Variable t (tiempo) despejada de la ecuación 10.....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 12. Periodo de iniciación</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 13. Periodo de iniciación (involucrando el coeficiente de difusión efectivo).....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 14. Tiempo de iniciación</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 15. Factor de retardo</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 16. Resistividad aparente</i>	<i>16</i>
<i>Ecuación 17. Periodo de iniciación (involucrando la reacción de cloruros con las fases del cemento).....</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 18. Periodo de iniciación (involucrando la resistividad efectiva)</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 19. Coeficiente de difusión.....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 20. Factor de exposición ambiental</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 21. Periodo de iniciación (involucrando el factor de exposición ambiental).....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 22. Último valor medido de resistividad efectiva.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 23. Periodo de iniciación (involucrando el factor de exposición ambiental).....</i>	<i>20</i>
<i>Ecuación 24. Densidad del cementante hidráulico</i>	<i>57</i>
<i>Ecuación 25. Porcentaje de humedad de absorción</i>	<i>64</i>
<i>Ecuación 26. Masa volumétrica seca y suelta.....</i>	<i>66</i>
<i>Ecuación 27. Masa volumétrica seca y varillada</i>	<i>67</i>
<i>Ecuación 28. Determinación del módulo de finura</i>	<i>71</i>
<i>Ecuación 29. Porcentaje de material que pasa la malla N° 200 en %.....</i>	<i>78</i>
<i>Ecuación 30. Porcentaje de terrones de arcilla</i>	<i>80</i>
<i>Ecuación 31. Densidad de la arena en gr/cm³</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 32. Densidad relativa</i>	<i>83</i>
<i>Ecuación 33. Equivalente de arena</i>	<i>86</i>
<i>Ecuación 34. Porcentaje de humedad actual</i>	<i>89</i>
<i>Ecuación 35. Densidad en gravas.....</i>	<i>90</i>
<i>Ecuación 36. Masa volumétrica seca suelta en gravas.....</i>	<i>92</i>
<i>Ecuación 37. Masa volumétrica seca varillada en gravas.....</i>	<i>93</i>
<i>Ecuación 38. Resistividad eléctrica</i>	<i>106</i>
<i>Ecuación 39. Módulo de ruptura si la falla ocurre en el tercio medio del claro</i>	<i>110</i>
<i>Ecuación 40. Módulo de ruptura si la falla ocurre fuera del tercio medio del claro</i>	<i>110</i>



JUSTIFICACIÓN

En el campo de la Ingeniería Civil el concreto es uno de los materiales más utilizados para la construcción, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales: cemento, agua y agregados; el cual tiene como función resistir los esfuerzos.

A estos elementos nombrados anteriormente se le incorpora un cuarto componente que se denomina aditivo. Esto con el fin de mejorar las construcciones y contribuir al desarrollo de nuevas alternativas para el mejoramiento del concreto.

La aplicación de fibras es una forma de mejorar las características del mismo buscando aumentar la resistencia y optimizar sus propiedades ya que son de vital importancia si con ella se busca aumentar la capacidad a la compresión y tensión del concreto.

La finalidad de esta investigación es hacer un análisis comparativo con diseños de concretos convencionales los cuales por lo general no utilizan aditivos, entonces de esta manera poder mejorar las condiciones para un concreto de alta resistencia con el uso de fibra de polipropileno y un aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante para evaluar las propiedades físico-mecánicas de cada una de las mezclas.

En cualquier caso, la fabricación de mezclas de concreto de alta resistencia no requiere materiales especiales o diferentes de los utilizados en los concretos convencionales. Sin embargo, la optimización en el uso de estos materiales y el control de calidad se vuelven vitales para alcanzar las resistencias a la compresión necesarias.



OBJETIVO GENERAL

El propósito de este trabajo es presentar los resultados y experiencias obtenidos en el laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” relacionados con la elaboración de mezclas de concreto de alta resistencia determinando, también, dosificación, procedimientos de mezclado y métodos de prueba.

El alcance que se plantea este trabajo es encontrar las mejores mezclas de concreto que logren las más altas resistencias, teniendo en cuenta el procedimiento de mezclado, las adiciones de fibra de polipropileno y el uso de un aditivo reductor de agua superplastificante para así mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar las propiedades físicas y mecánicas de un concreto convencional; el cual nos servirá de base para evaluar comparativamente un concreto adicionado con materiales como la fibra de polipropileno y un aditivo.

Proponer el uso de un aditivo que sea capaz de tener una respuesta más favorable que un concreto convencional, esto con la finalidad de mejorar las propiedades reológicas del concreto, así como disminuir el costo del mismo.

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



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los diseñadores arquitectónicos y estructurales requieren materiales de mayor resistencia a la compresión para lograr sus propósitos de edificios y puentes de mayor altura, lo que deriva en mayores cargas, con una menor cantidad de elementos estructurales y una menor sección en dichos elementos.

En consecuencia, se encuentra en auge la investigación para desarrollo de concretos de alta resistencia, los cuales permitan una alta confiabilidad en el desempeño final de los elementos elaborados con este material.

En esencia la composición de los concretos de alta resistencia no difiere de la composición de los concretos convencionales; la diferencia radica en la proporción de cada uno de los componentes utilizados en la mezcla. De esta forma se aprovecha de forma óptima cada uno de los componentes, agregando sólo la cantidad mínima necesaria para que se produzcan las diferentes reacciones químicas dentro de la masa de concreto.

Cuando se habla de concreto de alta resistencia, es necesario indicar el rango de valores para los que el término debe aplicarse, pero antes de intentar acotar las resistencias para las cuales puede usarse esta acepción, puede ser útil describir cómo se han venido incrementando en las últimas décadas los valores de la resistencia a la compresión.

En los años cincuenta, un concreto con resistencia a los esfuerzos de compresión de 350 kg/cm² (34.3 MPa) era considerado de alta resistencia; hoy día, este valor es considerado normal. En la siguiente década, valores de los esfuerzos de compresión de 400 a 500 kg/cm² (39.2 a 49.1 MPa) eran usados comercialmente en algunos sitios (principalmente en países del primer mundo), y para los ochenta ya se producían concretos con valores que llegaban casi al doble.



En la actualidad de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Concreto se entiende por concreto de alta resistencia aquel que tiene una resistencia a la compresión f'_c igual o mayor que 400 kg/cm^2 (40 MPa).

El ACI (Instituto Americano del Concreto) describe que el concreto de alta resistencia, es aquel que tiene una resistencia a la compresión, f'_c mayor o igual a 420 kg/cm^2 (42 MPa).

Mezclas de concreto de alta resistencia

Un óptimo diseño de concreto resulta de la selección de los materiales disponibles en la localidad, que permitan que el concreto en estado plástico sea de fácil colocación y acabado, y que aseguren el desarrollo de la resistencia y demás propiedades del concreto endurecido que especifique el diseñador. Algunos de los conceptos básicos que es necesario manejar para su realización son los siguientes:

1. Los agregados deben ser resistentes y durables. No es necesario que sean duros o de alta resistencia, pero si necesitan ser compatibles, en términos de rigidez y resistencia con la pasta de cemento. En general se emplean agregados gruesos del menor tamaño máximo posible para lograr dichos concretos. La arena debe ser más gruesa que la que se permite en la (ASTM C 33)(módulo de finura mayor de 3.2) debido al gran contenido de finos de los materiales cementantes.
2. Las mezclas de concreto de alta resistencia tienen un mayor contenido de materiales cementantes que incrementan el calor de hidratación y posiblemente produzcan una mayor contracción (retracción) por secado, creando un mayor potencial de agrietamiento. La mayoría de mezclas contienen una o más adiciones como cenizas volantes (clase C o F), cenizas de alto horno molidas, microsílice, metacaolín o materiales puzolánicos de origen natural.
3. El concreto de alta resistencia necesita por lo general tener una baja relación agua/material cementante (A/C), dicha relación debe estar en el rango de 0.23 a 0.35. Relaciones A/C tan bajas solo se pueden obtener con muy altas



dosificaciones de aditivos reductores de agua de alto rango (o superplastificantes) de acuerdo al tipo F o G de la (ASTM C 494). Un aditivo tipo A reductor de agua puede usarse en combinación.

4. El contenido total de materiales cementantes debe estar alrededor de 415 kg/m³, pero no más de 650 kg/m³.
5. El uso de aire incorporado en este concreto ocasionará una gran reducción en la resistencia deseada.

Usos del concreto de alta resistencia

- Para colocar el concreto en servicio a una edad mucho menor, por ejemplo, dar tráfico a pavimentos a 3 días de su colocación.
- Para construir edificios altos reduciendo la sección de las columnas e incrementando el espacio disponible.
- Para construir superestructuras de puentes de mucha luz y para mejorar la durabilidad de sus elementos.
- Para satisfacer necesidades específicas de ciertas aplicaciones especiales como por ejemplo durabilidad, módulo de elasticidad y resistencia a la flexión. Entre algunas de dichas aplicaciones se cuentan presas, cubiertas de graderías, cimentaciones marinas, parqueaderos, y pisos industriales de tráfico pesado. (Cabe señalar que el concreto de alta resistencia no es garantía por sí mismo de durabilidad).

Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de producir concretos de alta resistencia son:

- La posibilidad de disminuir la sección de los elementos estructurales, particularmente de las columnas.
- Para una misma sección transversal reducir la cantidad de acero de refuerzo en el elemento de concreto.
- Facilitar la construcción de edificios más altos, dada la posibilidad de aplicar mayores cargas a la estructura y cimentación.
- En la construcción de puentes, reducir el número de vigas.



- Mayor resistencia a los ataques químicos.
- Inhibición del crecimiento de bacterias y moho.

Por otra parte, las desventajas de este tipo de concretos pueden ser:

- El incremento de las deformaciones plásticas a largo plazo.
- El incremento en la retracción durante el fraguado.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte de materiales en estudio

2.1.1. Fibras de polipropileno

La fibra de polipropileno se viene utilizando como refuerzo secundario, por tal motivo se analizó el comportamiento del concreto con incorporación de fibras de polipropileno, evaluándose el efecto que produce la adición de la fibra sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico en condiciones locales.

El conocimiento de la relación entre la fibra y las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico permite mejorar la calidad del concreto optimizando la dosificación racional de sus elementos y brindando características acordes con las exigencias de los diseños estructurales de la actualidad, permitiendo conocer la influencia de la fibra sobre las propiedades del concreto hidráulico, reduciendo el potencial de agrietamiento del concreto en estado fresco, reduciendo el riesgo de corrosión de la armadura, el riesgo estético y otras patologías ligadas al fenómeno de fisuración.

2.1.2. Antecedentes del estudio

(Saeid Kakooei, Hazizan Md Akil, Morteza Jamshidi and Jalal Rouhi., 2012), en su investigación “The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures” Publicado en Malasia en la revista científica “Construction and Building Materials”, estudió el efecto de la adición de fibras de polipropileno sobre las propiedades de resistencia a la compresión, la permeabilidad y la resistividad eléctrica del concreto. Se adicionó fibra de polipropileno en dosis de 0, 0.5, 1.5 y 2 kg/m³, se utilizó como parámetro de diseño una relación agua cemento de 0.48. Concluye que la permeabilidad a los 30 días se reduce significativamente en 0.082, 0.061, 0.007 y 0.007, (/10¹⁶ m²) para concreto con adiciones de 0, 0.5, 1.5 y 2 kg/m³,



respectivamente. Según los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, la resistencia del concreto aumentará proporcionalmente con el aumento de relaciones de volumen de fibras de polipropileno, los valores más altos de resistencia se observaron en las proporciones de volumen de 1.5 y 2 kg/m³. La resistividad eléctrica para dosis de 1 y 1.5 kg/m³ tuvo los valores más altos en comparación con otras dosis. Tiene un efecto directo en la reducción de la corrosión. En general, las muestras con contenido de fibras de 1,5 kg/m³ mostraron resultados óptimos en comparación con otras muestras en este estudio.

(Dávila, M., 2010) en su tesis “Efectos de la adición de fibra de polipropileno sobre las propiedades plásticas y mecánicas del concreto” para optar el grado de Maestro en Ingeniería presentado a la Universidad Nacional Autónoma de México, estudió el efecto de la adición de fibra de polipropileno sobre las propiedades del concreto, mediante la fabricación de mezclas de concreto con dos tamaños de agregado grueso, 3/4” y 3/8”, en cada caso se fabricaron cuatro mezclas incorporando 0, 1, 3 y 5 kg/m³ de fibra de polipropileno tipo monofilamento no fibrilada. Los parámetros de diseño fueron el revenimiento de 10 cm y una resistencia a la compresión de 300 kg/cm² a los 28 días. Concluye respecto a las propiedades plásticas que, la adición de fibra de polipropileno al concreto genera en el revenimiento una disminución conforme se aumenta el contenido de fibra, la mezcla con fibra en 5kg/m³ se tuvo que emplear un superplastificante, mientras que el peso unitario y el contenido de aire no muestran cambios significativos, finalmente en el ensayo de contracción plástica obtuvo que al aumentar el contenido de fibra el índice de grieta disminuye. Respecto a las propiedades mecánicas, se obtuvo que la resistencia a la compresión disminuye a medida que se aumenta el contenido de fibra, la disminución de la resistencia para las mezclas con agregado de 3/4” es del 5% para una dosis de 1 kg/m³ y aumenta a 9% para la dosis de 3 kg/m³, para las mezclas con agregado de 3/8” se observa una disminución de 5% para una dosis de 5 kg/m³. Mientras que en el ensayo de flexión se obtuvo que para la mezcla con agregado de 3/4” el mayor incremento se obtiene para la dosis de 5 kg/m³, siendo el 11% del f_c a los 28 días, para la mezcla con agregado de 3/8” se obtiene que la resistencia por flexión es el 14 % del f_c a los 28 días.



(Kolli Ramujee., 2013) en su investigación “Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete.” Publicado en la India en “International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology”, estudió el efecto de la adición de fibras de polipropileno sobre la resistencia del concreto. Se utilizó agregado grueso granito angular de peso específico es 2.70 gr/cm^3 , densidad a granel de 1450 kg/m^3 , agregado fino con peso específico de 2.6 gr/cm^3 , y densidad aparente de 1680 kg/m^3 . El cemento gravedad específica de 3.02 gr/cm^3 , con tiempos de fraguado inicial y final 50 y 170 minutos, respectivamente. Las fibras utilizadas fueron monofilamentos de polipropileno finas con longitud de fibra de 12 mm. Los parámetros de diseño fueron, resistencia a la compresión del concreto estándar a los 28 días de 54.0 MPa , relación agua cemento 0.50. Se realizaron ensayos con diferentes dosis de fibra, que varían de 0, 0.5, 1, 1.5 y 2,0%. Concluye, para dosis mayores a 1.5% de fibra existe una disminución del asentamiento, respecto a la resistencia a la compresión afirma que para dosis de 0.5, 1 y 1.5% de fibra se incrementa la resistencia a la compresión a los 28 días en 40.9, 44.12 y 45.24 MPa, respectivamente, mientras que para una dosis de 2% de fibra la resistencia a la compresión disminuye a 40.5 MPa. La resistencia a la tracción aumenta para dosis de 0.5, 1 y 1.5% en 3.22, 3.4 y 3.52 MPa, respectivamente, mientras que para la dosis de 2% la resistencia a la tracción disminuyó a 2.90 MPa.

(López, J., 2015) en su tesis “Análisis de las propiedades del concreto reforzado con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno: influencia del tipo y consumo de fibra adicionado” para optar el grado de Maestro en Ingeniería presentado a la Universidad Nacional Autónoma de México, estudió el efecto de la adición de fibras, de acero y de polipropileno, sobre las propiedades del concreto, mediante la 33 fabricación de mezclas de concreto con agregado grueso de origen calizo de 3/8” en total se fabricaron ocho mezclas, de las cuales cuatro fueron con fibra de polipropileno incorporando 2.3, 4.6, 7.0 y 9.3 kg/m^3 . Los parámetros para el diseño de mezclas fueron el revenimiento de 15 cm, un porcentaje de volumen absoluto para los agregados de 52% para la grava y de 48% para la arena, y una relación de agua/cemento de 0.5 para el concreto sin fibra, en todos los casos se utilizó un aditivo superplastificante para mantener el revenimiento en el rango deseado.



Concluye respecto a las propiedades plásticas del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno que, la trabajabilidad del concreto se reduce de forma proporcional al consumo de fibras, tanto de acero como de polipropileno, sin embargo, la trabajabilidad es menor cuando se adicionan fibras cortas de acero. En cuanto al peso volumétrico no existe variación al incrementar la dosis, mientras que el contenido de aire atrapado experimenta una reducción proporcional al consumo de fibra. Respecto al ensayo de potencial de fisuración la macrofibra de polipropileno es más eficiente para el control de grietas por contracción plástica. Respecto a las propiedades mecánicas, las macrofibras de polipropileno brindan un incremento pequeño en la resistencia a las edades de 28 y 90 días, con respecto al concreto sin fibras. La resistencia a tensión se incrementa proporcionalmente al consumo de fibra; de la misma forma, el porcentaje que representa la resistencia a tensión con respecto a la de compresión aumenta con el consumo de fibra. Para porcentajes de fibras de hasta 0.51% existe un mejor desempeño de las macrofibras de polipropileno; para porcentajes mayores, el desempeño del concreto con fibras de acero tiende a ser más eficiente.

(Milind V. Mohod., 2015) en su investigación “Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete.” Publicado en la India en “IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)”, estudió el efecto de la adición de fibras de polipropileno sobre la resistencia del concreto. Se utilizó como agregados, arena de río como agregado y como agregado grueso piedra angular de un tamaño de 20 mm, los agregados estuvieron libres de polvo antes utilizado en el concreto. El cemento utilizado fue cemento Portland puzolana (PPC) con una densidad relativa de 3.11 gr/cm³, con un tiempo de fraguado inicial y final de 69 y 195 min, respectivamente. Las fibras utilizadas fueron monofilamentos de polipropileno finas con longitud de fibra de 6.20 mm. El objetivo principal de la investigación fue estudiar el efecto de la mezcla de fibras de polipropileno mediante la variación de dosis en 0%, 0.5%, 1%, 1.5% y 2%, en mezclas de resistencias de diseño de 30 y 40 MPa., encontrando el contenido óptimo de la fibra de polipropileno. La mitad de las probetas de concreto se dejaron expuestas al entorno sin curar y la mitad restante se curaron en un tanque de curado. Concluye, realizadas las pruebas en el concreto



para diferentes condiciones de curado, curado en tanque húmedo y curados en condición irregular, para la condición irregular inicialmente tiene más fuerza de compresión que el de la condición de curado en tanque húmedo, pero a medida que transcurre el tiempo pierde su fuerza y no llega a una resistencia satisfactoria como la condición de curado. Por lo tanto, para una mejor resistencia concluye que el curado es un parámetro esencial. Las fibras de polipropileno (PPF) reducen la contracción a temprana edad y la pérdida de humedad de la mezcla de concreto, incluso cuando se utilizan fracciones de bajo volumen de PPF. Se concluyó que el volumen con mayor porcentaje de fibra añadido en el concreto disminuye el asentamiento, las tasas de dosificación de volumen por encima de 1.0% mostró que el concreto fue significativamente más rígida y difícil de compactar, sin embargo, también reduce el sangrado y la segregación en la mezcla de concreto. El porcentaje óptimo de fibra encontrado de la investigación es el de 0.5%, dosis que incrementa significativamente la resistencia a la tracción y flexión.

2.2. Cálculo de la vida útil de una estructura de concreto reforzado con base en la resistividad eléctrica

2.2.1. Introducción

Esta metodología permite el cálculo de la vida útil de una estructura de concreto reforzado con base en la resistividad eléctrica húmeda (PNE 83994-2, 2016) dicha estructura pudiera estar bajo el ataque del ion cloruro o por carbonatación. Para nuestro caso de estudio nos enfocaremos en el cálculo de la vida útil por ataque del ion cloruro.

