



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE CONCRETOS DE ALTA DURABILIDAD

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

VICTOR MICHEL MORALES ALEJANDRE

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO



Ciudad Universitaria

Marzo 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Señor
VÍCTOR MICHEL MORALES ALEJANDRE
Presente

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/168/14

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

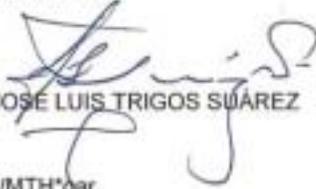
"ESTUDIO DE CONCRETOS DE ALTA DURABILIDAD"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. MATERIAL Y EQUIPO EMPLEADO
- IV. MEZCLA DE CONCRETO EN ESTUDIO
- V. ENSAYES REALIZADOS
- VI. RESULTADOS DE ENSAYES Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 4 de noviembre del 2014.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JLTS/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

A MIS MADRES MARÍA DE LOURDES MARTÍNEZ CONTRERAS Y ALICIA MORALES ALEJANDRE

Quienes día a día me apoyaron a seguir adelante sin importar lo difícil que sea el problema. Quienes me enseñaron que lo importante no es el reconocimiento de otros, sino el gusto de hacerlo por cuenta propia. Por todo el amor, cariño, comprensión y sobre todo confianza que me han brindado para lograr mis metas. Les agradezco a ustedes dos por convertirme en un hombre de bien, con fortalezas y debilidades.

M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

Por haberme dado la oportunidad de trabajar con usted, soportar todas las dudas y problemas que le ocasioné, tanto en mi servicio social como en la realización de esta tesis.

*A la memoria de
Isidro Morales Flores y Rosa Contreras Gálvez*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
OBJETIVO	3
1. ANTECEDENTES	4
1.1. Durabilidad	4
1.2. Abrasión	4
1.3. Ataque de sulfatos	5
1.4. Corrosión por cloruros.....	6
1.5. Componentes de una mezcla de concreto	6
2. MATERIAL Y EQUIPO EMPLEADO	11
2.1. Cemento Portland Compuesto.....	11
2.2. Agregados pétreos	11
2.2.1. Agregado grueso	14
2.2.2. Agregado fino	15
2.4. Aditivo y adiciones	16
2.5. Equipos e instrumentación	17
3. MEZCLA DE CONCRETO EN ESTUDIO	23
3.1. Proporcionamiento.....	23
3.2. Elaboración del concreto	27
4. ENSAYES REALIZADOS	31
4.1. Concreto en estado fresco	31
4.1.1. Revenimiento	31
4.1.2. Peso volumétrico	32
4.1.3. Aire atrapado	32
4.2. Concreto en estado endurecido.....	33
4.2.1. Resistencia a compresión.....	33
4.2.2. Resistencia a tensión	34
4.2.3. Módulo de elasticidad.....	36
4.2.4. Relación de Poisson	38
4.2.5. Contracción por secado	39
4.2.6. Resistencia a la abrasión	41

4.2.7.	Permeabilidad al agua	42
4.2.8.	Permeabilidad al ión cloruro	42
4.2.9.	Resistencia al ataque de sulfatos	43
5.	RESULTADO DE ENSAYES Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	45
5.1.	Ensayes de concreto en estado fresco.....	45
5.2.	Ensayes de concreto en estado endurecido.....	46
5.2.1.	Ensayes a compresión	46
5.2.2.	Ensayes a tensión.....	52
5.2.3.	Ensayes de módulo de elasticidad.....	55
5.2.4.	Ensayes de relación de Poisson	57
5.2.5.	Ensayes de contracción por secado.....	58
5.2.6.	Resistencia a la abrasión	60
5.2.7.	Ensayes de permeabilidad al agua	61
5.2.8.	Ensayes de permeabilidad al ión cloruro.....	63
5.2.9.	Ensayes de resistencia al ataque de sulfatos	65
6.	CONCLUSIONES	70
	ANEXO FOTOGRÁFICO	72
	REFERENCIAS	75

INTRODUCCIÓN

La necesidad de contar con un refugio siempre ha sido demanda del hombre, por lo que en los primeros días las estructuras consistían en bloques de piedra acomodados o tierra apisonada. Sin embargo, tanto los griegos como los romanos descubrieron ciertos métodos para calcinar la piedra caliza y así obtener la cal viva, misma que después se apagaba para usarse en la elaboración de mortero; a su vez aprendieron que determinados tipos de suelos finos o tierra, cuando se mezclaba con cal y arena, producían un material cementante.

En 1824 Joseph Aspdin, albañil de Leeds, Inglaterra, patentó un material al cual llamó cemento portland, así denominado porque el concreto era elaborado con piedra caliza de las canteras cercanas a Portland, Inglaterra. Este material se generaba por medio de la mezcla de la piedra caliza y arcilla, la cual se calcinaba para producir escoria de cemento y que después trituraba para producir un cemento hidráulico.

Después de varios siglos, el uso del concreto se expandió cuando empezaron a construirse vías férreas, puentes, edificios y pavimentos para calles; con el paso del tiempo se desarrollaron nuevos métodos de control y ensayos para llevarlos a cabo.

Pero al igual que sucede con toda clase de materiales, existen problemas y estos generan riesgos y fallas, que en un concreto no simplemente se presentan u ocurren como accidentes, todas ellas tienen una causa. A grandes rasgos, los problemas del concreto se deben a materiales inadecuados, mano de obra inapropiada o al medio ambiente agresivo.

Dado que en los dos primeros casos se puede tener un adecuado control de calidad, lo que genera más problemas para una obra terminada es el ambiente donde ésta se encuentre; debido a ello, hoy en día se busca que las construcciones sean durables y para ello se necesitan estudiar las causas por las cuales las estructuras de concreto se deterioran o incluso llegan a fallar. Por esa razón es esencial que el concreto tenga que resistir las condiciones para las cuales fue diseñado, sin deterioro por un periodo de muchos años.

El concreto durable mantendrá su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto al medio ambiente; mediante el uso de un cemento adecuado y una mezcla apropiadamente dosificada se obtendrá un concreto resistente a los agentes agresivos del medio.

Además, se requiere conocer otras características, adicionales a la resistencia mecánica, que permitan evaluar la facilidad de transportar, colocar y compactar el concreto en las cimbras, entre otras de las propiedades del concreto en estado plástico.

Para este estudio, en la fabricación del concreto se utilizaron consumos de cemento CPC 40 RS mayores de 400kg/m^3 , relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.40, consumos de humo de sílice de 5 y 10% del total de cementante, un aditivo reductor de agua de alto rango, agregado grueso calizo y agregado fino andesítico.

El diseño del concreto se realizó con base en una resistencia a 28 días de edad; la edad a la que se debe alcanzar la resistencia es función del tiempo al que se prevé la estructura deba soportar las acciones de diseño.

En este estudio se realizaron pruebas de revenimiento, peso volumétrico, aire atrapado, resistencia a compresión, resistencia a tensión, módulo de elasticidad, relación de Poisson, resistencia a la abrasión, contracción plástica y por secado para el concreto en estado fresco y endurecido, respectivamente. Para las pruebas de durabilidad se realizaron los ensayos de permeabilidad al agua, permeabilidad al ión cloruro y resistencia al ataque de sulfatos, ensayos que se mencionan en el capítulo 4, con sus respectivos resultados en el capítulo 5.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que se tiene la necesidad de construir estructuras con un alto desempeño para brindar un buen servicio y alargar la vida útil en lugares donde las condiciones ambientales sean agresivas ¿Cuál será la resistencia que pueda brindar un concreto de cemento Portland de altas especificaciones en un ambiente donde la concentración de cloruros y sulfatos del suelo sea elevado? En este estudio se contestará esta pregunta.

OBJETIVO

El objetivo del estudio es evaluar el desempeño de seis mezclas para lograr concretos potencialmente durables y resistentes, para seleccionar el de mejores características enfocando el estudio en:

- Determinar las propiedades mecánicas de seis dosificaciones de concreto.
- Elaborar mezclas de concreto poco permeables al paso de los cloruros.
- Determinar la expansión por ataque de sulfatos durante un periodo de doce meses.

1. ANTECEDENTES

En este capítulo se describen algunos aspectos relacionados con la durabilidad, así como sobre los componentes de una mezcla de concreto.

1.1. Durabilidad

Durante mucho tiempo se ha notado que el concreto es un material adecuado para lograr estructuras durables, ejemplo de los cuales son las que hoy en día siguen de pie después de muchos años, por lo tanto, se puede decir que el concreto es un material durable y a su vez resistente; sin embargo, en algunas estructuras se puede observar que el concreto se encuentra con algún grado de deterioro, como agrietamiento, descascaramiento y erosión, que puede afectar su capacidad estructural; en otras, se pueden apreciar estructuras que solo necesitan retoques en el acabado. Esta diferencia en el desempeño de los concretos con los que fueron realizadas las estructuras, se debe a las condiciones ambientales a las que está expuesto el concreto, a la idoneidad de los materiales y mezclas utilizados, así como a un diseño estructural apropiado ya que todos ellos influyen en su durabilidad.

