



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

Que para obtener el título de Ingeniero Civil

Presenta

ANTONIO MALDONADO HUANTE

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO- MECÁNICAS DEL
CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO ADICIONADO CON SÍLICE, FIBRAS DE
ACERO Y UN MODIFICADOR DE REOLOGÍA.**

Director:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Co-Director.

M.I. Jorge Alberto Pacheco Segovia

Morelia, Michoacán enero de 2020.





Agradecimientos

A mis padres Antonio Maldonado Curiel y Silvia Huante Pacheco por todo el apoyo incondicional recibido y por haberme dado el sustento a lo largo de este proyecto de vida, por sus innumerables muestras de cariño y por todo el sacrificio diario hecho por ellos para poder llegar a este día; su día. A mis hermanos Karina, Daniel, Rafael quienes formaron parte también de este proyecto y a toda mi familia.

A mi pareja y ahora colega Joana Enríquez Ramírez por todo el apoyo, quien se lleva gran crédito de este trabajo por haberme ayudado en este desarrollo experimental y haber permanecido a mi lado a pesar de lo demandante que fue el proceso.

A todos los maestros que he tenido en el aula, y a los que me orientaron en mis inquietudes.

A mi asesora, la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su apoyo, guía y consejos en todo momento que los necesite durante esta etapa.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Doctor Wilfrido Martínez Molina por la confianza brindada, asesorías y apoyo en numerosas ocasiones para asistir a congresos, seminarios y cursos locales, nacionales e internacionales.

Al M.I. Cipriano Bernabé Reyes, por haber creído del proyecto y haberme orientado con paciencia en todo el desarrollo, así mismo por su gran amistad y confianza que me ha brindado a lo largo de varios años.

A los profesores Marco Antonio Ornelas, Noel Díaz, Hugo Blancas, Luis Colín y al ing. Víctor Carranza por todo el apoyo brindado para este trabajo y por las innumerables ocasiones que me han ayudado en toda clase de situaciones.



A mis compañeros de generación Ricardo Soto, Javier Fabián, Alejandro Méndez, Rigoberto Gómez, Álvaro Arroyo, por su amistad, por las innumerables noches de estudio, trabajo y diversión.

Al Ing. José Alfredo Rodríguez del CiteC de Holcim México por sus atenciones y por ser un ejemplo a seguir.

Al Dr. Guillermo Hernández y al ing. Héctor Iván Morales de Concretos ABCD por las atenciones, amistad, momentos de conocimiento y las asesorías dadas.

Al ing. Gonzalo y a ELEMENT5 por el donativo del aditivo superplastificante y otros insumos.



Índice de Contenido

I. RESUMEN	XII
II. ABSTRACT	XV
III. JUSTIFICACIÓN.....	XVII
IV. OBJETIVO GENERAL.....	XVIII
V. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	XVIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Estado del arte de las adiciones a las mezclas de concreto.....	3
2.1.1. Adición de las fibras de acero a mezclas de concreto	3
2.1.2. Adición de Sílice.....	5
2.2. Modelos de durabilidad propuestos en la literatura.	6
2.2.1. Fundamento del método.....	8
2.2.2. Deducción de la fórmula para el cálculo de la vida útil de estructuras de concreto a partir del valor de Resistividad.	9
2.2.3. Factor de retardo (rb).....	11
2.2.4. Resistividad aparente (ρ_{ap}).....	12
2.2.5. Factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación (F_{exp}).....	13
2.2.6. Resistividad efectiva (ρ_{ef}).....	14
2.2.7. Factor edad (q).....	16
2.3. Cemento.....	17
2.3.1. Producción del cemento Portland	18
2.3.2. Clasificación del cemento	19
2.3.3. Propiedades del cemento.....	21
2.3.3.1. Propiedades Físicas	21
2.3.3.2. Propiedades Químicas.....	23
2.3.3.3. Propiedades Mecánicas.....	24
2.3.4. Cemento usado en la Investigación	25
2.4. Agregados.....	26
2.4.1. Propiedades de los agregados	27
2.4.1.1. Propiedades físicas.....	27
2.4.1.2. Propiedades Químicas.....	28
2.4.1.3. Propiedades Mecánicas.....	28
2.4.2. Agregados utilizados en la investigación	29
2.5. Agua.....	29
2.5.1. Especificaciones del agua en la construcción	30
2.5.2. El agua utilizada en la investigación	31
2.6. Materiales en estudio como adición al concreto.....	32
2.6.1. Fibras de acero	32
2.6.2. Fibra de acero utilizada en la investigación	33



2.6.3.	Humo de Sílice o Sílice	34
2.6.4.	Aditivos	35
2.6.4.1.	Tipos y usos	35
2.6.4.2.	Aditivo utilizado en la investigación	37
2.6.5.	Aditivos tipo PCE.....	38
3.	METODOLOGÍA	39
3.1.	Características y propiedades de los materiales	39
3.1.1.	Cemento	39
3.1.1.1.	Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento.	40
3.1.1.2.	Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.	43
3.1.1.3.	Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.	45
3.1.2.	Arenas.....	48
3.1.2.1.	Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba (Cuarteo).	49
3.1.2.2.	Método de prueba estándar para la humedad superficial y humedad de absorción en arenas.	53
3.1.2.3.	Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica seca suelta).	55
3.1.2.4.	Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica seca varillada).	57
3.1.2.5.	Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos.....	58
3.1.2.6.	Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino.	64
3.1.2.7.	Método de prueba estándar para densidad relativa de la arena.....	66
3.1.3.	Gravas	69
3.1.3.1.	Muestreo en gravas.....	69
3.1.3.2.	Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas “Cuarteo en gravas”.	70
3.1.3.3.	Contenido de agua por secado “Humedad actual en gravas”.....	70
3.1.3.4.	Densidad en gravas.	71
3.1.3.5.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta en gravas (M.V.S.S.)	72
3.1.3.6.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada en gravas (M.V.S.V.).....	74
3.1.3.7.	Análisis granulométrico o Granulometría	75
3.1.4.	Agua.....	77
3.1.5.	Aditivo.....	77
3.1.6.	Sílice.....	77
3.2.	Elaboración de especímenes.....	78
3.2.1.	Elaboración de cilindros.....	78
3.2.2.	Elaboración de Vigas.....	80
3.2.3.	Elaboración de cubos.....	81
3.3.	Pruebas no destructivas	83
3.3.1.	Resistividad Eléctrica	83
3.3.2.	Velocidad de pulso ultrasónico.....	85
3.4.	Pruebas destructivas	87
3.4.1.	Resistencia a la tensión indirecta	87
3.4.2.	Resistencia a la compresión simple en prismas cúbicos.....	89



3.4.3.	Resistencia a la flexión en vigas.....	91
3.5.	Diseño de Mezclas.....	93
3.5.3.	Dosificación del concreto	93
3.5.4.	Método ACI (American Concrete Institute)	93
3.5.5.	Condiciones generales del proyecto.....	94
3.5.6.	Metodología del diseño de mezclas	95
3.5.6.1.	Dosificación del concreto empleado	96
3.5.6.2.	Cálculo	96
3.6.	Elaboración de Mezclas.	102
4.	Análisis de resultados y discusiones	104
4.1.	Cemento	104
4.2.	Agregados.....	104
4.3.	Sílice.....	107
4.4.	Resultados de pruebas a mezclas en estado fresco	107
4.5.	Pruebas realizadas a especímenes de concreto endurecido	110
4.5.1.	Resultados de ensayos no destructivos a especímenes de concreto.	110
4.5.1.1.	Resistividad Eléctrica	111
4.5.1.2.	Velocidad de Pulso Ultrasónico	112
4.5.2.	Resultados de ensayos destructivos a especímenes de concreto.	113
4.5.2.1.	Resistencia a la compresión.	113
4.5.2.2.	Resistencia a la tensión indirecta	114
4.5.2.3.	Resistencia a la Flexión.....	117
4.6.	Proyección de la vida útil del concreto para obras civiles	120
5.	CONCLUSIONES	129
6.	BIBLIOGRAFIA	131



Contenido de Ilustraciones

Ilustración 1. Evolución de las mezclas de concreto adicionadas con diferente porcentaje de fibras de acero Fuente. (COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO ZP-306 SOMETIDO A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Gallo-Arciniegas, González Peñuela, & Carrillo León, 2013)).....	5
Ilustración 2. Valores de conductividad en los tiempos t_0 , t_n y factor edad “q” (escala logarítmica).(Fuente. “MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS Ing. José Alberto Pacheco Segovia).....	17
Ilustración 3. Esquema del proceso de producción del cemento. (IMCYC 2014)	19
Ilustración 4. Mezclado de la pasta con las manos (Fotografía Antonio M)	41
Ilustración 5. Penetración de la aguja (Fotografía Antonio).....	43
Ilustración 6 Aparato de Guillmore (Fotografía Antonio M.).....	45
Ilustración 7. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento (Fuente equipo de laboratorio, ilustraciones lamac).....	47
Ilustración 8. Normas nacionales e internacionales que rigen las prácticas de caracterización del agregado.....	48
Ilustración 10. Colocación del agregado en una superficie limpia (Fotografía Antonio M).....	51
Ilustración 11. Homogenización del material (Fotografía Antonio M)	51
Ilustración 12. Aplanado de la parte superior del material (Fotografía Florentino M).....	51
Ilustración 13. División de la muestra en 4 partes iguales (Fotografía J. Méndez).....	52
Ilustración 14. Secado superficial del agregado con ayuda del cono troncocónico (Fotografía Antonio M).....	54
Ilustración 15. Llenado y pesado de la muestra en M.V.S.S (Fotografía Antonio M).....	56
Ilustración 16. Llenado y varillado de MVSV (Fotografía Florentino M)	57
Ilustración 17. Muestra representativa a secar en la parrilla (Fotografía Antonio M)	59
Ilustración 18. Mallas ordenadas en orden decreciente (Fotografía Antonio M).....	60
Ilustración 19. Agitado mecánico (Raf-tap) (Fotografía Antonio M).....	60
Ilustración 20. Separación de los retenidos en cada malla (Fotografía Antonio M).....	61
Ilustración 21. Límites de granulometría para morteros y concreto. Fuente (NMX-C-111-ONNCCE, 2004)	63
Ilustración 22. Colorimetría en arenas (Fotografía Antonio M).....	65
Ilustración 23. Tabla de colorimetría (Fotografía Antonio M).....	65
Ilustración 24. Vertido de la muestra al frasco de vidrio (Fotografía Antonio M).....	68
Ilustración 25. Frascos y vidrios utilizados (Fotografía Antonio M).....	68
Ilustración 26. Material cuarteado listo para ejecución de prueba (Fotografía Antonio M)	73
Ilustración 27. Determinación del peso total de la prueba (Fotografía Antonio M).....	73
Ilustración 28. Proceso de varillado en la tara con el material (Fotografía Antonio M)	74
Ilustración 29. Lectura del pH a una mezcla de sílice disuelta (Fotografía Antonio M).....	77
Ilustración 30. Equipo para medir la resistividad “Resistometro”. (Fuente Antonio M).....	83
Ilustración 31. Prueba de Resistividad a espécimen cilíndrico (Fuente Antonio M).....	85
Ilustración 32. Lectura de la velocidad de pulso ultrasónico a espécimen cilíndrico (Fuente Antonio M)	86
Ilustración 33. Medición de velocidad de pulso ultrasónico a espécimen prismático para corroborar homogeneidad en la mezcla (Fuente Antonio M)	86
Ilustración 34. Ensayo de espécimen a tensión indirecta. (Fuente Antonio M)	89
Ilustración 35. Aplicación de carga para prueba de compresión en especímenes prismáticos. (Fuente Antonio M).....	90
Ilustración 36. Especímenes prismáticos para ensayar en prueba a flexión. (Fuente Antonio M)...	92
Ilustración 37. Análisis granulométrico de arena usada en la investigación. (Fuente Antonio M) ..	105
Ilustración 38. Análisis granulométrico de grava usada en la investigación. (Fuente Antonio M) ..	106



Ilustración 39. Lectura de pH a una solución de agua y sílice (Fuente Antonio M).....	107
Ilustración 40a y 33b. Consistencia de las mezclas de concreto con revenimiento mayor a 20 cm (Fotografía Antonio M)	108
Ilustración 41. Prueba de revenimiento, resultado 19.5cm (Fotografía Antonio M)	109
Ilustración 42. Lectura de temperatura en cada una de las mezclas (Fotografía Antonio M)	109
Ilustración 43. Lectura de pH en cada una de las mezclas (Fotografía Antonio M)	110
Ilustración 44. Desprendimiento de la pasta-agregado lo que provoca falla y colapso del espécimen en las mezclas que contienen sílice a temprana edad. (Fuente Antonio M).....	116
Ilustración 45. La falla que rige en los especímenes a edades de 45 y 60 días es la fractura del agregado. (Fuente Antonio M)	117
Ilustración 46. Falla frágil en las mezclas que no contienen adición de fibras de acero. (Fuente Antonio M)	119
Ilustración 47. Falla dúctil en las mezclas adicionadas con fibras de acero, soportando incluso una carga permanente de 2500 kg. (Fuente Antonio M)	119



Contenido de tablas

Tabla 1. Valores simplificados del factor de retardo (Fuente. PNE 83994-2, 2016).	12
Tabla 2. Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (Fuente. PNE 83994-2, 2016).....	14
Tabla 3. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente ((NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	20
Tabla 4 Clasificación de los cementos con la norma actual (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	20
Tabla 5. Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)...	23
Tabla 6 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	30
Tabla 7. Características físico-mecánicas de las fibras de acero. (Fuente Antonio M).....	34
Tabla 8. Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría (Fuente manual de prácticas del laboratorio de materiales UMSNH)	61
Tabla 9. Especificaciones de granulometrías según Bureau of Reclamation ASTM	63
Tabla 10. Formato de registro y cálculo para análisis granulométrico. (Fuente. Antonio M)	76
Tabla 11. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica (Fuente (NMX-C-530-ONNCCE-2017))	84
Tabla 12. Valores de Velocidad de pulso ultrasónico aun normativa. (Fuente (NMX-C-275-ONNCCE-2019))	87
Tabla 13. Características de los materiales (Fuente Antonio M).....	96
Tabla 14. Elección del revenimiento (Fuente Antonio M)	97
Tabla 15. Calculo del agua de mezclado (Fuente Antonio M).....	98
Tabla 16. Selección de la relación agua/cemento (Fuente Antonio M)	98
Tabla 17. Selección del contenido de cemento (Fuente Antonio M)	98
Tabla 18. Selección del contenido de agregado grueso (Fuente Antonio M).....	99
Tabla 19. Selección del contenido de agregado fino (Fuente Antonio M)	100
Tabla 20. Factores de corrección por humedad de absorción (Fuente Antonio M)	100
Tabla 21. Cantidades finales ajustadas para 1m ³ de concreto (Fuente Antonio M)	100
Tabla 22. Cantidades para un total de 12 cilindros de 10x20cm (Fuente Antonio M)	101
Tabla 23. Cantidades para un total de 6 vigas de 15x15x60cm (Fuente Antonio M)	101
Tabla 24. Cantidades para un total de 18 de 15x15x50cm (Fuente Antonio M)	102
Tabla 25. Cantidades totales por colada (Fuente Antonio M).....	102
Tabla 26. Resultados de pruebas en el cemento (Fuente Antonio M)	104
Tabla 27. Resultados de pruebas en agregado fino. (Fuente Antonio M).....	105
Tabla 28. Resultados de pruebas en agregado grueso. (Fuente Antonio M).....	106
Tabla 29. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 1. (Fuente Antonio M)	107
Tabla 30. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 2. (Fuente Antonio M)	108
Tabla 31. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 3. (Fuente Antonio M)	108
Tabla 32. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 4. (Fuente Antonio M)	109
Tabla 33. Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla testigo (Fuente Antonio M)	120
Tabla 34. Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla Adtivo-fbra (Fuente Antonio M).....	120
Tabla 35. Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla Adtivo-fbra –slce (Fuente Antonio M)	120



Tabla 36 Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla Adtivo –slce (Fuente Antonio M).....	121
Tabla 37. Tiempos de iniciación (vida útil) de un piso industrial con un recubrimiento de 5cm.	124
Tabla 38. Tiempos de iniciación (vida útil) de un piso industrial con un recubrimiento de 6 cm.	125
Tabla 39. Tiempos de iniciación (vida útil) de un piso industrial con un recubrimiento de 7 cm. ...	125
Tabla 40. Valores de recubrimiento obtenidos para un tiempo de iniciación de 100 años para que sea considerada como durable una estructura.	127



Contenido de gráficas

Gráfica 1. Valores de Resistividad eléctrica en especímenes a distintas edades (Fuente Antonio M)	112
Gráfica 2. Valores obtenidos de Velocidad de Pulso Ultrasonido en especímenes (Fuente Antonio M)	113
Gráfica 3. Valores obtenidos en el ensaye a compresión en especímenes (Fuente Antonio M) ...	114
Gráfica 4. Valores obtenidos en ensaye a tensión indirecta a especímenes (Fuente. Antonio M)	115
Gráfica 5. Comparación de resistencia a flexión en las mezclas de concreto a la edad de 28 días. (Fuente Antonio M.).....	118
Gráfica 6. Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto testigo.	121
Gráfica 7. Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto Adtvo-fbra.	122
Gráfica 8. Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto Adtvo-fbra-slce.	122
Gráfica 9. . Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto Adtvo-slce.....	123



I. RESUMEN

La tecnología del concreto hoy en día ya no es una ciencia joven, y ha sufrido una revolución en su desarrollo a partir de la década de los años 80, hoy en día es muy sencillo lograr concretos especiales con ayuda de los numerosos productos de adición al concreto que se encuentran en el mercado, sin embargo el camino a la optimización del proceso de obtención de estos concretos es aún desconocido en muchos de criterios básicos de composición, dosificación y elaboración. En la actualidad, la industria de la construcción y el uso del concreto está migrando hacia el uso de concretos más resistentes y más durables, el concreto de alto desempeño provee a los ingenieros estructurales, a los arquitectos, y constructores novedosas soluciones técnicas y económicas tan deseables como la resistencia y la durabilidad, la meta debe ser descubrir los medios de construcción más económicos, de echo el concreto de alto desempeño puede conducir a menores costos de ejecución, de diseños más eficientes, mayor rapidez a la construcción y una menor cantidad de materiales gracias a la disminución de secciones.