La vida útil de una estructura de concreto es la suma del tiempo en que tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento de concreto que protege al acero de refuerzo hasta llegar a este (Periodo de iniciación) y el tiempo en que se corroe el acero de refuerzo hasta formarse microfisuras en la superficie del concreto (tiempo de propagación) (Tuutti, K., 1982)



Es decir:

$$T_{vu} = T_i + T_p$$

Ecuación 1. Tiempo de vida útil

Debemos garantizar una vida útil de por lo menos 100 años, si logramos que el tiempo de iniciación (T_i) sea de por lo menos 100 años no será necesario calcular el tiempo de propagación (T_p), por lo cual, solo nos enfocaremos en el cálculo del tiempo de iniciación garantizando que este sea de por lo menos 100 años.

La resistividad puede ser utilizada para calcular la vida útil de una estructura de concreto. Esto se debe a la relación inversa que guarda la resistividad y la difusividad del ion cloruro (lo que permite el cálculo del periodo de iniciación) y la relación entre la velocidad de corrosión y la resistividad (lo que permite el cálculo del periodo de propagación) debido a que la resistividad refleja el grado de saturación del concreto.

Se deben tener en cuenta dos aspectos muy importantes cuando se calcula la vida útil de una estructura de concreto reforzado a partir de la resistividad:

1. La resistividad refleja la porosidad del concreto y la tortuosidad de los poros capilares, siempre y cuando el concreto se encuentre totalmente saturado.
2. La resistividad varía con el grado de saturación del concreto, el valor mínimo de resistividad se alcanza cuando el grado de saturación es el máximo, el valor máximo de resistividad se alcanza cuando el concreto se encuentra parcialmente húmedo.

Es baja la velocidad de avance del ion cloruro cuando el concreto se encuentra totalmente seco, esta se incrementa conforme el concreto aumenta su grado de saturación.

Debido a lo anterior, el cálculo de la vida útil se basa en valores de resistividad obtenidos a partir de especímenes de concretos curados en condiciones de saturación, ya que esta representa la condición más crítica.



La metodología que se presenta a continuación considera únicamente el cálculo del tiempo o periodo de iniciación (T_i).

2.2.2. Fundamento del método

El método se basa en la relación entre la difusividad y la resistencia al movimiento de las cargas eléctricas (iones) establecida hace unos 100 años por A. Einstein y que a lo largo del tiempo ha sido modificada por otros autores al aplicar ese principio a medios porosos (PNE 83994-2, 2016).

Esta relación se expresa como:

$$D_{ef} = \frac{k_{cl}}{\rho_{ef}}$$

Ecuación 2. Coeficiente de difusión efectivo

Donde:

D_{ef} = Coeficiente de difusión efectivo (no toma en cuenta la reacción de los cloruros con las fases del cemento).

k_{cl} = Una constante que depende de la concentración exterior de cloruros.

ρ_{ef} = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

Sabemos que la resistividad guarda una relación inversa con la conductividad, es por ello que:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{ef}}$$

Ecuación 3. Conductividad

Donde:

σ = Conductividad (inversa de la Resistividad).



p_{ef} = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

Debido a la relación anterior, la ecuación número dos queda de la siguiente forma (PNE 83994-2, 2016).

$$D_{ef} = k_{cl} \sigma$$

Ecuación 4. Coeficiente de difusión efectivo (involucrando la conductividad)

2.2.3. Deducción de la fórmula para el cálculo de la vida útil de estructuras de concreto a partir del valor de resistividad.

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998):

$$X_{cl} = K_{cl} \sqrt{t}$$

Ecuación 5. Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

t = Tiempo.

K_{cl} = Constante dependiente del concreto y del medio.

Ello es debido a que, en general, tanto los procesos de difusión pura, como los de absorción capilar, siguen una ley potencial.

El cálculo riguroso de X es complejo debido a la multitud de parámetros que influyen (porosidad del concreto, tipo de cemento, nivel de contaminación exterior, contenido en humedad del concreto, etc.).

Es decir, la constante K_{cl} depende del tipo de cemento, de la agresividad del ambiente (concentración de cloruros), del contenido de humedad del concreto etc.



Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la velocidad de penetración del frente de cloruros en el concreto es la que relaciona la profundidad de alcance del ion cloruro con la raíz cuadrada del tiempo de exposición, por lo que (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998):

$$K_{cl} = \frac{X_{cl}}{\sqrt{t}}$$

Ecuación 6. Constante dependiente del concreto y del medio

Con base en la información del párrafo anterior, se puede inferir que:

$$K_{cl} = V_{cl}$$

Ecuación 7. Constante dependiente del concreto y del medio (involucrando la velocidad de penetración del frente de cloruros)

Donde:

V_{cl} = Velocidad de penetración del frente de cloruros.

K_{cl} = Constante dependiente del concreto y del medio.

Tomando en cuenta la ecuación número siete, la cual se sustituye en la ecuación número cinco, se tiene que:

$$X_{cl} = V_{cl} \sqrt{t}$$

Ecuación 8. Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

V_{cl} = Velocidad de penetración del frente de cloruros.

t = Tiempo.



Considerando que, la velocidad de penetración del frente de cloruros es igual a la raíz cuadrada del coeficiente de difusión efectivo (PNE 83994-2, 2016):

$$V_{cl} = \sqrt{D_{ef}}$$

Ecuación 9. Velocidad de penetración del frente de cloruros

Sustituyendo la ecuación número nueve en la ecuación número ocho:

$$X_{cl} = \sqrt{D_{ef}} \sqrt{t}$$

Ecuación 10. Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros (involucrando el coeficiente de difusión efectivo)

La variable t representa el tiempo de exposición al agente agresor (ion cloruro). Ya que nos interesa conocer el tiempo de vida útil (periodo de iniciación) se despeja el tiempo de la ecuación número diez:

$$t = \frac{X_{cl}^2}{D_{ef}}$$

Ecuación 11. Variable t (tiempo) despejada de la ecuación 10

El periodo de iniciación es el tiempo que tarda el frente de cloruros en atravesar el espesor de recubrimiento que protege al acero de refuerzo y llegar a la superficie de este, por lo cual la ecuación número once se podría describir como:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2}{D_{ef}}$$

Ecuación 12. Periodo de iniciación

Sustituyendo la ecuación número dos en la ecuación número once:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2}{\frac{k_{cl}}{\rho_{ef}}}$$

Ecuación 13. Periodo de iniciación (involucrando el coeficiente de difusión efectivo)



Expresada de otra forma:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{k_{cl}}$$

Ecuación 14. Tiempo de iniciación

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

k_{cl} = Una constante que depende de la concentración exterior de cloruros.

ρ_{ef} = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

t_i = Tiempo de iniciación.

En la expresión número catorce la relación ρ_{ef}/k_{cl} no toma en cuenta la reacción de los cloruros con las fases del cemento, es por ello que a continuación se presenta un nuevo parámetro, el cual se incluirá en la ecuación para el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación).

2.2.3.1. Factor de retardo (rb).

El factor de retardo de un concreto es un valor que toma en cuenta la cantidad de cloruros que quedan combinados en relación al flujo de iones cloruro. El factor de retardo se expresa como la relación entre el coeficiente de difusión en estado estacionario (equivalente al D_{ef}) y el coeficiente de difusión en estado no estacionario (equivalente al D_{ap}) (PNE 83994-2, 2016):

$$r_{b,cl} = \frac{D_{ef,cl}}{D_{ap,cl} * P}$$

Ecuación 15. Factor de retardo



Donde:

rb,l = Factor de retardo.

Def,l = Coeficiente de difusión en estado estacionario referido a cm^3 de fase acuosa, en cm^2/s .

Dap,l = Coeficiente de difusión en estado no estacionario referido a cm^3 de muestra, en cm^2/s .

P = Volumen de la fase acuosa entre el volumen de muestra, que coincide con la porosidad del concreto en volumen cuando la muestra está saturada, en cm^3/cm^3 .

De forma simplificada se pueden tomar los valores que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Valores simplificados del factor de retardo (PNE 83994-2, 2016).

CLORUROS	Tipo de Cemento	Factor de retardo
	Tipo I	1.3
	Tipo II y III/A	1.5
	Tipo III/B, III/C y IV	2

2.2.3.2. Resistividad aparente (ρ_{ap}).

La resistividad aparente ρ_{ap} es el valor de la resistividad efectiva por el factor de retardo rb (PNE 83994-2, 2016):

$$\rho_{ap} = \rho_{ef} * rb, cl$$

Ecuación 16. Resistividad aparente

La ρ_{ap} es un parámetro teórico que se ha definido por analogía a la existencia de un coeficiente de difusión efectivo Def (equivalente a la pe) que no contempla que haya reacción entre el cloruro y las fases hidratadas del cemento y un coeficiente “aparente” Dap que si toma en cuenta esta reacción de los cloruros. La ρ_{ap} equivale



al D_{ap} que se deduce de un ensayo de difusión de cloruros. La ρ_{ap} no puede ser obtenida de una medida de resistividad que solo aporta la ρ_{ef} .

Por lo tanto (tomando como base la ecuación número catorce y la número dieciséis), la ecuación para el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación) que considera la reacción de los cloruros con las fases del cemento es:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ap}}{k_{cl}}$$

Ecuación 17. Periodo de iniciación (involucrando la reacción de cloruros con las fases del cemento)

Expresada de otra forma:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{k_{cl}} r_{b,cl}$$

Ecuación 18. Periodo de iniciación (involucrando la resistividad efectiva)

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

k_{cl} = Una constante que depende de la concentración exterior de cloruros.

ρ_{ef} = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$r_{b,l}$ = Factor de retardo.

t_i = Tiempo de iniciación.

La constante k_{cl} que depende de la concentración exterior de cloruros puede expresarse como un factor de exposición, tal y como se muestra a continuación.



2.2.3.3. Factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación (***F_{exp}***).

El factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación F_{exp} es el factor que relaciona la resistividad del concreto con la difusividad de los cloruros (PNE 83994-2, 2016). Es decir:

$$D_{ap,cl} = \frac{F_{exp,cl}}{\rho_{ap}}$$

Ecuación 19. Coeficiente de difusión

Si comparamos la ecuación número diecinueve y la ecuación número dos y además consideramos la influencia del factor de retardo, se infiere que:

$$F_{exp,cl} = k_{cl}$$

Ecuación 20. Factor de exposición ambiental

Sustituyendo la igualdad anterior en la ecuación número dieciocho:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{F_{exp,cl}} r_{b,cl}$$

Ecuación 21. Periodo de iniciación (involucrando el factor de exposición ambiental)

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

$F_{exp,l}$ = Factor de exposición ambiental.

ρ_{ef} = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$r_{b,l}$ = Factor de retardo.

t_i = Tiempo de iniciación.



El factor de exposición ambiental depende del clima y de la cantidad de cloruros. Este factor considera el grado de agresividad ambiental (contenido de cloruros).

Los valores de $F_{exp,l}$ que pueden ser utilizados en función de la agresividad ambiental y que a la vez son independientes de la resistencia mecánica del concreto son:

Tabla 2. Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (PNE 83994-2, 2016).

Clase de exposición	F exp, cl
	($\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$)
XS1 – III a-aéreo (> 500 m de la costa)	5,000
XS1 – III a-aéreo (< 500 m de la costa)	10,000
XS2 – III b	17,000
XS3 – III c	25,000

2.2.3.4. Resistividad efectiva (ρ_{ef}).

El valor de ρ_{ef} se mide utilizando el método de las cuatro puntas después de un curado normalizado en probetas curadas durante 28 días en condiciones de humedad relativa superior al 95% y $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura.

La ρ_{ef} representa el último valor de resistividad que se mide, no se tiene experiencia de cuánto dura la hidratación del concreto ni de la eficacia de la reacción con las fases del cemento. Por ello se sugieren edades tempranas como medida conservadora debido a la falta de experiencia. Las edades sugeridas son 60 y 90 días (PNE 83994-2, 2016).

El último valor de ρ_{ef} que se mide puede ser expresado de la siguiente forma (ver Anexo A):

$$\rho_{ef} = \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0} \right)^q$$

Ecuación 22. Último valor medido de resistividad efectiva



Donde:

ρ_{ef} = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$\rho_{ef,0}$ = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y 20 + 2°C de temperatura.

t_n = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

t_o = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad.

q = Es el factor edad.

Sustituyendo la ecuación número veintidós en la ecuación número veintiuno:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_o}\right)^q}{F_{exp,cl}} r_{b,cl}$$

Ecuación 23. Periodo de iniciación (involucrando el factor de exposición ambiental)

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros, en cm.

$F_{exp,l}$ = Factor de exposición ambiental, en $\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$.

ρ_{ef} = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado, en $\Omega\text{-cm}$.

$\rho_{ef,0}$ = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y 20 + 2°C de temperatura, en $\Omega\text{-cm}$.

t_n = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

t_o = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad.

Ambas edades t_n y t_o deben introducirse en las mismas unidades.

q = Es el factor edad (adimensional)

$r_{b,l}$ = Factor de retardo (adimensional)



t_i = Tiempo de iniciación, en años.

La ecuación número veintitrés representa el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación) del concreto en función de la resistividad eléctrica húmeda.

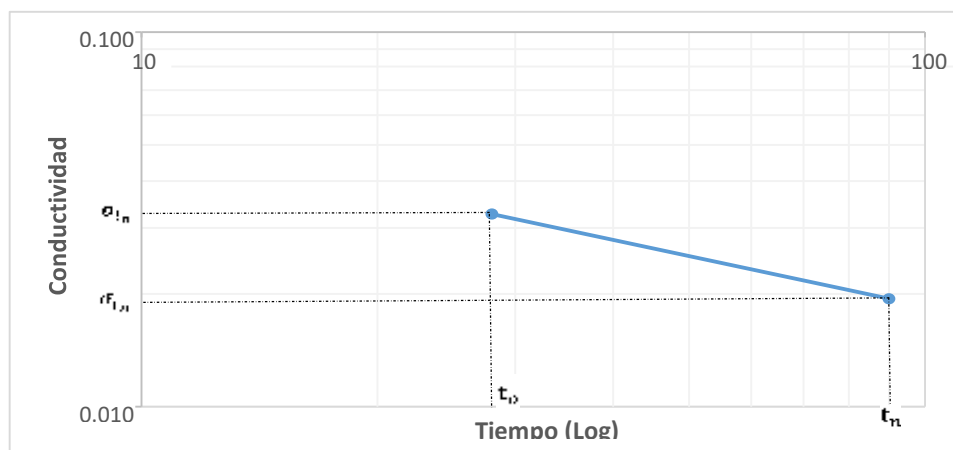
También se introdujo un nuevo parámetro denominado “Factor Edad” el cual está representado por la letra “q”.

2.2.3.5. Factor edad (q).

El factor edad “q” es el exponente al que se eleva una relación de edades entre las que se quiere calcular el aumento de resistividad con el tiempo. Habitualmente la edad inicial es la de 28 días desde la fabricación y la otra edad puede ser considerada a 60 o 90 días.

Para obtener el valor del factor edad “q” es necesario seguir una secuencia ordenada de pasos:

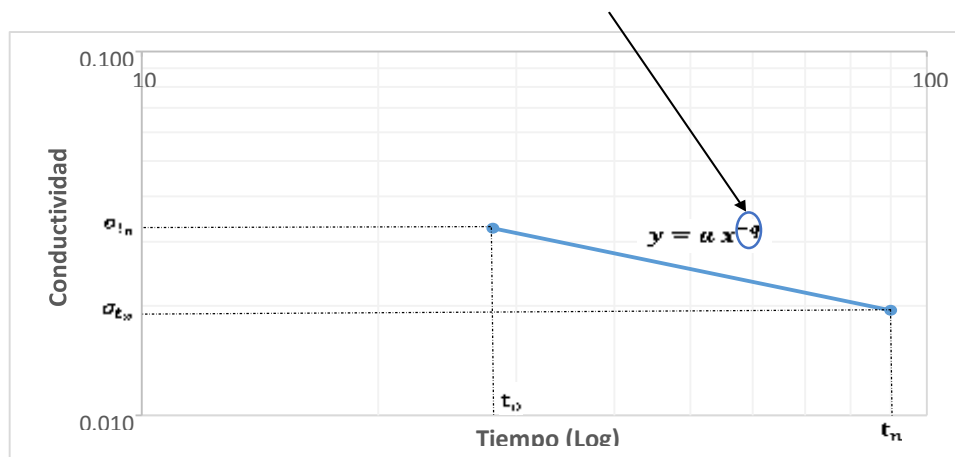
- Se obtienen los valores inversos de la resistividad efectiva (conductividad) a la edad de 28 días (t_0) y a la última edad que se midió la resistividad efectiva (t_n).
- Se grafican ambos valores en escala logarítmica, colocando en el eje de las ordenadas los valores de conductividad y en el eje de las abscisas el tiempo t_0 y t_n , obteniendo un gráfico como el que se muestra a continuación:



Gráfica 1. Valores de conductividad en los tiempos t_0 y t_n (escala logarítmica).



- c) Se obtiene una línea de tendencia potencial de la recta, generándose la ecuación del gráfico, el valor del exponente se tomará como el factor edad “q”. cómo se observa a continuación en la gráfica 2 :



Gráfica 2. Valores de conductividad en los tiempos t_o , t_n y factor edad “q” (escala logarítmica).

- d) Se toma el valor absoluto del factor edad “q”.

El valor del factor edad “q” representa la pendiente de la recta en escala logarítmica, físicamente representa el proceso de hidratación del concreto (conservado en estado húmedo). El aumento de resistividad (disminución de la conductividad) a lo largo del tiempo refleja la disminución de la porosidad.

El factor edad “q” representa la evolución de la resistividad con el tiempo. Este factor puede no utilizarse si se efectúa un curado acelerado (PNE 83994-2, 2016).

2.3. Cemento

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Portland, debido a que es el más común. El cemento Portland es la mezcla de



materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.(Instituto del Concreto, 1997).

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

2.3.1. Producción del cemento Portland

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

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

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



4. Se mezcla el clinker con el yeso para convertirlos en cemento Portland y se almacena para después envasarlo. (véase en la ilustración 1).



Ilustración 1. Esquema del proceso de producción del cemento (Fundación Laboral del Cemento y Medio ambiente, 2013).

2.3.2. Clasificación del cemento

Anteriormente los cementos estaban clasificados de acuerdo a las normas mexicanas NMX-C-001, NMX-C-002 y NMX-C-175, como se muestra en la Tabla 3, por diversas circunstancias de calidad la normativa cambio para una mejor resistencia en el concreto y es la que se indica en la Tabla 4. Esta nomenclatura solo se utiliza en México, la nomenclatura a nivel mundial sigue utilizando los números romanos.

Tabla 3. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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



Tabla 4 Clasificación de los cementos con la norma actual (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

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

2.3.3. Propiedades del cemento

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

2.3.3.1. Propiedades Físicas

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



- **Densidad:** Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Portland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 gr/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento, pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.
- **Finura:** El proceso de molienda de clínker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia(Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **Consistencia normal:** Se refiere a la movilidad relativa de la mezcla fresca de pasta o mortero de cemento. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33%(Instituto del Concreto, 1997).
- **Tiempos de fraguado:**
 - **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
 - **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve



rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya está dura.

➤ **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. Internamente ocurre que una gran cantidad de sulfatos se deshidrata y de esta manera se forma el yeso. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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

2.3.3.2. Propiedades Químicas

En el proceso de producción del cemento se produce una transformación de las materias primas a productos con mejores características, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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



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

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

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

2.3.3.3. Propiedades Mecánicas

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



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

2.3.4. Cemento usado en la Investigación

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

El Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C_3A) la norma inglesa para este cemento, (BS-4027:1980, 2000), estipula un contenido de C_3A , del 3.5%. La finura mínima es 250 m^2/kg .

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

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

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



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

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

2.4. Agregados

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

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

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



2.4.1. Origen de los agregados

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

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

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



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

Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena roca madre producen un concreto de calidad, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores, a las sugeridas en reglamentos, obtenidos a partir de rocas madre no tan buenas. Estos agregados, que no son tan buenos, pueden ser utilizados para elaborar concreto satisfactorio debido al hecho de que una capa de pasta de cemento en los agregados, logra mejoras respecto a las características de durabilidad y resistencia. La selección de los agregados debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico (Neville & Brooks, 2010).

2.4.2. Propiedades de los agregados

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

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

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

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



2.4.2.1. Propiedades físicas

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

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

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

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



influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.