Al tener en cuenta la durabilidad del concreto se está haciendo referencia al costo final de la obra y su vida útil.

Cuando se habla de durabilidad se refiere a la capacidad de resistir las condiciones ambientales a las que se expone la estructura de concreto, ya sean ataques químicos, físicos o cualquier otro proceso de deterioro. Es decir, el concreto deberá mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto a un ambiente agresivo.

1.2. Abrasión

Al hablar de un deterioro físico se hace referencia a la abrasión, ya que se presenta en el concreto como un desgaste producido por el rozamiento de la superficie, como el que se presenta en los pisos de instalaciones industriales por la acción del tránsito, el impacto o

el deslizamiento de materiales sueltos. El grado de deterioro esperado por el uso de las instalaciones se comenta a continuación:

- En pavimentos y pisos de concreto expuestos, utilizados como área de maniobras ligeras en industrias, por la circulación de todo tipo de vehículos con ruedas neumáticas y personas, puede alcanzar un grado de abrasión mediano o ligero.
- En el caso de pavimentos sometidos al tránsito de vehículos pesados y en plataformas con zonas de carga y descarga, el grado de abrasión puede ser severo.
- Por último, en el caso de pavimentos destinados para maniobras pesadas, en donde se requiere de vehículos provistos de orugas, o donde se manejen cargas pesadas y se tengan que arrastrar dichas cargas, como en el caso de patios de aserraderos, se puede llegar a tener un grado de abrasión muy severo.

Sí las instalaciones elaboradas con concreto se deterioran de manera rápida a causa de su uso, la vida útil de dicha obra es muy baja y, en consecuencia, muy alto el costo de la obra.

1.3. Ataque de sulfatos

Hoy en día el ataque de sustancias químicas en las estructuras provoca que muchas obras tengan que ser reparadas y otras tengan que demolerse, lo que ocasiona un costo elevado en cualquiera de los dos casos. Entre las sustancias químicas dañinas que encontramos comúnmente en el medio ambiente, destacan los sulfatos porque son potencialmente dañinas para el concreto fabricado con cemento Portland debido a que dan lugar a compuestos expansivos, como la etringita, que destruyen el concreto. Este compuesto ocasiona agrietamiento y desprendimiento de concreto en la estructura. En la tabla 1.1 se muestran diferentes grados de ataque de sulfatos.

Tabla 1.1. Grado de ataque de los sulfatos al concreto (ref. 30).

Grado de ataque	Porcentaje en peso de SO_4 en suelos	Ppm de SO_4 en muestras de agua
Despreciable	0.00-0.10	0-150
Moderado	0.10-0.20	150-1500
Severo	0.20-2.00	1500-10000
Muy severo	Mayor a 2.00	Mayor a 10000

Sin embargo, para que los sulfatos ocasionen un daño severo a las estructuras, se requieren dos condiciones: que los sulfatos se hallen en solución acuosa y que la concentración de los sulfatos en el medio sea alta.

1.4. Corrosión por cloruros

La corrosión del acero de refuerzo es una de las causas del deterioro prematuro de las estructuras, debido a que ocurre un proceso electroquímico, en el cual existen puntos con diferencia de potencial a lo largo de una misma barra o entre barras contiguas, los cuales funcionan como electrodos inmersos en solución de poro alcalina del concreto (ref. 30). Lo anterior ocasiona que la barra se oxide en el punto de mayor potencial (ánodo) generando hidróxidos ferrosos y férricos (herrumbre); los compuestos generados por la reacción son de mayor volumen que sus componentes, por lo que generan presiones internas que ocasionan que el concreto se fracture.

Por esta razón el concreto debe de tener una permeabilidad al paso de los cloruros baja; su determinación se realiza de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM C 1202 (ref. 20). La velocidad de reacción, depende del contenido de cloruros en la solución que está en contacto con la estructura de concreto reforzado y de los cloruros que provienen de los componentes de la mezcla de concreto.

1.5. Componentes de una mezcla de concreto

A) Cemento Portland

Este material cementante posee una composición química compleja a pesar de que su elaboración depende de materiales extraídos de la tierra. De esta manera la fabricación del cemento debe contener cal, sílice, alúmina y componentes de hierro en proporciones adecuadas. Según la norma NMX-C-414-ONNCCE los tipos de cemento son (ref. 35):

Por su composición

- CPO: Cemento Portland Ordinario
- CPP: Cemento Portland Puzolánico
- CPEG: Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno
- CPC: Cemento Portland Compuesto
- CPS: Cemento Portland con humo de Sílice
- CEG: Cemento con Escoria Granulada de alto horno

Por su resistencia

Clase	Resistencia, MPa		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

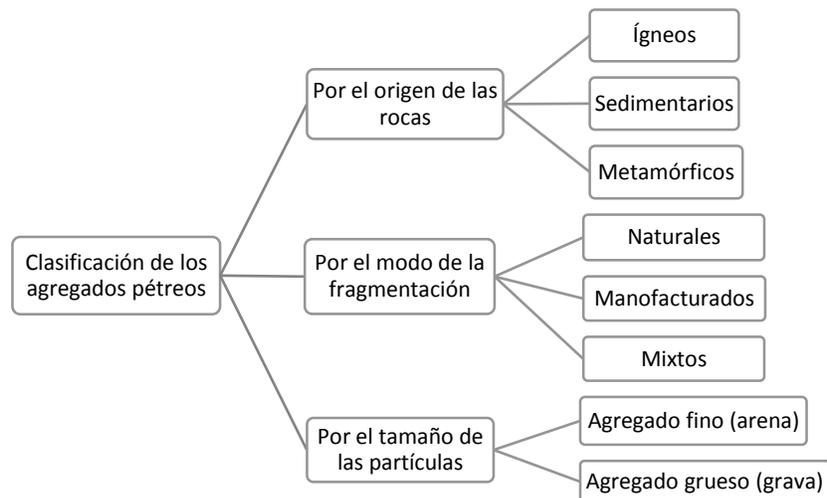
Por sus características especiales

- RS: Resistente a los sulfatos
- BRA: Baja Reactividad Álcali agregado
- BCH: Bajo Calor de Hidratación
- B: Blanco

El cemento Portland, es un cemento hidráulico compuesto por silicatos de calcio, aluminatos de calcio, ferroaluminatos de calcio y de sulfato de calcio (yeso). Este cemento se produce por la pulverización del clínker, el cual se obtiene por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice, junto con el yeso; al combinar el cemento hidráulico más agua, éste fragua y endurece para formar una masa a la cual se denomina pasta; la reacción química se genera por la hidratación del cemento.

B) Agregados pétreos

Los agregados son materiales granulares, los cuales se obtienen por la fragmentación, por causas naturales o medios artificiales. Se utilizan para la construcción de estructuras de concreto, mediante la combinación de un cementante y agua. Los agregados pétreos se clasifican por (ref. 23):



A su vez, los agregados se clasifican por una característica, la cual es el peso unitario como se muestra a continuación:

- Baja densidad (300 – 800kg/m³)
- Ligero (800 - 1400kg/m³)
- Ligero estructural (1400 - 1900kg/m³)
- Normal (2200 - 2500kg/m³)
- Pesado (2600 – 5500kg/m³)

C) Agua

Una parte importante para la interacción de los materiales que componen al concreto es el agua. Sin embargo, no se puede emplear cualquier tipo de agua ya que esta debe de estar libre de agentes nocivos para el concreto; los tipos de agua que contienen agentes dañinos para el concreto son aguas puras, ácidas naturales, fuertemente salinas, recicladas, industriales y negras.

Cuando se está en obra no siempre se puede contar con agua potable o en buenas condiciones, por ello la norma NMX-C-122 provee una tabla para marcar los límites de impurezas que puede contener el agua con la que se trabaja (ref. 32), tabla 1.2.

Tabla 1.2. Valores permisibles para el agua utilizada en obra (ref. 32).

Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas		
Impurezas	Límites en ppm	
	Cementos ricos en calcio	Cementos sulfuresistentes
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales	2000	2000
En aguas recicladas	50000	35000
Cloruros		
Para concreto con acero de preesfuerzo	400	600
Para concretos reforzados en ambiente húmedo	700	1000
Sulfato (SO ₄)	3000	3500
Magnesio (Mg ⁺⁺)	100	150
Carbonatos (CO ₃)	600	600
Dióxido de carbono disuelto (CO ₂)	5	3
Álcalis totales (NA ⁺)	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica	150	150
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 5

D) Adicionante mineral

El adicionante mineral como lo indica su nombre es una adición al cemento; principalmente se utiliza para mejorar alguna propiedad particular del concreto, como lo son la resistencia a los sulfatos o la permeabilidad del concreto. De las propiedades de los materiales adicionantes depende el efecto que llegue a tener en el concreto. La cantidad de adicionante se determina a través de ensayos, los cuales muestran si el material realmente mejora la propiedad y si la cantidad utilizada es correcta.