Inicialmente se hablaba de los concretos de alta resistencia como aquel que alcanzaba resistencias mayores a las convencionales, pero con el tiempo los estudiosos del tema modificaron el termino como “cualquier concreto que satisfaga criterios propuestos para sobrepasar las limitaciones de un concreto convencional puede ser llamado concreto de alto desempeño” (Department of Transportation Federal Highway Administration, 1994)

Según el workshop sobre concretos de alto desempeño (CAD) Realizado en 1990 por el ACI y otras instituciones se define como: “El concreto que reúne un comportamiento especial, uniformemente exigido, que no puede nunca ser alcanzado utilizando solamente los materiales convencionales, una mezcla, colocación y curado normal (Concreto de alto desempeño)



El ACI ((American Concrete Institute)) lo define como el concreto que presenta funcionamiento y uniformidad especiales que no puede ser obtenida utilizando ingredientes convencionales, procedimientos normales de mezclado y prácticas típicas de curado. Estos requisitos pueden incluir aspectos como: Facilidad de colocación, Compactación sin segregación, Características mecánicas a largo plazo, Alta resistencia a edades tempranas, Dureza, Estabilidad de volumen y Larga vida útil (American Concrete Institute, 1999). El concreto de alto desempeño evolucionó gradualmente durante los últimos 15 años, más o menos, principalmente por la producción de concreto con resistencias cada vez más altas. Hoy día, en algunas partes del mundo pueden producirse de manera rutinaria resistencias de 140 MPa, pero el concreto de alto desempeño no es lo mismo que el concreto de alta resistencia. El énfasis ha cambiado de una resistencia muy alta a otras propiedades deseables en algunas circunstancias. Estas son: alto módulo de elasticidad, alta densidad, baja permeabilidad y resistencia a algunas formas de ataque.

El Prestressed Concrete Institute ((PCI Committee on Durability, 1994)) define al concreto de alto desempeño como un concreto con o sin microsílíce que tiene una relación agua/cemento de 0.38 o menos y cuyas propiedades físico mecánicas se verán beneficiadas con este parámetro.

La Fundación de investigación en Ingeniería Civil (Civil Engineering Research Foundation CERF Technical, 1994) menciona que al contrario de un concreto convencional, un concreto de alto desempeño debe tener uno o más de estos requisitos.

1. Fácil colocación y compactación.
2. Alta resistencia inicial
3. Exhibir propiedades mecánicas a largo plazo superiores, resistencia a la abrasión o cargas de impacto, y baja permeabilidad.



Con el uso de otros materiales cementantes diferentes al cemento (sílice) y la incorporación de fibras de acero y un superplastificante se ha buscado incrementar las propiedades físico mecánicas que den como resultado una mezcla que cumpla con las definiciones anteriormente mostradas.

PCE, Cloruros, Sílice, Fibras, Desempeño.



II. ABSTRACT

Concrete technology today is no longer a young science, and has undergone a revolution in its development since the 1980s, today it is very easy to achieve special concrete with the help of numerous products added to the concrete that are in the market, however the path to the optimization of the process of obtaining these concretes is still unknown in many of the basic criteria of composition, dosage and elaboration. At present, the construction and concrete use industry is migrating towards the use of tougher and more durable concrete, high performance concrete provides structural engineers, architects, and builders with innovative technical and economic solutions so desirable as resistance and durability, the goal should be to discover the most economical construction means, in fact high performance concrete can lead to lower execution costs, more efficient designs, faster construction and a lower amount of construction materials thanks to the decrease of sections.

Initially there was talk of high-strength concrete such as one that reached higher resistance than conventional, but over time the subject's students modified the term as “any concrete that meets the criteria proposed to overcome the limitations of a conventional concrete can be called concrete high performance ”(Department of Transportation Federal Highway Administration, 1994)

According to the workshop on high performance concrete (CAD) Conducted in 1990 by the ACI and other institutions, it is defined as: “Concrete that meets a special behavior, uniformly required, that can never be achieved using only conventional materials, a mixture, placement and normal curing (High performance concrete)

The ACI ((American Concrete Institute)) defines it as the concrete that presents special functioning and uniformity that cannot be obtained using conventional ingredients, normal mixing procedures and typical curing practices. These requirements may include aspects such as: Ease of placement, Compaction without



segregation, Long-term mechanical characteristics, High resistance at an early age, Hardness, Volume stability and Long service life (American Concrete Institute, 1999). High-performance concrete evolved gradually over the past 15 years, more or less, mainly due to the production of concrete with increasing resistance. Today, in some parts of the world, resistance of 140 MPa can occur routinely, but high performance concrete is not the same as high strength concrete. The emphasis has changed from a very high resistance to other desirable properties in some circumstances. These are: high modulus of elasticity, high density, low permeability and resistance to some forms of attack.

The Prestressed Concrete Institute ((PCI Committee on Durability, 1994)) defines high performance concrete as a concrete with or without microsilica that has a water / cement ratio of 0.38 or less and whose physical and mechanical properties will benefit from this parameter.

The Civil Engineering Research Foundation (Civil Engineering Research Foundation CERF Technical, 1994) mentions that unlike conventional concrete, a high-performance concrete must have one or more of these requirements.

1. Easy placement and compaction.
2. High initial resistance
3. Display superior long-term mechanical properties, abrasion resistance or impact loads, and low permeability.

With the use of cementitious materials other than cement (silica) and the incorporation of steel fibers and a superplasticizer, we have sought to increase the physical and mechanical properties that result in a mixture that meets the definitions shown above.



III. JUSTIFICACIÓN

La investigación presentada en este documento de tesis busca incentivar la producción industrial y el uso de concretos de alto desempeño con distintas adiciones, específicamente las de sílice, fibras y un aditivo superplastificante; por medio de la identificación de características de las mezclas de concreto que determinan el incremento de ventajas y cualidades de durabilidad y vida útil de las obras civiles. El concreto de alto desempeño es un criterio de calidad del concreto que se extendió a partir de la 1970 gracias al desarrollo de nuevos aditivos plastificantes, superfluidificantes e hiperplastificantes que demostraron mejorar las cualidades de manejabilidad y resistencia a la compresión del concreto, además de demandar menos agua en el proceso de producción. En general, se considera que cualquier concreto que muestre cualidades que sobrepasen las del concreto convencional, es un concreto de alto desempeño (Department of Transportation Federal Highway Administration, 1994) El incremento del uso y la producción industrial de concretos de alto desempeño aportará a la preservación de las obras civiles, mitigando los agentes meteorológicos de exposición, alargando su vida de servicio, además de la reducción de costos de mantenimiento. Sin embargo prevalecen retos para lograr procesos de producción a gran escala, tales como, logísticas de colocación, protocolos para cumplir con estándares de calidad, preparación de personal calificado que pueda obtener el acopio de materiales y estándares de laboratorio. Todo esto justifica el desarrollo de mayores estudios. Por lo tanto, se apoyara a demostrar la variedad y versatilidad de las aplicaciones del concreto de alto desempeño y la solución de diversos problemas que más allá de las sollicitaciones dinámicas y estáticas que requieren las estructuras convencionales, está en mitigar eventos meteorológicos, agentes químicos y ambientales.



IV. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, elaborar y evaluar una mezcla de concreto incorporada con adiciones, con la finalidad de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y su desempeño en general. A su vez mejorar el comportamiento de mezclas de concreto tradicionales que sean usadas en obras civiles y que ayuden a la prolongación de su vida útil, así mismo lograr que la mezcla diseñada cumpla con los parámetros anteriormente mencionados por diversos órganos y sociedades técnicas y pueda ser catalogada como una mezcla de alto desempeño, con aplicaciones a diversas estructuras.

V. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar y analizar de manera detallada el comportamiento de una mezcla de concreto que es adicionada con fibras de acero, sílice y un superplastificante en base a una mezcla llamada testigo para observar y evaluar sollicitaciones mecánicas específicas como: resistencia a la flexión, compresión simple, tensión, así como pruebas no destructivas con la finalidad de evaluar su durabilidad.

Estudiar y caracterizar concretos de alto desempeño con un enfoque práctico a la durabilidad, sostenibilidad y controles de calidad que permitan a la industria promover su utilización y masificación.

Mejorar el comportamiento físico-mecánico y condiciones de trabajabilidad en mezclas de concreto con bajas relaciones a/c.



1. INTRODUCCIÓN

Los concretos de alto desempeño son concretos que tienen un mejor comportamiento para una aplicación en particular. Este comportamiento se mide con características a diferentes edades del concreto, más allá de la resistencia, incide en propiedades del material, como es: módulo de elasticidad, densidad, permeabilidad. Esta clase de concretos en su mayoría no se alcanzan con el uso de materiales convencionales y sus requisitos involucran mejoras de colocación, compactación sin segregación, propiedades mecánicas a largo plazo, resistencia a edades tempranas, rigidez, estabilidad volumétrica, vida de servicio y durabilidad. Alguna diferencia de materiales que se utilizan para producir concretos de alto desempeño encontramos: El aumento de contenidos de cemento y aditivos reductores de agua Uso de otros aditivos químicos o minerales, tales como la micro sílice, ceniza volante y escoria de alto horno Para producir concretos de alto desempeño deben existir actividades integradas con procesos estandarizados de calidad, desde la obtención de sus insumos, dosificación y precauciones durante los procesos de colocación y curado, ya que el manejo del concreto modifica su desempeño después de fraguado. El comité del ACI encargado del concreto de alto desempeño lo define como aquel que satisface los siguientes requisitos especiales de comportamiento y uniformidad: Facilidad de colocación y acabado sin segregación. Propiedades mecánicas a largo plazo. Desarrollo de resistencia a edades tempranas. Ductilidad. Estabilidad volumétrica. Larga vida de servicio en condiciones ambientales severas

Las propiedades típicas de los concretos de alto desempeño pueden involucrar alta resistencia a la compresión, alto módulo de elasticidad, así como manejabilidad y larga vida de servicio en condiciones medioambientales severas. No se puede afirmar que concretos con resistencias a la compresión inferiores a 42MPa tengan un mal desempeño; el alto desempeño identifica el incremento de cualidades que favorecen a un tipo de estructura, sometida a sollicitaciones específicas de diseño estructural y preservación en el tiempo. En la industria de la construcción mexicana



las obras se construyen con concretos de resistencia a la compresión normal de 21MPa y/o 25MPa. Se piensa que es un concreto económico y que equivocadamente satisface los requerimientos de cualquier tipo de obra. Concretos con mayor desempeño que el de 21 MPa, pueden significar un proceso de adaptación a estructuras sostenibles y duraderas en el tiempo que no requerirán mayor inversión en mantenimiento.

Diferencia entre concreto de alto desempeño vs concreto de alta resistencia.

El concreto tiene una variedad de propiedades que se pueden mejorar de acuerdo al proyecto, las cuales se pueden dividir en tres grandes categorías:

1. Incrementar las propiedades mecánicas como la resistencia y el módulo de elasticidad
2. Desarrollo de propiedades no mecánicas como durabilidad
3. Perfeccionamiento del proceso constructivo de colocación y compactación

A diferencia de los concretos que buscan la alta resistencia, los concretos de alto desempeño son diseñados para satisfacer los requerimientos de los proyectos con una, con dos o las tres categorías mencionadas.

Los concretos de alto desempeño buscan cumplir con requisitos de uniformidad que difícilmente se pueden alcanzar rutinariamente con el uso de materiales convencionales y prácticas normales de mezclado, colocación y curado. Con el alto desempeño se busca obtener un material que en estado fresco presente manejabilidad, por razones económicas y calidad constructiva y que en estado endurecido se comporte como una mezcla homogénea, con elevada compacidad, estabilidad y durabilidad. El hecho de buscar un elevado nivel de resistencia trae como consecuencia diversos factores, como el empleo de materiales seleccionados y bajas relaciones agua/material cementante, que propicia una estructura menos porosa, de baja permeabilidad, más durable, logrando así la condición de los concretos de alto desempeño.



Existen casos en los cuales un concreto de alta resistencia al no tomarse las medidas necesarias, no alcanza un alto desempeño. Para obtener bajas relaciones agua /material cementante y por consiguiente alta resistencia y desempeño, requiere el uso de aditivos fluidificantes que reducen considerablemente la cantidad de agua, conservando o incrementando su fluidez. Al igual que la incorporación de adiciones minerales, como las cenizas volantes (fly ash) y, sobre todo, el humo del sílice (silica fume), permitirá una mayor obturación de poros y un mejoramiento de la interface matriz-agregado, aumentando así la capacidad de la mezcla. El empleo de concretos de alta resistencia y de alto desempeño permiten estructuras innovadoras, con mayor calidad, durables y de alto rendimiento constructivo; gracias a las adiciones minerales, aditivos fl La mayor parte de las propiedades que se desean para el concreto dependen de la calidad de la dosificación de la mezcla y el primer paso consiste en la selección óptima de la relación agua/material cementante, los cuales se basan en dos criterios: resistencia y durabilidad. Sin embargo es importante que la relación agua/ material cementante, con base a la resistencia, posea un comportamiento durable ante las condiciones de exposición.

La relación de agua/material cementante incide en los coeficientes de retracción y de fluencia, determinando la estructura interna del concreto. Cuanto mayor sea la existencia de agua en exceso habrá mayor cantidad de capilares y son tan numerosos que están unidos entre sí formando una red permeable en el concreto. La porosidad incrementada debido a un aumento de la relación agua / material cementante acarrea una disminución de la compacidad y en consecuencia de la resistencia del concreto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte de las adiciones a las mezclas de concreto

2.1.1. Adición de las fibras de acero a mezclas de concreto

Actualmente el desarrollo del concreto con la adición de fibras de acero, ha tenido un auge importante en México, entre sus aplicaciones más comunes se tienen



desde el refuerzo de pisos industriales, comerciales y pistas de aeropuertos, hasta el refuerzo de túneles y la estabilización de taludes, a través de concreto lanzado. Las fibras metálicas adicionadas al concreto han demostrado mejorar el desempeño mecánico y su capacidad estructural. Las fibras pueden reemplazar el uso de las mallas electrosoldadas para el refuerzo del concreto, dependiendo de la calidad y del tipo de fibra que se utilice. En ocasiones, este producto se utiliza como complemento de las mallas electrosoldadas, dependiendo de los intereses y gustos de los constructores y de la obra que se quiera reforzar. Las fibras metálicas para el refuerzo del concreto, no sólo pueden reemplazar las mallas electrosoldadas, sino que también pueden disminuir los costos en los que se incurre si sólo se utiliza malla para el mismo fin. El trabajo con fibra se hace mucho más sencillo, teniendo en cuenta el manejo y el armado del armazón de las mallas, por lo que se hace, para el constructor, más rentable utilizar fibra por el ahorro en la mano de obra; al utilizar fibra no se generan desperdicios de material, lo que sí puede suceder si se utiliza malla, tampoco exige inversiones importantes para el transporte y almacenamiento, como sí lo hacen las mallas electrosoldadas.

El uso de fibras metálicas y sintéticas en el refuerzo del concreto puede ser complementario, estos tipos de fibras juntos son una excelente mezcla para evitar fisuras en estado fresco o plástico y limitar las fisuras que se pueden generar en estado endurecido, como se menciona anteriormente. (Estudio de factibilidad para producción de fibras de acero para refuerzo del concreto 2016)

Las siguientes ilustraciones muestran el comportamiento a compresión en cilindros que tienen las mezclas de concreto con la adición de fibras en un 12 y 14% en función del volumen del concreto y sin ellas.



Resistencias a la compresión de los cilindros

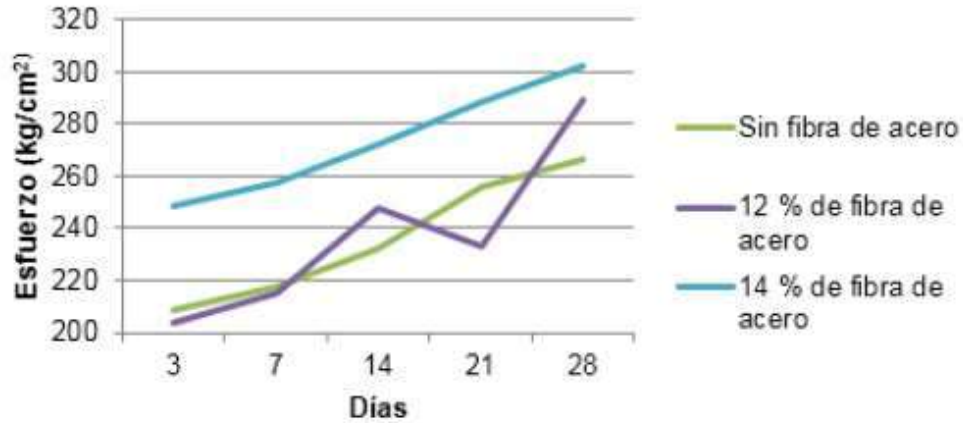


Ilustración 1. Evolución de las mezclas de concreto adicionadas con diferente porcentaje de fibras de acero Fuente. (COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO ZP-306 SOMETIDO A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Gallo-Arciniegas, González Peñuela, & Carrillo León, 2013))

En la Ilustración 1 se muestra una mejora en la resistencia a la compresión de los cilindros con fibra de acero con respecto a los cilindros sin fibra, notándose que la mezcla con adición del 14 % fue la más alta, superando en un 13,65 % la capacidad de resistencia a la compresión de la mezcla de concreto sin adición.

2.1.2. Adición de Sílice

La sílice, debido a su extrema finura además de su contenido de sílice, tiene un importante papel en las reacciones internas de la pasta de hormigón. Su uso se incrementó en la producción de hormigones de alto desempeño en la década de los 80's y 90's.

La sílice (o humo de sílice) suele definirse como una excelente puzolana por las propiedades que proporciona al cemento. Según el ACI 116R el humo de sílice se define como un “muy fino y no cristalino sílice producido en hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio o de aleaciones elementales que contienen silicio; también es conocido como humo de sílice condensado o



microsílice. Es un mineral compuesto de Dióxido de silicio amorfo y ultrafino, que resulta del proceso de obtención de ferrosilicio o silicatos, involucrando la reducción en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000°C.