2.4.2.2. Propiedades Químicas

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

- **Reacción álcali-agregado:** La sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes (Instituto del Concreto, 1997).

2.4.2.3. Propiedades Mecánicas

- **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 les han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración.



- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas.
- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales(Neville & Brooks, 2010).

2.4.3. Agregados utilizados en la investigación

El agregado fino utilizado en la investigación fue obtenido del banco de materiales “Joyitas” en el municipio de Morelia Michoacán, lugar que se encuentra salida a Quiroga, un lugar que por su ubicación geográfica presenta un clima extremo y en su topografía presenta desniveles mientras que el agregado grueso fue obtenido del banco de materiales “La roka” ubicado en el municipio de Cuto del Porvenir, Michoacán.

Dichos agregados son los que se utilizan para las construcciones que se realizan en el municipio.



2.5. Agua

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del concreto. Sin embargo, también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables. Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para la preparación del concreto con menos de 2000 partes por millón (ppm) (NMX-C-122-ONNCCE-, 2018), de sólidos disueltos. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para verificar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla.

2.5.1. Especificaciones del agua en la construcción

Las aguas a las que se refiere la norma (NMX-C-122-ONNCCE-, 2018) ,que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la Tabla 6. El agua de mar no es apropiada para la preparación de concreto reforzado con acero y no se debe usar en concreto pretensado, debido al riesgo de la corrosión de la armadura, principalmente en ambientes cálidos y húmedos.



Tabla 6 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-
ONNCCE, 2014)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulforesistentes 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 carbonato disuelto, como CO_2	5	3
Álcalis totales como Na^+	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5
(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites. (b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088. (c) Cuando se use cloruro de calcio $CaCl_2$ como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.		



2.5.2. El agua utilizada en la investigación

El agua utilizada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El agua se utilizó tal y como llega al laboratorio, esto con el fin de usarla lo más apegado a la realidad.

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

2.6. Concretos de alta resistencia

Es un tipo de concreto de alto desempeño, que comúnmente tiene una resistencia a la compresión especificada de 400 kg/cm^2 (40 MPa) o más. La resistencia a la compresión se mide en cilindros de prueba de 6” X 12” (15 X 30 cm) o de 4” X 8” (10 X 20 cm), a los 56 o 90 días por lo general, o alguna otra edad especificada dependiendo su aplicación. La producción de concreto de alta resistencia requiere un mayor estudio, así como un control de calidad más exigente en comparación con el concreto convencional.

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias de Concreto se entiende por concreto de alta resistencia aquel que tiene una resistencia a la compresión f'_c igual o mayor que 400 kg/cm^2 (40 MPa).

El ACI (Instituto Americano del Concreto) describe que el concreto de alta resistencia, es aquel que tiene una resistencia a la compresión, f'_c mayor o igual a 420 kg/cm^2 (42 MPa).

2.6.1. Antecedentes

El uso del Concreto de Alta Resistencia tiene poco más de 50 años, fue utilizado por primera vez en 1968 en las columnas inferiores del edificio Lake Point Tower en



Chicago, Illinois, teniendo una resistencia de 520 kg/cm². A partir de aquel momento se han ido empleando en forma considerable, y por ello los institutos que estudian el diseño y uso del concreto, han tenido que formular y estudiar en sus laboratorios cual es el comportamiento real de este concreto; teniendo relación directa con las proporciones y calidad de ingredientes, y como debe ser su colocación para proporcionar el mejor desempeño y seguridad de los elementos donde se ocupe.

2.6.2. Requisitos de los materiales para lograr una alta resistencia

Se requieren al menos las siguientes características en los materiales que componen el concreto con fines de que tenga una alta resistencia a la compresión:

- Cemento. Son recomendables los tipos I y II, con contenidos significativos de silicato tricálcico (mayores que los normales), módulo de finura alto y composición química uniforme.
- Grava. De alta resistencia mecánica, estructura geológica sana, bajo nivel de absorción, buena adherencia, de tamaño pequeño y densidad elevada.
- Arena. Bien graduada, con poco contenido de material fino plástico y módulo de finura controlado (cercano a 3.00).
- Agua. Requiere estar dentro de las normas establecidas.
- Mezcla. Relaciones agua/cemento bajas (de 0.25 a 0.35), mezclado previo del cemento y del agua con revolvedora de alta velocidad, empleo de agregados cementantes, período de curado más largo y controlado, compactación del concreto por presión y confinamiento de la mezcla en dos direcciones.
- Aditivos. Es recomendable emplear alguno o una combinación de los aditivos químicos: superfluidificantes y retardantes; y, de los aditivos minerales, ceniza volante, microsílica o escoria de alto horno.
- Cenizas Volantes. Son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía, deben tener conformidad con la norma (ASTM C618).



- Escorias Molidas de Alto Horno. Son productos no metálicos producidos en un alto horno, producto del hierro, se usa escoria bien molida de alto horno cumpliendo con la norma (ASTM C989).
- Humo de Sílice. Es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro-silíceo., deben cumplir con la norma (ASTM C1240).

2.6.3. Uso y aplicación de los Concretos de Alta Resistencia

Diversos estudios han demostrado que la economía que representa utilizar un concreto de alta resistencia, se puede ver representada directamente en el tamaño de los elementos estructurales, y en especial las columnas para los edificios de gran altura, de mediana altura y los de baja altura

Debido a que se reducen los tamaños de los elementos estructurales, produce un material más durable y resistente, y aparte, porque en el sometimiento a un análisis dinámico, se ha podido demostrar que produce menor desplazamiento lateral, y con ello le da más resistencia a la rigidez lateral y al acortamiento axial del edificio.

Otro aspecto importante del uso de Concretos de Alta Resistencia es que además pueden disminuir el uso de tamaños diversos de cimbras para la estructura de soporte, debido a que se puede iniciar usando un concreto de alta resistencia en los niveles inferiores y en los niveles posteriores, únicamente se disminuye la resistencia, esto conlleva a mantener iguales las dimensiones de los elementos en todo el edificio.

El uso cada vez mayor del concreto de alta resistencia ha tenido su contra, debido a que muchos de los reglamentos actuales no tienen cubierto todo este campo, y con ello se tiene el resultado de aclarar y reformular las teorías sobre el comportamiento detallado de los elementos estructurales empleando concreto de alta resistencia.



Hasta la fecha existen diversas investigaciones a escala nacional e internacional para la obtención de procedimientos de elaboración de concretos de alta resistencia; incluso, como se mencionó anteriormente, en algunas partes se han construido edificios usando concretos de este tipo. Y por ello, los institutos de concreto se han dado la tarea de investigar los siguientes puntos:

- Características necesarias en los materiales que componen el concreto para lograr alta resistencia a la compresión.
- Aditivos recomendables para lograr alto comportamiento en el concreto.
- Revisión de los procedimientos de mezclado y de dosificación propuestos en cada una de las referencias analizadas.

2.7. Materiales en estudio como adición al concreto

2.7.1. Fibra de polipropileno

Pueden usarse fibras plásticas de material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon o poliéster).

Las fibras plásticas deben cumplir con la norma ASTM D 7508/D 7508M. Su longitud debe estar comprendida entre 20 mm y 60 mm, y debe guardar una relación con el tamaño máximo del agregado (tma) de al menos 3:1 (fibra:tma).

Las fibras plásticas de longitud menor a 30 mm pueden usarse para reducir el agrietamiento por contracción plástica del concreto, especialmente en pavimentos y para mejorar el desempeño frente a fuego, pero no pueden tener ninguna función estructural.

2.7.2. Antecedentes

Las fibras son elementos de corta longitud y sección pequeña que se incorporan a la masa de concreto con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas. Se clasifican como fibras estructurales aquellas que proporcionan una tenacidad importante al concreto, en cuyo caso la contribución de las fibras se considera en el



cálculo de la respuesta de la sección de concreto; como fibras no estructurales aquellas que, sin considerarlas en el cálculo de la respuesta, la tenacidad que desarrollan permite tener una mejora en las propiedades del concreto como el control del agrietamiento por contracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otras. De acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas. La efectividad de las fibras se valora por medio de la energía de rotura (tenacidad) en Julios (J) en especímenes de concreto de conformidad con la norma (ASTM C 1018).

2.7.3. Tipos y usos

1. Las fibras de acero deben cumplir con los requisitos de la especificación (ASTM A-820). La forma de la fibra tiene un impacto importante en la adherencia de la fibra con el concreto, pueden ser rectas, onduladas, corrugadas, con extremos de distintas formas, etc. Su sección transversal puede ser circular, rectangular, semicircular, irregular o de sección transversal variable.

La longitud de la fibra, l_f , debe ser mayor o igual a 2 veces el tamaño máximo del agregado (t_{ma}); es usual el empleo de longitudes de 2.5 a 3 veces el t_{ma} . Además, el diámetro de la tubería para el bombeo del concreto exige que la longitud de la fibra sea inferior a $2/3$ del diámetro del tubo.

La longitud de la fibra debe ser suficiente para lograr la adherencia necesaria a la matriz y evitar que sea arrancada con facilidad. Un parámetro conveniente para describir la geometría de la fibra es el llamado relación de aspecto, que es la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra o diámetro equivalente, en caso de que la sección transversal no sea circular. A igualdad de longitud, fibras de diámetro pequeño aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente al permitir una mejor redistribución de esfuerzos.

2. Pueden usarse fibras plásticas de material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon o



poliéster). Las fibras plásticas deben cumplir con la norma (ASTM D 7508/D7508M). Su longitud debe estar comprendida entre 20 mm y 60 mm, y debe guardar una relación con el tamaño máximo del agregado (tma) de al menos 3:1 (fibra:tma).

Las fibras plásticas de longitud menor a 30 mm pueden usarse para reducir el agrietamiento por contracción plástica del concreto, especialmente en pavimentos y para mejorar el desempeño frente a fuego, pero no pueden tener ninguna función estructural.

3. Las fibras inorgánicas, entre las que se encuentran las de vidrio, pueden usarse para fines estructurales, para reducir el agrietamiento, la contracción por secado y el flujo plástico, así como para mejorar el desempeño del concreto ante fatiga e impacto, pero debe garantizarse que tengan un desempeño adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de su deterioro como consecuencia de la alcalinidad del medio. Cuando se usen en elementos estructurales donde se presenten cargas de flexión o tensión, como en vigas, columnas y losas, se debe considerar en su dimensionamiento que toda la fuerza de tensión debe ser resistida por barras de refuerzo.

2.7.4. Fibra de polipropileno utilizada en la investigación

E5 Fiber 600 fibra de polipropileno para concreto

e5 FIBER 600 es un producto diseñado específicamente para refuerzo secundario del concreto, reduce la formación superficial de fisuras por contracción plástica del concreto en estado fresco y por temperatura en estado endurecido. Elaborado con fibra de polipropileno 100% virgen, en forma de multifilamentos para un mejor desempeño en el concreto.

2.7.4.1. Beneficios y características

- Actúa como refuerzo secundario de manera tridimensional en el concreto.
- Reduce el sangrado.



- Reduce la segregación.

2.7.4.2. Usos

- Naves industriales.
- Pavimentos de concreto.
- Estacionamientos.
- Concreto no reforzado convencional.
- Cimentaciones.
- Losas, tuberías de concreto.

2.7.4.3. Dosificación

La dosificación es a razón de una bolsa de 600 gramos por metro cubico de concreto.

e5 FIBER 600 está lista para usarse en cualquier momento. En concreto premezclado se puede aplicar en planta u obra, con un mínimo de mezclado de 3 minutos en velocidad de agitación, para su buena dispersión en toda la masa de concreto. En mezclas secas se requiere mayor tiempo de mezclado para su buena dispersión y no generar aglutinamientos en el concreto.

Referencias

(ACI 302.1R-04): Guide for Concrete Floor and Slab Construction.

(ACI 308R-01): Guide to Curing Concrete (Reapproved 2008).

2.8. Aditivos

El uso de un aditivo superplastificante es requisito fundamental en el concreto autocompactante y, en ocasiones, puede ser conveniente el uso de un aditivo regulador de la viscosidad que minimice los efectos de la variación granulométrica, del contenido de humedad, del contenido de finos o de la distribución granulométrica, haciendo que el concreto autocompactante sea menos sensible, en



cuanto a la propiedad de autocompatibilidad, a pequeñas variaciones en la calidad de las materias primas y en sus proporciones.

Su empleo se realizará después de conocer su compatibilidad con el cemento y las adiciones, comprobando que exista una buena conservación de las propiedades reológicas durante el tiempo previsto para la puesta en obra del concreto autocompactante, así como las características mecánicas correspondientes mediante la realización de ensayos previos.

Los aditivos superplastificantes cumplirán con la norma (NMX-C-255-ONNCCE-2013).

Los aditivos reguladores de la viscosidad cumplirán con la norma (ASTM C494/C494M).

2.8.1. Tipos y usos

Usos de los aditivos

Las razones más comunes para usar aditivos en el concreto son:

- Incrementar la trabajabilidad, sin cambiar el contenido de agua.
- Reducir el contenido de agua, sin cambiar la trabajabilidad.
- Así mismo, efectuar una combinación de lo anterior.
- Ajustar el tiempo de fraguado.
- Reducir la segregación y/o el sangrado.
- Mejorar la bombeabilidad.
- Acelerar la tasa de desarrollo de resistencia a edades tempranas.
- Incrementar la resistencia.
- Mejorar la durabilidad potencial y reducir la permeabilidad.
- Disminuir el costo total de los materiales usados en el concreto.
- Compensar las pobres propiedades del agregado.



Tipos de aditivos

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

- **Plastificadores** (agentes reductores de agua).

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

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

- **Superplastificadores.**

Estos aditivos son químicamente distintos de los plastificantes normales y aunque su acción es casi la misma, es más marcada. Cuando se usan para producir concreto fluido puede esperarse una pérdida rápida de trabajabilidad y, por tanto, éstos deben ser agregados justo antes de la colocación. De modo usual, los superplastificantes son compuestos químicos como formaldehído de melamina sulfonatada, formaldehído naftaleno sulfonatado y lignosulfonatos modificados.

- **Inclusores de aire.**

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

- **Aceleradores.**

Estos aditivos aceleran la reacción química del cemento y el agua, y de este modo aceleran la tasa de fraguado y/o la ganancia temprana en la resistencia del concreto. Entre los tipos principales de aceleradores están el cloruro de calcio, el formiato de



calcio, ceniza de sosa, cloruro de potasio y varios materiales orgánicos. El cloruro de calcio parece ser el único predecible, de modo razonable, en su desempeño, pero tiende a promover la corrosión del acero en el concreto.

- **Retardadores.**

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

Muchos aditivos proporcionan combinaciones de las propiedades tales como plastificadores/retardadores o plastificadores/inclusores de aire.

2.8.2. Aditivo utilizado en la investigación

Aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante PCE 2000 (Element5 Química Aplicada)

Es un reductor de agua de alto rango y superplastificante, elaborado a partir de polímeros de alta tecnología diseñada especialmente para interactuar con las partículas de cemento y romper así el efecto de floculación de las mismas. Formulado especialmente para elementos prefabricados, permite alcanzar el desarrollo de resistencias altas a la compresión a edades tempranas, a través de una disminución importante en la relación agua/material ligante. Permite reducciones de agua hasta del 40%. Cumple ampliamente como aditivo tipo F ASTM C-494 y tipo I ASTM C 1017.

2.8.2.1. Beneficios

- Incrementa la resistencia a la tensión, compresión y módulo de elasticidad del concreto.
- Mejora las propiedades reológicas del concreto.
- Especialmente diseñado para concretos para elementos prefabricados.



- Reduce la permeabilidad del concreto.
- Reduce la relación agua/material ligante.

2.8.2.2. Aplicaciones principales

- Concretos para elementos prefabricados que requieren el desarrollo de resistencias a edades tempranas.
- Concretos de alto desempeño.
- Concretos auto-consolidables.
- Concreto bombeado.
- Concreto permeable.
- Concretos de alta resistencia mecánica.
- Concretos elaborados con humo de sílice.
- En combinación con sistemas de acelerantes, se pueden lograr concretos con desarrollo rápido del módulo de ruptura a edades tempranas para reparación de losas de pavimentos.

2.8.2.3. Dosificación

Las dosificaciones pueden variar desde 4 hasta 20 cc/kg de cemento, y dependerán del diseño del concreto a emplear. Una sobredosificación a las establecidas puede provocar segregación en la mezcla de concreto.

Es importante ingresar todos los materiales: agregados, cemento y el 80 % del agua de mezclado. Deje mezclar estos componentes por un tiempo de 2 minutos, después adicionar la cantidad de aditivo establecida con el último 20% del agua de mezcla. Con lo anterior se logrará que el sulfato de calcio forme etringita con el aluminato tricálcico del cemento mejorando el desempeño del aditivo.

Para concretos con muy baja relación agua/ligante menor a 0.32 es necesario después de colocar todos los materiales para elaborar el concreto permitir un tiempo de mezcla mínimo de 5 minutos.



3. METODOLOGÍA

3.1. Características y propiedades de los materiales

3.1.1. Cemento

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

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

Ventajas:

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

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

Es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato de Vicat, penetre dentro de la pasta de cemento elaborada con dicha agua, 10 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 una determinada masa de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado.

Procedimiento.

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

- a) Obtención de la muestra representativa de cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.
 1. Se pesan 650 gr. 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 porciento. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento), (Ilustración 2).



Ilustración 2. Vertido de agua en el centro del cráter (Fotografía Joana Enríquez).



3. Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
 - a. En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea (Ilustración 3).



Ilustración 3. Mezclado de la pasta con las manos (Fotografía Joana Enríquez).

- b. En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 centímetros,



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

- c. En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansamos la bola en la palma de la mano, se introduce a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se sostiene con la otra mano llenado completamente el anillo con pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).
 - d. El exceso de esta que permanezca en la boca grande se remueve con un movimiento simple de la palma de la mano. A continuación, se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa la boca superior con una pasa de boca de albañil o una espátula que se mantendrá formando un pequeño ángulo en el borde de la cuchara durante las operaciones de enrasado y enlisado, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.
6. Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un embolo se pone en contacto con la superficie de la pasta y se aprieta el tornillo sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial (todo lo anterior se puede hacer previo al realizado de la mezcla para ya no entretenerse ya que esto se debe hacer dentro de los 30 segundos).
7. Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30s y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (Ilustración 4), se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento (si la lectura no es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, se repite el procedimiento antes visto hasta conseguir



la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento).



Ilustración 4. Penetración de la aguja (Fotografía Joana Enríquez).

Referencias

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

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

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

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



Definiciones:

Tiempo de fraguado inicial: Es el tiempo que transcurre, a partir del momento de contacto inicial del cemento con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 3.4 MPa (35 kg/cm²).

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

Temperatura y humedad

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

Preparación de la pasta de cemento

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

Moldeado del espécimen

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



Determinación de los tiempos de fraguado

3. Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la menos pesada), sin que marque huellas apreciables. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin que marque huella apreciable (ilustración 5). (ASTM-C-266, 2015).

Recomendaciones

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



Ilustración 5. Aparato de Gillmore (Fotografía Joana Enríquez).

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

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



Procedimiento:

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



Cálculo:

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

$$D = \frac{M}{V} = \frac{60 \text{ g}}{L_f - L_i}$$

Ecuación 24. Densidad del cementante hidráulico

Donde:

D = densidad del cementante hidráulico (gr./cm³).

M = masa del cementante hidráulico (gr).

V = volumen del líquido desalojado (cm³).

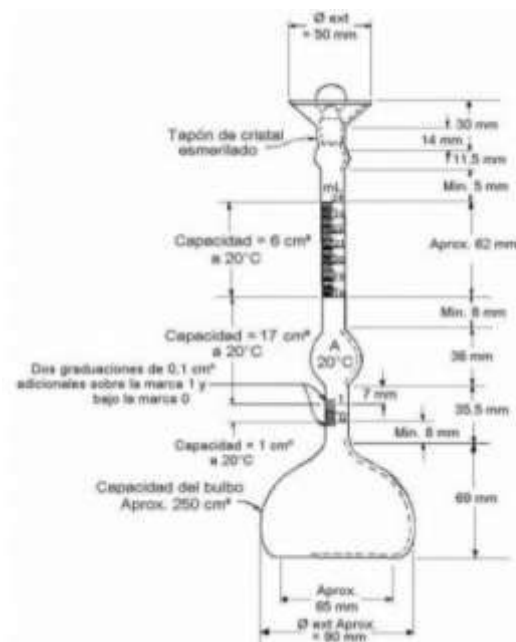


Ilustración 6. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento (Norma I.N.V. E-307-07).