Los principales adiconantes minerales son la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice, el esquisto calcinado y la arcilla calcinada. El uso de los adiconantes empezó en la década de los 70's, sobre todo por los beneficios que pueden ofrecer al concreto.

E) Aditivos químicos

Los aditivos químicos se utilizan para modificar el comportamiento del concreto en estado fresco o endurecido y mejorar ciertas propiedades, por ejemplo mayor tiempo de fraguado debido a la reducción del calor de hidratación, rapidez en la adquisición de la resistencia, control de la reacción química con ciertos agregados, reducir la segregación o mejorar la condición de bombeo, por mencionar algunos.

Para alcanzar la propiedad deseada en el concreto se debe de tomar en cuenta que la eficacia del aditivo depende de factores como el tipo y cantidad de cemento, proporción de agua, forma del agregado, granulometría y proporciones, tiempo de mezclado, las temperaturas del concreto y del ambiente.

En general los aditivos se pueden clasificar como sigue (ref. 33):

- Tipo A Reductor de agua
- Tipo B Retardante
- Tipo C Acelerante de fraguado
- Tipo C2 Acelerante de fraguado inicial
- Tipo D Reductor de agua y retardante
- Tipo E Reductor de agua y acelerante
- Tipo F Reductor de agua de alto rango
- Tipo G Reductor de agua de alto rango y retardante
- Tipo F2 Superplastificante
- Tipo G2 Superplastificante y retardante
- Tipo AA Inclusor de aire

F) Concreto

Acorde con la definición que proporciona *ASTM C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates* el concreto es “un material compuesto constituido esencialmente por un medio aglutinante y partículas o fragmentos de agregados; en el concreto de cemento hidráulico, el aglutinante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua” (ref. 7).

Lo anterior quiere decir que el concreto es una mezcla de dos componentes, estos son agregados y pasta. Los agregados se dividen en finos, que pueden ser arena natural o

artificial con partículas de hasta 10mm, y gruesos, son las partículas que pueden ser retenidas en la malla número 16 y llegan usualmente a un tamaño máximo de 40mm. Sin embargo, para saber dónde se dividen los agregados finos de los gruesos, convencionalmente se acepta que los agregados mayores que 4.75mm (malla número 4) es el agregado grueso, menores de 4.75mm es el agregado fino. La pasta, combinación de cemento y agua, actúa como aglutinante de los agregados.

Por consiguiente, la mezcla de estos materiales produce una masa plástica que puede ser moldeable e incluso compactarse con facilidad. Pero esta característica no es permanente, ya que al paso del tiempo, hablando en término de horas, la masa se torna rígida y comienza a adquirir el comportamiento de un cuerpo sólido. Otra característica del concreto es que el agregado grueso tiene muy poco o ningún contacto entre sus partículas.

El comportamiento mecánico del concreto en estado endurecido depende de seis aspectos:

- 1) Las características, composición y propiedades de la pasta endurecida
- 2) La calidad de los agregados
- 3) La capacidad de trabajar en conjunto de los agregados y la pasta
- 4) Tipo y forma de los agregados pétreos
- 5) Relación agua/cemento
- 6) Tipo de cemento

Ante ello la resistencia de un concreto se ve directamente afectado por la relación agua/cemento. Esto quiere decir que la resistencia del concreto disminuye conforme se eleva la relación agua/cemento. Así mismo, la mezcla de concreto debe cumplir con tres objetivos:

- 1) Facilidad con que se puede colocar el concreto en estado fresco.
- 2) Propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido.
- 3) Ser económica.

En la práctica de la elaboración del concreto se puede apreciar la pérdida de la trabajabilidad, esto ocurre debido a la rigidización del concreto fraguado, lo que sucede después de un lapso de tres horas aproximadamente; sin embargo, el lapso depende de la composición del cemento, del aditivo utilizado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura ambiente. Esto quiere decir que el concreto fragua y se endurece, si se tiene temperatura y humedad adecuadas. En estas condiciones el concreto se vuelve resistente y duro.

2. MATERIAL Y EQUIPO EMPLEADO

2.1. Cemento Portland Compuesto

El cemento que se utilizó fue un cemento portland compuesto resistente a los sulfatos de nomenclatura CPC 40 RS, el cual ésta constituido por Clinker y yeso, incluyendo en su composición escoria granulada de alto horno, materiales puzolánicos y microsílíce, estos materiales pueden constituir el 50 por ciento de la mezcla. Las características físicas y químicas del cemento se presentan en la tabla 2.1.

Por el contenido de silicato tricálcico (C_3S), este cemento puede alcanzar resistencias a compresión aceptables, de acuerdo con su clasificación (40MPa a 28 días). Sin embargo, el contenido de aluminato tricálcico (C_3A), 9.5 por ciento, resultó superior al límite considerado como moderadamente resistente a los sulfatos que es de 8 por ciento (ref. 36). Dado que se pudo comprobar que el cemento es moderadamente resistente a los sulfatos, mediante análisis químico, se optó por usar este cemento para conocer su comportamiento ante la acción de los cloruros y sulfatos.

2.2. Agregados pétreos

Cuando se hace referencia a los agregados pétreos se habla de los agregados finos y gruesos, los cuales ocupan comúnmente de 60 a 70 por ciento del volumen del concreto e influye notablemente en la resistencia y durabilidad del concreto en estado endurecido.

Una característica física que distingue a los agregados finos de los agregados gruesos es el tamaño del agregado, con ello se tiene que si el diámetro del agregado es menor a 4.75mm o que el agregado pasa por la malla número 4, se le considera como agregado fino y por el contrario si el diámetro del agregado es mayor a 4.75mm o no pasa por la malla número 4, se le considera como agregado grueso.

Tabla 2.1. Características físico-químicas del cemento CPC 40 RS.

	Determinación	Unidades	Resultados	Especificación	
Pruebas físicas	Consistencia normal		% de agua	25.4	45 min
	Tiempo de fraguado	Inicial	min	112	
		Final	min	275	600 máx
	Vicat y/o Gillmore				
	Finura en malla 0.45 mm (No. 325)		% pasa	90.7	
	Superficie específica, Blaine		m ² /kg	418	
	Sanidad: expansión o contracción en autoclave		%	-0.01	-0.20 ó 0.80 máx
	Fraguado falso: Penetración final		%	43	
	Resistencia a la compresión				
		A 3 días	MPa	28.7	30 min
		A 7 días	MPa	36.1	
		A 28 días	MPa	42.9	40min
		Relación A/C		0.53	
		Fluidez	%	105	
Análisis químico	SiO ₂ -Sílice		%	18.53	
	Al ₂ O ₃ -Alúmia		%	5.32	
	Fe ₂ O ₃ -Óxido Férrico		%	2.72	
	CaO-Cal combinada		%	59.23	
	CaO-Cal libre		%	2.41	
	MgO-Magnesio		%	1.39	
	SO ₃ -Trióxido de azufre		%	3.75	
	Residuo insoluble		%	1.47	
	Pérdida por calsinación		%	4.02	
			Suma	98.84	
	Na ₂ O-Óxido de sodio		%	0.45	
	K ₂ O-Óxido de potasio		%	0.57	
	Total de álcalis (Na ₂ O+0.658K ₂ O)		%	0.83	
Compuestos potenciales	C ₃ S-Silicato tricálcico		%	59.78	
	C ₂ S-Silicato dicálcico		%	8.02	
	C ₃ A-Aluminato tricálcico		%	9.5	
	C ₄ AF-Ferro aluminato tetracálcico		%	8.28	
			Suma	87.43	

Para este estudio se determinó, al agregado fino y grueso, las propiedades: granulometría, densidad, absorción, peso volumétrico suelto, peso volumétrico compactado y partículas que pasan por la malla número 200 por el método de lavado. Dichas propiedades se definen como:

- **Granulometría:** es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado; esta propiedad se determina por la separación por tamaños a través de tamices. Los tamices son charolas con mallas en el fondo con un cierto tamaño de abertura dependiendo del número de tamiz.
- **Densidad:** es la magnitud que refleja la relación que existe entre la masa de un cuerpo y su volumen.
- **Absorción:** se determina con el fin de conocer el contenido neto de agua que es capaz de absorber un agregado seco al horno para llegar a la condición de saturado y superficialmente seco.
- **Peso volumétrico:** es la masa del agregado por unidad de volumen.
- **Peso específico:** es la relación de la densidad del agregado con respecto a la densidad del agua.

Los ensayos se realizaron de acuerdo con las siguientes normas:

- ASTM C 29, Unit Weight and Voids in Aggregate (ref. 2).
- ASTM C 33, Standard Specification for Concrete Aggregates (ref. 3).
- ASTM C 117, Materials Finer Than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing (ref. 6).
- ASTM C 127, Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate (ref. 8).
- ASTM C 128, Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate (ref. 9).
- ASTM C 136, Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ref. 10).