Al ser tan pequeñas las partículas, estas actúan como un filler llenando los espacios vacíos en la pasta haciendo que el concreto tenga mayores propiedades adherentes, creando mayor compacidad a la vez que brinda más fluidez a la mezcla. Además ayuda a reducir la exudación de agua en la superficie y proporciona reducciones significativas en la permeabilidad del hormigón y, al ser menos permeable, incrementa también la durabilidad del mismo. En cuanto a la resistencia del concreto se han determinado aumentos significativos desde 20 a 50% obteniendo mayores beneficios con el uso de súper plastificantes. Al hacer uso de éstos los contenidos normales de sílice varían entre el 5% y el 15% del peso del cemento. Otra de las propiedades que brinda el uso de sílice como adición es el incremento de la resistencia al ataque de sulfatos y cloruros, reduce casi hasta eliminar una probable reacción álcali sílice. Todo esto se traduce en mayor durabilidad en los elementos en los cuales se emplee esta adición y que estén sometidos a climas extremos tales como hielo-deshielo, etc. Otro aspecto importante es la disminución de pH que produce la adición de sílice en la que reduce este parámetro de manera significativa que dependerá del porcentaje que se adicione o se sustituya en función de la masa del cemento. ((Uso de Sílice en concretos de Alto Desempeño. Luis Allauca, Hugo Amen, Jessica Lung, 2015))

2.2. Modelos de durabilidad propuestos en la literatura.

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, 1982).

Es decir:

$$t_{\text{vutil}} = t_i + t_p$$

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 para este desarrollo de 50 o 60 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:

- a) La resistividad refleja la porosidad del concreto y la tortuosidad de los poros capilares, siempre y cuando el concreto se encuentre totalmente saturado.
- b) La resistividad varia 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 concreto 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).



2.2.1. 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:

$$Def = \frac{kcl}{\rho_{ef}} \quad (1)$$

Donde:

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

kcl = 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:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{ef}} \quad (2)$$

Donde:

σ = Conductividad (inversa de la Resistividad).

ρ_{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):

$$Def = \rho_{ef} * \sigma \quad (3)$$



2.2.2. 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 (DURAR, 2000):

$$X_{cl} = K_{cl}\sqrt{t} \quad (4)$$

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 (DURAR, 2000):

$$K_{cl} = \frac{X_{cl}}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

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

$$K_{cl} = V_{cl} \quad (6)$$

Donde:

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

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



Tomando en cuenta la ecuación siete, la cual se sustituye en la ecuación número 4, se tiene que:

$$X_{cl} = V_{cl}\sqrt{t} \quad (7)$$

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):

$$V_{cl} = \sqrt{D_{ef}} \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación número nueve en la ecuación número siete:

$$X_{cl} = \sqrt{D_{ef}}\sqrt{t} \quad (9)$$

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 nueve:

$$t = \frac{X_{cl}^2}{D_{ef}} \quad (10)$$

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 diez se podría reescribir como:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2}{D_{ef}} \quad (11)$$

Sustituyendo la ecuación número uno en la ecuación número once:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2}{\frac{K_{cl}}{\rho_{ef}}} \quad (12)$$



Expresada de otra forma:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{K_{cl}} \quad (13)$$

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 veintiocho 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. Factor de retardo (r_b).

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):

$$r_{b, cl} = \frac{D_{ef, cl}}{D_{ap, cl} P} \quad (14)$$

Donde:

r_b , = Factor de retardo.

D_{ef} , = Coeficiente de difusión en estado estacionario referido a cm^3 de fase acuosa, en cm^2 / s .



D_{ap} , = 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:

	Tipo de Cemento	Factor de retardo
CLORUROS	Tipo I	1.30
	Tipo II y III/A	1.50
	Tipo III/B, III/C y IV	2.00

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

2.2.4. Resistividad aparente (ρ_{ap}).

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

$$\rho_{ap} = \rho_{ef} * r_b \quad (15)$$

La ρ_{ap} es un parámetro teórico que se ha definido por analogía a la existencia de un coeficiente de difusión efectivo D_{ef} (equivalente a la ρ) que no contempla que haya reacción entre el cloruro y las fases hidratadas del cemento y un coeficiente “aparente” D_{ap} 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, 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:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{K_{cl}} r_{b,cl} \quad (16)$$



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.

$r_{b,cl}$ = 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.

2.2.5. 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:

$$D_{ap,cl} = \frac{F_{exp,cl}}{\rho_{ap}} \quad (17)$$

Sustituyendo la igualdad anterior queda:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{F_{exp,cl}} r_{b,cl} \quad (18)$$

Donde:

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

F_{exp} = Factor de exposición ambiental.

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



rb , = 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} , que pueden ser utilizados en función de la agresividad ambiental y que a la vez son independientes de la resistencia mecánica del concreto son:

Clase de exposición	$F_{exp,cl}$ ($\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$)
XS1 - IIIa-aéreo (> 500 m de la costa)	5,000
XS1 - IIIa-aéreo (< 500 m de la costa)	10,000
XS2 - IIIb	17,000
XS3 - IIIc	25,000

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

2.2.6. 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 la 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:

$$\rho_{ef} = \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0} \right)^q \quad (19)$$



Donde:

$\rho_{ef,0}$ = 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_0 = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad.

q = Es el factor edad.

Finalmente queda:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q}{F_{exp,cl}} r_{b,cl} \quad (20)$$

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.

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_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)

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

t_i = Tiempo de iniciación, en años.



2.2.7. 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:

- a) 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).
- b) 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 .
- 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 ”.
- 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).

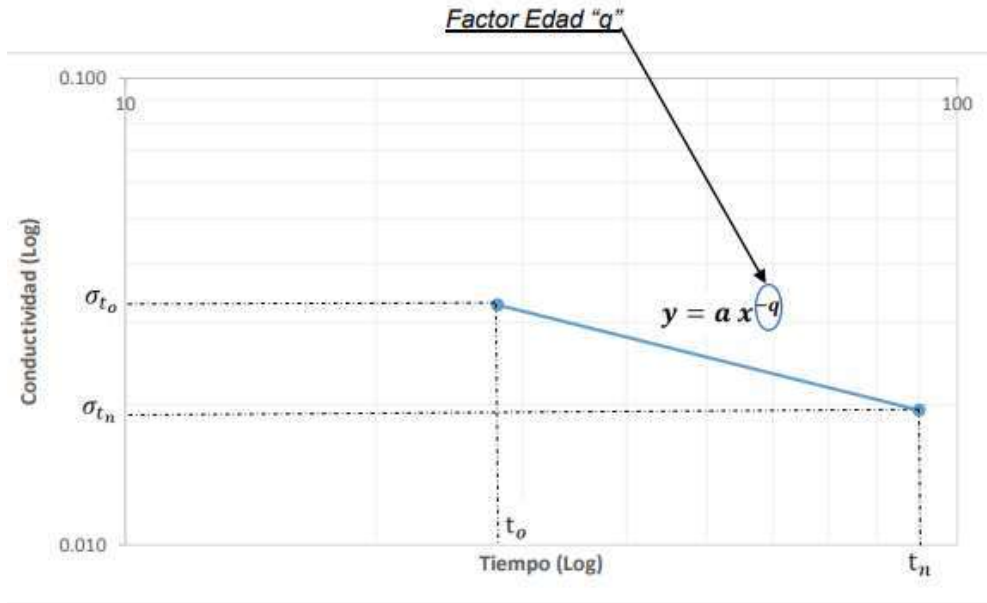


Ilustración 2. Valores de conductividad en los tiempos t_o , t_n y factor edad "q" (escala logarítmica). (Fuente. "MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS Ing. José Alberto Pacheco Segovia)

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).

La elección del tipo de cemento Pórtland a usarse es muy importante para los concretos de alto desempeño, estos deben cumplir con las normas como la ASTM C 150 o C 595, por ser el cemento el componente mas activo del concreto, y teniendo en cuenta que todas las propiedades del concreto dependen de la cantidad y tipo de cemento a usarse es que la selección del tipo a usarse y una adecuada dosificación son muy importantes.

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 e hierro.



Ilustración 3. Esquema del proceso de producción del cemento. (IMCYC 2014)

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

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

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 4, por diversas circunstancias de calidad la normativa cambio para una mejor



resistencia en el concreto y es la que se indica en la Tabla 1. 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 Álcali Agregado)



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

2.3.3. Propiedades del cemento

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

2.3.3.1. Propiedades Físicas

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

- **Densidad:** Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Portland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de cementos



adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 gr/cm^3 .

- **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 super calcinadas. La mayoría de las especificaciones para cemento Portland limitan el contenido de magnesia (periclasa) 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 3.

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:** Prueba que permite 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. Esta prueba está referida a la norma (MX-C-083-ONNCCE-2014), o su equivalente de acuerdo con la norma ASTM C 39-01 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)
- **Resistencia a la tensión indirecta:** Determinar la resistencia a la tensión indirecta de cilindros de concreto y corazones extraídos con barreno. La presente prueba está referida a la norma ASTM-C-496-96
- **Resistencia a la flexión:** Prueba que permite conocer la resistencia a flexión del concreto en vigas moldeadas en el laboratorio o en la obra. 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.

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)

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

Si bien los agregados son los componentes inertes del concreto, su influencia en las características del concreto es notable; sin embargo durante varios años su estudio fue descuidado, debido principalmente, al bajo costo comparativo con el costo del cemento, además de los bajos requerimientos de resistencia, en los cuales los agregados no tienen gran influencia, hoy en día se conoce la influencia del agregado en las propiedades del concreto tanto en estado fresco y endurecido. En los concretos de alto desempeño los agregados deben cumplir las normas como la (ASTM-C-33), caso contrario se deberá comprobar su eficiencia en el concreto. Es recomendable que en una obra, todas las mezclas empleen los mismos 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. Propiedades de los agregados

Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto 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 (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)

2.4.1.1. 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).

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)

2.4.1.2. 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)

2.4.1.3. 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.
- **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.



- **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)

2.4.2. Agregados utilizados en la investigación

Los agregados utilizados en la investigación fueron obtenidos de un banco de materiales en el municipio de Cuto del Porvenir, Michoacán en el banco de materiales conocido como “La Roka”, de grupo de oro, esto debido a que es el agregado triturado más usual en la región.

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) 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-2004) que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 6 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE-2004)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulforesistentes Límites en p.p.m.
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 pre-esfuerzo 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 CaCl₂ 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.



2.6. Materiales en estudio como adición al concreto

Se busca adiciones al concreto para mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad, las adiciones son con materiales de origen industrial como son las fibras de acero, de origen natural como el humo de sílice o sílice y con un origen con modificaciones químicas como es el aditivo superplastificante.

2.6.1. Fibras de acero

Las fibras metálicas o de acero son un aditivo que se distribuye en la mezcla del concreto para brindar un mejor control de agrietamiento durante el asentamiento plástico del concreto y después de que el concreto se ha endurecido. Por lo que su uso se extiende a pisos de concreto que estarán sometidos a cargas considerables, como los comerciales e industriales.

Las fibras metálicas son elementos delgados de longitud corta y diámetro pequeño, que son utilizadas para formar hilos del material para el refuerzo de concreto. Están compuestas de alambre trefilado y acero bajo en carbono. Permiten incluso sustituir por completo el armado tradicional del concreto a base de malla y acero corrugado. Puede ser utilizada como un refuerzo secundario de concreto y mortero lanzado, obteniendo un elevado número de fibras por cada kilogramo, distribuyéndose de manera uniforme y logrando un comportamiento mecánico homogéneo.

Puede ser utilizada en pisos de:

- Industrias
- Bodegas
- Cubiertas para puentes
- Sistema de losa- acero
- Concreto lanzado
- Pistas de aeropuertos



- Pavimentos de tráfico pesado

VENTAJAS

- a) Mejoran la adherencia de la fibra dentro de la matriz del concreto.
- b) Alta resistencia a la tracción.
- c) Aumenta la resistencia al agrietamiento por contracción plástica y por asentamiento.
- d) Provee un refuerzo para concreto uniforme y multidireccional.
- e) Aumenta la resistencia al corte.
- f) Proveen un refuerzo superior que se traduce en juntas y grietas más resistentes.

2.6.2. Fibra de acero utilizada en la investigación

Para esta investigación se usaron fibras onduladas de la empresa “fibras de acero JV”, Estas principalmente, mejoran el módulo de elasticidad del concreto, ayudando al concreto a tener una mejor distribución de esfuerzos internos, provocados por los esfuerzos de contracción por fraguado inicial y esfuerzos de flexión. Las ventajas de adicionar estas fibras al concreto, son:

Mejor comportamiento dúctil

Controla el agrietamiento en su fase de fraguado inicial, como los provocados por esfuerzos externos, una vez que éste ya está endurecido.

Mayor resistencia al impacto, hasta un 2000%.

Mejor desempeño cuando se somete a altas temperaturas.

Mejor desempeño a flexión, la fibra toma los esfuerzos antes de que se presente la primera grieta. En la tabla 5 se describen las propiedades y características de las fibras usadas en la investigación.



Longitud	35 mm
Diámetro	0.60 mm
Fibras por kilogramo	12,000
Forma	Gancho
Tipo de sección	Redonda
Resistencia a la tensión	1350 N/mm ²
Resultado de absorción de energía	1000 joules con 20 kgm /m ³

Tabla 7. Características físico-mecánicas de las fibras de acero. (Fuente Antonio M)

Comportamiento de las fibras.

Cumple con las normas ASTM 1018-ASTM A820 TIPO I Y ACI 506 para concreto lanzado. Dosificación:

Las dosificaciones de fibras se diseñan de acuerdo al elemento que se va a colocar, si se trata de un piso industrial o bien de concreto lanzado por lo tanto varían entre 20 y 30 kg/m³ de concreto que son los más comunes casos de aplicación.

La dosificación usada en proporción al volumen del concreto fue de 20kg/m³

2.6.3. Humo de Sílice o Sílice

El uso de adiciones minerales en el concreto, no es una tecnología reciente, Maliowski reporta un viejo ejemplo que data de 5000-4000 años A. C., la cual fue una mezcla de limos y una puzolana natural, los viejos escritos del ingeniero romano Marcus Vitrubius Pollio, reportan cementos hechos por los griegos y romanos, los que describe como de durabilidad superior, el indica que los romanos desarrollaron técnicas superiores mediante el uso de una combinación de limos y puzolanas. Actualmente, el uso de adiciones minerales al concreto y al cemento, se ha difundido mundialmente, estando en boga el uso de materiales como la ceniza



volante y el filler calizo, este incremento en el uso de estos materiales se debe principalmente a las mejoradas propiedades del concreto tanto en estado endurecido como en estado fresco; este incremento de trabajabilidad, durabilidad y según sea el caso de resistencia, hacen que el uso de adiciones ya sean naturales o artificiales sea muy recomendado para el concreto. La sílice es un subproducto con composición química muy constante, aunque puede tener algunos cambios dependiendo de la aleación de silicio que se está produciendo y la naturaleza de las materias primas. En la composición química predomina el SiO_2 con el 90 al 96%.

2.6.4. Aditivos

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

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

2.6.4.1. Tipos y usos

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

1. Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire).
2. Aditivos reductores de agua.
3. Plastificantes (fluidificantes).
4. Aditivos aceleradores (acelerantes).
5. Aditivos retardadores (retardantes).



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

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

Las razones principales para el uso de aditivos son:

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

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



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

2.6.4.2. Aditivo utilizado en la investigación

Para esta investigación se usó un aditivo súper plastificante llamado **PCE ULTRA** de la empresa ELEMENT5, Este aditivo 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.

Beneficios

Incrementa la resistencia a la tensión y compresión.

Mejora las propiedades reológicas del concreto.

Especialmente diseñado para concretos para elementos prefabricados.

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

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.

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.

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.

2.6.5. Aditivos tipo PCE

Pertenecen a la última generación de superplastificantes, teniendo como antecesores previamente a aditivos del tipo:

Lignosulfonatos

Son la primera generación de aditivos plastificantes para el concreto y son aún bastante utilizados dentro de la tecnología más simple de aditivos. Se extraen del proceso de producción de celulosa dentro de la industria del papel. Se consigue una reducción de agua de aproximadamente el 10%.

Naftalen sulfonatos y melamina sulfonatos

Son la segunda generación de plastificantes para concreto. Los naftalen sulfonatos se extraen del proceso de refinado del carbón. Comparados con los lignosulfonatos proporcionan una mayor reducción de agua, de hasta un 25%. Los aditivos basados en melamina sulfonatos están basados en polímeros sintéticos. La reducción de agua es similar a la de los naftalenos, pero mejoran considerablemente las resistencias a edades tempranas.

Los PCE químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico y ésteres de estos ácidos (comúnmente denominados policarboxilatos modificados) y a



diferencia de los plastificantes tradicionales, son macromoléculas que poseen cadenas laterales que les confieren "forma de peine". La síntesis específica de estas macromoléculas, especialmente de las cadenas laterales, es lo que los hace mucho más específicos, ya que dependiendo de la aplicación concreta que se busque, son capaces de variar enormemente la trabajabilidad del concreto, o bien pueden retrasar o acelerar de forma importante el fraguado, mejorar las resistencias iniciales y/o finales, etc. Con este tipo de aditivos se pueden alcanzar reducciones de agua de hasta el 40%. Todas estas características ofrecen nuevas aplicaciones y hacen que se trate de aditivos óptimos para la confección de hormigones autocompactables, concreto para prefabricados y concretos de alto desempeño.

El incremento de viscosidad plástica que provocan los aditivos superplastificantes basados en PCE es un fenómeno conocido y estudiado, este comportamiento contrasta con el observado en los condensados de naftalensulfonato, los cuales apenas provocan incrementos de viscosidad apreciables incluso cuando son usados a alta dosis, aunque su empleo para la fabricación de CAD no es viable debido a su insuficiente capacidad fluidificante.

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:



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

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

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

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

Procedimiento.

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

- a) Obtención de la muestra representativa de cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.

1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.



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



Ilustración 4. Mezclado de la pasta con las manos (Fotografía Antonio M)



- 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 5. Penetración de la aguja (Fotografía Antonio)

Referencia.