Precisión:

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



3.1.2. Arena

En la Tabla 7 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 7 Normas nacionales e internacionales que rigen las prácticas de caracterización del agregado.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02



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

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

Procedimiento

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

Método “A”. Cuarteo Mecánico

- Procedimiento para divisor de muestras.
1. Se tomó la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vació sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor (ilustración 7).
 2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.



Ilustración 7. Agregando el material al divisor de muestras mecánico (Fotografía Joana Enríquez).



Método “B”. Cuarteo Manual

- Procedimiento por cuarteo con palas.
1. Se coloca la muestra original sobre un nivel de superficie limpio y duro, donde no pueda existir ninguna pérdida de material o adición accidental de material foráneo (Ilustración 8).
 2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto (Ilustración 9).
 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 aplana la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala (Ilustración 10).



Ilustración 8. Colocación del agregado en una superficie limpia (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 9. Homogenización del material (Joana Enríquez).



Ilustración 10. Aplanado de la parte superior del material (Fotografía Joana Enríquez).

5. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con la pala, trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie del material, removiendo y eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona (Ilustración 11).
6. Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.
7. Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.



Ilustración 11. División de la muestra en 4 partes iguales (Fotografía Joana Enríquez).



Procedimiento con el trozo de plástico

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

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

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

Especificaciones

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

Referencia

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



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

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

Procedimiento de la prueba

1. La muestra de 2 kilogramos se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras.
2. Al término de este tiempo, se seca superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico como se describe a continuación.
 - Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.
 - Para saber cuándo la arena está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en cuatro capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 10 a la primera, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta (Ilustración 12). Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse, quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que



la arena todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Ilustración 12. Secado superficial del agregado con ayuda del cono troncocónico (Fotografía Joana Enríquez).

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

Cálculos

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

Ecuación 25. Porcentaje de humedad de absorción



Donde:

Mh = Masa saturada y superficialmente seca (gr).

Ms = Masa seca del material (gr).

Referencia

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

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

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

Procedimiento de la prueba

1. Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono (Ilustración 13).
2. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo.
3. La masa obtenida anteriormente se le resta la masa del recipiente para obtener la masa de la arena.



Ilustración 13. Llenado de la muestra en M.V.S.S (Fotografía Joana Enríquez).



Cálculos

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

Ecuación 26. Masa volumétrica seca y suelta

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gr).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Referencia

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

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

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

Procedimiento de la prueba

1. Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material (Ilustración 14).
2. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.



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



Ilustración 14. Llenado y varillado de MVSV (Fotografía Joana Enríquez).

Cálculos a realizar

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

Ecuación 27. Masa volumétrica seca y varillada

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gr).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Referencia

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



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

La granulometría afecta las porciones relativas del agregado, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del mortero. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del mortero fresco (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

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

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

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

Procedimiento de la prueba

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



2. Se seca la muestra hasta masa constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.
3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gr, 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 gr y se tapa (Ilustración 15).

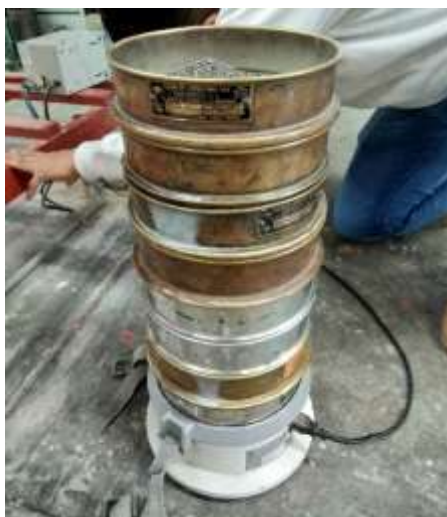


Ilustración 15. Mallas ordenadas en orden decreciente (Fotografía Joana Enríquez).

5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap) (Ilustración 16).



Ilustración 16. Agitado mecánico (Raf-tap) (Fotografía Joana Enríquez).



6. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando las masas en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado 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.
7. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error (Ilustración 17).



Ilustración 17. Separación de los retenidos en cada malla (Fotografía Joana Enríquez).

El registro debe hacerse de la siguiente manera.

Tabla 8. 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:

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

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

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

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

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

5. Módulo de finura:

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

Ecuación 28. Determinación del módulo de finura

Recomendaciones y especificaciones

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

Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation A.S.T.M.
(tabla 9).

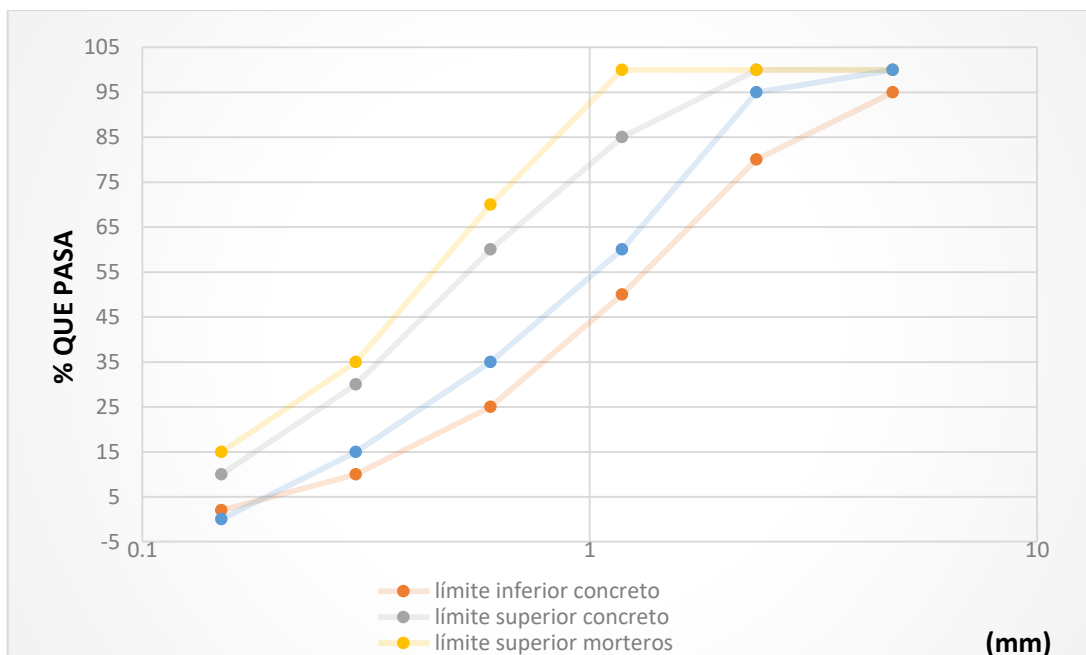


Tabla 9. Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation ASTM

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

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

Gráficas de los límites para concreto y morteros. (gráfica 3).



Gráfica 3. Límites de granulometría para morteros y concreto (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

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

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

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

Procedimiento de la prueba

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



- Solución de ácido tánico 2 gramos en 10 cm³ de alcohol, posteriormente se añaden 90 cm³ de agua destilada, se hace en un vaso de precipitado.
 - Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de agua destilada.
 - Se toman 2.5 cm³ de la primera solución (ácido tánico) y se reúnen con 97.5 cm³ de solución de sosa cáustica.
2. Esta solución es de color normal se hará simultáneamente con la prueba que se hace con la arena y se coloca en una botella de las indicadas anteriormente (frasco de biberón).
3. Después de 24 horas se comparan los colores.
- Se toma una muestra representativa de arena de 500 gr. aproximadamente.
 - Se seca hasta masa constante a una temperatura no mayor a 110 ° C.
4. Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 133 cm³ adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 206 cm³ (ilustración 18).



Ilustración 18. Colorimetría en arenas (Fotografía Joana Enríquez).

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



6. Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica (ilustración 19). Si no se tiene esta, se compara con el color de la solución normal que se haya hecho en la otra botella idéntica.



Ilustración 19. Tabla de colorimetría (Fotografía J. M.).

Tabla 10. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas (ASTM-C-40, 2004)

Carta Colorimétrica				
1	2	3 (Color Límite)	4	5

Recomendaciones a seguir

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

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



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

3.1.2.7. Sedimentación en arenas

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

Procedimiento de la prueba

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca agua hasta la marca de 828 ml. (Ilustración 20).
2. Se tapa el frasco y se procede a agitarlo hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos (Ilustración 21).



Ilustración 20. Llenado del recipiente con material y agua hasta las marcas establecidas (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 21. Se agita el frasco durante dos minutos (Fotografía Joana Enríquez).



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.

Reporte

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

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

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

Procedimiento de la prueba

1. Se toma una muestra representativa de 600 gr. de arena, se seca a una temperatura no mayor de 110°C.
2. La muestra seca y fría se coloca en la balanza y se pesa al décimo de gramo (Mi).
3. Se coloca el material en un recipiente y se le agrega agua hasta saturar.
4. Se agita enérgicamente la muestra con agua y se vierte inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).
5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua quede completamente clara.
6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado (ilustración 22).



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



Ilustración 22. Lavado del material (Fotografía J.M.).

Cálculo

$$\%A = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100$$

Ecuación 29. Porcentaje de material que pasa la malla N° 200 en %

Dónde:

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

Mi = masa seca inicial (gr).

Mf = masa seca después de lavar (final) (gr).

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 11).



Tabla 11. Materiales finos que pasa por la criba 0.0075 mm (No 200).

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

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

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

Procedimiento de la prueba

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente un kilogramo, se seca una temperatura no mayor de 110° C teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla.



2. Se deja enfriar la muestra y se pasa por la malla N° 16, del retenido se toma una muestra de 100 gramos y se anota como M_i pesados al décimo de gramo. En este caso, se utilizaron tres muestras a las cuales se les hizo la prueba y se tomó un promedio.
3. Se colocan los 100 gramos de arena en una charola y se le adiciona agua hasta cubrir la muestra, se deja durante 24 horas.
4. Posteriormente se escurre el agua libre y se extiende la arena en el fondo de una charola para romper, con los dedos, los terrones de arcilla que aún existan.
5. A continuación, se hace pasar el material por la malla N° 30, lavándola con mucha agua, el retenido en esta malla se recoge en una charola y se seca totalmente, se deja enfriar y se pesa nuevamente al décimo de gramo anotándose como M_f .
6. Cálculo del porcentaje de terrones de arcilla:

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

Ecuación 30. Porcentaje de terrones de arcilla

Dónde:

% Terrones = porcentaje de terrones de arcilla, en %

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

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

Especificaciones y recomendaciones a seguir

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



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

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

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

Procedimiento de la prueba

➤ Utilizando la probeta.

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

Cálculos a realizar

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



$$DA = \frac{Ma}{Vf - Vi}$$

Ecuación 31. Densidad de la arena en gr/cm³

Dónde:

DA = densidad de la arena en gr/cm³.

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

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

➤ Utilizando un frasco.

1. Una vez que la muestra del agregado este seco mediante el método descrito en la prueba de absorción.
2. Se introduce agua en el frasco hasta su máxima capacidad y se determina su masa, se registra su valor como B (ilustración 23).
3. Se introduce agua al frasco hasta la primera marca.
4. Se pesan 500±10 gr. de la muestra superficialmente seca, registrando este valor como S.
5. Con ayuda de un embudo, se introduce la muestra en el frasco y se le adiciona agua hasta la segunda marca.
6. Se agita el frasco con el fin de expulsar el aire atrapado en la muestra.
7. Se determina la masa del frasco con agua y material y se registra como C.



Ilustración 23. Frascos y vidrios utilizados (Fotografía Joana Enríquez).

Cálculos a realizar

$$Dr = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 32. Densidad relativa

Donde:

Dr = densidad relativa o gravedad específica, adimensional.

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

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

S = masa del material superficialmente seco, en gr.

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

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

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



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

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

Preparación de la solución de reserva

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

Preparación de la solución de trabajo

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

Procedimiento de la prueba

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

1. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa (ilustración 24).



Ilustración 24. Llenado de capsula (Fotografía L. C.).

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 agítese 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 (Ilustración 25).
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:

$$Eq. de arena = \frac{Lectura\ de\ arena}{Lectura\ de\ arcilla} * 100$$

Ecuación 33. Equivalente de arena



Ilustración 25. Se deja reposar el material en la probeta durante 20 minutos (Fotografía L. C.).

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. Gravas

3.1.3.1. Muestreo en gravas

El objetivo tiene la finalidad de obtener una muestra representativa de este material para llevarla al laboratorio y realizarle las pruebas correspondientes para su estudio respectivo.



Procedimiento:

1. Dependiendo del estudio que se va a realizar se debe elegir el tamaño de la muestra, por ejemplo, para realizar estudios para un proporcionamiento se debe obtener una muestra de 50 kilogramos aproximadamente.
2. Si el muestreo se realiza en los bancos de material se debe de tomar éste del frente que se vaya a utilizar en la obra respectiva, por lo que de nada nos servirá hacer un estudio de un material equivocado o del que no se vaya utilizar.
3. La muestra debe de reunir las características de todo el material en general, para que esta sea realmente representativa, (tamaño, colores, formas, Etc.).
4. También el muestreo se puede realizar en los camiones que suministran a las obras, así mismo del que se encuentra en las obras, esto nos sirve para verificar la calidad de los materiales.

Referencia

La presente prueba está referida a la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004.

3.1.3.2.Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas “Cuarteo en gravas”.

Obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado para realizar la prueba correspondiente al material de estudio. Para realizar el cuarteo de gravas (ilustración 26) existen dos métodos:

1. Cuarteo por paleado.
2. Cuarteo con el divisor de muestras.



Ilustración 26 Cuarteo del material para obtener una muestra lo más homogénea posible (Fotografía Joana Enríquez).

Referencia.

La presente prueba está referida a la norma NMX-C-170-1997-ONNCCE.

3.1.3.3. Contenido de agua por secado “Humedad actual en gravas”.

Determinar la cantidad de agua que contiene una grava, en estado natural, es decir, en el momento que va a ser utilizada; parámetro a tomar en cuenta en el diseño de la mezcla de concreto.

Procedimiento

1. Se toma una muestra representativa de 300 a 500 gr. y se determina su masa, registrándola como masa húmeda (Mh). (ilustración 27).
2. Enseguida se coloca en la charola para exponerlo en la fuente de calor para eliminar el agua que contiene la grava moviéndola constantemente con la espátula para que el secado sea uniforme. Cuando aparentemente esta seca colocamos el cristal sobre ella para hacer la verificación del secado, si se empaña el cristal o se le forman gotas de agua quiere decir que el material todavía está húmedo y por lo tanto debemos seguir moviéndolo hasta que se seque completamente, para darnos cuenta de esto repetimos la operación con el vidrio.



3. Cuando esta seca la grava la retiramos de la fuente de calor y la dejamos enfriar un poco (ilustración 28), posteriormente la pesamos para determinar la masa seca (Ms) en gramos.

$$\%H. Actual = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Ecuación 34. Porcentaje de humedad actual

Dónde:

% H. Actual = Porcentaje de humedad

Mh =Masa húmeda de la grava en gr.

Ms = Masa seca en gr.



Ilustración 27 Pesado de la muestra representativa de grava (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 28 Secado de la muestra representativa de grava (Fotografía Joana Enríquez).

Referencia

La presente prueba está referida a la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006, o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C127-04.



3.1.3.4. Densidad en gravas.

Determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen.

Procedimiento

1. Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerlo se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8 y que pasa la 3/4 durante 24 horas, secándola superficialmente con una franela, esta masa se registra como la masa de la muestra (M).
2. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro esperamos a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de las partículas de grava. (ilustración 29).

Cálculos:

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

Ecuación 35. Densidad en gravas

Dónde:

D=densidad (gr/cm³)

M= masa de la grava (gr).

V= volumen de la grava (cm³).



*Ilustración 29. Utilización del picnómetro para la determinación de la densidad en gravas
(Fotografía Joana Enríquez).*



Referencia

La presente prueba está referida a la norma ASTM C127-04.

3.1.3.5. Determinación de la masa volumétrica seca y suelta en gravas (M.V.S.S.)

Determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Procedimiento

1. Se seca la muestra hasta masa constante, esto se puede realizar extendiendo el material con el rastrillo al sol para lograr el secado. (ilustración 30).
2. Cuando el material este completamente seco, se continúa con el siguiente procedimiento.
3. Primeramente se determina la masa y el volumen del recipiente que vamos a utilizar. Enseguida con el cucharón se va llenado el recipiente, dejando caer la grava, a la altura de 5 cm del borde superior del molde, cuidando el acomodo de las partículas sea por caída libre, esto es sin que el recipiente se someta a vibraciones hasta que quede completamente lleno y forme un cono el material.
4. Enseguida se procede a enrasarlo con la varilla punta de bala o con la mano que es más práctico ya que este enrasado se pesa obteniendo así la masa del recipiente más la masa del material. (ilustración 31).



Ilustración 30. Material cuarteado para la determinación de masas volumétricas (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 31. Determinación del peso total de la muestra (Fotografía Joana Enríquez).

Cálculos:

$$MVSS = \frac{\text{Masa de grava}}{\text{Volumen grava}}$$

Ecuación 36. Masa volumétrica seca suelta en gravas

Referencia

La presente prueba está referida a la norma NMX–C–073–ONNCCE–2004, o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C29-97.

3.1.3.6. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada en gravas (M.V.S.V.)

Obtener la masa de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación.

Procedimiento.

1. Se seca la grava donde quede expuesta a los rayos del sol, se obtiene la masa y el volumen exacto del recipiente que se va a utilizar.
2. Enseguida con el cucharón se llena el recipiente en tres capas, cada capa deberá ser aproximadamente una tercera parte del volumen del recipiente.



3. Con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes distribuyéndolo en toda la superficie, al término se enrasa el recipiente y determina su masa. (ilustración 32).



Ilustración 32. Proceso de varillado del material (Fotografía Joana Enríquez).

Cálculos:

$$MVSV = \frac{\text{Masa de grava compactada}}{\text{Volumen de grava}}$$

Ecuación 37. Masa volumétrica seca varillada en gravas

Referencia

La presente prueba está referida a la norma NMX–C–073–ONNCCE–2004, o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C29-97.

3.1.3.7. Análisis granulométrico o Granulometría

Obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava así, como el tamaño máximo (T.M.) de la grava, valor que se utiliza para el cálculo del diseño de mezclas.

Procedimiento

1. Se seca previamente la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, la grava que se utilizó para llenar el recipiente se pesa y se obtiene la masa de la muestra registrándose como masa de la muestra (Mm).



2. Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, agitándolas con la mano para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla como a continuación se indica, registrando las masas retenidas en cada una de las mallas correspondientes como lo indica la tabla 12.

Registro

Tabla 12. Formato de registro y cálculo para análisis granulométrico.

1 Malla	2 Masa retenida	3 % Retenido	4 % Acumulativo	5 % Que pasa
2"	A2	$A3 = (A2/MM) * 100$	$A4 = A3$	$A5 = 100 - A4$
1 1/2"	B2	$B3 = (B2/MM) * 100$	$B4 = A4 + B3$	$B5 = 100 - B4$
1"	C2	$C3 = (C2/MM) * 100$	$C4 = B4 + C3$	$C5 = 100 - C4$
3/4"	D2	$D3 = (D2/MM) * 100$	$D4 = C4 + D3$	$D5 = 100 - D4$
1/2"	E2	$E3 = (E2/MM) * 100$	$E4 = D4 + E3$	$E5 = 100 - E4$
3/8"	F2	$F3 = (F2/MM) * 100$	$F4 = E4 + F3$	$F5 = 100 - F4$
1/4"	G2	$G3 = (G2/MM) * 100$	$G4 = F4 + G3$	$G5 = 100 - G4$
Nº4	H2	$H3 = (H2/MM) * 100$	$H4 = G4 + H3$	$H5 = 100 - H4$
Pasa la Nº4	I2	$I3 = (I2/MM) * 100$	$I4 = H4 + I3$	$I5 = 100 - I4$
Total	Masa muestra (MM)	$\sum (A3 + B3 + C3 + \dots + I3 = 100\%)$	$\sum (A4 + B4 + C4 + \dots + I4 = 100\%)$	$\sum (A5 + B5 + C5 + \dots + I5 = 100\%)$

Cálculo:

Al realizar la suma de las masas parciales retenidas debe ser igual al peso de la muestra inicial, teniendo una tolerancia de ± 1 % del peso de la muestra.