2.2.1. Agregado grueso

Para la fabricación de los concretos se empleó agregado grueso de 19mm (3/4") de tamaño máximo, de origen calizo, proveniente del Banco Ejido Ignacio Zaragoza del estado de Hidalgo. En la tabla 2.2 se presentan las propiedades físicas y en la figura 2.1 se muestra la granulometría de la grava caliza, donde se observa que la curva de la grava caliza se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C 33 (ref. 3), lo cual indica que la grava cumple con los requisitos de dicha norma.

Tabla 2.2. Propiedades físicas de la grava

Propiedades	Caliza
Tamaño Máximo, mm (pulgadas)	19(3/4)
Peso específico, seco	2.69
Peso específico, SSS	2.7
Absorción, %	0.57
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m ³	1423
Peso volumétrico seco (compacto), kg/m ³	1597

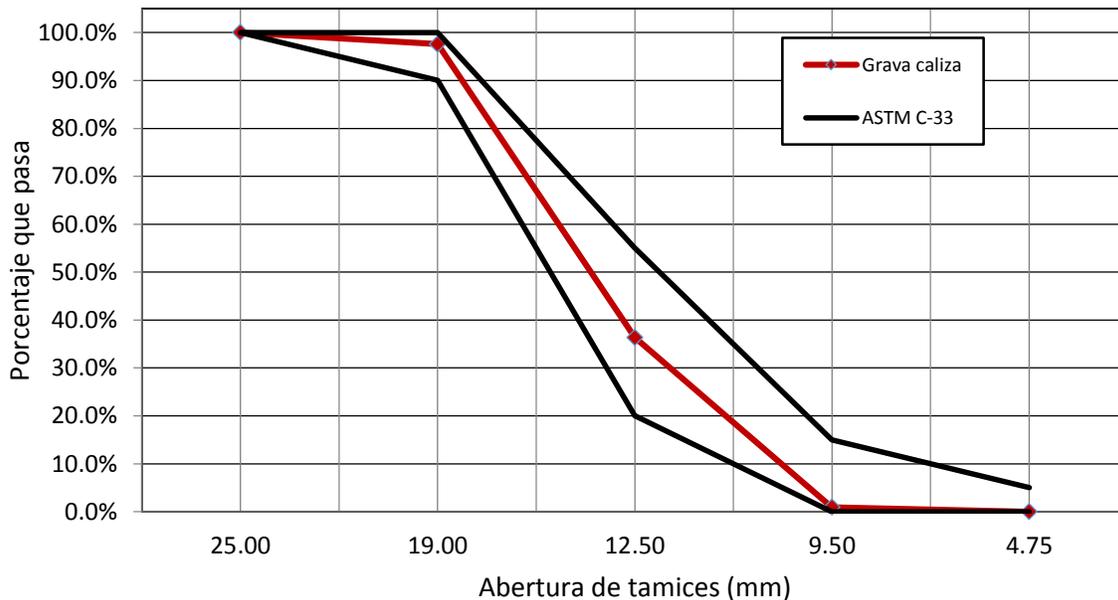


Figura 2.1. Curva granulométrica de la grava caliza, Banco Ejido, Ignacio Zaragoza.

2.2.2. Agregado fino

Como agregado fino se empleó arena de origen andesítico proveniente de la mina La Lupita del Estado de México. En la tabla 2.3 se presentan las propiedades físicas y en la figura 2.2 se muestra la granulometría de la arena andesítica, donde se observa que la curva de la arena andesita se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C 33 (ref. 3), lo cual indica que la grava cumple con este requisito de dicha norma. El contenido de finos que pasa la malla #200, excede en demasía el límite superior considerado como aceptable (7%) para finos que no incluyan arcilla y concreto no sujeto a abrasión.

Tabla 2.3. Propiedades físicas de la arena.

Propiedades	La Lupita
Módulo de finura	2.67
Peso específico, seco	2.23
Peso específico, SSS	2.38
Absorción, %	6.73
Pasa malla # 200, %	18.58
Peso volumétrico seco (suelto) kg/m ³	1502
Peso volumétrico seco (compacto) kg/m ³	1646

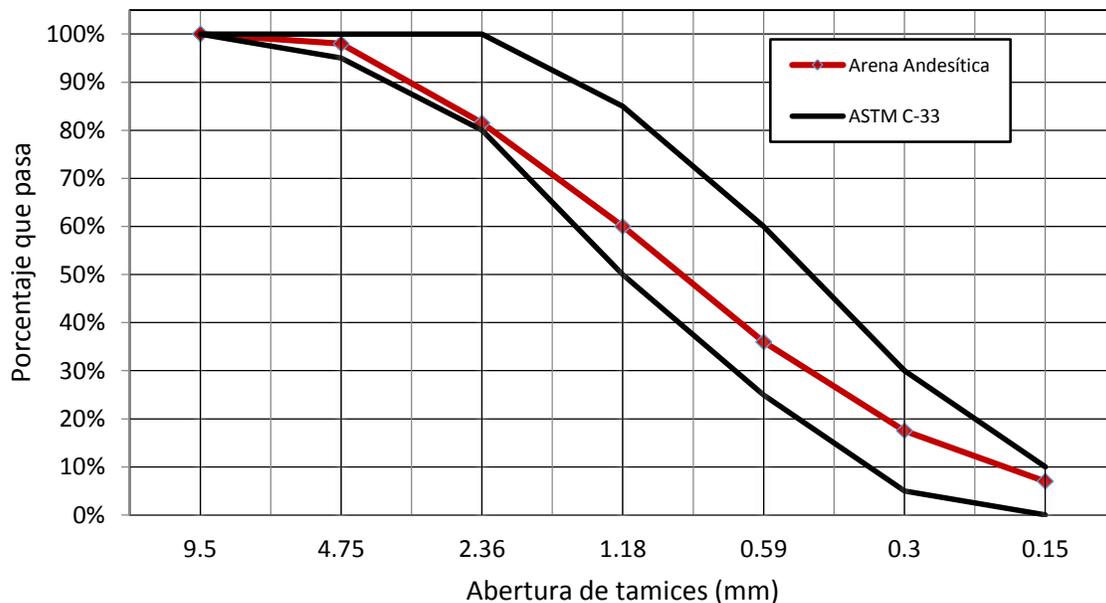


Figura 2.2. Curva granulométrica de la arena andesita, Estado de México, La Lupita.

2.3. Agua

El tipo de agua que se utilizó en este estudio fue agua potable, obtenida del sistema de distribución de agua potable de la UNAM. Se define como agua potable aquella que es apta para la alimentación y el uso doméstico, debido a que no contiene sustancias, ni microorganismos que puedan provocar enfermedades o perjudicar a la salud de las personas que la consuman.

2.4. Aditivo y adiciones

Para la fabricación de los concretos se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango, hiperfluidificante (Plastol Precast) a base de policarboxilatos, que cumple con los requerimientos de la norma ASTM C 494 para los aditivos tipo F (ref. 17).

El aditivo tipo F es un superfluidificante utilizado en losas de concreto, cimentaciones, muros y columnas, además de que se emplea como reductor de agua e incrementa la resistencia por la baja relación agua/cemento requerida. Se recomienda para concreto pretensado o postensado.

Para este estudio se utilizó como adiconante mineral el humo de sílice, el cual está compuesto mayormente por silicio (SiO_2) entre 85 y 98 por ciento; sus partículas esféricas son muy finas, entre 0.1 y 0.2 μm de diámetro y son 100 veces más finas que las partículas del cemento portland; su densidad específica es de aproximadamente 2.2g/cm³. Este adiconante mineral se emplea con el fin de alcanzar alto grado de impermeabilidad y alta resistencia en el concreto.

Por sus características, el humo de sílice ayuda a proteger el acero de refuerzo; su baja permeabilidad impide el ingreso de los iones de cloro y reduce la conductividad eléctrica, lo cual evita el proceso electroquímico de la corrosión. En relación con el ataque por sulfatos, el humo de sílice reduce el contenido de hidróxido de calcio libre y alúmina, y con esto la formación de etringita evitando la expansión del concreto.

La incorporación de humo de sílice reduce los tiempos de fraguado e incrementa la demanda de aditivo superfluidificante para lograr una buena trabajabilidad en la mezcla. En la tabla 2.4 se presentan las características físico-químicas del humo de sílice, ensayos realizados por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), así como los requerimientos específicos de la norma ASTM C 1240 (ref. 21).

Tabla 2.4. Características físico-químicas del humo de sílice.