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

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

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

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



Definiciones:

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

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

Temperatura y humedad.

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

Procedimiento y preparación de la pasta de cemento.

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

Moldeado del espécimen.

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



Determinación de los tiempos de fraguado.

3. Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporta 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 soporta la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin que marque huella apreciable. (Ilustración 5)

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 6 Aparato de Guillmore (Fotografía Antonio M.)

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 efectúe reacción química alguna.



Procedimiento:

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



Cálculo:

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

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

Donde:

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

M = masa del cementante hidráulico, en g.

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

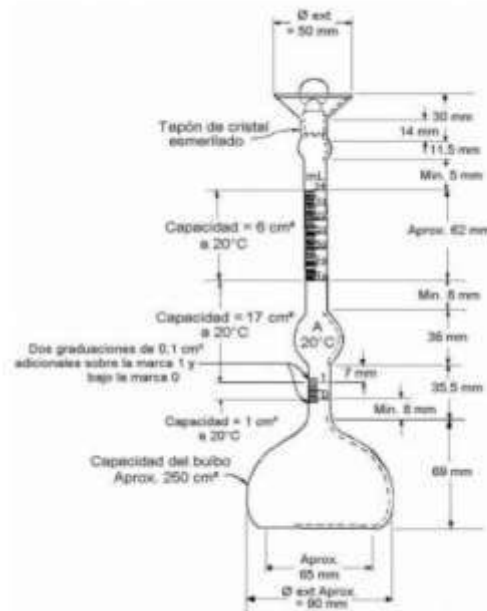


Ilustración 7. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento (Fuente equipo de laboratorio, ilustraciones lamac).

Precisión:

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



3.1.2. Arenas

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.

Ilustración 8. Normas nacionales e internacionales que rigen las prácticas de caracterización del agregado.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04



Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02

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

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

Procedimiento.

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

Método “A”. Cuarteo Mecánico.

Procedimiento para divisor de muestras.



1. Se tomó la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vació sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor (Ilustración 8).
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 8. Agregando el material al divisor de muestras mecánico (Fotografía Antonio M).

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 10).
2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto (Ilustración 12).



3. En el último cambio se traslapa la muestra entera dentro de una pila cónica depositando cada palada sobre la punta superior de la pila.
4. Se aplanan la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala (Ilustración 12).



Ilustración 9. Colocación del agregado en una superficie limpia (Fotografía Antonio M).



Ilustración 10. Homogenización del material (Fotografía Antonio M)



Ilustración 11. Aplanado de la parte superior del material (Fotografía Florentino M).

4. 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 13)



5. Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.
6. Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.



Ilustración 12. División de la muestra en 4 partes iguales (Fotografía J. Méndez).

- Procedimiento con el trozo de plástico.

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

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



de las manos, cogiendo el extremo que está 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.

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 tres capas distribuyendo golpes dados con el pisón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. 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 14)



Ilustración 13. Secado superficial del agregado con ayuda del cono troncocónico (Fotografía Antonio M).

3. Cuando la arena esta seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrándola como masa saturada y superficialmente seca (Mh).



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

Cálculos.

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

Donde:

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

M_s = Masa seca del material. (Gramos).

Referencia.

((NMX-C-164-ONNCCE-2014) ASTM-C-128, 2004.

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

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.
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 15)



Ilustración 14. Llenado y pesado de la muestra en M.V.S.S (Fotografía Antonio M).

Cálculos.

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

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).



Referencia.

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

3.1.2.4. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica seca varillada).

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

Procedimiento.

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 16).
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 15. Llenado y varillado de MVSV (Fotografía Florentino M)



Cálculos a realizar.

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

Dónde:

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

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Referencia.

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

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

La granulometría afecta las porciones relativas del agregado, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del mortero. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no 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.

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta masa constante, a una temperatura de no mayor de 110°C. (Ilustración 17)



Ilustración 16. Muestra representativa a secar en la parrilla (Fotografía Antonio M)

3. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.



4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa (Ilustración 18).



Ilustración 17. Mallas ordenadas en orden decreciente (Fotografía Antonio M).

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 19)



Ilustración 18. Agitado mecánico (Raf-tap) (Fotografía Antonio M).

6. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando las masas en el registro correspondiente (Ilustración 19). Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.(Ilustración 20)



Ilustración 19. Separación de los retenidos en cada malla (Fotografía Antonio M).

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.

El registro debe hacerse en una tabla como la siguiente.

Tabla 8. Ejemplo de tabla para el registro de los datos obtenidos en la prueba de Granulometría
(Fuente manual de prácticas del laboratorio de materiales UMSNH)

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



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

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

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

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

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

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

5. Módulo de finura:

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

Recomendaciones y especificaciones.

Para fines de calidad se recomienda que el Modulo de finura este entre 1.9 y 3.5.

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



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%

Graficas de los límites para concreto y morteros

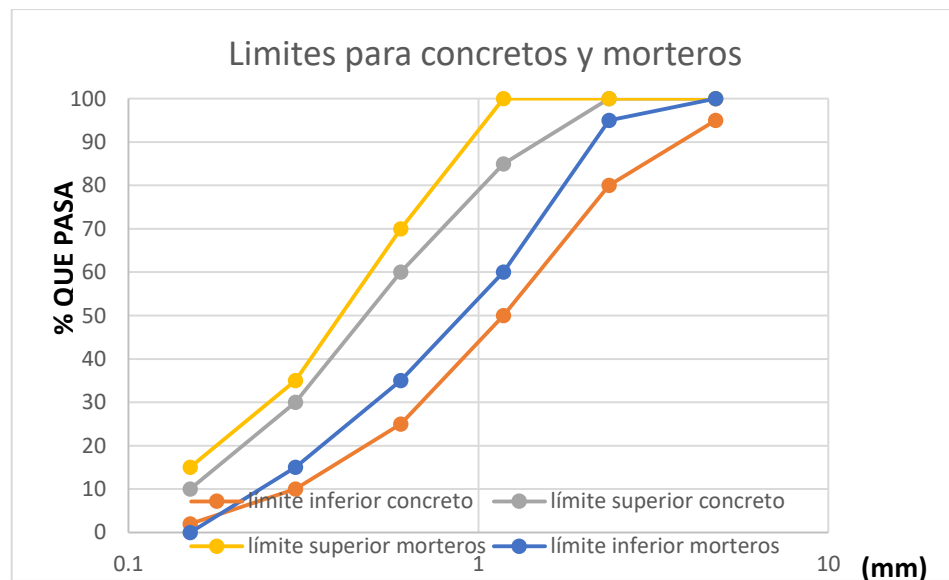


Ilustración 20. Límites de granulometría para morteros y concreto. Fuente (NMX-C-111-ONNCCE, 2004)



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.

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



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



Ilustración 21. Colorimetría en arenas (Fotografía Antonio M)

5. Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo posteriormente se dejará reposar 24 horas. (Ilustración 22)
6. Al cabo de este tiempo se compara el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica. Si no se tiene esta, se compara con el color de la solución normal que se haya hecho en la otra botella idéntica. (Ilustración 23)



Ilustración 22. Tabla de colorimetría (Fotografía Antonio M).



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. 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.

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:

$$DA = \frac{M_a}{V_f - V_i} \quad (9)$$

Dónde:

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

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

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

Utilizando un frasco.

3. Una vez que la muestra del agregado este seco mediante el método descrito en la prueba de absorción.
4. Se introduce agua en el frasco hasta su máxima capacidad y se determina su masa, se registra su valor como B .
5. Se introduce agua al frasco hasta la primera marca.



6. Se pesan 500±10 gramos de la muestra superficialmente seca, registrando este valor como S.
7. Con ayuda de un embudo, e introduce la muestra en el frasco y se le adiciona agua hasta la segunda marca.(Ilustración 24)



Ilustración 23. Vertido de la muestra al frasco de vidrio (Fotografía Antonio M).

8. Se agita el frasco con el fin de expulsar el aire atrapado en la muestra.
9. Se determina la masa del frasco con agua y material y se registra como C. (Ilustración 25)



Ilustración 24. Frascos y vidrios utilizados (Fotografía Antonio M).

Cálculos a realizar.

$$D_r = \frac{A}{B + S - C} \quad (10)$$



Donde:

D_r = densidad relativa o gravedad específica, adimensional.

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

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

S = masa del material superficialmente seco, en g.

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

3.1.3. Gravos

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 existen dos métodos:

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

Referencia.

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

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 400 a 500 g. y se determina su masa, registrándola como masa húmeda (Mh).
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 este 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, posteriormente la pesamos para determinar la masa seca (Ms) en gramos.

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

Dónde:

% H. Actual = Porcentaje de humedad.

Mh =Masa húmeda de la grava en gramos.

Ms = Masa seca en gramos.

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 el 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.

Cálculos

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

Dónde:

D=densidad en g/cm³

M= masa de la grava en g

V= volumen de la grava cm³

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.
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 (Ilustración 26)

. 4. Enseguida se procede a enrasarlo con la varilla punta de bala o con la mano que es más práctico ya que esta enrasado se pesa obteniendo así la masa del recipiente más la masa del material. (Ilustración 27)

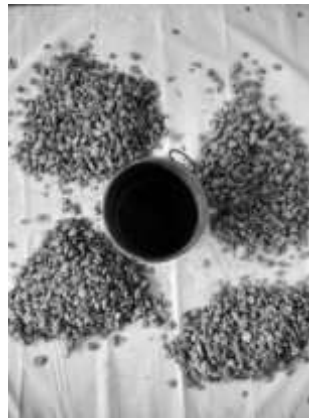


Ilustración 25. Material cuarteado listo para ejecución de prueba (Fotografía Antonio M)



Ilustración 26. Determinación del peso total de la prueba (Fotografía Antonio M)



Cálculos

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

Referencia.

La presente prueba está referida a la norma (NMX-C-073-ONNCCE-2014), 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 28)



Ilustración 27. Proceso de varillado en la tara con el material (Fotografía Antonio M)



Cálculos.

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

Referencia.

La presente prueba está referida a la norma (NMX-C-073-ONNCCE-2014), 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.



Registro.

MALLA	MASA RETENIDA	%RETENIDO	%ACUMULATIVO	%QUE PASA
2"	A2	$A3 = \frac{A2}{MM} * 100$	A4=A3	A5=100-A4
1 1/2"	B2	$B3 = \frac{B2}{MM} * 100$	B4=A4+B3	B5=100-B4
1"	C2	$C3 = \frac{C2}{MM} * 100$	C4=B4+C3	C5=100-C4
3/4"	D2	$D3 = \frac{D2}{MM} * 100$	D4=C4+D3	D5=100-D4
1/2"	E2	$E3 = \frac{E2}{MM} * 100$	E4=D4+E3	E5=100-E4
3/8"	F2	$F3 = \frac{F2}{MM} * 100$	F4=E4+F3	F5=100-F4
1/4"	G2	$G3 = \frac{G2}{MM} * 100$	G4=F4+G3	G5=100-G4
N°4	H2	$H3 = \frac{H2}{MM} * 100$	H4=G4+H3	H5=100-H4
PASA N°4	I2	$I3 = \frac{I2}{MM} * 100$	I4=H4+I3	I5=100-I4
TOTAL	MASA MUESTRA (MM)	$\Sigma(A3 + B3 + \dots + I3) = 100\%$	$\Sigma(A4 + B4 + \dots + I4) = 100\%$	$\Sigma(A5 + B5 + \dots + I5) = 100\%$
1	2	3	4	5

Tabla 10. Formato de registro y cálculo para análisis granulométrico. (Fuente. Antonio M)

Calculo.

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



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.

Al aditivo usado no se le realizó ningún tipo de prueba y/o control de calidad.

3.1.6. Sílice

A este material cementante adicionado al concreto se le practicó una prueba para determinar su pH en la cual se disolvió una cantidad de sílice molido y cribado por la malla 100 en agua con la finalidad de obtener su pH y relacionar el valor de pH en las mezclas de concreto, buscando que este parámetro no bajara de un valor de 9 caso contrario podría causar problemas de corrosión en las fibras de acero.

(Ilustración 29)



Ilustración 28. Lectura del pH a una mezcla de sílice disuelta (Fotografía Antonio M).



3.2. Elaboración de especímenes

3.2.1. Elaboración de cilindros

En esta fase de la investigación se realizaron los especímenes cilíndricos los cuales fueron realizados con un cemento normal CPC 30R Tolteca, en condiciones controladas de laboratorio. A continuación se muestra el proceso de fabricación de los especímenes y sus dimensiones.



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 3/8", charola de mezclado, placa de acero, cono de Abrams, y cubetas.
2. Se elabora la revoltura, empezando por los agregados pétreos, seguidos del cementante y en los casos particulares ya mencionados se agregan el aditivo, el sílice 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 homogeneización



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.

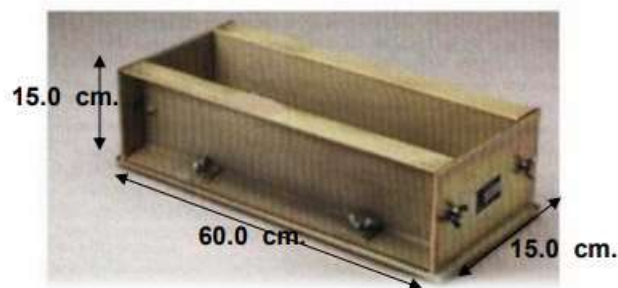
El método de curado que se realizó fue por inmersión.

Referencia.

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

3.2.2. Elaboración de Vigas

En esta fase de la investigación se realizaron los especímenes prismáticos los cuales fueron realizados con un cemento normal Tolteca con características CPC 30 R, en condiciones controladas de laboratorio. A continuación se muestra el proceso de fabricación de los especímenes y sus dimensiones.



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. Como observación se menciona que en todas las mezclas nunca fue necesario el varillado debido a que la mezcla presentaba características de un concreto autocompactable o autonivelable, lo mismo sucedió con cilindros, vigas y cubos.

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.

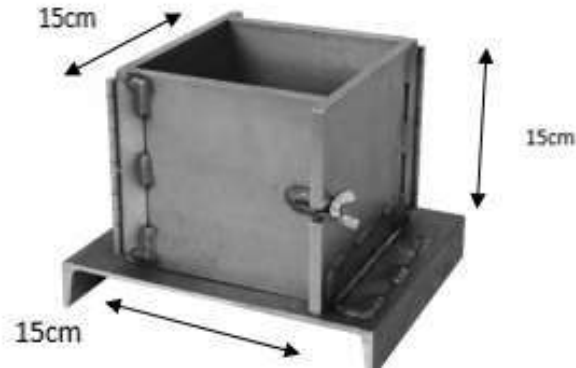
El método utilizado para el curado fue por inmersión.

Referencia.

(NMX-C-159-ONNCCE-2004)

3.2.3. Elaboración de cubos

En esta fase de la investigación se realizaron los especímenes prismáticos los cuales fueron realizados con un cemento normal Tolteca con características CPC 30 R, en condiciones controladas de laboratorio. A continuación se muestra el proceso de fabricación de los especímenes y sus dimensiones.



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 3/8", 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, varillando una vez por cada 7 cm² de superficie, es decir cada capa se penetra 32 veces con la varilla punta de bala de 3/8", distribuyendo de manera adecuada las penetraciones hasta llenar el molde y enrasar. Como observación se menciona que en todas las mezclas nunca fue necesario el varillado debido a que la mezcla presentaba características de un concreto autocompactable o autonivelable, lo mismo sucedió con cilindros vigas y cubos.

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)

3.3. Pruebas no destructivas

3.3.1. Resistividad Eléctrica

El objetivo de este ensayo es la determinación de la Resistividad Eléctrica del Concreto en campo o en el laboratorio.

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 hormigón 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.



Ilustración 29. Equipo para medir la resistividad "Resistometro". (Fuente Antonio M)

La medida de resistividad eléctrica puede efectuarse bien sea: en laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o, directamente sobre la estructura en campo. Los materiales y equipos requeridos son los siguientes:

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con el equipo llamado Resistometro marca Nilsson (Ilustración 29) que mide la resistencia resistividad eléctrica.



Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen se somete este a una corriente dada, (I) y se registra el voltaje, E. la resistencia eléctrica, Re, se calcula como E/I y se expresa en Ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

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

Donde:

A = área transversal del espécimen

L = longitud del espécimen

Re = Resistencia eléctrica

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

Criterios de evaluación:

Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general la siguiente tabla 11:

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

Tabla 11. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica (Fuente (NMX-C-530-ONNCCE-2017))



Ilustración 30. Prueba de Resistividad a espécimen cilíndrico (Fuente Antonio M)

Referencia.

La presenta prueba está referida a la norma (NMX-C-530-0NNCCE-2017)

3.3.2. Velocidad de pulso ultrasónico

Este ensayo no destructivo tiene como principales objetivos: a) Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del hormigón. 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 hormigón a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio. (Ilustración 31 y 32)

Velocidad de pulso. La velocidad de pulso ultrasónico es 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.

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.



Ilustración 31. Lectura de la velocidad de pulso ultrasónico a espécimen cilíndrico (Fuente Antonio M)



Ilustración 32. Medición de velocidad de pulso ultrasónico a espécimen prismático para corroborar homogeneidad en la mezcla (Fuente Antonio M)

La tabla 12 muestra los valores y su descripción para VPU según la norma NMX-C-275-ONNCCE-2019.



Velocidad de pulso	Descripción
>4500 m/s	Durable
3500-4500 m/s	Alta calidad
2500-3500 m/s	Mediana calidad
<2500 m/s	Baja calidad

Tabla 12. Valores de Velocidad de pulso ultrasónico aun normativa. (Fuente (NMX-C-275-ONNCCE-2019))

Referencia.

(NMX-C-275-ONNCCE-2019)

3.4. Pruebas destructivas

3.4.1. 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 pasen por el centro de la placa superior de apoyo.

Que la placa suplementaria cuando se use y el centro del espécimen esté directamente debajo del centro de la placa con apoyo esférico.