El porcentaje retenido se calcula con:

$$\%RETENIDO = \frac{\text{Masa retenida en la malla}}{\text{Masa de la muestra}} * 100$$

El porcentaje acumulativo se calcula de la siguiente manera:

$$\%ACUMULATIVO \text{ MALLA} = \%ACUMULADO + \%RETENIDO \text{ DE MALLA}$$

El porcentaje de la malla que pasa:

$$\%QUE \text{ PASA} = 100 - \%ACUMULATIVO \text{ DE MALLA}$$



El tamaño máximo de la grava se obtiene observando la columna de los % retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retenga el 5% o más de la masa de la muestra. (ilustración 33).



Ilustración 33. Cribado del material para la determinación de la granulometría (Fotografía Joana Enríquez).

Referencia

La presente prueba está referida a la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997, o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C136-01.

3.1.4. 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.

3.1.5. Aditivo

Gravedad específica 1.05.

Apariencia física Líquido turbio color ámbar. (ilustración 34).



Ilustración 34. Aditivo utilizado (Fotografía Joana Enríquez).

3.2 Pruebas realizadas al concreto en estado fresco

3.2.1. 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 deben 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.

Vaciado del concreto

Debe vaciarse con un cucharón en los moldes, cada porción de concreto contenido en la charola de mezclado debe ser representativa de la revoltura, es necesario remezclar el concreto en la charola con una pala o una cuchara para prevenir la segregación durante el moldeo de los especímenes; debe moverse el cucharón alrededor del borde superior del molde a medida que el concreto vaya descargándose con el fin de asegurar una distribución uniforme del mismo y



minimizar la segregación del agregado grueso dentro del molde. Posteriormente debe distribuirse el concreto usando una varilla de compactación antes de iniciar la misma. Durante el colado de la capa final el operario debe añadir una cantidad de concreto tal que sobrepase el cupo del molde y lo llene totalmente después de la compactación. El número de capas para llenar el molde y compactarlas debe efectuarse según lo indicado en la tabla 13.

Compactación

La elaboración de especímenes adecuados, requiere de métodos de compactación apropiados. Los métodos de compactación son varillado y vibrado interno o externo. La selección del método de compactación debe basarse en el revenimiento, a menos que el método se establezca en las especificaciones bajo las cuales se cumple el contrato. Debe varillarse el concreto que tenga revenimiento mayor de 80mm. Los revenimientos de 30 mm a 80 mm pueden varillarse o vibrar. Deben vibrarse los concretos con revenimientos menores de 30 mm.

Tabla 13. Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleados para moldear especímenes de prueba

Diámetro del cilindro cm	Diámetro de la varilla Mm	Número de penetraciones por capa
Cilindros verticales		
Entre 5 y menos de 15	10	25
15	16	25
20	16	50
25	16	75
Cilindros horizontales		
(Para flujo plástico)		50 en total de cada
15	16	lado del eje
Vigas y prismas		
Área superficial superior del espécimen en cm ²		
1600 menos	10	25
Entre 165 y 310	10	Uno por cada 7 cm ² de superficie
320 o mas	16	Uno por casa 10 cm ² de superficie



Varillado

Se coloca el concreto dentro del molde en el número de capas que se especifique, de aproximadamente igual volumen cada una. Se varilla cada capa con el extremo redondeado, efectuando el número de penetraciones especificado en la tabla 14. En el caso de vigas, el número de compactaciones con la varilla por capa requerida es uno por cada 1000 mm² de superficie de espécimen. Se varilla la capa inferior en todo su espesor, se distribuyen las penetraciones uniformemente en toda la sección transversal del molde, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 10 mm dentro de la capa inmediata inferior, cuando el espesor de esa capa sea menor de 100 mm, y aproximadamente de 20 mm, cuando el espesor de la capa sea de 100 mm o más. Si la varilla produce oquedades se golpean ligeramente las paredes del molde para eliminarlas. En el caso de las vigas, después de que cada capa se ha varillado, debe introducirse y sacarse repetidamente una cuchara de albañil u otra herramienta adecuada en la zona de contacto del concreto y el molde en su perímetro.

Tabla 14. Número de penetraciones de la varilla para el moldeado de especímenes cilíndricos.

Diámetro del cilindro mm	Número de penetraciones por capa
150	25
200	50
250	75

3.2.1.1. Elaboración de cubos

Procedimiento

1.- Se preparan los moldes y previamente se les aplica desmoldante para su mejor desmoldado y para que el concreto no se adhiera a los moldes. Al mismo tiempo se prepara el material que será utilizado para elaborar los especímenes: varilla punta de bala de 3/8", cono de Abrams, cucharón, palas, mazo, termómetro, placa de acero, tiras medidoras de pH, etc.



2.- Se realiza el llenado de los moldes en donde cada molde es llenado en 2 capas, varillando una vez por cada 7 cm² de superficie, es decir, en cada capa se penetra 32 veces con la varilla punta de bala de 3/8", distribuyendo de una manera uniforme las penetraciones hasta llenar el molde y enrasar.

3.- Una vez realizados los especímenes después de 24 horas se procede a descimbrar los moldes para ponerlos en el cuarto de curado hasta la fecha de la realización de las pruebas.

El método utilizado para el curado fue por inmersión.

Referencia

Los especímenes fueron realizados según la norma (NMX-C-159-ONNCCE-2004)

3.2.1.2. Elaboración de cilindros

Procedimiento

1.- Se preparan los moldes y previamente se les aplica desmoldante para su mejor descimbrado y para que el concreto no se adhiera a los moldes. Al mismo tiempo se prepara el material que será utilizado para elaborar los especímenes: varilla punta de bala de 3/8", cono de Abrams, cucharón, palas, mazo, termómetro, placa de acero, tiras medidoras de pH, etc.

2.- Se elabora la revoltura, empezando por los agregados pétreos, seguidos del cementante y en los casos particulares ya mencionados se agregan el aditivo, y las fibras realizando una revoltura abundante para lograr la homogeneización de la mezcla.

3.- Se adiciona el agua a la mezcla y se revuelve generosamente hasta obtener una pasta de condiciones aceptables de trabajabilidad y homogenización.

4.- Después de haberse obtenido la muestra, se remezcla el concreto para garantizar uniformidad en la mezcla y se procede a hacer la prueba de revenimiento inmediatamente. Se humedece el molde; se coloca sobre una superficie horizontal, plana rígida, húmeda y no absorbente. Se debe mantener firme en su lugar durante



la operación de llenado, apoyando los pies en los estribos que tiene para ello el molde. A continuación, se llena el molde con tres capas aproximadamente de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura de aproximadamente 7 cm, la segunda capa debe llegar a una altura de aproximadamente 15 cm y la tercera, al extremo del molde. Se compacta cada capa con 25 penetraciones de la varilla introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente sobre la sección de cada capa, por lo que es necesario inclinar la varilla ligeramente en la zona perimetral; aproximadamente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después, con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro.

Se compacta la segunda capa y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 1", para el llenado de la última capa se coloca un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde, antes de empezar la compactación. Si a consecuencia de la compactación, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde a la décima y/o vigésima penetración, se agrega concreto en exceso para mantener su nivel por encima del borde del molde, todo el tiempo. Después de terminar la compactación de la última capa, se enrasa el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Se limpia la superficie exterior de la base de asiento, e inmediatamente se levanta el molde con cuidado en dirección vertical. La prueba de revenimiento es una medida de la consistencia del concreto fresco en término de la disminución de altura, según la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010. Este proceso de elaboración de mezcla y prueba de revenimiento se realizó una sola vez para cada mezcla colada, por ello se omite este en los procesos de elaboración de vigas y cubos.

5.- Se procede a realizar el llenado de los moldes en donde cada molde es llenado en 2 capas, cada capa se penetra 25 veces con la varilla punta de bala de 5/8", hasta llenar el molde y enrasar.

6.- Una vez realizados los especímenes después de 24 horas se procede a descimbrar los moldes para ponerlos a curar y se ponen a curar hasta la fecha que



les toque su respectiva prueba. El método de curado que se realizó fue por inmersión.

Referencia

Los especímenes fueron realizados según la norma (NMX-C-159-ONNCCE-2004)

3.2.1.3. Elaboración de vigas

Procedimiento

- 1.- Se preparan los moldes que van a ser colados, previamente se les aplica desmoldante para su fácil descimbrado y para que el concreto no se adhiera a las paredes de los moldes. Al mismo tiempo se prepara el material que será utilizado para elaborar los especímenes, como lo son: palas, cucharones, balanzas, maso de goma, varilla punta de bala de 5/8", charola de mezclado, placa de acero, cono de Abrams, y cubetas.
- 2.- Se procede a realizar el llenado de los moldes en donde cada molde es llenado en 2 capas, cada capa se penetra una vez por cada 14 cm² de superficie con la varilla punta de bala de 5/8", distribuyendo de manera adecuada las penetraciones hasta llenar el molde y enrasar.
- 3.- Una vez realizados los especímenes después de 24 horas se procede a descimbrar los moldes para ponerlos a curar y se ponen a curar hasta la fecha que les toque su respectiva prueba.

El método utilizado para el curado fue por inmersión.

Referencia

(NMX-C-159-ONNCCE-2004)

3.2.2. Curado

Protección después del acabado: para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se deben cubrir inmediatamente después de



terminados, de preferencia, con una placa no absorbente y no reactiva, o con una tela de plástico durable e impermeable.

Descimbrado: Los especímenes deben ser descimbrados no antes de 20 horas ni después de 48 horas de su elaboración.

Ambiente de curado: A menos que en otro método se especifique lo contrario, todos los especímenes deben ser curados en humedad a temperatura de $296\text{ K} \pm 3\text{ K}$ ($23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$) durante las primeras 24 horas después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura de $296\text{ K} \pm 2\text{ K}$ ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), con una humedad relativa de 95 % mínima, hasta el momento de la prueba. El almacenaje durante las primeras 48 horas debe ser en un sitio libre de vibraciones. Con relación a los especímenes extraídos de los moldes, el curado húmedo significa que los especímenes de prueba pueden mantenerse con agua libre en su superficie en todo tiempo. Esta condición se logra por inmersión en agua saturada con cal, o por almacenamiento en un cuarto húmedo o gabinete que cumpla con los requisitos de la NMX-C-148-0NNCCE. Los especímenes no deben ser expuestos a goteo directo o agua corriente.

3.3 Pruebas realizadas al concreto en estado endurecido

3.3.1. Pruebas no destructivas

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



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

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

Este ensayo no destructivo tiene como principales objetivos:

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

Homogeneidad. Es la cualidad del hormigón por la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que se encuentre en toda ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas.

La velocidad de pulso ultrasónico se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto 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 concreto 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), 1998).

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



La normativa (ASTM-C-597, 2009), rige la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, ilustración 65; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie de prueba y para tal fin se emplea un gel, (Ilustración 35).

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



Ilustración 35. Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Fotografía Joana Enríquez).

De acuerdo con (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998), se establece los criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico y así determinar la



calidad del concreto de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación (Tabla 15).

Tabla 15. Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998).

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

3.3.1.2. Resistividad eléctrica

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

La medida de resistividad eléctrica puede efectuarse bien sea: en laboratorio sobre testigos de hormigón extraídos de la estructura o, directamente sobre la estructura en campo.

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012) (Ilustración 36).



Ilustración 36. Equipo utilizado en la determinación de resistividad eléctrica (Fotografía Joana Enríquez).

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre estas esponjas húmedas.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

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

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente fórmula (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998).

$$\rho = Re * \frac{A}{L}$$

Ecuación 38. Resistividad eléctrica

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica ohm-cm (Ω -cm).

Re = Resistencia eléctrica (Ω).

A = área transversal del espécimen (cm^2).



L = longitud del espécimen (cm).

Criterios de evaluación

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión en las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general la tabla 16.

Tabla 16. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998)

Resistividad (K Ω -cm)	Descripción
>100-200	Concreto muy denso
50-100	Concreto con porosidad interconectada baja
10-50	Concreto con porosidad interconectada de consideración
<10	Concreto con porosidad interconectada excesiva

3.3.2. Pruebas destructivas

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

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

3.3.2.1. Resistencia a la compresión

Conocer el esfuerzo de ruptura por compresión en una muestra representativa del concreto usado en la obra para comparar su resistencia y saber si es equivalente a la resistencia de proyecto, lo que significa que se le aplicara una carga axial al prisma de concreto. Con utilidad práctica en el control de calidad del concreto, es



decir, verificar la resistencia real del concreto con la resistencia de proyecto, cuyo equipo es: Regla para medir el diámetro de cilindro. Máquinas hidráulicas (máquina universal, Forney o prensas).

Procedimiento

1. Se coloca el espécimen se coloca en la máquina limpiando perfectamente las placas de apoyo en la máquina y centrando el eje del espécimen en el centro de la placa de apoyo.
2. Se ajusta la platina superior a la cara del espécimen de manera que no se aplique carga de impacto si no que apenas quiera rozar el espécimen.
3. Se nivela y se pone en ceros la máquina. Se aplica la carga a una velocidad constante (continua y sin impactos), de 1.4 a 3.1 kgf/cm²/seg. Esta velocidad puede ser un poco mayor a la primera mitad de la carga total del espécimen, respecto a este punto se pueden hacer las siguientes recomendaciones.

Que no se suspenda la aplicación de la carga por ningún contratiempo y luego se vuelva a poner a funcionar cuando el espécimen ya se aproxime a la carga de falla.

Esta carga falla la podemos prefijar conociendo el porciento de resistencia según su edad, que debe de observar, esta masa se prefija multiplicando el área de la sección transversal del prisma por la resistencia de proyecto ($F'c$).

Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material. (Ilustración 37).

Las pruebas a la compresión de los especímenes curados en húmedo deben ser relacionados tan pronto como sea posible después de retirarlos.



*Ilustración 37. Aplicación de carga para prueba de compresión en especímenes prismáticos.
(Fotografía Joana Enríquez).*

Referencia

La presente prueba está referida a la norma (MNX-C-083-ONNCCE-2014) o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C 39-01.

3.3.2.2. Resistencia a la flexión

La presente prueba tiene como objetivo determinar la resistencia a flexión del concreto en vigas moldeadas en el laboratorio o en la obra, se requiere máquina de prueba Forney o Tinius Olsen, accesorios para la flexión y/o Metro.

Procedimiento

1. El espécimen debe de voltearse sobre uno de sus lados, respecto a la posición original en la que fue colado, se marcará con un crayón la posición en donde tendrán que ir los cuatro apoyos, se centran los apoyos inferiores y los apoyos superiores deben de poner en contacto con la cara superior del espécimen sobre los puntos externos del tercio central del claro entre apoyos interiores, si no se tiene un buen contacto con los apoyos interiores será necesario pulir, cabecear o calzar el espécimen con tiras de madera o acero las superficies de contacto, la carga deberá



aplicarse en forma uniforme de modo que no produzca impacto, puede aplicarse rápidamente hasta poco menos del 50 % de carga de ruptura, después se aplicara de manera que el esfuerzo en la fibra externa no exceda de 10 kg/cm² /min (980 kPa/min). (ilustración 38).

2. Se determinarán las dimensiones del espécimen, ancho y peralte promedio del espécimen en la sección de falla, deberá hacerse mediciones redondeando al 0.25 cm.

Cálculos

Si la fractura ocurre en tercio medio del claro el módulo de ruptura se calculará como:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Ecuación 39. Módulo de ruptura si la falla ocurre en el tercio medio del claro

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en no más del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará.

$$R = \frac{3PA}{bd^2}$$

Ecuación 40. Módulo de ruptura si la falla ocurre fuera del tercio medio del claro

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kgf/cm².

P = Carga de ruptura en kg.

L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

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



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



Ilustración 38. Especimen sometido a la prueba de flexión. (Fotografía Joana Enríquez).

Referencia

La presente prueba está referida a la norma (NMX-C-191-ONNCCE, 2015) o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C 78-00.

3.3.2.3. Resistencia a la tensión indirecta

Determinar la resistencia a la tensión indirecta de cilindros de concreto.

Procedimiento

1. Marcado de los especímenes. En cada extremo de los especímenes se trazan líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure estén en el mismo plano axial.
2. Se toman las dimensiones del diámetro promediando las medidas dos cerca de los extremos y una al centro siguiendo el plano de los diámetros marcados en los extremos. La longitud se obtiene promediando las dos medidas de las



líneas que unen los extremos de cada línea que marca el diámetro en las dos caras del espécimen.

3. Se colocó una de las tiras de cuero a lo largo del centro de la placa de apoyo inferior. El espécimen se coloca sobre la tira de cuero y se acomoda de tal modo que las líneas marcadas en sus dos extremos sean verticales y queden concentradas sobre la tira se coloca longitudinalmente la segunda tira de cuero sobre el cilindro, concentrándola sobre las líneas marcadas sobre las líneas en los extremos del mismo. El conjunto debe de colocarse de tal manera que garantice las siguientes condiciones:
 - Que la prolongación del plano que contenga las dos líneas marcadas en los extremos del espécimen pase por el centro de la placa superior de apoyo.
 - Que la placa suplementaria cuando se use y el centro del espécimen esté directamente debajo del centro de la placa con apoyo esférico.
4. Aplicación de carga. La carga se aplica continuamente y sin impacto a una velocidad uniforme debe de anotarse la carga máxima aplicada que indique la máquina de ensaye en la falla, el tipo de falla y la apariencia del espécimen. (ilustración 39).

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

$$T = \frac{2P}{dL\pi}$$

Ecuación 41. Resistencia a la tensión indirecta

Dónde:

T = resistencia a tensión indirecta en kg/cm².

P = carga aplicada máxima en kg.

L = longitud en cm.



d = diámetro en cm.



Ilustración 39. Ensayo de espécimen a tensión indirecta. (Fotografía Joana Enríquez).

Referencia

La presente prueba está referida a la norma ASTM- C-496-96.

3.4. Diseño de mezcla de concreto por método ACI 211.1

Se requiere dosificar los materiales para producir 1 m³ de concreto sin aire incluido con resistencia a la compresión de 40 MPa (400 kg/cm²) a los 28 días de edad. Este será utilizado en vigas (15x15x60cm), cubos (15x15x15cm) y cilindros (10x20cm).

Determinar el revenimiento requerido

El revenimiento consiste en medir el hundimiento que sufre una pila de concreto fresco en forma de cono truncado de concreto fresco al retirarle el apoyo; para hacer esta prueba se usa un molde metálico, cuyas medidas son 30 cm de altura, 10 cm en su base superior y 20 cm en su base de apoyo llamado Cono de Abrams.

1. Adoptando la teoría que menciona que la resistencia de un cilindro es aproximadamente igual a 80% de la resistencia de un cubo, un revenimiento de 10 cm, 2% de aire incluido, empleando un CPC y un tamaño máximo de la grava de 19mm (3/4").



2. En la tabla 17 obtenemos un valor de agua de 205 kg/m³.

Tabla 17. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

TABLA 17								
REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑOS MAXIMOS NOMINALES DE AGREGADO.								
Agua, kg. / m ³ de Concreto								
Tamaños máximos nominales de agregado, en (mm). ⇒	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Revenimiento en centímetros ↓	Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5	207	199	190	179	160	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	175	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	185	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire, expresado como un porcentaje.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Promedio recomendado de contenido de aire total, según el nivel de exposición (%) ↓								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Para poder encontrar la relación agua/cemento se debe definir cuál será la resistencia a la compresión (f'_c) que deberá cumplir el concreto.