Determinación		Unidades	Resultados	Especificación Clase F
Requerimientos Físicos	Índice de actividad puzolánica, mínimo de control a 7 días	%	94	75
	Índice de actividad puzolánica, mínimo de control a 28 días	%	109	75
	Expansión en autoclave, máxima	%	-0.03	0.8
	Densidad	g/cm ³	2.2	
Requerimientos Químicos	Dióxido de silicio (Si O ₂)+Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)+Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), mínimo	%	95	70
	Trióxido de azufre (SO ₃), máximo	%	0.3	5
	Pérdida por calcinación, máximo	%	2.8	6
	Humedad, máxima	%	0.005	3
	Álcalis disponibles, máximo	%	0.3	1.5

2.5. Equipos e instrumentación

A) Equipo para pruebas mecánicas

Para los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, se empleó una prensa Universal Testing Machine de capacidad de 500,000lb, imagen 2.1.

Para la realización de la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson se utilizaron un par de deformímetros LVDT (Linear Variable Differential Transformer), los cuales se emplean para registrar las deformaciones transversales y longitudinales del espécimen cilíndrico con el incremento de la carga, imagen 2.2.



Imagen 2.1. Fotografías del equipo completo de "Universal Testing Machine".



Imagen 2.2. Fotografías del equipo para la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson junto con la muestra de la colocación en especímenes.

B) Equipo para pruebas de contracción por secado y ataque por sulfatos

El equipo utilizado para las pruebas de contracción por secado fue la cámara seca, con temperatura de 23°C y humedad relativa de 50%, y un aparato con graduación de 0.001 pulgadas, adecuado para medir las variaciones de longitud de acuerdo con la norma ASTM C 490 (ref. 16), imagen 2.3.



Imagen 2.3. Tipo de aparato adecuado para la medición de las variaciones de longitud en especímenes prismáticos.

Con este mismo aparato se realizó la medición de la expansión ocasionada por los sulfatos, con el mismo tipo de especímenes prismáticos.

C) Equipo para la resistencia a la abrasión

La determinación de la resistencia a la abrasión se realizó con un equipo que utiliza arena sílica 50-80, arena que pasa por la malla número 50 y se retiene en la malla número 80. Este aparato cuenta con dos regaderas de agua (1), un disco esmeril (2), dos tolvas de depósito para la arena sílica (3), dos tolvas para el agua (4) y una serie de engranajes encargados de que el disco esmeril gire (5), imagen 2.4A).

El espécimen prismático con dimensiones 50 x 50 x 100mm, se coloca en una prensa ajustada por un par de torniquetes; la prensa mantiene fija la probeta ejerciendo una presión de 250g/cm². Primeramente la prensa se mantiene a una altura de 5cm arriba del disco de esmeril para que la probeta se coloque encima del disco, de esta manera se ajusta la probeta y se deja con la presión que ejerce la prensa para su desgaste con el disco de esmeril, imagen 2.4B).



A) Fotografía del aparato



B) Fotografía de la colocación del espécimen prismático

Imagen 2.4. Aparato utilizado para el desgaste de los especímenes prismáticos de 50 x 50 x 100mm.

D) Equipo para permeabilidad al agua

El equipo GWT-4140 (German Water Permeation Test) se utiliza para determinar microfisuración y porosidad superficial del concreto. El equipo permite realizar ensayos en sitio, ya sea en pared o en el piso de la estructura (figura 2.3), o en el laboratorio, imágenes 2.5 y 2.6. La prueba se realizó mediante la aplicación de presión de agua a la superficie del concreto.



Imagen 2.5. Adaptación del aparato en laboratorio.

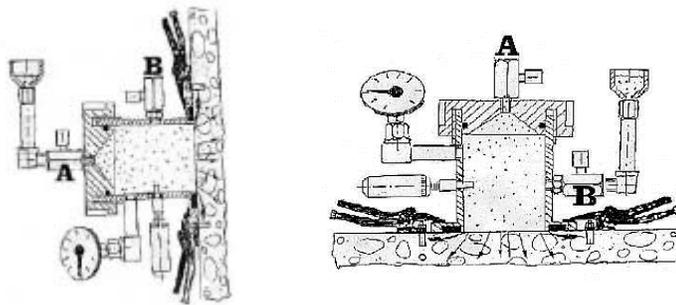


Figura 2.3. Colocación del aparato GWT en sitio.



Imagen 2.6. Fotografía del aparato GWT con adaptación hacia medios cilindros.

El equipo, que se muestra en la imagen 2.7, incluye:

- Cámara de presión con manómetro, medidor de presión de 0 a 1.6 BAR, válvulas, junta y la tapa roscada con presión o-ring.
- Llave de aluminio para girar la tapa de presión.
- Medidor extra de presión 0-6 BAR, para uso alternativo.
- Taza de relleno de agua con L-joint.

- Dos pinzas de sujeción ajustables y las herramientas de anclaje (broca de 8mm, 20 anclas de acero desechables, de deriva y de martillo, tornillos de 6 mm, tuercas y arandelas, junto con llave de 10mm) y llaves de 14mm y 17mm.
- Cinta sellante.
- Tres botellas de agua hervida.
- Cuatro juntas de 10mm de altura y cuatro juntas de 15mm de altura (para presión mayor que 1.0 BAR o para superficies curvas).
- Manual en la tapa de la maleta de aluminio con forro de espuma.



Imagen 2.7. Fotografía del equipo completo "GWT-4140".

E) Equipo para permeabilidad al ión cloruro

El equipo "PROOVE'it" está diseñado para realizar una indicación eléctrica rápida y automatizada de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones cloruro conforme a la norma ASTM C 1202, permeabilidad al ión cloruro, imagen 2.8.

Se cuenta con una escala en Coulombs para caracterizar el grado de permeabilidad al ión cloruro de la muestra de concreto, tabla 2.5.

Tabla 2.5. Penetrabilidad al ión cloruro sobre la base de carga eléctrica.

Coulombs	Permeabilidad al ión cloruro	Típico de
>4000	Alta	Alta relación A/C
4000-2000	Moderada	Relación A/C 0.4-0.5
2000-1000	Baja	Relación A/C < 0.4
1000-100	Muy baja	Concreto modificado con látex
<100	Despreciable	Concreto con Polímero

El equipo cuenta con los siguientes aditamentos para su correcto uso:

- Unidad PROOVE'it © microprocesador Power Supply para la evaluación de un máximo de 8 celdas, requiere un PC compatible con IBM con el sistema operativo de Windows.
- PROOVE'it © software
- PROOVE'it © Manual
- PROOVE'it © Celdas de medición con dos juntas de caucho
 - PR-1010A, juntas de 99mm de diámetro interior, diámetro exterior de 12mm
 - PR-1010B, juntas de 93mm de diámetro interior, diámetro exterior de 126mm (estándar)
 - PR-1010C, 90mm de diámetro interior. Juntas, diámetro exterior. 126mm
 - PR-1010-75, 75mm de diámetro interior. Juntas
- PROOVE'it © Celdas de medida con aletas de refrigeración
- Cable de conexión roja de celda a unidad de microprocesador Power Supply
- Cable de conexión negra de celda a unidad de microprocesador Power Supply
- Sonda de temperatura, uno por canal.
- Dos llaves de 17mm para apretar los pernos de las celdas.
- Botella de 300ml de solución de NaCl al 3.0%
- Botella de 300ml de solución 0.3N de NaOH
- Cable principal de 220VAC

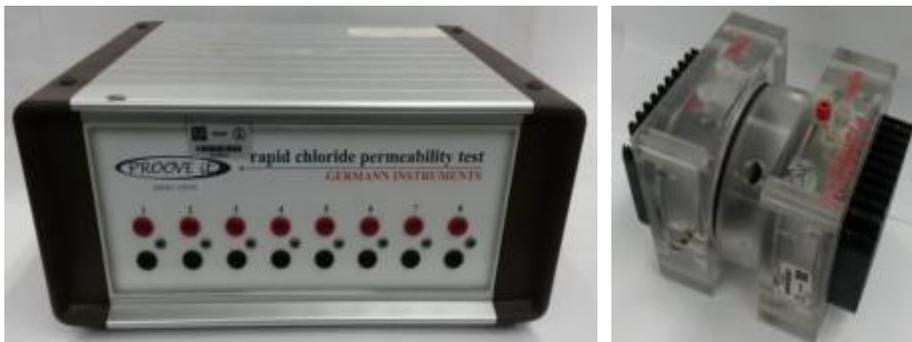


Imagen 2.8. Fotografía de la unidad PROOVE'it y ejemplo de la celda, con la cual se capta la permeabilidad.

3. MEZCLA DE CONCRETO EN ESTUDIO

Para este estudio el criterio empleado para la dosificación de las mezclas de concreto fue el de volúmenes absolutos. Los ensayos se realizaron con el fin de conocer la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto fabricado con un cemento clasificado como resistente a los sulfatos, de nomenclatura CPC 40 RS (ref. 35), con relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.40. Dichas mezclas se fabricaron con agregado grueso calizo y agregado fino andesítico.