4. Aplicación de carga. La carga se aplica continuamente y sin impacto a una velocidad uniforme debe de anotarse la carga máxima aplicada que indique la máquina de ensaye en la falla, el tipo de falla y la apariencia del espécimen.(Ilustración 33)

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

$$T = \frac{2P}{dL\pi} \quad (11)$$

Dónde:

T = resistencia a tensión indirecta en kg/cm².

P = carga aplicada máxima en kg.

L = longitud en cm.

d = diámetro en cm.



Ilustración 33. Ensayo de espécimen a tensión indirecta. (Fuente Antonio M)

Referencia.

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

3.4.2. Resistencia a la compresión simple en prismas cúbicos.

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 kg/cm²/s. 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 porcentaje 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 35)

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



Ilustración 34. Aplicación de carga para prueba de compresión en especímenes prismáticos.

(Fuente Antonio M)



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.

3.4.3. Resistencia a la flexión en vigas

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).

2. Se determinaran las dimensiones del espécimen, ancho y peralte promedio del espécimen en la sección de falla, (Ilustración 35) 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:

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

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



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

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

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm².

P = Carga de ruptura en kg.

L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

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

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



Ilustración 35. Especímenes prismáticos para ensayar en prueba a flexión. (Fuente Antonio M)

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.



3.5. Diseño de Mezclas

3.5.3. Dosificación del concreto

La dosificación de los materiales para el concreto debe establecerse para lograr:

(a) Trabajabilidad y consistencia que permitan colocar fácilmente el concreto dentro del encofrado y alrededor del refuerzo bajo las condiciones de colocación que vayan a emplearse, sin segregación ni exudación excesiva.

(b) Resistencia a exposiciones especiales.

(c) Conformidad con los requisitos del ensayo de resistencia. La relación agua/material cementante seleccionada debe ser lo suficientemente baja, o la resistencia a la compresión lo suficientemente alta, en el caso de concreto liviano, como para satisfacer tanto los criterios de resistencia como los requisitos para exposición especial o durabilidad. El reglamento no incluye disposiciones sobre condiciones de exposición especialmente severas, tales como la exposición a ácidos o altas temperaturas, ni sobre consideraciones estéticas, tales como acabado de superficies. Estos puntos están fuera del alcance del reglamento y deben estar específicamente cubiertos en las especificaciones del proyecto. Los componentes y la dosificación del concreto deben seleccionarse de manera que puedan cumplir con los requisitos mínimos establecidos por el reglamento y con los requisitos adicionales de los documentos contractuales.

3.5.4. Método ACI (American Concrete Institute)

El Instituto Americano del Concreto es una organización sin ánimo de lucro de los Estados Unidos de América que desarrolla estándares, normas y recomendaciones técnicas con referencia al concreto reforzado. Se fundó en 1904 y su sede central se halla en Farmington Hills, Michigan, este instituto desarrollo un



método para el diseño de mezclas de concreto con distintas características y propiedades físico-mecánicas.

El reglamento hace hincapié en el empleo de la experiencia de obra o de mezclas de prueba de laboratorio como el método preferido para seleccionar la dosificación del concreto. Existen diversos métodos para el diseño de mezclas, como lo son el método del American Concrete Institute (ACI), el método de las Curvas de Abrams, por mencionar algunos.

Esta investigación se basó en el método del American Concrete Institute (ACI) para el diseño de mezclas, debido a que es un método amigable con las pruebas a realizarse, y su sistema de cálculo es confiable, cabe mencionar que la elección del método de diseño de mezclas a utilizar es cuestión también de gustos. El método del ACI es un método de diseño de mezclas de concreto normal que se basa en las propiedades físicas de los materiales como lo son: la Densidad, Masa Volumétrica Seca y Suelta, Masa Volumétrica Seca y Varillada, % de Absorción, % de Humedad Actual, Módulo de finura, y Tamaño Máximo del agregado, estas propiedades las usa para obtener la cantidad necesaria del concreto por unidad de volumen para un concreto de peso normal. Este procedimiento tiene en consideración los requisitos para la facilidad de colocación, la coherencia, fuerza y durabilidad.

3.5.5. Condiciones generales del proyecto

Elaborar y evaluar mezclas de concreto con distintas adiciones para que puedan ser catalogadas de alto desempeño. En este método se utiliza el método del volumen absoluto, que es generalmente aceptado y es más conveniente para el concreto de peso pesado. El método de volúmenes absolutos se utiliza debido a su general aceptación. El cálculo de las cantidades de material se realizó para cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura respetando la relación ancho-espesor 1:2, cubos prismáticos de 15x15x15cm y vigas con dimensiones de 15x15x60 con una mezcla sin aire incluido. Con un revenimiento de proyecto de 10 cm y un $f'c$ de proyecto inicial de 420 kg/cm², sin embargo la relación agua/cemento (a/c) se



disminuyó hasta un valor de 0.30, con la finalidad de alcanzar resistencias elevadas a tempranas edades con la incorporación del aditivo tipo PCE y aún más a edades tardías, la cual era una de las consignas del proyecto; alcanzar resistencias altas, mejorar el comportamiento de concretos tradicionales e implícitamente características de durabilidad. Se desarrollaron en total 4 mezclas de concreto con las siguientes características:

La primera de ellas que sería la llamada “mezcla testigo” con la adición del aditivo Superplastificante en 4cm³/kg de cemento, cabe señalar que se decidió la incorporación en esta mezcla del aditivo ya que en base a la relación a/c que se trabajó (0.3) sería prácticamente imposible realizar la mezcla con el agua que arrojara el diseño.

La segunda mezcla fue realizada con la adición de las fibras de acero con una dosificación de 4kg/m³ de concreto en función a la ficha técnica de la misma, se manejó la misma cantidad de aditivo.

La tercera mezcla estuvo adicionada con un 10% de Sílice en función de la masa del cemento y de igual forma el aditivo.

La cuarta y última mezcla fue incorporada con todos los elementos, es decir: fibras de acero, sílice y el aditivo superplastificante.

Cabe señalar que todas las mezclas desarrolladas contaron con una constante; el aditivo superplastificante que ayudo con mucho en la trabajabilidad de las mezclas, en cada una de las mezclas se colaron 12 especímenes cilindros de 10x20cm, 6 vigas con dimensiones de 15x15x60 cm y 18 prismas cúbicos de 15x15x15cm.

3.5.6. Metodología del diseño de mezclas

PASO UNO: Elección del revenimiento

PASO DOS: Elección del T.M del agregado

PASO TRES: Calculo del agua de mezclado y contenido de aire

PASO CUATRO: Selección de la relación agua/cemento



PASO CINCO: Calculo del contenido de cemento

PASO SEIS: Estimación de contenido de agregado grueso

PASO SIETE: Estimación de contenido de agregado fino

PASO OCHO: Ajuste por humedad del agregado pétreo

PASO NUEVE: Ajuste de las mezclas de la prueba

PASO DIEZ: Calculo de las cantidades a usar de acuerdo a los especímenes necesarios

3.5.6.1. Dosificación del concreto empleado

3.5.6.2. Cálculo

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES						absorción	h actual
MATERIAL	PVSS(kg/m ³)	PVSV(kg/m ³)	DU(gr/cm ³)	MF	TM	%	%
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 13. Características de los materiales (Fuente Antonio M)

1.- Elección del Revenimiento.= 10 cm

TABLA 1

REVENIMIENTOS RECOMENDADOS PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCÓN

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	REVENIMIENTO EN CENTÍMETROS	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de Sub-estructura sencillos.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados.	10	2.5
Columnas para edificios.	10	2.5
Pavimentos y losas.	7.5	2.5
Concreto masivo.	7.5	2.5

*Puede incrementarse en 2.5 cm. Cuando los métodos de comparación no sean mediante



Vibrado.

Tabla 14. Elección del revenimiento (Fuente Antonio M)

2.- Elección del T.M del agregado= $\frac{3}{4}$ " (análisis granulométrico)

3.- Calculo del agua de mezclado y contenido de aire = 205kg/m³

TABLA 2								
REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑOS MÁXIMOS 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"
ò	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Revenimiento en centímetros	Concreto sin aire incluido							
ò								
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 (%)								
ò								
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



Tabla 15. Calculo del agua de mezclado (Fuente Antonio M)

4.- Selección de la relación agua/cemento =0.41

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	Concreto
	Sin aire incluido	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

Tabla 16. Selección de la relación agua/cemento (Fuente Antonio M)

5.- Calculo del contenido de cemento =500kg/m³

PASO CINCO: CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO			
Solo despejamos el cemento de la relación anterior			
A/C=	0.41		
AGUA=	205	litros	
	Cemento para 1 m ³ =		500.000 kg

Tabla 17. Selección del contenido de cemento (Fuente Antonio M)



6.- Estimación de contenido de agregado grueso=931.74kg

PASO SEIS: ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO					
Se hace uso de la tabla 4 para determinar el peso del agregado tomando en cuenta la humedad					
TM=	3/4 "	G=	0.582		
MF=	3.18			GP=	931.75 kg

Tabla 18. Selección del contenido de agregado grueso (Fuente Antonio M)

Para encontrar el valor de “G” se hace una interpolación no lineal para encontrar el valor desconocido, en el cual interviene implícitamente el módulo de finura y el PVSV de la grava.

X1	3	-----	0.6	Y1
Xmf	3.18	-----	0.582	
X2	3.2	-----	0.58	Y2

7.- Estimación de contenido de agregado fino=783.448kg

En este paso del diseño de la mezcla se decidió disminuir la relación a/c de 0.41 a 0.3, para lo cual se mantuvo constante el peso del cemento igual a 500kg y la ecuación se igualo a 0.3 para encontrar el valor correspondiente de agua para esa relación de la siguiente manera.

$$\frac{a}{c} = 0.3$$

Donde:

c= cemento= 500kg

a=valor del agua a encontrar con la relación igual a 0.3

Despejando el agua queda.

$$a = 0.3 * c$$

$$a = 0.3 * 500 = 150\text{kg}$$



Este valor se usó en el cálculo del proporcionamiento como sigue.

CANTIDAD PARA UN METRO CÚBICO			
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m³)
CEMENTO	500.000	3.130	0.160
AGUA	150.000	1.000	0.150
AIRE	0.000	0.000	0.020
ARENA	783.448	2.400	0.326
GRAVA	931.749	2.710	0.344
TOTAL	2365.197		1

Tabla 19. Selección del contenido de agregado fino (Fuente Antonio M)

8.-Ajuste por humedad del agregado pétreo.

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%
CANTIDAD DE HUMEDAD EN ARENAS=			-6.20%
			factor de corrección
			factor de corrección

Tabla 20. Factores de corrección por humedad de absorción (Fuente Antonio M)

9.-Ajuste de las mezclas de la prueba

CANTIDADES DE MATERIALES CORREGIDAS PARA UN METRO CÚBICO					PARA 1 BTO
MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDAD	VOL (m3)	RELACIÓN EN PESO	50.00 kg
CEMENTO	500.000	3.130	0.160	1	50
AGUA	217.209	1	0.217	0.434	21.721
AIRE	0	0	0.020	-----	-----
ARENA	734.875	2.400	0.306	1.470	73.487
GRAVA	913.114	2.710	0.337	1.826	91.311
TOTAL	2365.197	-----	1	-----	-----

Tabla 21. Cantidades finales ajustadas para 1m3 de concreto (Fuente Antonio M)



10.- Calculo de las cantidades a usar de acuerdo a los especímenes necesarios considerando un 10% de desperdicio.

Cilindros.

h=	0.20 m		
D=	0.10 m		
VOLUMEN DE UN CILINDRO=		0.0016	m ³
	PARA	12	CILINDROS
1.000	m ³	0.020735	m ³
MATERIALES	PESO (kg)		
CEMENTO	500.000	10.367	
AGUA	217.209	4.504	
AIRE	0	0	
ARENA	734.875	15.237	
GRAVA	913.114	18.933	
TOTAL	2365.197	49.041	

Tabla 22. Cantidades para un total de 12 cilindros de 10x20cm (Fuente Antonio M)

Vigas.

ALTURA	0.15
ANCHO	0.15
LARGO	0.60

VOLUMEN DE UNA VIGA=	0.0135	m³
	PARA	6
1.000	m ³	0.0891
MATERIALES	PESO (kg)	Kg (+20% DE DESPERDICIO)
CEMENTO	500.000	44.55
AGUA	217.209	19.35
AIRE	0	0
ARENA	734.875	65.48
GRAVA	913.114	81.36
TOTAL	2365.197	210.74

Tabla 23. Cantidades para un total de 6 vigas de 15x15x60cm (Fuente Antonio M)



Cubos.

Cubos	18	0.066825
		0.066825
MATERIALES	PESO (kg)	KG
CEMENTO	500	33.4125
AGUA	217.2087777	14.51497657
AIRE	0	0
ARENA	734.8746054	49.1079955
GRAVA	913.1138495	61.01883299
TOTAL	2365.197233	158.0543051

Tabla 24. Cantidades para un total de 18 de 15x15x50cm (Fuente Antonio M)

TOTAL	KG	Proporcionamiento
CEMENTO	88.330	18 cubos
AGUA	38.372	12 cilindros
AIRE	0	6 vigas
ARENA	129.823	
GRAVA	161.3102	
TOTAL	417.835	

Tabla 25. Cantidades totales por colada (Fuente Antonio M)

3.6. Elaboración de Mezclas.

En la investigación presente se elaboraron diferentes mezclas, todas ellas diseñadas por el método del ACI, mencionado con anterioridad, en cada una de las mezclas se realizaron especímenes cilíndricos y especímenes prismáticos.

MEZCLA 1:

La mezcla 1 llamada testigo se realizó con el proceso y diseño en base al ACI antes ya mencionado, la cual se diseñó con una relación $a/c = 0.3$ y con la incorporación de un aditivo superplastificante PCE ULTRA debido a que la cantidad de agua calculada en el diseño para esa relación a/c no era suficiente para garantizar una buena trabajabilidad en ella, por lo tanto se añadió el aditivo en una proporción de 4ml/kg de cemento, esta mezcla testigo servirá para comparar con las demás



mezclas. Cabe señalar que todas las mezclas tuvieron la incorporación del aditivo como una constante.

MEZCLA 2

La segunda mezcla fue realizada con las mismas características pero adicionada además del aditivo con fibras de acero, esta adición se hizo de acuerdo a la ficha técnica de las mismas, la cual menciona que se añaden en una proporción de 20kg/m³ de concreto. Para esta mezcla se calcularon 0.2m³ por lo tanto se adicionaron 4kg de fibras de acero.

1m³ de concreto -----20kg/m³ de concreto

0.2m³ de concreto ----- X cantidad de fibras

$$\text{cantidad de fibras} = 0.2\text{m}^3 * \frac{20\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ de concreto} = 4\text{kg de fibras} \quad (10\%)$$

MEZCLA 3

Esta se adiciono con en un 10% de sílice por la masa del cemento mismo que fue puesto por lapsos de 20 min en la máquina de desgaste de los ángeles para obtener un material más fino, hecho esto se procedió a pasar el material por la malla 100 debido a que por la malla 200 no pasaba material suficiente para la experimentación. Se decidió añadir el 10% para mejorar propiedades de durabilidad y para no alterar el pH de la mezcla debido a que la sílice es un material ácido y en exceso podría causar problemas de corrosión. También se adiciono con aditivo esta mezcla.

$$\text{cantidad de silice} = \text{Cemento} * 0.1$$

$$\text{cantidad de silice} = 88.33 * 0.1 = 8.833\text{kg} \quad (10\%)$$



MEZCLA 4

Esta última mezcla tuvo la combinación de todos los elementos: Aditivo, Fibras y sílice todos materiales con las proporciones anteriormente mencionadas con la finalidad de evaluar el comportamiento en conjunto.