3. En la tabla 18 no aparece un valor óptimo para un f'_c de 400 kg/cm² por lo cual se procede a realizar una interpolación obteniendo como resultado una relación agua/cemento de 0.43.

Tabla 18. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

TABLA 18	
CORRESPONDENCIA ENTRE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO	
Resistencia a la compresión a los 28 días, kg./cm ²	Relación Agua/Cemento por peso



	Concreto Sin aire incluido	Concreto Con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

4. Con base a la información en los pasos 2 y 3, se concluye que el consumo de cemento es de: $205/0.43 = 476.744$ kg.
5. De la tabla 19 estimamos la cantidad de grava; para un módulo de finura de 3.18, un tamaño máximo de grava de 19 mm (3/4"), puede emplearse 0.582 metros cúbicos de grava, por lo tanto, el peso de la grava es de $1600.943 \times 0.582 = 931.75$ kg/m³.

Tabla 19. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

TABLA 4					
VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO					
Tamaño máximo del Agregado (mm)	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.				
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
37.5(1 1/2 ")	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70
75(3")	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79



6. Conociendo los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire atrapado.
7. La cantidad de agregado fino (arena) se determina por el método del volumen absoluto, multiplicando el volumen determinado de la arena por su densidad y se obtiene la cantidad de arena la cual es igual a $(2.40 \times 279) = 669.280$.

3.4.1. Proporcionamiento para 1 m³.

Tabla 20. Características de los materiales.

Agua: 205 litros							
Aire: 2%							
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES							
MATERIAL	PVSS(kg/m ³)	PVSV(kg/m ³)	DU(gr/cm ³)	MF	TM	absorción %	h actual %
GRAVA	1441.274	1600.943	2.710	----- -	3/4 "	2	0
ARENA	1290.844	1424.596	2.400	3.18	-----	6.2	0
CEMENTO	1490.000	-----	3.130		-----	-----	-----

Tabla 21. Cálculo de cemento.

Relación a/c	0.43
Volumen de grava	0.582
Cálculo de cemento	476.744 Kg

Tabla 22. Cantidades para un metro cúbico de concreto.

CANTIDAD PARA UN METRO CÚBICO			
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m ³)
CEMENTO	476.744	3.130	0.152
AGUA	205.000	1.000	0.205
AIRE	0.000	0.000	0.020
ARENA	669.28	2.400	0.2789
GRAVA	931.749	2.710	0.344
TOTAL	2282.773		1



Corrección por humedad y absorción

Se inició el análisis con el material totalmente seco por lo tanto la humedad natural es igual a cero.

Tabla 23. Ajuste por humedad del agregado.

AJUSTE POR HUMEDAD DEL AGREGADO				
MATERIAL	H. NATURAL		H. ABSORCIÓN	
GRAVA		0.00%	2.00%	
ARENA		0.00%	6.20%	
CANTIDAD DE HUMEDAD EN GRAVAS=			-2.00%	factor de corrección
CANTIDAD DE HUMEDAD EN ARENAS=			-6.20%	factor de corrección

Tabla 24. Cantidades de materiales corregidas para un metro cúbico.

CANTIDADES DE MATERIALES CORREGIDAS PARA UN METRO CÚBICO				
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m ³)	RELACIÓN EN PESO
CEMENTO	476.744	3.130	0.152	1
AGUA	265.130	1	0.265	0.556
AIRE	0	0	0.020	-----
ARENA	627.785	2.400	0.262	1.317
GRAVA	913.114	2.710	0.337	1.915
TOTAL	2282.773	-----	1	-----

3.5. Proporcionamiento del diseño de mezclas

Se realizaron cuatro mezclas en total las cuales las identificaremos de la siguiente manera:

Mezcla 1: Considerada la mezcla “Testigo” la cual fue diseñada para un $f'c=40\text{MPa}$ de acuerdo a las especificaciones del método ACI.

Mezcla 2: Considerada mezcla “Fibra” se realizó con las mismas características que la mezcla testigo adicionada con 600gr/m^3 de fibras de polipropileno esto con la finalidad de obtener mejores propiedades ya que la fibra de este tipo contribuye a tener mejoras en compresión y tensión de la misma.



Mezcla 3: Considerada mezcla “Fibra-Aditivo” esta mezcla fue diseñada con un $f'c=40\text{MPa}$ haciendo una reducción del agua de proyecto en un 40% y sustituyendo este mismo con un aditivo reductor de agua de alto rango superplastificante la cantidad de 14cc/kg de cemento, incluyendo en este 600gr/m^3 de fibras de polipropileno para mejorar sus propiedades reológicas.

Mezcla 4: Considerada mezcla “Aditivo” esta mezcla se diseñó para un $f'c=40\text{MPa}$ haciendo una reducción del agua de proyecto en un 40% y sustituyendo este mismo con un aditivo reductor de agua de alto rango superplastificante la cantidad de 14cc/kg de cemento con la finalidad de alcanzar altas resistencias.

3.5.1. Datos del proporcionamiento

Se hizo el proporcionamiento para 6 vigas (15x15x60cm), 18 cubos (15x15x15cm) y 12 cilindros (10x20cm); esto para cada una de las mezclas antes mencionadas.

Tabla 25. Dimensionamiento de vigas

ALTURA	0.15	m
ANCHO	0.15	m
LARGO	0.60	m

Tabla 26. Proporcionamiento para vigas

VOLUMEN DE UNA VIGA=		0.0135	m^3
	PARA	6	VIGAS
1.000	m^3	0.0891	m^3
MATERIALES	PESO (kg)	Kg (+10% DE DESPERDICIO)	
CEMENTO	476.744	42.48	
AGUA	265.130	23.62	
AIRE	0	0	
ARENA	627.785	55.94	
GRAVA	913.114	81.36	
TOTAL	2282.773	203.40	



Tabla 27. Dimensionamiento de cubos

ALTURA	0.15	m
ANCHO	0.15	m
LARGO	0.15	m

Tabla 28. Proporcionamiento para cubos

VOLUMEN DE UN CUBO=		0.0034 m ³	m ³
	PARA	18	CUBOS
1.000	m ³	0.066825	m ³
MATERIALES	PESO (kg)	Kg (!+10% DE DESPERDICIO)	
CEMENTO	476.744	31.86	
AGUA	265.130	17.72	
AIRE	0	0.00	
ARENA	627.785	41.95	
GRAVA	913.114	61.02	
TOTAL	2282.773	152.55	

Tabla 29. Dimensionamiento de cilindros

ALTURA	0.15	m
ANCHO	0.15	m

Tabla 30. Proporcionamiento para cilindros

VOLUMEN DE UN CILINDRO=		0.0016	m ³
	PARA	12	CILINDROS
1.000	m ³	0.020735	m ³
MATERIALES	PESO (kg)	Kg (!+10% DE DESPERDICIO)	
CEMENTO	476.744	9.885	
AGUA	265.130	5.497	
AIRE	0	0	
ARENA	627.785	13.017	
GRAVA	913.114	18.933	
TOTAL	2282.773	47.332	



Tabla 31. Proporcionamiento total por colada

TOTAL	Kg
CEMENTO	84.221
AGUA	46.838
AIRE	0
ARENA	110.904
GRAVA	161.3102
TOTAL	403.274

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Cemento

Tabla 32. Pruebas al cemento

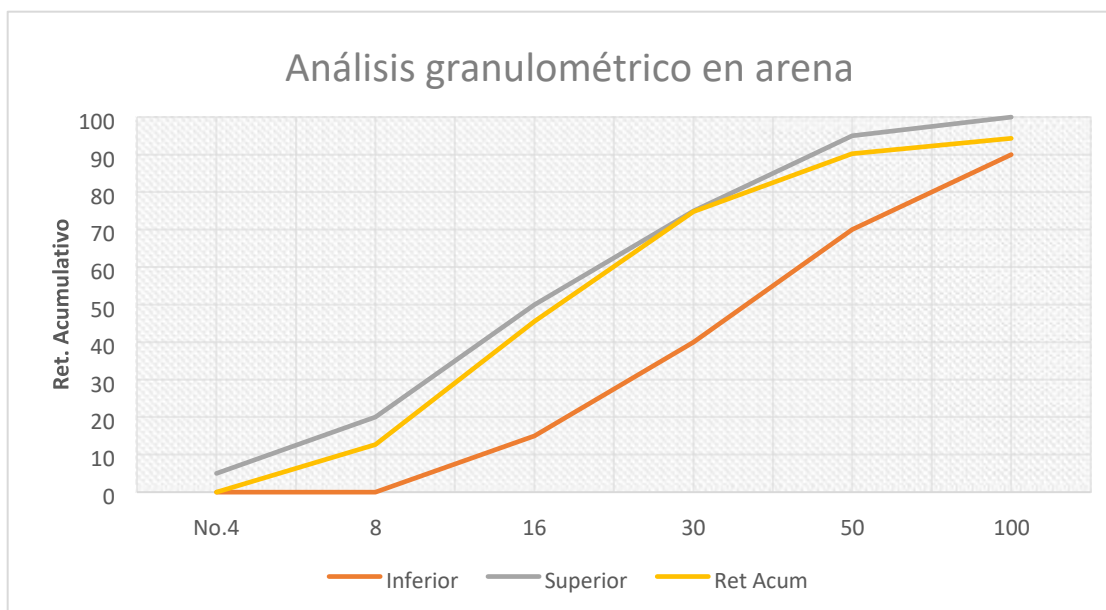
Pruebas al cemento	
Densidad	3.13 gr/cm ³

4.2 Caracterización del agregado fino



Tabla 33. Pruebas realizadas al agregado fino

Prueba	Arena
Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)	0%
Humedad de Absorción (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)	6.20%
M.V.S.S. (NMX-C-073-ONNCCE, 2014)	1.29 (gr/cm ³)
M.V.S.V. (NMX-C-073-ONNCCE, 2014)	1.42 (gr/cm ³)
Sedimentos	Aceptable (<30ml)
Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)	Escala 3 (acceptable)
Contenido de material fino (pasa malla ASTM No 200) (NMX-C-084-ONNCCE, 2006) (5% Max)	3.50%
Contenido de Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)	4%
Densidad (g/cm ³) (2.15 Aceptable)	2.4
Módulo de Finura (<2.3-3.2>)	3.18
Gravedad Específica	2.33



Gráfica 4. Análisis granulométrico en arenas

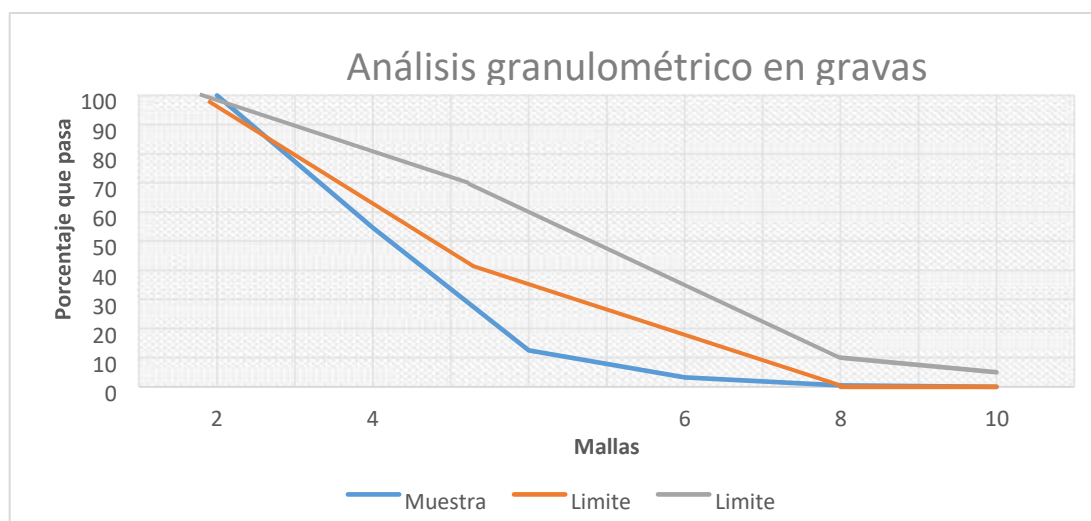
Como se puede observar en la gráfica 4 la arena en estudio cumple con los límites de granulometría para concreto de acuerdo a lo establecido por la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).



4.3 Caracterización del agregado grueso

Tabla 34. Pruebas realizadas al agregado grueso

Prueba	Grava
Humedad de absorción (NMX-C-164-ONNCCE-2014)	2.00%
Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE-2006)	0.00%
Masa volumétrica seca suelta (NMX-C073-ONNCCE-2014)	1.44 (gr/cm ³)
Masa volumétrica seca varillada (NMXC-073-ONNCCE-2014)	1.60(gr/cm ³)
Densidad (NMX-C-164-ONNCCE-2014)	2.71 gr/cm ³



Gráfica 5. Análisis granulométrico en gravas

Como se puede observar en la gráfica 5 la grava en estudio no cumple con los límites de granulometría para concreto de acuerdo a lo establecido por la norma, pero fue la utilizada ya que es la única de la región.

4.4. Pruebas realizadas al concreto en estado fresco

Tabla 35. Pruebas realizadas a mezcla "Testigo" al concreto en estado fresco

Mezcla 1 "Testigo"



Prueba	Resultado
Revenimiento (cm)	15.5
Temperatura °C	25
pH	12.5



Ilustración 40. Revenimiento de mezcla "Testigo" (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 41. Temperatura de mezcla "Testigo" (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 42. pH de mezcla "Testigo" (Fotografía Joana Enríquez).



Tabla 36. Pruebas realizadas a mezcla “Fibra” al concreto en estado fresco

Mezcla 2 "Fibra"	
Prueba	Resultado
Revenimiento (cm)	20
Temperatura °C	24
pH	12.5



Ilustración 43. Revenimiento de mezcla “Fibra” (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 44. Temperatura de mezcla “Fibra” (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 45. pH de mezcla “Fibra” (Fotografía Joana Enríquez).



Tabla 37. Pruebas realizadas a mezcla “Fibra-Aditivo” al concreto en estado fresco

Mezcla 3 "Fibra-Aditivo"	
Prueba	Resultado
Revenimiento (cm)	18
Temperatura °C	22
pH	12.5



Ilustración 46. Revenimiento de mezcla “Fibra-Aditivo” (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 47. Temperatura de mezcla “Fibra-Aditivo” (Fotografía Joana Enríquez).

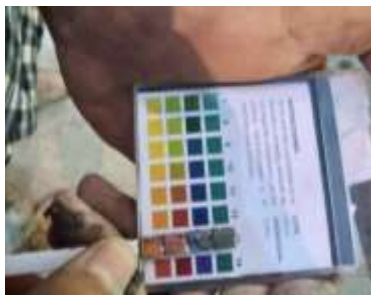


Ilustración 48. pH de la mezcla “Fibra-Aditivo” (Fotografía Joana Enríquez).



Tabla 38. Pruebas realizadas a mezcla "Aditivo" al concreto en estado fresco

Mezcla 4 "Aditivo"	
Prueba	Resultado
Revenimiento (cm)	20
Temperatura °C	20
pH	12.5



Ilustración 49. Revenimiento en mezcla "Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).



Ilustración 50. Temperatura en mezcla "Aditivo" (Fotografía Joana Enríquez).



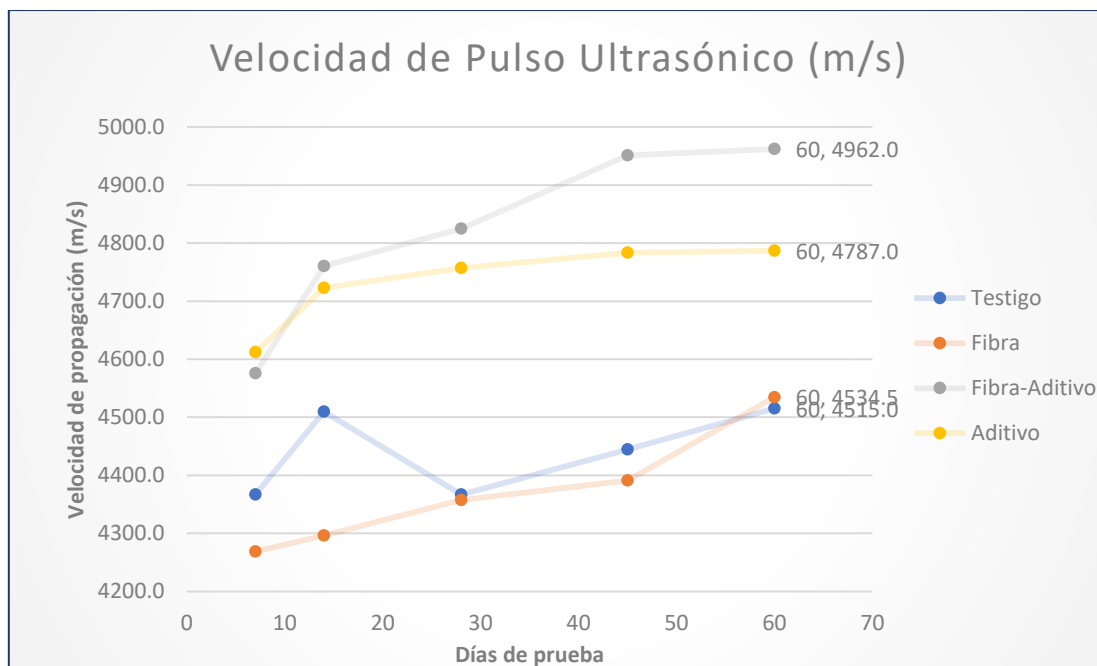
Ilustración 51. pH en mezcla “Aditivo” (Fotografía Joana Enríquez).

4.5 Pruebas realizadas al concreto en estado endurecido

4.5.1. Pruebas no destructivas

4.5.1.1. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

En la gráfica 6 se presentan los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en 4 edades. La mezcla con adiciones de fibra y aditivo es la que presenta mejores resultados, superiores a los de la mezcla testigo. De acuerdo a los criterios de durabilidad para concreto, los resultados se encuentran en una calidad **durable** del concreto (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998). Los mejores resultados se presentan a la edad de 60 días donde la mezcla “Fibra-Aditivo” tiene 4962.0 m/s, mientras la mezcla testigo registra 4515 m/s superándola en un 9% respecto a la mezcla “Testigo”.



Gráfica 6. Velocidad de pulso ultrasónico

4.5.1.2. Resistividad eléctrica

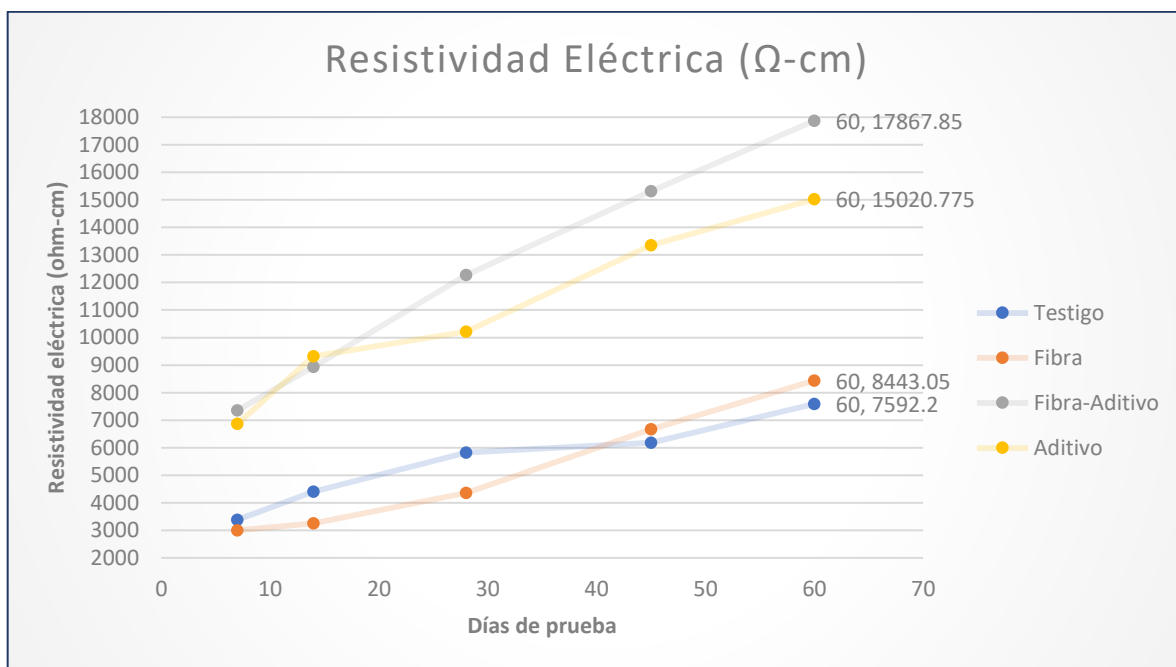
En la prueba de resistividad eléctrica, la mezcla “Fibra-Aditivo” presenta mejores resultados a la edad de 60 días (Gráfica 7) teniendo un aumento del 57.5% en comparación con la mezcla “Testigo” con valores registrados de 17867.85 Ω -cm para la mezcla “Fibra-Aditivo” mientras que la mezcla “Testigo” registra valores de 7592.2 Ω -cm.