3.1. Proporcionamiento

El proporcionamiento se realizó de acuerdo con la práctica estándar para concreto normal, pesado y en masa, ACI 211.1. De la tabla A 1.5.3.3 de las recomendaciones de diseño de mezclas (ref. 1) se obtiene la cantidad de agua de 190 litros, utilizando los datos de tamaño del agregado grueso de 19mm y el revenimiento deseado de 2 a 5cm. Además, en la misma tabla A 1.5.3.3 se proporciona el volumen de aire atrapado que llega a contener la mezcla, para este estudio fue de 2 por ciento. Con la cantidad de agua proporcionada por la tabla A 1.5.3.3 se realizaron ensayos de revenimiento, cambiando la cantidad de agua hasta que el revenimiento estuviera en el rango propuesto de 2 a 5cm. Los ensayos dieron como resultado la cantidad de 185 litros de agua (los resultados de dichos ensayos no se incluyen en este estudio).

Los consumos de cemento fueron de 411.11 y 462.50kg/m³, debido a las relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.40, respectivamente; las relaciones mencionadas fueron tomadas de las recomendaciones para concreto expuesto a ambientes que contengan altas concentraciones de sulfatos (tabla 4.2 de la ref. 36).

Para demostrar la forma en que se realizó el proporcionamiento, en este capítulo se incluirán dos ejemplos; en las dosificaciones se tienen tres mezclas por cada relación agua/cemento y en cada una se tiene la mezcla testigo que difiere en su dosificación de las otras dos.

Ejemplo 1:

Primeramente para determinar la cantidad de cemento se utiliza la relación agua/cemento, dado que la cantidad de agua resultante de los ensayos de revenimiento fue de 185 litros, se tiene:

$$\text{Rel} \frac{A}{C} = 0.45$$

$$0.45 = \frac{185}{C}$$

$$C = 411.11 \text{ kg/m}^3$$

Se procede a determinar la cantidad de aditivo, sabiendo que en estas pruebas la cantidad a utilizar es de 8 a 10cm³ por kilogramo de cemento; para las primeras tres mezclas se utilizó una cantidad de 8cm³ por kilogramo de cemento y para las últimas tres se utilizó 8, 9 y 10cm³ por kilogramo de cemento para cada una de las mezclas restantes respectivamente; dado lo anterior la cantidad de aditivo se calcula multiplicando la cantidad de cemento por los centímetros cúbicos utilizados:

$$\text{Aditivo} = 8 \text{ cm}^3/\text{kg} \times 411.11 \text{ kg} = 3288 \text{ ml} \approx 3.29 \text{ l/m}^3$$

La dosificación de las mezclas, se realizó por el criterio de volúmenes absolutos; dicho criterio hace referencia a un metro cúbico de concreto, con lo anterior para determinar las cantidades de los agregados pétreos se realiza por medio de la resta de los volúmenes de agua, cemento, aditivo y aire al metro cúbico de concreto. Con el volumen restante se realiza el proporcionamiento de la grava y la arena, los cuales fueron propuestos de 52 y 48 por ciento respectivamente. Como se muestra a continuación:

Cemento=	411.11 kg	411.11/3.15=	130.51 l
Grava 52%=			
Arena 48%=			
Aire=			20.00 l
Agua=	185.00 kg		185.00 l
Aditivo=	3.29 kg		3.29 l
			338.80 l

Para determinar el volumen de los materiales se dividió el peso del cemento, agua y aditivo entre sus respectivas densidades y se añadió el dos por ciento de aire atrapado, que en este caso representa 20 litros.

$$1000 \text{ l} - 338.80 \text{ l} = 661.20 \text{ l}$$

Ahora con esta cantidad se procede a obtener los agregados pétreos, multiplicando los volúmenes resultantes por el peso específico de cada material en estado seco. Como el

peso específico es la densidad relativa del agregado con respecto a la densidad del agua (1kg/l), el peso del agregado se puede obtener multiplicando el volumen del agregado por el peso específico del mismo.

$$PE_{\text{grava}} = 2.69$$

$$PE_{\text{arena}} = 2.23$$

$$\text{Grava} = 0.52 \times 661.20 = 343.82 \text{ l}$$

$$\text{Arena} = 0.48 \times 661.20 = 317.38 \text{ l}$$

$$\text{Grava} = 343.82 \times 2.69 = 924.89 \text{ kg}$$

$$\text{Arena} = 317.38 \times 2.23 = 707.75 \text{ kg}$$

Como resultado, la dosificación para la primera mezcla, mezcla testigo, fue:

Cemento=	411.11	kg
Grava 52%=	924.89	kg
Arena 48%=	707.75	kg
Agua=	185.00	kg
Aditivo=	<u>3.29</u>	kg
Peso total	2232.04	kg

Ejemplo 2:

Para este ejemplo la diferencia radica en la incorporación del adicinante mineral; la cantidad de agregado grueso de la dosificación anterior se mantuvo constante.

Como se mencionó en el ejemplo anterior la relación agua/cementante fue de 0.45 y la cantidad de agua de 185 litros, por lo tanto, la cantidad de cemento más adicinante mineral permaneció en 411.11kg. En esta mezcla se agrega como adicinante mineral el humo de sílice o SF (Silica Fume) por sus siglas en inglés. Este adicinante se añadió a las dos mezclas restantes de la relación 0.45, en porcentajes de 5 y 10 por ciento con respecto a la cantidad de cemento utilizado en la mezcla testigo, como sustituto de su respectivo peso de cemento.

Para la mezcla del ejemplo se añadió 5 por ciento de SF en sustitución de parte del cemento empleado, haciendo el cálculo:

$$SF = 0.05 \times 411.11 = 20.56 \text{ kg}$$

Para la estimación del volumen de cada material, se dividen los pesos entre los pesos específicos de cada uno, por lo tanto:

Cemento=	390.56 kg	$390.56/3.15=$	123.99 l
SF=	20.56 kg	$20.56/2.2=$	9.34 l
Grava=	924.89 kg	$924.89/2.69=$	343.82 l
Arena=			
Aire=			20.00 l
Agua=	185.00 kg		185.00 l
Aditivo=	3.29 kg		<u>3.29 l</u>
			685.44 l

De igual manera, se realiza la diferencia entre un metro cúbico de concreto y el resultado de la suma:

$$1000 \text{ l} - 685.44 \text{ l} = 314.56 \text{ l}$$

Como en el ejemplo anterior, la cantidad de 314.56 litros se multiplica por el peso específico de la arena, obteniendo:

$$\text{Arena} = 2.23 \times 314.56 = 701.46 \text{ kg}$$

Obteniendo como resultado la siguiente dosificación:

Cemento=	390.56 kg
SF=	20.56 kg
Grava=	924.89 kg
Arena=	701.46 kg
Agua=	185.00 kg
Aditivo=	<u>3.29 kg</u>
Peso total	2225.76 kg

En la tabla 3.1 se muestran las dosificaciones de las mezclas empleadas para este estudio.

Tabla 3.1. Dosificación de materiales componentes de las mezclas de concreto.

Consumo de Cementante	Mezcla	Cantidades por m ³						Relación A/C
		Cemento	Sílica Fume	Grava Caliza	Arena Andesítica	Agua	Plastol Precast	
kg/m ³		kg	kg	kg	kg	l	l	
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	411.11	0	924.89	707.75	185.00	3.29	0.45
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	390.56	20.56	924.89	701.46	185.00	3.29	0.45
	M3-C370-SF41.11-GC20	370.00	41.11	924.89	695.18	185.00	3.29	0.45
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	462.50	0	901.49	670.45	185.00	3.70	0.40
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	439.38	23.125	901.49	662.81	185.00	3.95	0.40
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	416.25	46.25	901.49	655.28	185.00	4.16	0.40

3.2. Elaboración del concreto

Para la elaboración del concreto, se debe tener en cuenta las pruebas que se realizarán a fin de calcular el volumen a partir de los moldes a utilizar; para este estudio, el volumen requerido fue de 255 litros. Debido a que en el laboratorio se tiene una revolvedora de 90 litros de capacidad, el número de bachadas realizadas para cada mezcla fue de tres de 85 litros cada una, con el fin de lograr un mezclado homogéneo.

Por cada bachada de 85 litros, se ajustaron las cantidades; se utilizará el ejemplo 1 para demostrar el ajuste por el volumen de cada bachada, por humedad y absorción de los agregados.