4. Análisis de resultados y discusiones

4.1. Cemento

Resultados de pruebas en cemento	
Prueba	Resultado
Densidad	3.13 gr/cm ³

Tabla 26. Resultados de pruebas en el cemento (Fuente Antonio M)

4.2. Agregados

Resultados de pruebas en arena	
Prueba	Resultado promedios
Humedad de absorción (NMX-C-164-ONNCCE-2014)	6.20%
Humedad actual (NMX-C-166-ONNCCE-2006)	0.0%
Masa volumétrica seca suelta (NMX-C-073-ONNCCE-2014)	1290.84 kg/m ³
Masa volumétrica seca varillada (NMX-C-073-ONNCCE-2014)	1424.60 kg/m ³
Módulo de finura (2.3-3.2)	3.18



Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE-1997)	Escala 3 (aceptable)
Densidad de arena (2.15 Aceptable)	2.4gr/cm³

Tabla 27. Resultados de pruebas en agregado fino. (Fuente Antonio M)

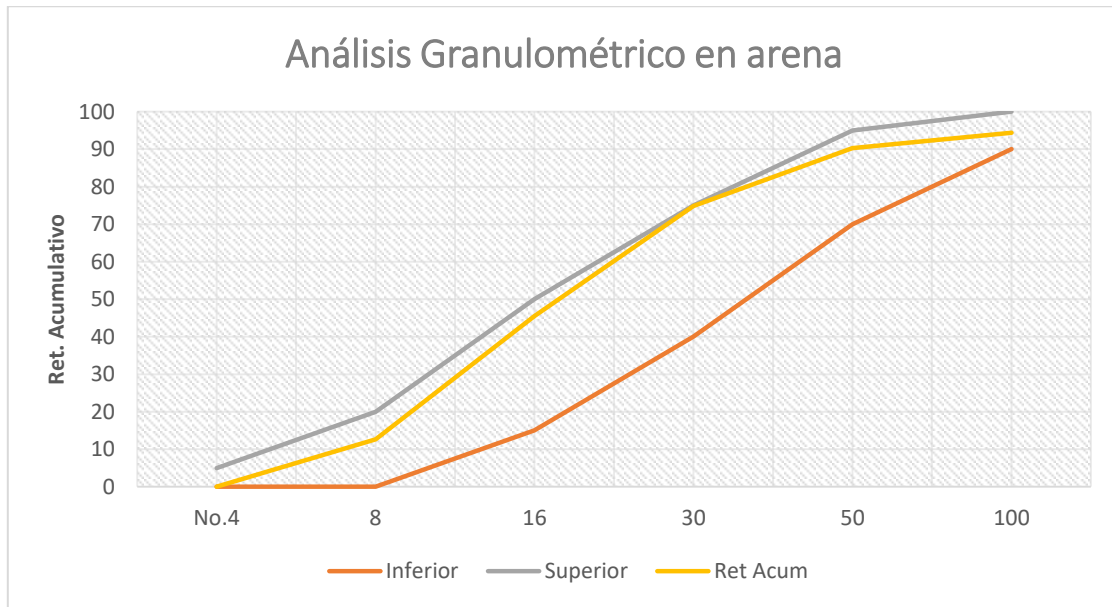


Ilustración 36. Análisis granulométrico de arena usada en la investigación. (Fuente Antonio M)



Resultados de pruebas en gravas	
Prueba	Resultados promedios
Humedad de absorción (NMX-C-164-ONNCCE-2014)	2.00%
Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE-2006)	0.00%
Masa volumétrica seca suelta (NMX-C-073-ONNCCE-2014)	1441.27 kg/m ³
Masa volumétrica seca varillada (NMX-C-073-ONNCCE-2014)	1600.94 kg/m ³
Densidad (NMX-C-164-ONNCCE-2014)	2.71 gr/cm ³

Tabla 28. Resultados de pruebas en agregado grueso. (Fuente Antonio M)

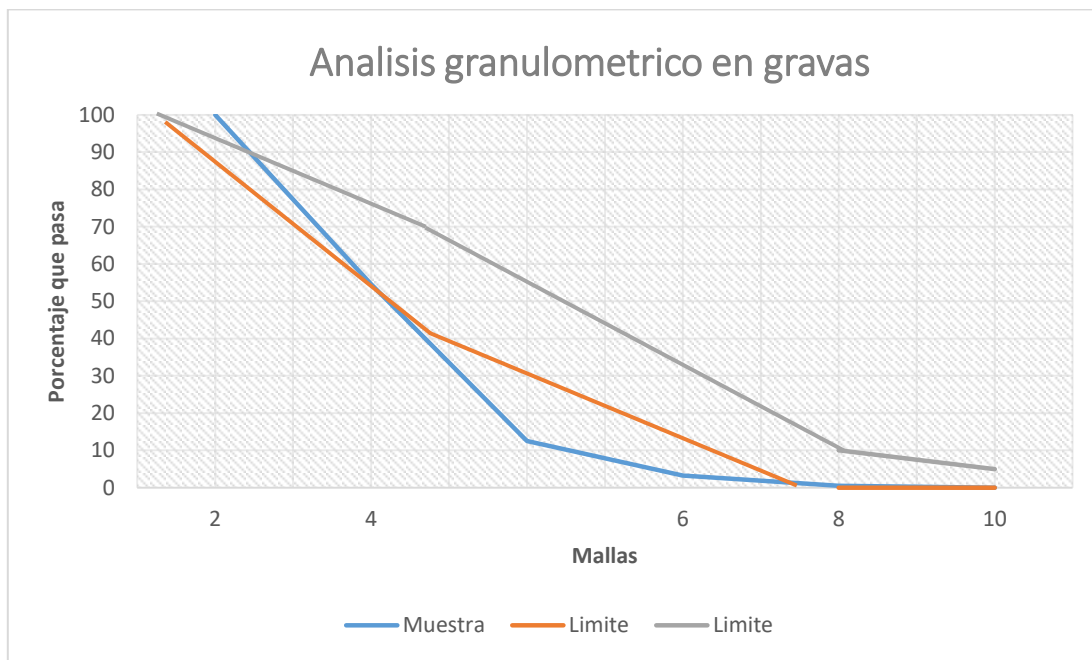


Ilustración 37. Análisis granulométrico de grava usada en la investigación. (Fuente Antonio M)

En la ilustración 37 se concluye que la grava usada en la investigación no cumple con los requisitos de graduación, sin embargo se continuó usando debido a que es el agregado más común y usado en la región del estado de Michoacán.



4.3. Sílice

Se le realizó una disolución en agua para obtener su pH en estado natural obteniéndose un pH=6 (Ilustración 39)



Ilustración 38. Lectura de pH a una solución de agua y sílice (Fuente Antonio M)

4.4. Resultados de pruebas a mezclas en estado fresco

Mezcla 1, Testigo

Resultados de pruebas a mezclas en estado fresco	
Parámetro	Valor y/o resultado
Revenimiento	25 cm
Temperatura	29°C
pH	13

Tabla 29. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 1. (Fuente Antonio M)



Ilustración 39a y 33b. Consistencia de las mezclas de concreto con revenimiento mayor a 20 cm
(Fotografía Antonio M)

Mezcla 2, con fibras

Resultados de pruebas a mezclas en estado fresco	
Parámetro	Valor y/o resultado
Revenimiento	22 cm
Temperatura	28°C
pH	13

Tabla 30. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 2. (Fuente Antonio M)

Mezcla 3, Fibras y sílice

Resultados de pruebas a mezclas en estado fresco	
Parámetro	Valor y/o resultado
Revenimiento	19.5cm
Temperatura	25°C
pH	12

Tabla 31. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 3. (Fuente Antonio M)



Ilustración 40. Prueba de revenimiento, resultado 19.5cm (Fotografía Antonio M)



Ilustración 41. Lectura de temperatura en cada una de las mezclas (Fotografía Antonio M)

Mezcla 4, con sílice

Resultados de pruebas a mezclas en estado fresco	
Parámetro	Valor y/o resultado
Revenimiento	21cm
Temperatura	25°C
pH	11-12

Tabla 32. Resultados de pruebas al concreto en estado fresco a la mezcla 4. (Fuente Antonio M)



Ilustración 42. Lectura de pH en cada una de las mezclas (Fotografía Antonio M)

Se puede observar en las tablas anteriores la disminución de la temperatura en las mezclas que contienen sílice, esto debido a que este tipo de cementantes reducen la velocidad de fraguado del concreto y en consecuencia también su calor de hidratación. De igual forma una característica en común fue los altos valores de revenimiento que se obtuvieron, prácticamente todas las mezclas se comportaron como autoconsolidable.

También algo sucede con el pH de las mismas mezclas; al tener el sílice un pH de 6 y una mezcla de concreto normal aproximadamente entre 12 y 13 la incorporación de este cementante provoca una disminución no tan considerable en este parámetro, sin embargo es de suma importancia cuidar este aspecto ya que una disminución por debajo de 9 podría traer problemas de corrosión en el acero y muy particularmente en las mezclas de concreto que contienen fibras de acero.

4.5. Pruebas realizadas a especímenes de concreto endurecido.

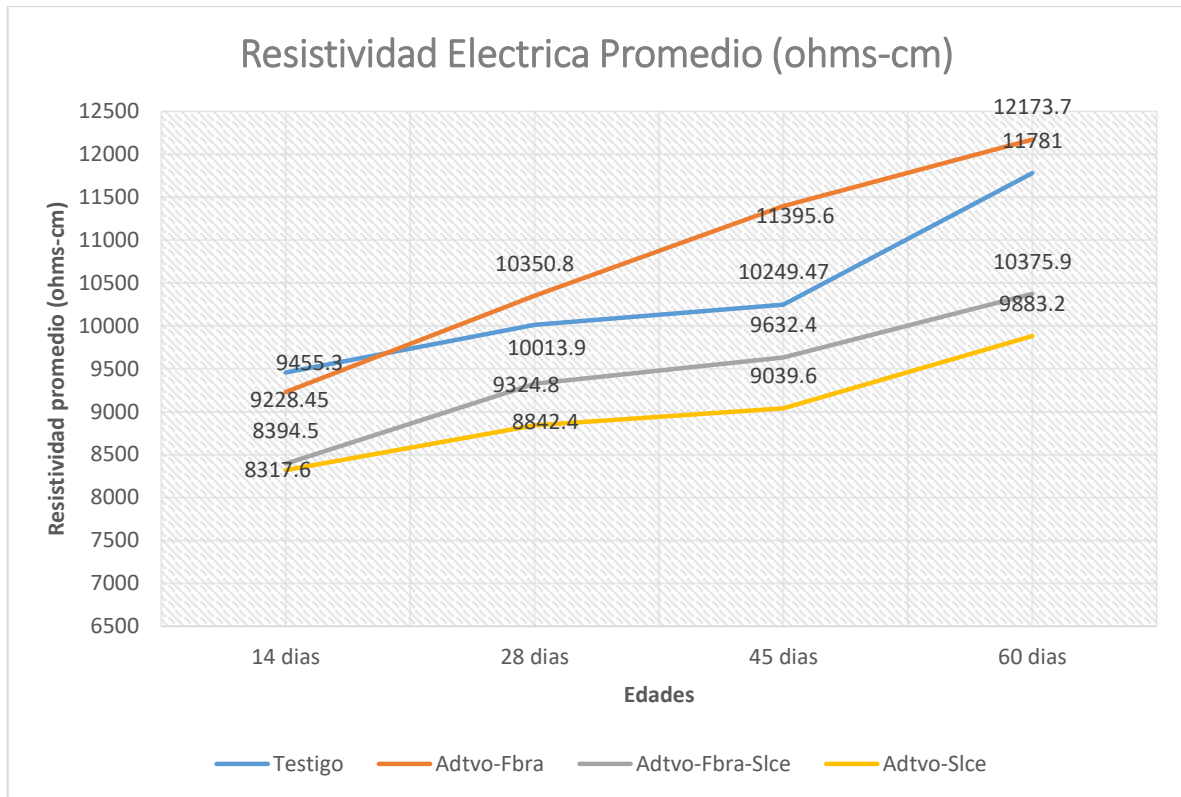
4.5.1. Resultados de ensayos no destructivos a especímenes de concreto.

Los ensayos no destructivos se realizaron a los especímenes a las edades de 14, 28, 45 y 60 días con la finalidad de observar su evolución, en las siguientes ilustraciones se presentan los valores obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico obteniéndose los siguientes valores:



4.5.1.1. Resistividad Eléctrica

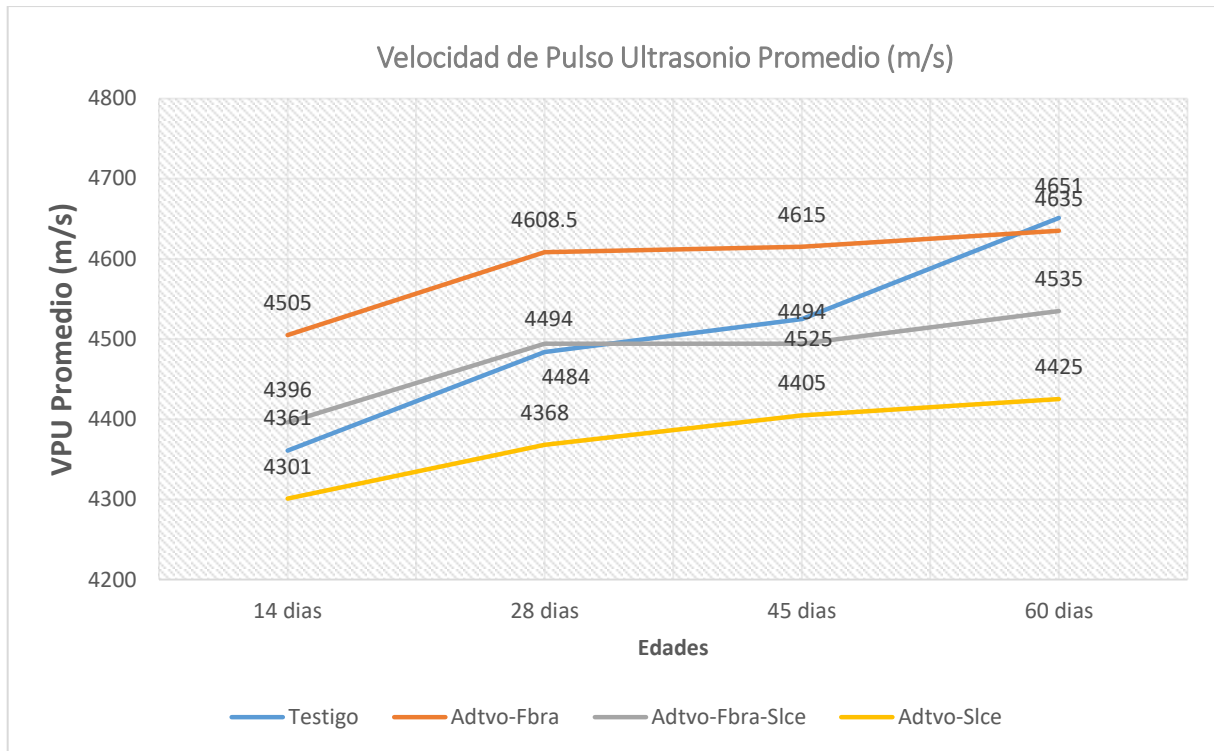
En la gráfica 1 se observar que la mezcla que mejores características de resistividad eléctrica presenta es la mezcla que contiene aditivo y fibras alcanzando un valor de 12173.7 ohm-cm y según la norma (NMX-C-530-0NNCCE-2017) se clasifica como un concreto con porosidad interconectada de consideración, este resultado se puede explicar debido a que en su proceso de elaboración el concreto no se varilló (este proceso de varillado funciona para realizar un mejor acomodo de las partículas y agregados de la mezcla y a su vez eliminar el exceso de vacíos y de aire) como marca la normativa en la elaboración de especímenes de concreto, ya que la mezcla se comportó como un concreto autocompactable o autoconsolidable por lo cual se decidió no vibrar los moldes debido al riesgo de provocar el fenómeno de segregación y en consecuencia un efecto de sangrado. Así pues esta mezcla antes mencionada obtuvo un resultado superando prácticamente a todas, lo que representa un incremento en un 3.3% respecto a la testigo, caso contrario de las mezclas con sílice debido a que su reacción química con el cemento no se ha consumado en su totalidad, lo que provoca un relativo bajo resultado, generalmente a la edad de 90 días su reacción química se ha completado, estos resultados se traducen en una pasta de cemento aun no densificada ya que la porosidad del concreto sigue existiendo, las edades tardías en este tipo de mezcla son adecuadas y se mostraran resultados más altos. Por otra parte se determina un 11.92% de diferencia en la mezcla de aditivo, fibra y sílice respecto a la testigo también, esto a la edad de 60 días.



Gráfica 1. Valores de Resistividad eléctrica en especímenes a distintas edades (Fuente Antonio M)

4.5.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

Los resultados obtenidos en la prueba de VPU se presentan en la gráfica 2, los cuales muestran una tendencia claramente superior en la mezcla que contiene la adición de fibras y aditivo alcanzando un valor final de 4635m/s, lo que según la norma mexicana (NMX-C-275-ONNCCE-2019) es considerado un concreto muy durable, esta tendencia es constante a lo largo de las pruebas, sin embargo se observa que la mezcla testigo repuntó a la edad de 60 días, superando con un valor relativamente mínimo pero superior, en términos numéricos representa solo una diferencia de 0.34% pero su tendencia a lo largo de la experimentación en resumen fue menor, a su vez se observa una diferencia de 2.49% de la mezcla que contiene la adición de Aditivo, fibras y sílice. Además se observa el rezago de la mezcla que contiene aditivo y sílice con valores menores. Lo cual coincide con los resultados de resistividad eléctrica.



Gráfica 2. Valores obtenidos de Velocidad de Pulso Ultrasonido en especímenes (Fuente Antonio M)

4.5.2. Resultados de ensayos destructivos a especímenes de concreto.

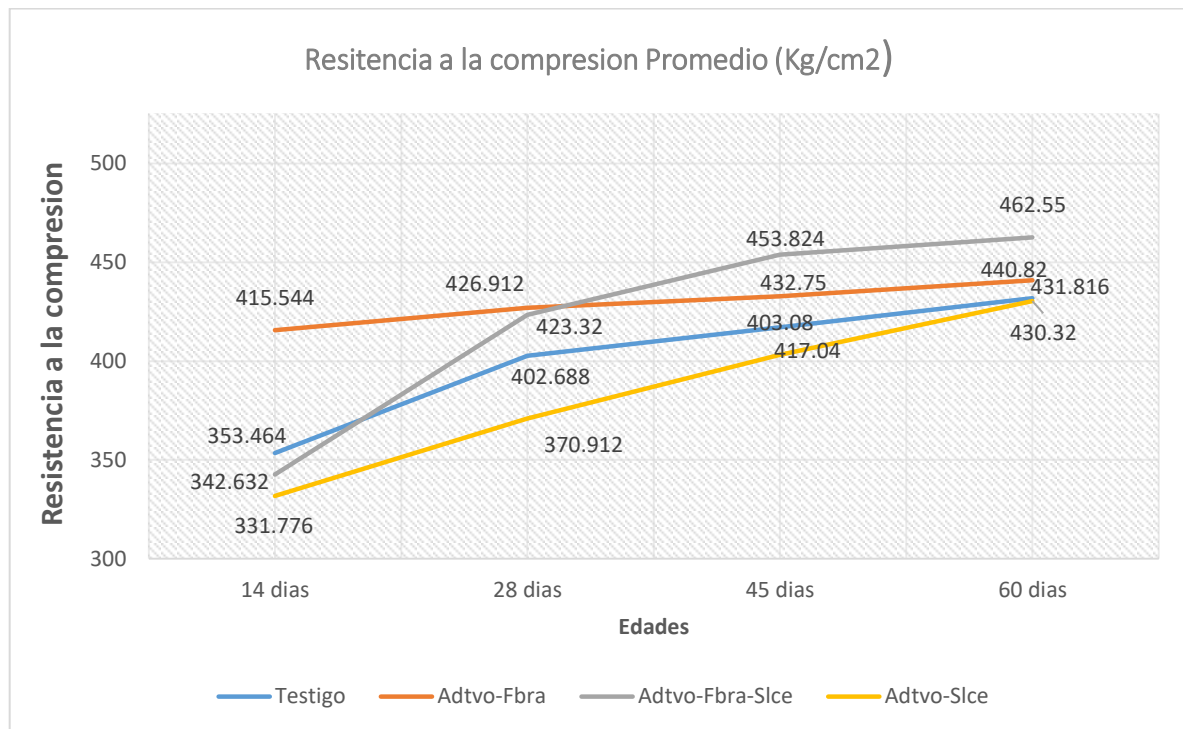
Los ensayos de compresión y tensión se realizaron a las edades de 14, 28, 45 y 60 días, la prueba de flexión se realizó solamente a la edad de 28 días para evaluar su comportamiento mecánico con estas pruebas destructivas.