Se puede observar que conforme la edad de prueba va aumentando los valores siguen incrementándose. Hay una notable diferencia en comparación con las mezclas que tienen aditivo debido que este mejora sus propiedades ya que es autocompactable y reduce los poros en el concreto.

De acuerdo a la Tabla 16, la resistividad obtenida para la mejor mezcla “Fibra-Aditivo” con un valor de 17867.85 Ω -cm es considerada como un **concreto con porosidad interconectada de consideración** (RED DURAR (Durabilidad de la



armadura), 1998), lo cual significa que tiene un riesgo de corrosión moderado o relativamente bajo.



Gráfica 7. Resistividad eléctrica

4.5.2. Pruebas destructivas

4.5.2.1. Resistencia a compresión

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

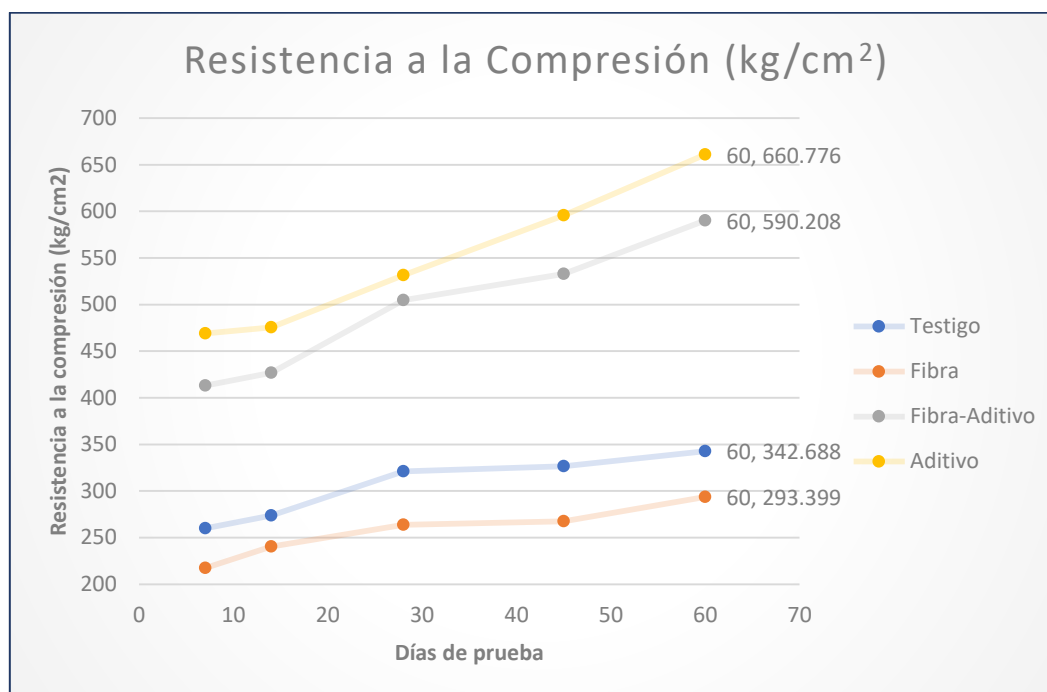
La mezcla “Aditivo” es en la que se obtienen mejores valores, registrando resultados siempre por arriba de la “Testigo” y de “Fibra-Aditivo”, aunque en las 4 edades de prueba los valores fueron en incremento.

En la edad de 60 días (gráfica 8) el resultado de la mezcla “Aditivo” es de 660.776 kg/cm² (64.80 MPa), estando por encima de la mezcla “Fibra-Aditivo” 590.208 kg/cm² (57.88 MPa) y de la mezcla “Testigo” 342.688 kg/cm² (33.61 MPa), lo cual



es producto de un mejor acomodo de las partículas del agregado, además de una mejor densificación dentro de la matriz cementicia debido a la utilización del aditivo.

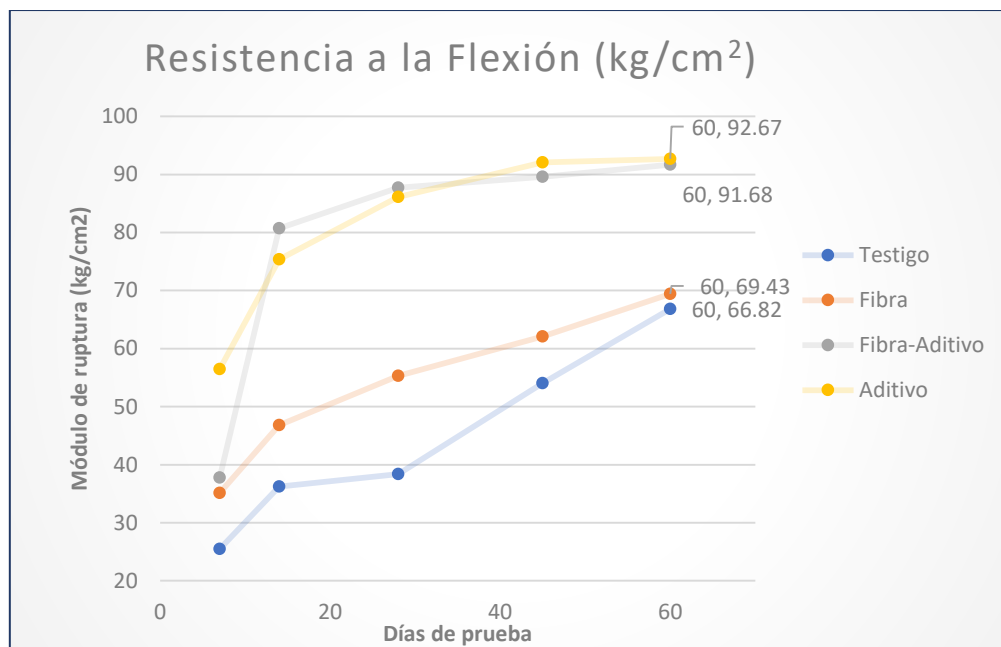
Las mezclas “Aditivo” y “Fibra-Aditivo” cumplen ampliamente las características en compresión para denominarse de alta resistencia mientras que la mezcla “Testigo” y “Fibra” no lograron llegar a la resistencia de diseño debido a sus características.



Gráfica 8. Resistencia a la compresión

4.5.2.2. Resistencia a la flexión

En la gráfica 9 se muestran los resultados obtenidos para los esfuerzos promedio a la flexión (valores del módulo de ruptura) de cada mezcla elaborada para cada edad de prueba. Se observa que la mezcla “Fibra-Aditivo” supera a la mezcla “Aditivo” en 2 de las 5 edades (14 y 28 días), pero en las siguientes edades de prueba la mezcla “Aditivo” 92.67 kg/cm² (9.09 MPa) es la que sigue presentando los mejores resultados ya que supero a la mezcla “Testigo”, mezcla “Fibra” y mezcla “Fibra-Aditivo” en la edad de 60 días registrando valores de 66.82 kg/cm² (6.55 MPa), 69.43 kg/cm² (6.81 MPa) y 91.68 kg/cm² (8.99 MPa) respectivamente.



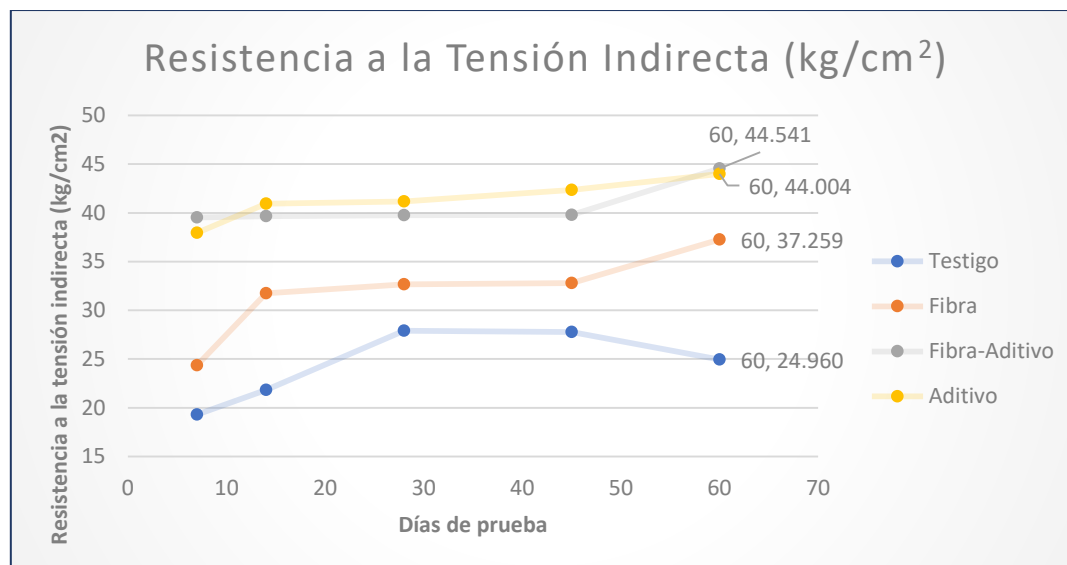
Gráfica 9. Resistencia a la flexión

4.5.2.3. Resistencia a la tensión indirecta

En la prueba de resistencia a tensión indirecta los mejores resultados los registra la mezcla “Aditivo” en 3 de las 5 edades, a 60 días la mezcla “Fibra-Aditivo” (gráfica 10), es la mezcla que registra los mejores resultados, la mezcla “Testigo” se encuentra en las 5 edades por debajo de las demás mezclas.

Cabe mencionar que a los 60 días los resultados de la mezcla “Testigo” presentan una caída en sus valores lo cual se puede asociar a varios factores, ya sea por el operador o un error en el instrumento de medición.

La mezcla “Fibra-Aditivo” resiste valores de 44.541 kg/cm^2 (4.37 MPa) a los 60 días de prueba, mientras que la mezcla “Aditivo” resiste 44.004 kg/cm^2 (4.31 MPa) y por abajo se encuentran las mezclas “Fibra” y “Testigo” que registran resultados de 37.259 kg/cm^2 (3.65 MPa) y 24.960 kg/cm^2 (2.45 MPa) respectivamente.



Gráfica 10. Resistencia a la tensión indirecta

4.6. Proyección de la vida útil del concreto

En las tablas siguientes se observan los resultados de resistividad promedio y conductividad de las cuatro mezclas a diferente edad de prueba, con la finalidad de aplicar la metodología del apartado 2.2 de esta investigación para estimar la vida útil de estructuras de concreto frente a agentes agresivos.

Tabla 39. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla "Testigo"

Número	Mezcla	Diámetro (cm)	Longitud promedio(cm)	Área promedio (cm²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (KΩ-cm)	Conductividad	Días
1	"Testigo"	10.00	20.00	78.54	3390.31	3.39	0.29	7
		10.20	20.00	81.71	4411.33	4.41	0.23	14
		10.00	20.04	78.54	5825.05	5.83	0.17	28
		10.03	20.10	79.01	6185.03	6.19	0.16	45
		10.00	20.00	78.54	7592.20	7.59	0.13	60
		10.01	20.03	78.70	8503.00	8.50	0.12	90



Tabla 40. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla "Fibra"

Número	Mezcla	Diámetro (cm)	Longitud promedio(cm)	Área promedio (cm ²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (KΩ-cm)	Conductividad	Días
2	"Fibra"	10.05	20.01	79.33	3004.16	3.00	0.33	7
		10.00	20.01	78.54	3259.41	3.26	0.31	14
		10.00	20.00	78.54	4357.50	4.36	0.23	28
		10.10	20.10	80.12	6675.90	6.68	0.15	45
		10.06	20.00	79.49	8443.05	8.44	0.12	60
		10.00	20.00	78.54	15280.00	15.28	0.07	90

Tabla 41. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla "Fibra-Aditivo"

Número	Mezcla	Diámetro (cm)	Longitud promedio(cm)	Área promedio (cm ²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (KΩ-cm)	Conductividad	Días
3	"Fibra-Aditivo"	10.02	20.00	78.85	7363.13	7.36	0.14	7
		10.10	20.04	80.12	8933.93	8.93	0.11	14
		10.40	20.10	84.95	12271.88	12.27	0.08	28
		10.00	20.05	78.54	15315.30	15.32	0.07	45
		10.08	20.10	79.80	17867.85	17.87	0.06	60
		10.00	20.00	78.54	25570.00	25.57	0.04	90

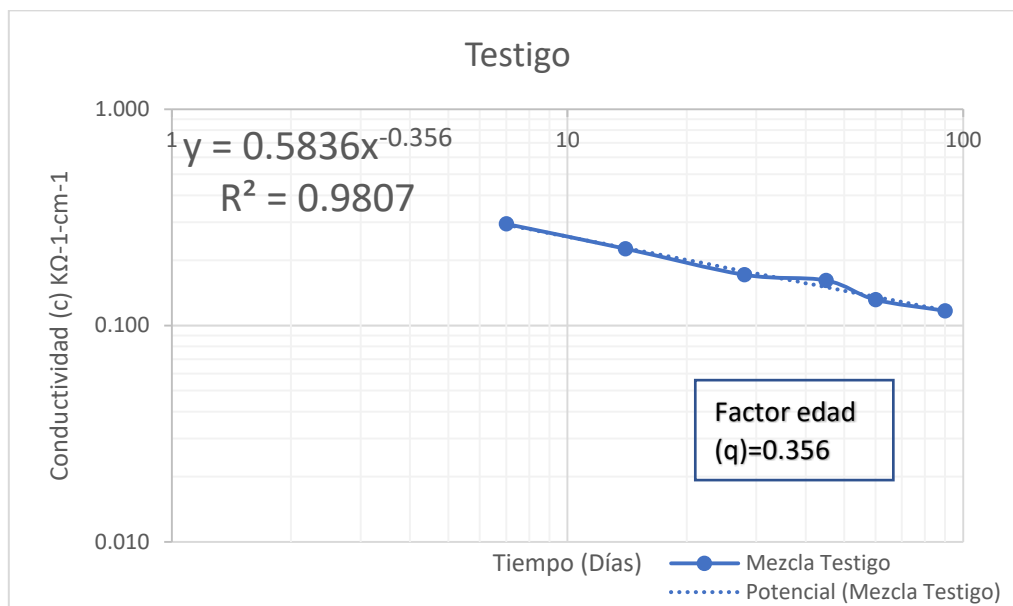
Tabla 42. Valores promedios de la resistividad eléctrica y conductividad a distintas edades de mezcla "Aditivo"

Número	Mezcla	Diámetro (cm)	Longitud promedio(cm)	Área promedio (cm ²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (KΩ-cm)	Conductividad	Días
4	"Aditivo"	10.20	20.00	81.71	6872.25	6.87	0.15	7
		10.00	20.00	78.54	9326.63	9.33	0.11	14
		10.00	20.02	78.54	10210.20	10.21	0.10	28
		10.00	20.10	78.54	13351.80	13.35	0.07	45
		10.00	20.00	78.54	15020.78	15.02	0.07	60
		10.01	20.00	78.70	16758.00	16.76	0.06	90

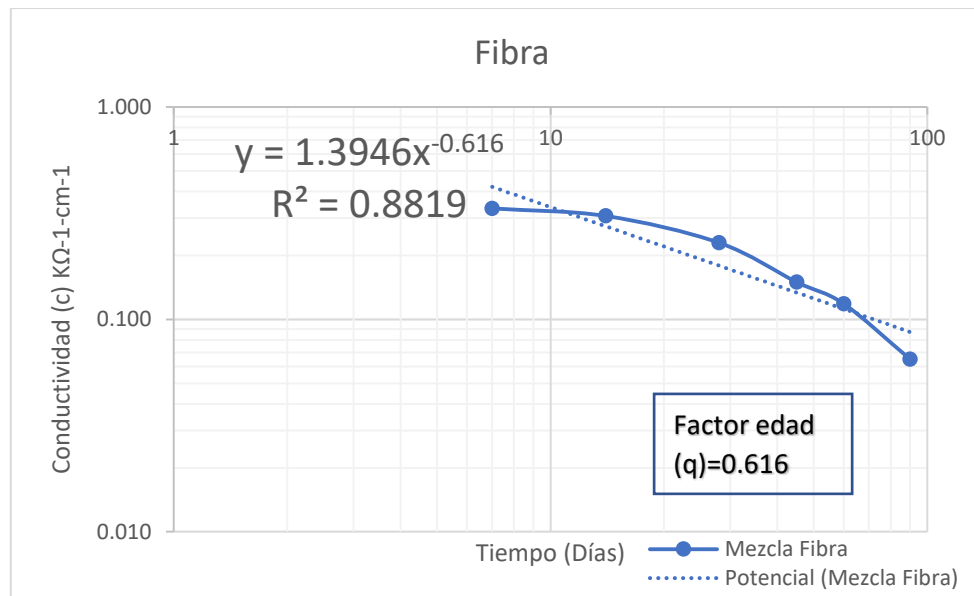
A continuación, se muestran las gráficas de cada mezcla para determinar su factor edad (q) que representa el envejecimiento del concreto, es decir, con que variación el concreto adquiere sus propiedades finales (Andrade & Andrea, 2011).