Ejemplo 1:

Teniendo la dosificación para un metro cúbico, primero se realizará el ajuste por humedad y absorción; este proceso se realiza obteniendo los porcentajes de humedad y absorción de los agregados pétreos. Se empezará con la obtención de la absorción, dicho porcentaje se obtuvo a través del promedio de tres pruebas, en las cuales se obtuvo un peso seco y un peso en SSS (Saturado y Superficialmente Seco), es decir, con todos sus poros llenos de agua y libre de humedad superficial, ya que si los agregados están saturados y superficialmente secos no pueden absorber ni ceder agua durante el proceso de mezclado. Los resultados fueron los siguientes:

	Grava Caliza 3/4			Arena Andesítica		
Muestras	1	2	3	1	2	3
Peso seco	1491.6	1490.8	1492.2	467.9	469.5	468
Peso SSS	1500	1500	1500	500	500	500

Con los datos anteriores, se procede a calcular la absorción con la siguiente fórmula:

$$\%ABS = \frac{Wm_{SSS} - Wm_{seca}}{Wm_{seca}} \times 100$$

Sustituyendo con los datos de la muestra 1, se obtiene:

$$\%ABS_{muestra\ 1} = \frac{1500 - 1491.6}{1491.6} \times 100 = 0.56\%$$

Con lo anterior, realizando las operaciones para cada muestra y el promedio, se tienen los siguientes datos:

	Grava Caliza 3/4			Arena Andesítica		
Muestras	1	2	3	1	2	3
Absorción	0.56%	0.62%	0.52%	6.86%	6.50%	6.84%
Promedio	0.57%			6.73%		

Estos porcentajes se utilizaron de manera general para todas las mezclas ya que es un parámetro de la calidad de los agregados pétreos; dichas pruebas se realizaron conforme a las normas ASTM C 127 y 128 (ref. 8 y 9).

Se procede a obtener el porcentaje de humedad; dicho porcentaje se obtiene para el día en que se realiza la mezcla, porque éste depende de la humedad que los materiales pudieran obtener al estar almacenados. La fórmula utilizada para el porcentaje de humedad es la siguiente:

$$\%HUM = \frac{W_m - W_{m_{seca}}}{W_{m_{seca}}} \times 100$$

Para realizar el cálculo se utilizarán los pesos obtenidos para el día de la mezcla M1, primeramente se toma una muestra de 1 kilogramo de los agregados y enseguida se mete a secar en horno a una temperatura de $100^\circ \pm 5^\circ$ Celsius durante 24 horas, por lo tanto:

Grava

$$W_m = 1000 \text{ g}$$

$$W_{m_{seca}} = 998.4 \text{ g}$$

$$\%HUM = \frac{1000 - 998.4}{998.4} \times 100 = 0.16\%$$

Arena

$$W_m = 1000 \text{ g}$$

$$W_{m_{seca}} = 984.5 \text{ g}$$

$$\%HUM = \frac{1000 - 984.5}{984.5} \times 100 = 1.57\%$$

Con estos datos, se realiza una resta entre la humedad y la absorción, tomando como resultado negativo la absorción.

Agregado	%Humedad	%Absorción	Resultado
Grava	0.16	-0.57	= -0.41
Arena	1.57	-6.73	= -5.16

Para realizar la corrección, primero se obtienen las cantidades de grava y arena húmeda que se requiere incorporar a la mezcla; las cantidades correspondientes se suman a la cantidad de grava y arena que se calculó desde un principio.

$$\text{Grava} = 924.89 \text{ kg}$$

$$924.89 \times (1 + 0.0016) = 926.40 \text{ kg}$$

$$\text{Arena} = 707.75 \text{ kg}$$

$$707.75 \times (1 + 0.0157) = 718.90 \text{ kg}$$

Ahora las cantidades corregidas son:

$$\text{Grava} = 926.40 \text{ kg}$$

$$\text{Arena} = 718.90 \text{ kg}$$

Con los porcentajes de humedad y absorción se corrige la cantidad de agua, ya que estos agregados pueden contribuir a quitar o agregar agua necesaria para la mezcla, por lo tanto, sumando las cantidades resultantes de los porcentajes, se tiene la cantidad de agua que se requerirá agregar a la mezcla, porque los agregados están más secos que la

condición SSS, por lo tanto, con la suma de los porcentajes de la diferencia entre humedad y absorción de cada agregado se tiene la siguiente cantidad de agua:

$$\text{Grava} = 926.40(-0.0041) = -3.80 \text{ kg}$$

$$\text{Arena} = 718.9(-0.0516) = -37.10 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad de agua} = 185 + 3.80 + 37.10 = 226.9 \text{ l}$$

Con las cantidades de agregados y agua corregidas, la dosificación es:

$$\text{Cemento} = 411.11 \text{ kg}$$

$$\text{Grava} = 926.40 \text{ kg}$$

$$\text{Arena} = 718.90 \text{ kg}$$

$$\text{Agua} = 226.90 \text{ kg}$$

$$\text{Aditivo} = 3.29 \text{ kg}$$

Para terminar, la dosificación debe multiplicarse cada cantidad por 0.085, ya que es la cantidad que corresponde a 85 litros por cada bachada:

$$\text{Cemento} = 34.94 \text{ kg}$$

$$\text{Grava} = 78.74 \text{ kg}$$

$$\text{Arena} = 61.11 \text{ kg}$$

$$\text{Agua} = 19.28 \text{ kg}$$

$$\text{Aditivo} = 0.28 \text{ kg}$$

Una vez hecho esto, se procede a pesar cada una de las cantidades con respecto a la dosificación anterior, para cada bachada. Después se calcula el diez por ciento del cemento, arena y agua para formar una lechada, que se agrega antes de introducir los componentes de la mezcla, con el fin de recubrir las paredes de la revolvedora y que el volumen de cada material no se quede pegado en las mismas.

Se procede a verter los materiales dentro de la revolvedora empezando con la arena y la grava con un diez por ciento del volumen total de agua, revolviéndolos durante un minuto, para homogeneizar la mezcla de los agregados pétreos. Una vez mezclado los agregados pétreos se procede a verter primero el cemento y después el adicionante mineral. Con estos materiales dentro revolvedora se procede a revolver, agregando agua durante el proceso para homogeneizar la mezcla. Por último, se procede a verter el aditivo, cuando la mezcla se está revolviendo.

El tiempo de revoltura inicial es de dos minutos, pasado ese tiempo se deja reposar el concreto tapando la revolvedora con una franela húmeda. El reposo dura un minuto, sirve para que se presente el fraguado falso del cemento, en caso de existir. Para finalizar con la

mezcla de los materiales, terminado el reposo se deja un tiempo de revoltura final de tres minutos para romper, en su caso, el fraguado falso y terminar la homogeneización de los componentes del concreto.

Con la mezcla elaborada, se procede a realizar los ensayos de revenimiento, peso volumétrico y aire atrapado, previamente se humedecen los instrumentos utilizados en los ensayos. Durante la realización de dichos ensayos, se engrasan los moldes para que el concreto no quede adherido a ellos. Para finalizar, se procede a rellenar y compactar cada uno de los especímenes; los moldes de cilindros se rellenan en tres capas, compactando cada capa con mesa vibratoria durante un tiempo de treinta segundos por capa; de la misma manera se rellenan los moldes de los especímenes prismáticos, acabado el llenado de los moldes se enrazan cada uno de ellos para eliminar el material en exceso.

Acabado el proceso de mezcla y colocación en moldes, se procede a dejar que los especímenes fragüen y el concreto endurezca durante un periodo de veinticuatro horas. Pasado ese tiempo, se desmoldan todos los especímenes y se llevan a la cámara húmeda para que alcancen su resistencia a determinados tiempos; para el estudio fueron de 7, 14, 28 y 91 días.

4. ENSAYES REALIZADOS

4.1. Concreto en estado fresco

Cuando el concreto está recién hecho no tiene una forma definida y es fácil de manipular para colocarlo en la cimbra para darle forma. Esto ocurre desde que el concreto se termina de mezclar hasta que se inicia el fraguado.

4.1.1. Revenimiento

Con la prueba de revenimiento se puede observar la consistencia, es decir, una medición de la facilidad con la que es posible colocar, manejar y compactar el concreto en la obra. Este ensaye se realiza con el cono de Abrams y una varilla de medidas específicas de acuerdo con la norma ASTM C 143 (ref. 12). El cono es puesto en una superficie horizontal rígida y húmeda, se rellena en tres capas, cada capa se compacta con 25 golpes de varilla estándar, se enrasa la parte superior del cono para que el concreto tenga las medidas del cono de Abrams y por último se levanta el cono en un tiempo de 5 ± 2 segundos sin movimientos laterales. A continuación el cono de Abrams se voltea y se coloca al lado de la muestra de concreto; con la varilla en la parte superior del cono que sirve como referencia, se toman tres medidas, al centro, al lado izquierdo y al lado derecho para determinar el asentamiento del concreto. Como se muestra en la imagen 4.1.



Imagen 4.1. Ensaye de revenimiento

4.1.2. Peso volumétrico

El peso volumétrico del concreto es un ensaye en el que se verifica la uniformidad, en las proporciones y componentes de la mezcla, si el valor cambia de manera drástica indica que algunos de los ingredientes han cambiado en su proporción o sus características, principalmente en la densidad del agregado grueso. La realización del ensaye en cuestión, puede ser llevado a cabo junto con el ensaye de aire atrapado, calculando el volumen y tomando el peso del recipiente antes y después de agregar el concreto; el peso volumétrico se obtienen en kg/m^3 . Ensaye realizado conforme a la norma ASTM C 138 (ref. 11).