4.5.2.1. Resistencia a la compresión.

En este gráfico 3 muestran los valores obtenidos en el ensayo a compresión en cubos, los cuales muestran una tendencia superior en la mezcla contenida con fibras y aditivo hasta la edad de 28 días, sin embargo esta tendencia se mantiene prácticamente lineal hasta los 60 días viéndose opacada por un alto incremento en la tendencia de la mezcla adicionada con fibras, aditivo y sílice, tendencia que se mantuvo hasta alcanzar una resistencia de 462.55kg/cm^2 , siendo esta la mayor obtenida respecto todas. En resumen se obtuvo finalmente un incremento de 6.64%



de la mezcla de aditivo, fibras y sílice respecto de la testigo y en un segundo puesto la adicionada con fibras y aditivo con un incremento de 2.04%, este resultado se podría ver modificando en definitiva con un incremento en la adición de fibras de acero, debido a que la proporción usada en esta investigación fue la mínima señalada por la ficha técnica usada. Así mismo se observa una vez más un desempeño menor en la mezcla que contiene sílice y aditivo.



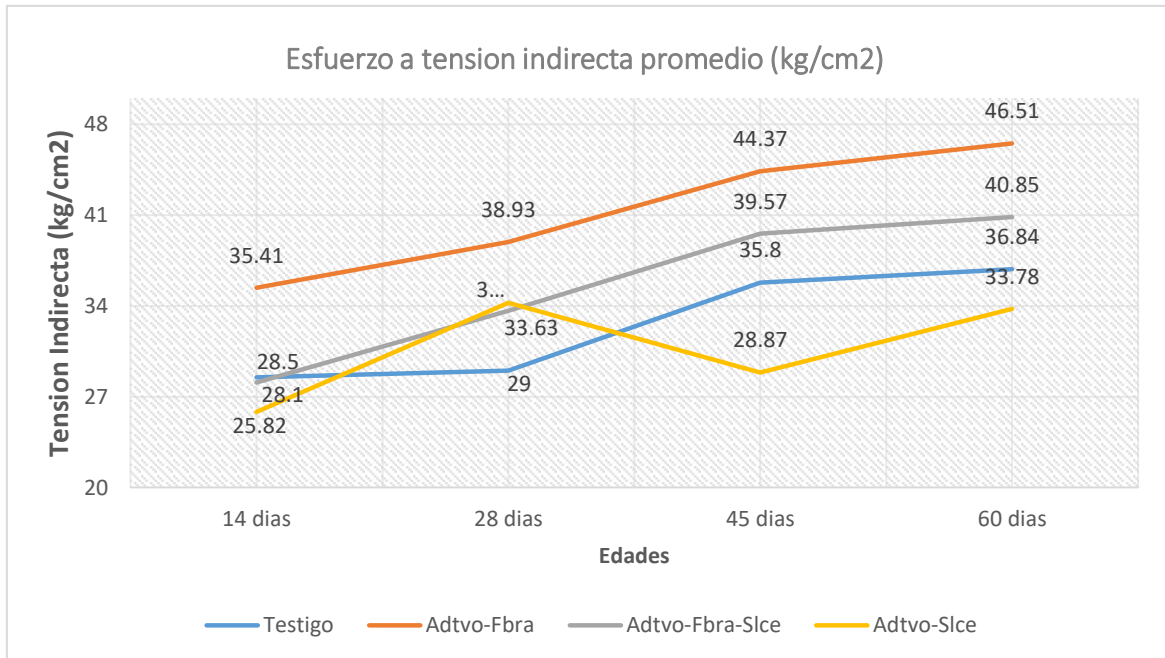
Gráfica 3. Valores obtenidos en el ensaye a compresión en especímenes (Fuente Antonio M)

4.5.2.2. Resistencia a la tensión indirecta

La gráfica 4 muestra claramente una superioridad en la tendencia de la mezcla adicionada con fibras y aditivo, misma que se mantiene hasta los 60 días alcanzando un valor final de 46.51kg/cm² lo que representa un incremento en un 20.8%, este resultado se ve reflejado por el trabajo efectuado por la fibras, debido a que estas toman los esfuerzos antes de que el concreto presente las primeras



grietas a su vez la forma ondulada de estas mismas permite tener una mejor cohesión entre los elementos que componen la mezcla por lo tanto la suma de estos efectos se ve reflejado en los resultados, en esta gráfica en particular se puede observar el trabajo que realizan las fibras, debido a que todas las mezclas que las contienen mostraron un claro incremento en la resistencia a tensión, otro ejemplo es la mezcla con aditivo, fibras y sílice con un incremento de 9.81% respecto a la testigo. Cabe señalar que a la edad de 28 días la mezcla de aditivo y sílice mostro una mejora respecto a la testigo y a la adicionada con aditivo, fibras y aditivo sin embargo su tendencia en las siguientes edades fue a la baja, este fenómeno se podría explicar por dos razones; la primera el operador de la prensa al momento de realizar la prueba, ya que si no se aplica la carga a la velocidad y la duración de la prueba no son las adecuadas estos resultados se podrían ver modificados y la segunda es la distribución, forma y homogeneidad de las mezclas de concreto ya que la diferencia entre estos aspectos se verá reflejado en la forma de falla del espécimen.



Gráfica 4. Valores obtenidos en ensaye a tensión indirecta a especímenes (Fuente. Antonio M)



En la ilustración 44 se observa que las mezclas de concreto que tienen la adición de sílice cuentan con un tipo de falla muy en particular y no deseable en los ensayos destructivos, en la cual la matriz cementicia se separa completamente del agregado grueso provocando así la falla del espécimen, esto se da como respuesta a la no completada reacción química entre el cemento y el sílice lo que provoca que al no consumarse esta reacción falle a edades de 14 y 28 días.



Ilustración 43. Desprendimiento de la pasta-agregado lo que provoca falla y colapso del espécimen en las mezclas que contienen sílice a temprana edad. (Fuente Antonio M)

A edades de 45 y 60 días la falla de los especímenes era una combinación entre pasta-agregado y la más deseable: la de la fractura del agregado siendo esta última la más común, según se observó en los especímenes que contenían sílice, esto confirma un considerable avance en la reacción química entre el cemento y la sílice. (Ilustración 45)



Ilustración 44. La falla que rige en los especímenes a edades de 45 y 60 días es la fractura del agregado. (Fuente Antonio M)

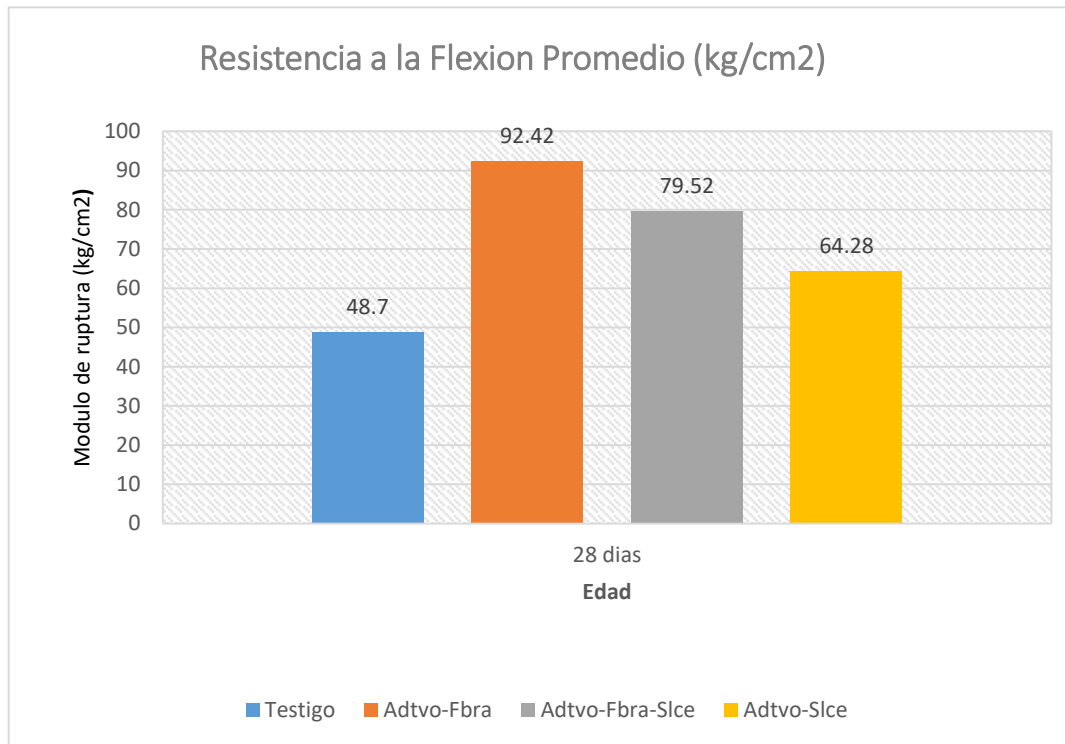
4.5.2.3. Resistencia a la Flexión.

Los ensayos de compresión, tensión y flexión se realizaron solo a la edad de 28 días para observar su comportamiento mecánico.

En la gráfica 5 se concluye que la mezcla que posee mejores características a flexión es la mezcla que contiene Aditivo PCE en combinación con las fibras de acero, teniendo un incremento de un 47.30% en el MR (módulo de ruptura) respecto de la testigo lo que se traduce como un desempeño muy marcado y superior, este incremento en esta prueba se puede ver reflejado en la disminución de espesores en pavimentos rígidos y/o en la disminución o eliminación por completo de la cuantía de acero (armex) usado en la construcción de estas obras y que se pudiera sustituir por la adición de fibras de acero, además esta adición provoca una deformación mínima en el espécimen ensayado debido a que las fibras toman los esfuerzos mucho antes de que el concreto comience a presentar grietas o fisuras, otro dato importante es la capacidad de carga que tuvieron los especímenes ya que aún



fallados soportaban una carga considerable, por otro lado se obtuvieron también resultados favorables en las otras mezclas ya que superaron por completo el comportamiento de la mezcla testigo con incrementos de un 38.75% de la Aditivo, Fibra Sílice y un 24.23% de la Aditivo-Sílice.



Gráfica 5. Comparación de resistencia a flexión en las mezclas de concreto a la edad de 28 días.
(Fuente Antonio M.)

En las siguientes ilustraciones 46 y 47 se plasman los tipos de falla frágil y dúctil que se presentaron en el ensaye a flexión en las vigas que no contenían fibras y en las que sí.



Ilustración 45. Falla frágil en las mezclas que no contienen adición de fibras de acero. (Fuente Antonio M)



Ilustración 46. Falla dúctil en las mezclas adicionadas con fibras de acero, soportando incluso una carga permanente de 2500 kg. (Fuente Antonio M)



4.6. Proyección de la vida útil del concreto para obras civiles

En la tabla 33 (treinta y tres) se muestran los resultados de resistividad y conductividad de las mezclas a diferente edad en la experimentación, 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; en este caso cloruros.

Número	Mezcla	Diámetro (cm)	longitud promedio(cm)	Área promedio (cm ²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (KΩ-cm)	Conductividad KΩ ⁻¹ cm ⁻¹	Días
1	testigo	10.09	20.13	79.95	9042.8	9.0428	0.110585217	7
		10.00	20.10	78.54	9455.3	9.4553	0.10576079	14
		10.00	20.10	78.54	10013.9	10.0139	0.099861192	28
		10.10	20.00	80.11	10249.47	10.24947	0.09756602	45
		10.00	20.00	78.54	11781	11.781	0.084882438	60

Tabla 33. Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla testigo (Fuente Antonio M)

Número	Mezcla	Diámetro(cm)	Longitud promedio(cm)	Área (cm ²)	Resistividad promedio (Ω-cm)	Resistividad promedio (K Ω -cm)	Conductividad(KΩ ⁻¹ cm ⁻¹)	Días
2	A dtvo-fibra	10.01	20.00	78.69	9143	9.143	0.109373291	7
		10	20.15	78.54	9228.45	9.22845	0.108360559	14
		10	20.00	78.54	10350.8	10.3509	0.096609956	28
		10.1	20.00	80.11	11395.6	11.3956	0.087753168	45
		10	20.10	78.54	12173.7	12.1737	0.082144295	60

Tabla 34. Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla A dtvo-fbra (Fuente Antonio M)

Número	Mezcla	Diámetro (cm)	Longitud promedio(cm)	Área (cm ²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (K Ω -cm)	Conductividad KΩ ⁻¹ cm ⁻¹	Días
3	A dtvo-fibra-slce	10	20.15	78.54	7645	7.645	0.130804447	7
		10.15	20	80.91	8394.5	8.3945	0.119125618	14
		10.2	20	81.71	9324.8	9.3248	0.107240906	28
		10.15	20.11	80.91	9632.4	9.6324	0.103816287	45
		10	20.1	78.54	10375.9	10.3759	0.096377182	60

Tabla 35. Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla A dtvo-fbra -slce (Fuente Antonio M)

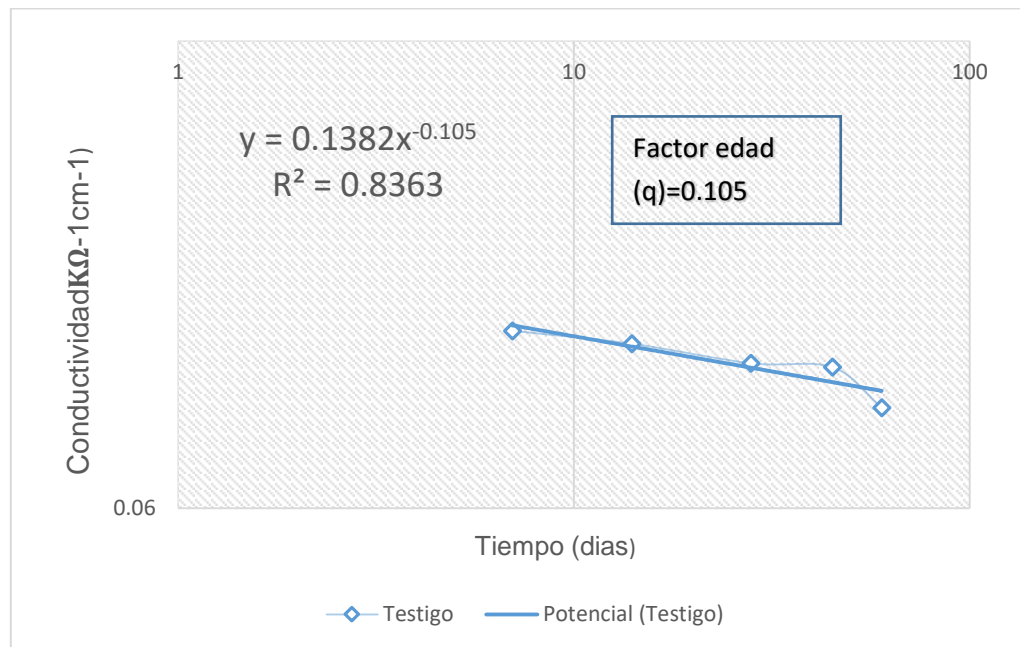


Número	Mezcla	Diámetro(cm)	Longitud promedio(cm)	Área(cm ²)	Resistividad promedio(Ω-cm)	Resistividad promedio (K Ω -cm)	Conductividad KΩ ⁻¹ cm ⁻¹)	Días
4	Adtvo-slce	10.15	20.2	80.91	8282.7	8.2827	0.120733577	7
		10	20.1	78.54	8317.6	8.3176	0.120226989	14
		10	20.15	78.54	8842.4	8.8424	0.113091468	28
		10.12	20.01	80.43	9039.6	9.0396	0.110624364	45
		10.1	20.21	80.11	9883.2	9.8832	0.101181803	60

Tabla 36 Valores promedios de dimensiones, área, resistividad eléctrica y conductividad de la mezcla Adtivo –slce (Fuente Antonio M)

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.

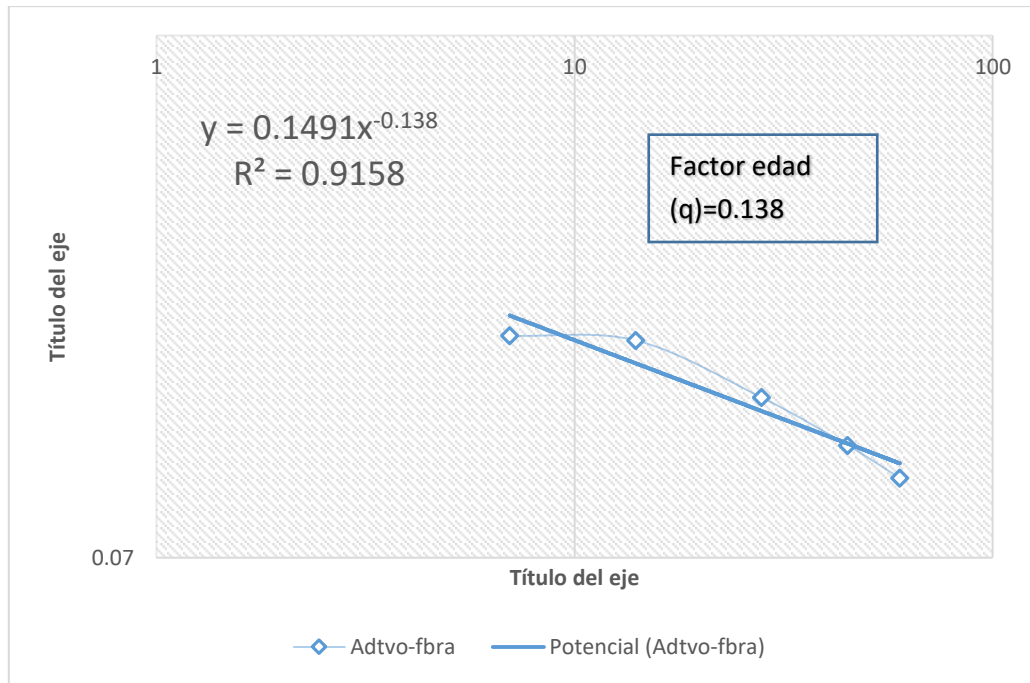
Mezcla testigo



Gráfica 6. Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto testigo.