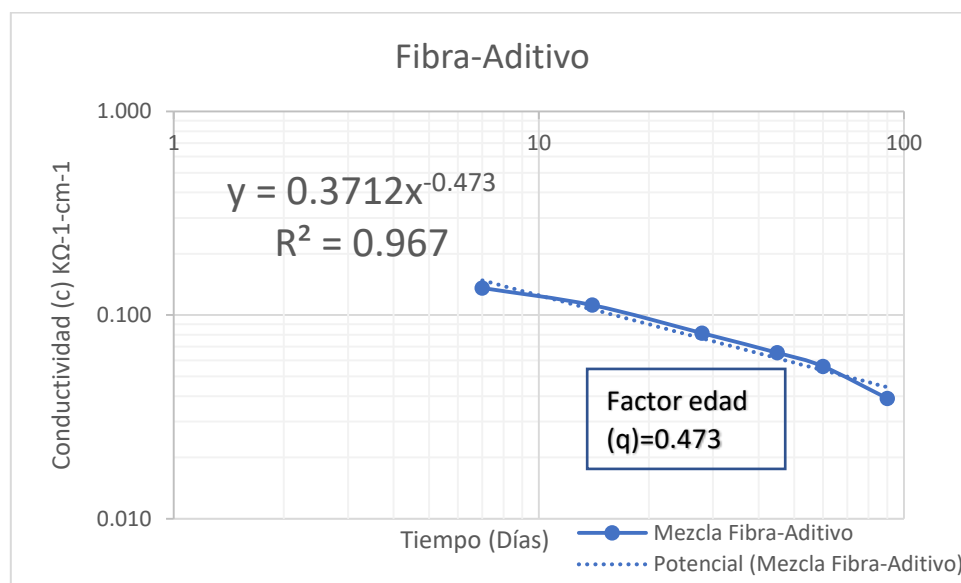
Este factor puede calcularse gráficamente, donde la pendiente del ajuste obtenido al representar el logaritmo de la inversa de la resistividad frente al logaritmo del tiempo, es el valor “q” (Andrade & D’Andrea, 2011). Es por ello que para cada mezcla de concreto elaborada se calculó su correspondiente factor edad como se muestra a continuación:



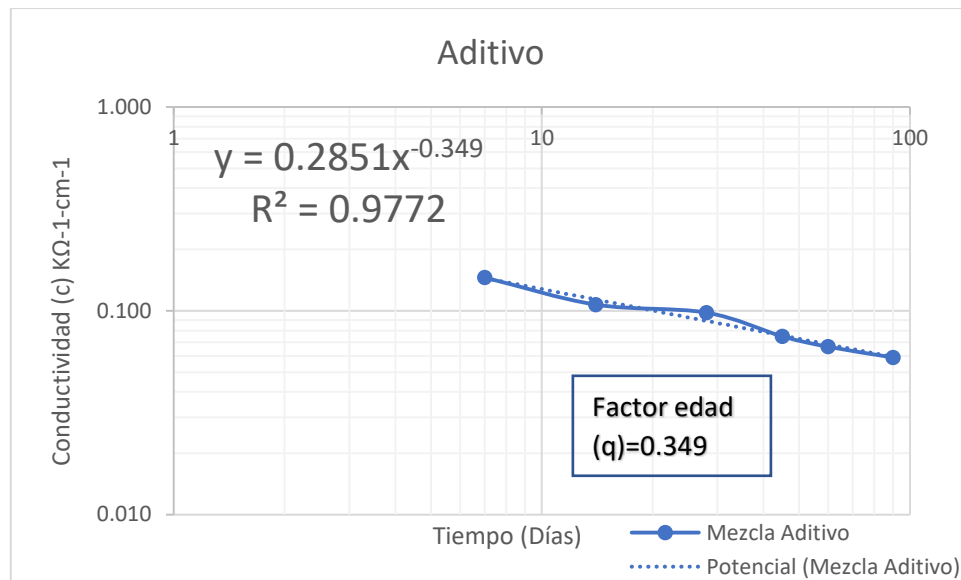
Gráfica 11. Factor edad “q” de la mezcla Testigo



Gráfica 12. Factor edad “q” de la mezcla Fibra



Gráfica 13. Factor edad “q” de la mezcla Fibra-Aditivo



Gráfica 14. Factor edad "q" de la mezcla Aditivo

Se procede a determinar el tiempo de iniciación del ataque de los agentes cloruros a una estructura de concreto con el cálculo de vida útil de una estructura.

La fórmula para el cálculo del tiempo de iniciación es la siguiente:

$$t_i = \frac{X_{cl} * p_{ef,0} * \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q}{F_{exp,cl}} r_{b,cl}$$

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros, en cm.

F_{exp} = Factor de exposición ambiental, en $\Omega\text{-cm}^3$ /año.

p_{ef} = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado, en $\Omega\text{-cm}$.

$p_{ef,0}$ = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, en $\Omega\text{-cm}$.

t_n = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.



t_o = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad. Ambas edades t_n y t_o deben introducirse en las mismas unidades.

q = Es el factor edad (adimensional)

rb , = Factor de retardo (adimensional)

t_i = Tiempo de iniciación, en años

En las siguientes tablas se observan los tiempos de iniciación (vida útil) de una estructura de concreto.

Tabla 43. Tiempo de iniciación para una estructura de concreto con un recubrimiento de 5 cm.

Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición ($F_{exp,cl}$)	Factor de retardo (rb,cl)	Resistividad efectiva a 28 días (Ω -cm)	Recubrimiento en cm (X,cl)	Tiempo de iniciación t_i (años)
Testigo	0.356	10000	1.5	5825.05	5	33.10
Fibra	0.616	10000	1.5	4357.50	5	33.55
Fibra-Aditivo	0.473	10000	1.5	12271.88	5	79.95
Aditivo	0.349	10000	1.5	10210.20	5	57.55

En la tabla 43 se puede observar que la vida útil en las mezclas Testigo y Fibra no alcanzan el valor mínimo de 50 años, por lo cual se procede a aumentar el espesor de recubrimiento mientras que en las mezclas Fibra y Fibra-Aditivo ya cumplen con lo mínimo requerido, esto se debe a su mayor valor de resistividad.

Tabla 44. Tiempo de iniciación para una estructura de concreto con un recubrimiento de 6 cm.

Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición ($F_{exp,cl}$)	Factor de retardo (rb,cl)	Resistividad efectiva a 28 días (Ω -cm)	Recubrimiento en cm (X,cl)	Tiempo de iniciación t_i (años)
Testigo	0.356	10000	1.5	5825.05	6	47.67
Fibra	0.616	10000	1.5	4357.50	6	48.31
Fibra-Aditivo	0.473	10000	1.5	12271.88	6	115.12
Aditivo	0.349	10000	1.5	10210.20	6	82.87

En la tabla 44 se puede observar que aumentando el recubrimiento a seis centímetros las mezclas Testigo y Fibra aún no obtienen un tiempo de vida útil



mínimo de 50 años por lo tanto se procede a aumentar más el espesor del recubrimiento.

Tabla 45. Tiempo de iniciación para una estructura de concreto con un recubrimiento de 6.5 cm.

Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición (Fexp,cl)	Factor de retardo (rb,cl)	Resistividad efectiva a 28 días (Ω-cm)	Recubrimiento en cm (X,cl)	Tiempo de iniciación ti (años)
Testigo	0.356	10000	1.5	5825.05	6.5	55.94
Fibra	0.616	10000	1.5	4357.50	6.5	56.69
Fibra-Aditivo	0.473	10000	1.5	12271.88	6.5	135.11
Aditivo	0.349	10000	1.5	10210.20	6.5	97.26

En la tabla 45 se puede observar que al aumentar el espesor de recubrimiento a 6.5 centímetros las mezclas Testigo y Fibra ya cumplen con lo mínimo recomendado de vida útil para cualquier estructura de concreto.

Se propondrá un tiempo de iniciación de 100 años para que nuestra estructura pueda ser considerada como durable y así obtener su espesor de recubrimiento en cm de una estructura de concreto.

La fórmula para el cálculo del recubrimiento es la siguiente:

$$X_{cl} = \sqrt{\frac{t_i * F_{exp, cl}}{\rho_{ef, 0} * \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q * r_{b, cl}}}$$

Donde:

X_{cl} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros, en cm.

$F_{exp,}$ = Factor de exposición ambiental, en Ω-cm³ /año.

ρ_{ef} = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado, en Ω-cm.



$\rho_{ef,0}$ = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y 20 + 2°C de temperatura, en Ω -cm.

t_n = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

t_o = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad. Ambas edades t_n y t_o deben introducirse en las mismas unidades.

q = Es el factor edad (adimensional)

r_b = Factor de retardo (adimensional)

t_i = Tiempo de iniciación, en años.

Para lo cual con los mismos datos de experimentación se obtuvieron los siguientes espesores:

Tabla 46. Valores de recubrimiento obtenidos para una vida útil de 100 años para estructura durable

Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición ($F_{exp,cl}$)	Factor de retardo ($r_{b,cl}$)	Resistividad efectiva a 28 días (Ω -cm)	Tiempo de iniciación t_i (años)	Recubrimiento en cm (X,cl)
Testigo	0.356	10000	1.5	5825.05	100	8.69
Fibra	0.616	10000	1.5	4357.50	100	8.63
Fibra-Aditivo	0.473	10000	1.5	12271.88	100	5.59
Aditivo	0.349	10000	1.5	10210.20	100	6.59

En la tabla 46 se puede observar que el valor más óptimo para un tiempo de iniciación de 100 años es el de la mezcla “Fibra-Aditivo” con 5.59 cm de recubrimiento, cuyo valor está dentro del rango de 4 a 8 cm para no tener problemas por figuración, ya que valores mayores a 10 cm tendría como consecuencia costos más elevados y problemas de agrietamiento en el recubrimiento de una estructura.



5. CONCLUSIONES

Al realizar la caracterización del agregado grueso proveniente de Cuto, Michoacán, para la elaboración del concreto, se obtuvieron resultados no muy factibles, ya que algunos de ellos están fuera de los rangos que establecen las normas; tal es el caso de la granulometría.

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



En las cinco pruebas realizadas al concreto se puede observar que la utilización de las fibras de polipropileno mejora las propiedades del concreto, así como reduce de forma importante el agrietamiento por contracción plástica.

Con base en los criterios de durabilidad que marca el manual de la (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998), y en función de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas a las mezclas de concreto (resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tensión indirecta), la calidad de las cinco mezclas de concreto elaboradas puede ser considerada como “durable”, a su vez, el riesgo de corrosión de se clasifica como “moderado o con porosidad interconectada de consideración”.

En la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) las mezclas “Fibra-Aditivo” y “Aditivo” presentaron los valores más altos, 4,962.0 m/s y 4,787.0 m/s presentando un incremento del 9% y del 5.68% respectivamente. Los valores de la velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas de concreto fueron obtenidos a los 60 días de análisis.

Dentro de las mezclas de concreto elaboradas la mezcla “Fibra-Aditivo” fue la que presento un mejor desempeño (en términos de durabilidad) en la prueba de resistividad eléctrica a los 60 días de análisis, con un valor de 17867.85 Ω -cm.

Por lo que respecta a la prueba de compresión simple, las mezclas de concreto que presentaron un mejor desempeño fueron, la mezcla de concreto “Aditivo” y la mezcla de concreto “Fibra-Aditivo” con valores de 660.776 kg/cm² (64.80 MPa) (a los 60 días de análisis) y la mezcla “Fibra-Aditivo” con valores de 590.208 kg/cm² (57.88 MPa) respectivamente por lo cual se consideran concretos de alta resistencia ya que cumplen ampliamente las características de diseño.

En la prueba de flexión la mezcla “Aditivo” 92.67 kg/cm² (9.09 MPa) es la que presenta los mejores resultados ya que supero a la mezcla “Testigo”, mezcla “Fibra” y mezcla “Fibra-Aditivo” en la edad de 60 días registrando valores de 66.82 kg/cm² (6.55 MPa), 69.43 kg/cm² (6.81 MPa) y 91.68 kg/cm² (8.99 MPa) respectivamente.



En la prueba de tensión indirecta la mezcla “Fibra-Aditivo” resiste valores de 44.541 kg/cm² (4.37 MPa) a los 60 días de prueba, mientras que la mezcla “Aditivo” resiste 44.004 kg/cm² (4.31 MPa) y por abajo se encuentran las mezclas “Fibra” y “Testigo” que registran resultados de 37.259 kg/cm² (3.65 MPa) y 24.960 kg/cm² (2.45 MPa) respectivamente.

Se concluye que la mezcla “Fibra-Aditivo” es la que presenta el mejor desempeño (en términos de durabilidad) dentro de las pruebas realizadas con base en los criterios de durabilidad que marca el manual de la (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 1998), además dentro de esta clasificación no se toma en cuenta la agresividad del medio ambiente que rodeara a la estructura de concreto, por lo cual estaríamos determinando la durabilidad de la mezclas de concreto de una manera cualitativa y de manera cuantitativa se determinó por medio de la determinación de la vida útil ya que esta mezcla cumple una vida útil mínima de 100 años con un espesor de recubrimiento de 5.6 cm lo cual hace que el costo de una obra disminuya ya que la cantidad de concreto necesaria también disminuye debido a las características que esta mezcla presenta.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO-T-106. (2002). *Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- ACI 302.1R-04. (s.f.). *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*.
- ACI 308R-01. (s.f.). *Guide to Curing Concrete (Reapproved 2008)*.
- (s.f.). *Aditivos Para Concreto-Compuestos Líquidos Que Forman Membrana Para Curado del Concreto - Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- ASTM A-820. (s.f.). *Especificación estándar para fibras de acero para hormigón reforzado con fibra*.
- ASTM C 1018. (s.f.). *Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión y la resistencia a la primera grieta del concreto reforzado con fibra*.



- ASTM C 33. (s.f.). *Especificación normalizada de agregados para concreto.*
- ASTM C 494. (s.f.). *Clasificación de los tipos de aditivos.*
- ASTM C1240. (s.f.). *Especificación Normalizada para Humo de sílice Utilizado en Mezclas Cementicias.*
- ASTM C494/C494M. (s.f.). *Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto.*
- ASTM C618 . (s.f.). *Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón.*
- ASTM C989. (s.f.). *Especificación Normalizada para Cemento de Escoria para Uso en Concreto y Morteros.*
- ASTM D 7508/D7508M. (s.f.). *Especificación estándar para hilos cortados de poliolefina para uso en concreto.*
- ASTM-C-109-M. (2002). *Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens).* EE.UU.
- ASTM-C-128. (2004). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.* E.E.U.
- ASTM-C-142. (1997). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.*
- ASTM-C-151-00. (2014). *Método estandar de ensayo para expansión en autoclave del cemento portland.* EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C-187-04. (2004). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement.*
- ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles.*
- ASTM-C-348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars.* EE.UU.
- ASTM-C-40. (2004). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete.*
- ASTM-C-597. (2009). *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.* Estados Unidos.
- ASTM-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate.*
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method.* EE.UU.
- BS-4027:1980. (2000). *Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos.* Inglaterra: British Standards Institution.
- Charles, J. H. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation.* Estados Unidos: McGrae-Hill.
- Christianson, S.A. de C.V. (2014). *Crisota R-5.* México: Boletín Técnico.



- Dávila, M. (2010). *Efecto de la adición de fibra de polipropileno sobre las propiedades plásticas y mecánicas del concreto*. México.
- Ensayo., A. P.-C.-E. (s.f.). *NMX-C-255-ONNCCE-2013*.
- Fundación Laboral del Cemento y Medio ambiente. (22-agosto de Julio de 2013). Obtenido de <http://www.flacema.org>
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de productores de concreto.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2015). *Pruebas de Agregados*. México: IMCyC.
- Kolli Ramujee. (2013). *Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. India.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- López, J. (2015). *Análisis de las propiedades del concreto reforzado con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno: influencia del tipo y consumo de fibra adicionado*. México.
- Milind V. Mohod. (2015). *Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. India.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (s.f.). *Industria de la Construcción-Determinación de la resistencia a compresión*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. England: ISBN 978-0-273-73219-8.
- NMX-C-057-ONCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cemento Hidráulico-Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.



- NMX-C-122-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agua para Concreto- Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-122-ONNCCE-. (2018). *Industria de la construcción-agua para concreto-Especificaciones*.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-165-ONNCCE. (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 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 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-255-ONNCCE-2013. (s.f.).
- NMX-C-255-ONNCCE-2013. (s.f.). *Aditivos Para Concreto-Compuestos Líquidos Que Forman Membrana Para Curado del Concreto - Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- 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.
- PNE 83994-2. (2016). *Durabilidad del hormigón. Estrategia de comprobación de la durabilidad en niveles. Parte 2: Cálculo de la vida útil en relación a la corrosión de armaduras a través de la resistividad*.
- RED DURAR (Durabilidad de la armadura). (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. México: CYTED.
- Saeid Kakooei, Hazizan Md Akil, Morteza Jamshidi and Jalal Rouhi. (2012). *The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures*. . Malaysia.
- Tuutti, K. (1982). *"Corrosion of steel in concrete"*.



ANEXO A (Informativo).

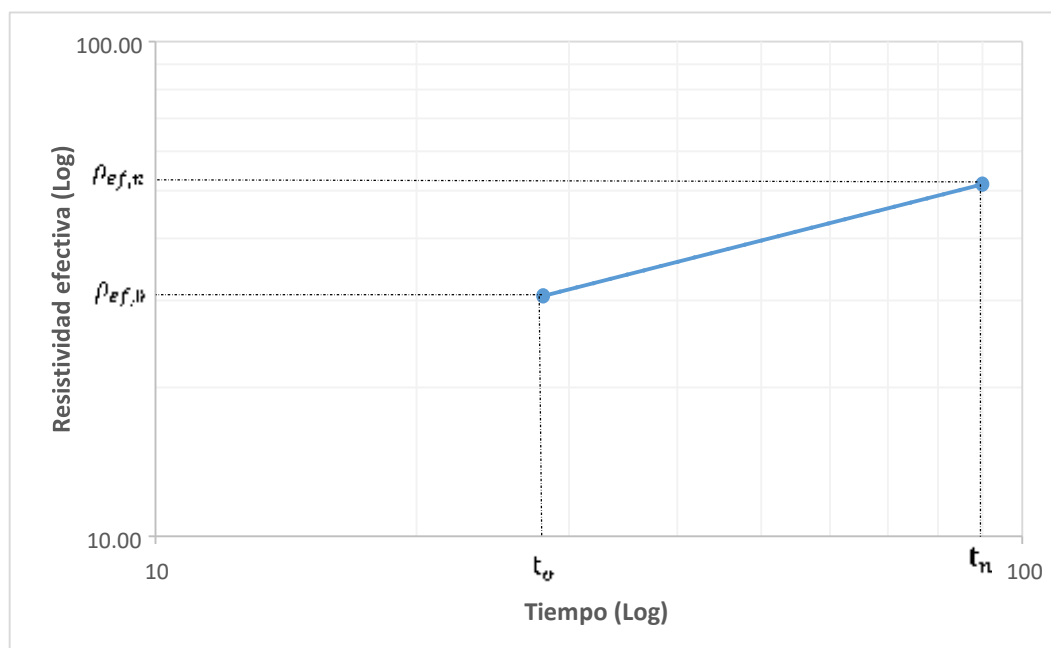
En este anexo, se muestra como el último valor de resistividad $\rho_{ef,n}$ que se mide puede ser expresado de la forma (PNE 83994-2, 2016):

$$\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0} \right)^q \quad (A1)$$

Para obtener la expresión A1, debe seguirse una secuencia ordenada de pasos:



- Se obtienen los valores de resistividad efectiva a la edad de 28 días (t_0) y a la última edad que se midió esta (t_n).
- Se grafican ambos valores en escala logarítmica, colocando en el eje de las ordenadas los valores de resistividad efectiva y en el eje de las abscisas el tiempo t_0 y t_n , obteniendo un gráfico como el que se muestra a continuación:



Gráfica 69. Valores de resistividad efectiva en los tiempos t_0 y t_n (escala logarítmica).

De la gráfica 69 se infiere que:

$$\frac{\text{Log} (\Delta \rho)}{\text{Log} (\Delta t)} = \text{constante} \quad (\text{A2})$$

Recordemos que la pendiente de una recta es constante, la cual podría representarse con la letra “q”:



$$\frac{\text{Log}(\Delta\rho)}{\text{Log}(\Delta t)} = q \quad (\text{A3})$$

Sabemos que:

$$\text{Log}(\Delta\rho) = \text{Log}(\rho_{ef,n}) - \text{Log}(\rho_{ef,0}) \quad (\text{A4})$$

$$\text{Log}(\Delta t) = \text{Log}(t_n) - \text{Log}(t_0) \quad (\text{A5})$$

Sustituyendo las ecuaciones A4 y A5 en la ecuación A3:

$$\frac{\text{Log}(\rho_{ef,n}) - \text{Log}(\rho_{ef,0})}{\text{Log}(t_n) - \text{Log}(t_0)} = q \quad (\text{A6})$$

Despejando ρ_{ef} ,

Aplicando las propiedades de los logaritmos base 10:

$$\frac{\text{Log}\left(\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}}\right)}{\text{Log}\left(\frac{t_n}{t_0}\right)} = q \quad (\text{A7})$$

$$\text{Log}\left(\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}}\right) = q \text{Log}\left(\frac{t_n}{t_0}\right) \quad (\text{A8})$$

$$\text{Log}\left(\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}}\right) = \text{Log}\left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q \quad (\text{A9})$$

Aplicando base 10 en ambos miembros de la ecuación A9:



$$10^{\text{Log}\left(\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}}\right)} = 10^{\text{Log}\left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q} \quad (\text{A10})$$

$$\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}} = \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q \quad (\text{A11})$$

Despejando ρ_{ef} , de la ecuación A11:

$$\rho_{ef,n} = \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q \quad (\text{A12})$$

Donde:

ρ_{ef} , = Ultimo valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado, en $\Omega\text{-cm}$.

$\rho_{ef,0}$ = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, en $\Omega\text{-cm}$.

t_n = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

t_0 = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad. Ambas edades t_n y t_0 deben introducirse en las mismas unidades.

q = Es el factor edad (adimensional).