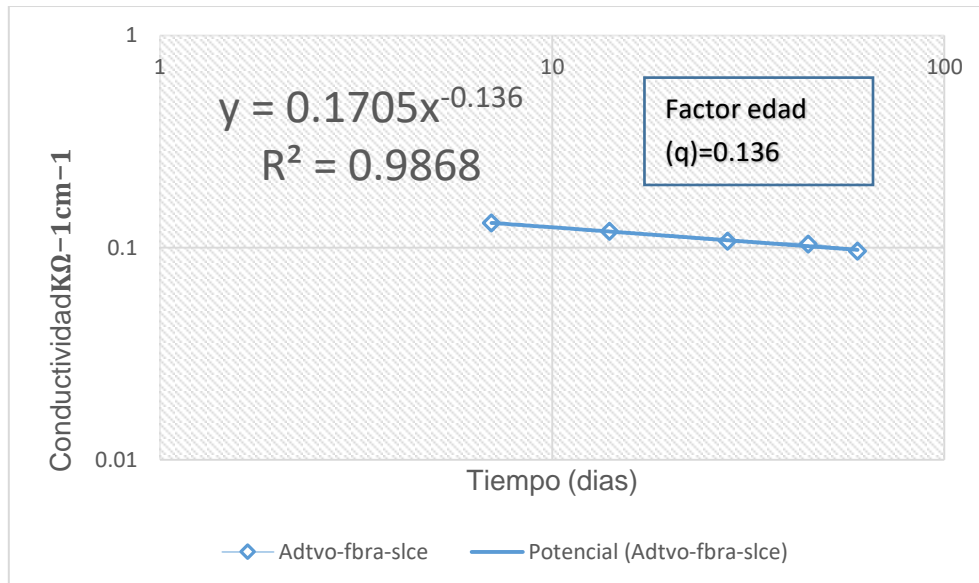


Mezcla Aditivo-fibra



Gráfica 7. Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto Adtvo-fbra.

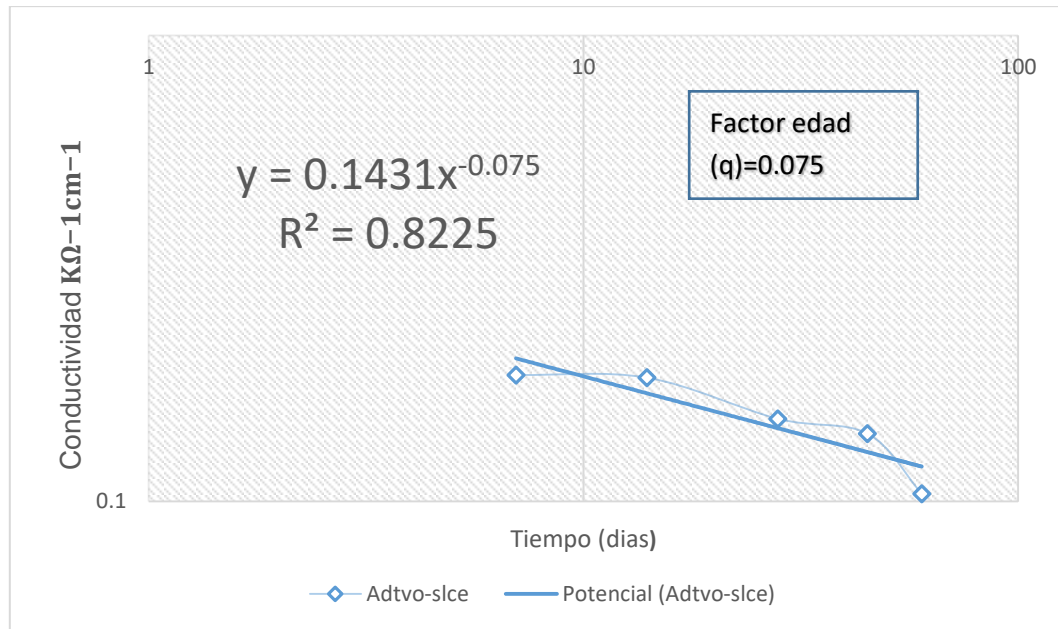
Mezcla Aditivo-fibra-sílice



Gráfica 8. Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto Adtvo-fbra-slce.



Mezcla Aditivo-fibra



Gráfica 9. . Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto Adtvo-slce.

Haciendo uso de la ecuación 20 del apartado 2.2.6 de esta experimentación para determinar el tiempo de iniciación del ataque de los agentes cloruros a una estructura de concreto se procede al cálculo de vida útil de una estructura, para este caso y debido a la aplicación de las mezclas se tendrá como ejemplo un piso industrial en una zona con una exposición XS1 - IIIa-aéreo (< 500 m de la costa) (ver tabla 2) que le corresponde un factor de exposición ($F_{exp,cl}$) de $10000 \frac{\Omega-cm^3}{año}$, un factor de retardo ($r_{b,cl}$) de 1.50 (ver tabla 1) que corresponde al tipo de cemento usado en esta investigación (tipo II) y un recubrimiento inicial de 5 cm (X_{cl}) se tiene lo siguiente:

Ecuación:

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



Donde:

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

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

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

$pef,0$ = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y $20 + 2^\circ\text{C}$ 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)

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 un piso industrial con distintos espesores de recubrimiento.

Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición ($F_{exp,cl} \frac{\Omega\text{-cm}^3}{\text{año}}$)	Factor de retardo (rb,cl)	Resistividad efectiva a 28 días ($\Omega\text{-cm}$)	Recubrimiento en cm (X,cl)	Tiempo de iniciación t_i (años)
Testigo	0.105	10000	1.5	10113.9	5	40.7
A-F	0.138	10000	1.5	10350.8	5	43.1
A-F-S	0.136	10000	1.5	9324.8	5	38.8
A-S	0.075	10000	1.5	9039.6	5	35.9

Tabla 37. Tiempos de iniciación (vida útil) de un piso industrial con un recubrimiento de 5cm.



Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición (F _{exp,cl}) $\frac{\Omega\text{-cm}^3}{\text{año}}$	Factor de retardo (r _{b,cl})	Resistividad efectiva a 28 días (Ωcm)	Recubrimiento en cm (X,cl)	Tiempo de iniciación t _i (años)
Testigo	0.105	10000	1.5	10013.9	6	58.6
A-F	0.138	10000	1.5	10350.8	6	62.1
A-F-S	0.136	10000	1.5	9324.8	6	55.9
A-S	0.075	10000	1.5	9039.6	6	51.7

Tabla 38. Tiempos de iniciación (vida útil) de un piso industrial con un recubrimiento de 6 cm.

Mezcla	Factor edad (q)	Factor de exposición (F _{exp,cl}) $\frac{\Omega\text{-cm}^3}{\text{año}}$	Factor de retardo (r _{b,cl})	Resistividad efectiva a 28 días (Ωcm)	Recubrimiento en cm (X,cl)	Tiempo de iniciación t _i (años)
Testigo	0.105	10000	1.5	10013.9	7	79.7
A-F	0.138	10000	1.5	10350.8	7	84.5
A-F-S	0.136	10000	1.5	9324.8	7	76.0
A-S	0.075	10000	1.5	9039.6	7	51.7

Tabla 39. Tiempos de iniciación (vida útil) de un piso industrial con un recubrimiento de 7 cm.

Ejemplo de cálculo

1. Haciendo uso de la tabla 1 obtenemos el factor de retardo que corresponde al tipo de cemento usado; para nuestro caso tipo II por lo tanto un factor de 1.5.
2. Posteriormente de la tabla 2 se obtiene el factor de exposición ambiental, con las condiciones propuestas anteriormente tomamos uno de $10000 \frac{\Omega\text{-cm}^3}{\text{año}}$
3. Como siguiente paso se toman los valores del factor de retardo, resistividad efectiva y recubrimiento.

Haciendo uso de la siguiente ecuación se tiene:



$$t_i = \frac{X_{cl}^2 * \rho_{ef,0} * \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q}{F_{exp,cl}} r_{b,cl}$$

Sustituyendo valores queda:

$$t_i = \frac{6^2 * 10013.9 * \left(\frac{60}{28}\right)^{0.105}}{10000} 1.5 = 58.6 \text{ años}$$

Que corresponde a la mezcla testigo.

De las tablas anteriores (treinta y siete, treinta y ocho y treinta y nueve) podemos observar y resumir que la mezcla Aditivo-fibra logro un incremento de su vida útil respecto de la mezcla testigo en un 5.56% para un recubrimiento de 5 cm, un 5.63% con un recubrimiento de 6 cm y un 5.68% con 7 cm, en valores más altos de recubrimiento ya no se incrementa en porcentajes altos estos valores debido a que su tendencia máxima es un incremento de un 5.66% respecto de la testigo para cualquier espesor.

Finalmente podemos mencionar que de las muestras que contienen sílice su reacción química y resistividad eléctrica se observa baja a la edad de 28 días por ello sus resultados en vida útil son menores a la testigo, sin embargo a edades tardías (60 días) su tendencia se incrementa. Con estos resultados la mezcla aditivo fibra con un recubrimiento de 6 y 7 cm garantiza una vida útil mínima de 50 años, misma que se podría incrementar con adiciones puzolanicas un buen ejemplo el microsíllice que presenta mejores propiedades que el sílice tradicional por la razón de su finura.

Ahora bien se propondrá un tiempo de iniciación de 100 años para que nuestra estructura pueda ser considerada como durable y así obtener su respectivo espesor de recubrimiento.

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



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 X _{cl} (cm)
Testigo	0.105	10000	1.5	10013.9	100	7.8
A-F	0.138	10000	1.5	10350.8	100	7.6
A-F-S	0.136	10000	1.5	9324.8	100	8.0
A-S	0.075	10000	1.5	9039.6	100	8.3

Tabla 40. Valores de recubrimiento obtenidos para un tiempo de iniciación de 100 años para que sea considerada como durable una estructura.

Ejemplo de cálculo

- De la tabla 1 obtenemos el factor de retardo que corresponde al tipo de cemento usado; para nuestro caso tipo II por lo tanto un factor de 1.5.
- Haciendo uso de la tabla 2 se obtiene el factor de exposición ambiental, con las condiciones propuestas anteriormente tomamos uno de $10000 \frac{\Omega\text{-cm}^3}{\text{año}}$
- De manera general se usan los datos de resistividad efectiva y se propone un tiempo de iniciación de 100 años.

Haciendo uso de la formula 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 $\Omega\text{-cm}^3$ /año.

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 + 2°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)

rb , = Factor de retardo (adimensional)

t_i = Tiempo de iniciación, en años

Sustituyendo en la ecuación anterior queda:

$$X_{cl} = \sqrt{\frac{100 * 10000}{10013.9 * \left(\frac{60}{28}\right)^{0.105} * 1.5}} = 7.8cm$$

Resultado correspondiente a la mezcla testigo.

En la tabla 40 se observa que el valor más óptimo para un tiempo de iniciación de 100 años es de 7.6 a 7.8 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

A raíz de la experimentación llevada a cabo y que se describe en este trabajo podemos resumir puntos importantes: en cuestiones de pruebas no destructivas la mezcla Aditivo-fibra resulto mayor con un incremento de 3.3% en resistividad eléctrica y solo una diferencia de 0.34% respecto de la mezcla testigo, en velocidad de pulso ultrasónico que como se puede observar en la tabla 2 repunto mínimamente a la edad de 60 días, para lo cual según la normativa (NMX-C-530-ONNCCE-2017) y (NMX-C-275-ONNCCE-2019) podemos caracterizar a esta mezcla (Aditivo-fibra) como una mezcla con porosidad moderada y un riesgo de corrosión moderado según la red DURAR, 1998. Así mismo se observan relativos menores resultados en las mezclas adicionadas con sílice debido a que la reacción química entre este cementante y el cemento portland no se llevaba a cabo en su totalidad a edades tempranas, sumado a que en esta experimentación se usó el sílice cribado por la malla 100, es por ello que su reacción no fue rápida.

En cuestiones de pruebas destructivas la mezcla que mejor desempeño tuvo en resistencia a la compresión fue la mezcla con aditivos-fibras y sílice en resumen obtuvo finalmente un incremento de 6.64% respecto de la testigo y una resistencia a la compresión de 462.55 kg/cm² que según la red DURAR 1998 se clasifica como un concreto durable ($f'_c > 45\text{Mpa}$) y en un segundo puesto la adicionada con fibras y aditivo con un incremento de 2.04%, este resultado se podría ver modificando en definitiva con un incremento en la adición de fibras de acero, debido a que la proporción usada en esta investigación fue la mínima señalada por la ficha técnica usada, en la prueba de resistencia a tensión indirecta la mezcla adicionada con aditivo-fibra fue superior a todas alcanzando un valor final de 46.51kg/cm² lo que representa un incremento en un 20.8% de la testigo, este resultado se da claramente por el trabajo efectuado por la fibras, debido a que estas toman los esfuerzos antes de que el concreto presente las primeras grietas a su vez y permite una mejor adherencia entre la mezcla. En la prueba para determinar el módulo de ruptura claramente y con superioridad la mezcla con aditivo-fibra se destacó por su



resultado teniendo un incremento en este valor de aproximadamente un 47.30% en el MR (módulo de ruptura) respecto de la testigo lo que se traduce como un desempeño muy marcado ya que es prácticamente lo doble de la mezcla testigo, resultado que se podría utilizar para diseños que involucren una disminución de los espesores de la sección de un pavimento y la disminución de cuantías de acero que podrían ser sustituidas por las fibras de acero.

En términos de durabilidad se observó que la mezcla aditivo-fibra logro un incremento de 5.56% de su vida útil para un recubrimiento de 5 cm y un 5.63% con un recubrimiento de 6 cm, misma que cumple con una vida útil de 50 años respecto de la testigo, para garantizar una estructura durable (100 años de iniciación) se encontró un espesor de recubrimiento de 7.8cm para esta misma mezcla, que de manera expresa se traduce como el tiempo que tardaran agentes despasivantes (cloruros) en penetrar el recubrimiento de concreto y llegar al acero de refuerzo con las situaciones ambientales y de materiales usados en la experimentación propuestas y usadas anteriormente, las mezclas adicionadas con sílice mostraron un resultado menor ya que su valor de resistividad a los 28 días fue menor a las otras. Un dato importante que comprueba los resultados obtenidos en resistividad eléctrica es el valor del factor edad (q) que se calculó en las gráficas seis, siete, ocho y nueve ya que entre mayor sea este valor (valor absoluto) mayor fue su velocidad de hidratación, es decir sus propiedades físico-mecánicas se dieron con mayor rapidez. Finalmente la mezcla que mejor desempeño tuvo en general fue la mezcla adicionada con aditivo y fibras de acero que se comportó como una mezcla de alto desempeño por los resultados obtenidos que podría ser usada en proyectos de ingeniería tales como pavimentos y pisos industriales superando a otra considerada de alto desempeño como fue la llamada mezcla testigo. Una parte importante a estudiar en un futuro próximo es el comportamiento que pudiera tener una mezcla de concreto con sílice y que esta adición cuente con una finura distinta, esto con la finalidad de observar las variaciones que el factor edad (q) llega a presentar.



6. BIBLIOGRAFIA

- AASHTO-T-106. (2002). Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens). EE.UU.
- American Concrete Institute. (s.f.).
- American Concrete Institute. (1999).
- 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-151-00. (2014). Método estandar de ensayo para expansión en autoclave del cemento portland. EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C-33. (s.f.).
- ASTM-C-348. (1997). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars. EE.UU.
- BS-4027:1980. (2000). Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos. Inglaterra: British Standards Institution.
- Cámara Nacional del Cemento. (22-agosto de Julio de 2016). Obtenido de <http://www.canacem.org.mx>
- Civil Engineering Research Foundation CERF Technical. (1994).
- COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO ZP-306 SOMETIDO A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Gallo-Arciniegas, L. P., González Peñuela, G., & Carrillo León, J. (2013). COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO ZP-306 SOMETIDO A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN.
- Department of Transportation Federal Highway Administration. (1994). U.S.
- Especificaciones del agua para construccion. (s.f.).
- Estudio de factibilidad para producción de fibras de acero para refuerzo del concreto 2016. (s.f.).
- IMCYC. (2016). Construcción y Tecnología. México: IMCYC.
- Instituto del concreto. (1997).
- 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.
- 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.



- MX-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.
- MX-C-057-ONNCCE-2015. (s.f.). 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.
- MX-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.
- MX-C-073-ONNCCE-2014. (s.f.). Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- MX-C-073-ONNCCE-2014. (s.f.). Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- MX-C-073-ONNCCE-2014. (s.f.). Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- MX-C-073-ONNCCE-2014. (s.f.). Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- MX-C-073-ONNCCE-2014. (s.f.). Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- MX-C-088-ONNCCE-1997. (s.f.). Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino. México: ONNCCE.
- MX-C-122-ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción -Agua para Concreto-Especificaciones. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- MX-C-122-ONNCCE-2004. (s.f.). Industria de la Construcción -Agua para Concreto-Especificaciones. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- MX-C-159-ONNCCE-2004. (s.f.). 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-164-ONNCCE-2014. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DENSIDAD-MÉTODO DE PRUEBA. MÉXICO: ONNCCE.
- NMX-C-164-ONNCCE-2014. (s.f.). 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-166-ONNCCE-2006. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México.
- NMX-C-170-ONNCCE-1997. (s.f.). 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-191-ONNCCE-2015. (s.f.). 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-191-ONNCCE-2015. (s.f.). 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-275-ONNCCE-2019. (s.f.). Velocidad de pulso ultrasonico.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción-cementos hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción-cementos hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C.
- NMX-C-530-ONNCCE-2017. (s.f.). Resistividad Electrica.
- NMX-C-530-ONNCCE-2017. (s.f.).
- PCI Commitee on Durability. (1994).
- Report, C. E. (1994).
- SHRP. (s.f.).



Uso de Sílice en concretos de Alto Desempeño. Luis Allauca, Hugo Amen, Jessica Lung.
(2015).