4.1.3. Aire atrapado

En este ensaye lo que se pretende es medir la cantidad de aire que contiene el concreto recién mezclado para que éste pueda protegerse de los cambios de temperatura (congelación y deshielo). El ensaye se lleva a cabo mediante la determinación del volumen de agua que se infiltra en el concreto con un cambio de presión interna en el equipo.

Para realizar el ensaye, el recipiente se llena en tres capas con el concreto fresco, compactando cada capa con 25 golpes de varilla, se enrasa el recipiente y se tapa; previamente se humedece el recipiente y la tapa para evitar que se adhiera el concreto, a continuación se llena con agua el volumen de la tapa hasta purgar el líquido al través de unas válvulas, posteriormente se cierran las válvulas y se bombea aire, la presión que se levanta mueve la aguja de un indicador en la tapa del recipiente, después se libera la presión y se lee el contenido de aire directamente en el indicador. Ensaye realizado conforme a la norma ASTM C 231 (ref. 14), imagen 4.2.



Imagen 4.2. Fotografía del aparato para medir el contenido de aire.

4.2. Concreto en estado endurecido

Al haber acabado con la etapa de ensayos en estado fresco, el concreto empieza a fraguar y endurecer para que de esta forma pueda desarrollar características de resistencia, durabilidad, estabilidad e impermeabilidad, cuando fue elaborado adecuadamente.

4.2.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del concreto se determina para comprobar si la dosificación de la mezcla es adecuada para cumplir con la resistencia de diseño, para verificar la uniformidad de la resistencia, ajustarla al nivel requerido para la producción del concreto y para verificar la resistencia del concreto en la estructura. En los dos primeros casos se toman las muestras de concreto en estado fresco y en el último se toma la muestra, o mejor dicho, los especímenes de ensaye del concreto en estado endurecido proveniente de la estructura.

Con lo anterior, la determinación de la resistencia a compresión consiste en ensayar especímenes representativos del concreto que se prueban hasta la falla a la velocidad de carga de 25t/min, por esta razón se le considera como ensaye destructivo, como se muestra en la figura 4.1. Estos especímenes se elaboran de forma cilíndrica, tomando como base que la altura del cilindro sea dos veces el diámetro, o de forma cúbica, las cuales son más utilizados en algunos países europeos.

En la práctica se utilizan cilindros de 150 x 300mm, como medida estándar; dado que el espécimen se somete a una carga axial, sus bases deben de ser paralelas y perpendiculares al eje de la carga axial. Ante el hecho de que el concreto tiene que haber alcanzado un porcentaje elevado de su resistencia potencial, los cilindros se prueban en periodos determinados; de manera estandarizada, se tienen las edades de 7, 14, 28, 91 y 180 días, de los cuales se toma un cierto intervalo para el estudio que se requiera. Los ensayos se realizaron conforme a la norma ASTM C 39 (ref. 4).

Para el estudio realizado se tomaron las edades de 7, 14, 28 y 91 días. Los ensayos fueron realizados con cilindros de 150mm de diámetro y 300mm de altura. Para que se realice el cálculo de la resistencia a compresión se utilizó la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

donde:

f_c , esfuerzo máximo a compresión, kg/cm²

P, carga máxima, kg

A, área de la sección transversal, cm²

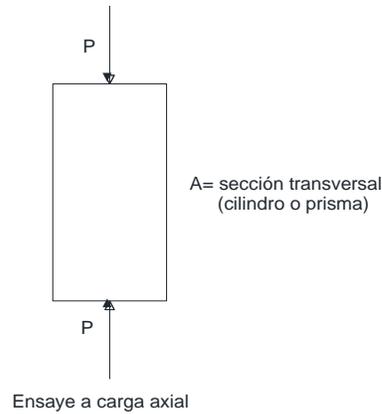


Figura 4.1. Descripción gráfica de la prueba a compresión, figura tomada de la referencia 10.

4.2.2. Resistencia a tensión

En cuanto a la resistencia a tensión, en el diseño estructural se considera que el concreto no resiste dicha fuerza, dado que su resistencia es baja, en comparación con su resistencia a compresión; sin embargo, ello no quiere decir que el concreto no resista una cierta fuerza a tensión, originadas por determinadas condiciones de carga que involucran tensión, flexión y cortante, o como resultado de las contracciones que se producen en el concreto por secado o por cambio de temperatura.

Debido a lo anterior, es necesario que se tenga en cuenta la resistencia a tensión del concreto en el diseño de ciertas estructuras, como en el pavimento de carreteras o pistas de aterrizaje. La tensión depende de la adherencia que se tenga entre la pasta y los agregados.

Para que se realicen estas pruebas se toman muestras formadas por cilindros de medida estándar de 150 x 300mm, los cuales se cargan a compresión diametral a lo largo de dos líneas diametralmente opuestas a una velocidad de carga de 7t/min; a esta prueba se le denomina de tensión por compresión diametral. Otra forma de tomar la resistencia a tensión es por medio de la flexión en especímenes prismáticos, o vigas, las cuales son apoyadas en dos puntos en los extremos y la carga se aplica a una velocidad de carga de 800kg/min, con dos cargas iguales concentradas a cada tercio de la viga; por último se tiene la prueba de tensión directa en la cual se realiza con especímenes prismáticos o cilíndricos, al espécimen se le aplica una fuerza de tensión axial. Figura 4.2.

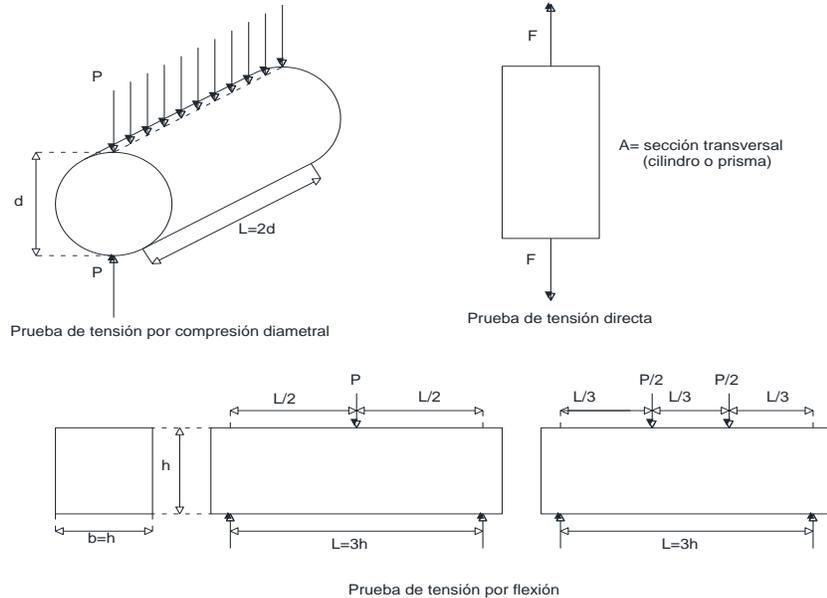


Figura 4.2. Descripción gráfica de las pruebas a tensión, figura adaptada de la referencia 10.

Los ensayos fueron hechos con las pruebas de tensión por compresión diametral y de tensión por flexión con dos cargas concentradas a cada tercio de la viga, conforme a las normas ASTM C 496 y ASTM C 78 (ref. 18 y 5), respectivamente. La tensión se puede calcular por medio de las siguientes fórmulas:

Resistencia a tensión por compresión diametral (ref. 29)

$$f_t = \frac{2P}{\pi Ld}$$

donde:

f_t , esfuerzo máximo a tensión, kg/cm^2

P, carga máxima, kg

L, longitud del cilindro, cm

d, diámetro del cilindro, cm

Resistencia a tensión por flexión con dos cargas concentradas a cada tercio de la viga (fórmula de la escuadría)

$$f_f = \frac{PL}{bh^2}$$

donde:

f_f , esfuerzo máximo a tensión, kg/cm^2

P, carga máxima, kg

L, longitud del claro entre apoyos, cm

b, base del prisma, cm

h, altura del prisma, cm

4.2.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto se puede definir como un índice de la rigidez del material, representado por la relación de los esfuerzos a los que se encuentra sometido el material y las deformaciones unitarias correspondientes.

El módulo de elasticidad del concreto puede variar por diversos factores como el estado de humedad (el concreto en estado saturado muestra un módulo de elasticidad más alto que en estado seco; este incremento puede ser del orden del 3 por ciento), la compactación del concreto, la relación agua/cemento, la edad de ensaye, las características de los agregados y otros.

Para calcular el módulo de elasticidad del concreto, el equipo con el que se ensaya el espécimen arroja datos de carga, deformaciones longitudinales y deformaciones transversales, dichos ensayos se realizaron a una velocidad de carga de 25t/min; se puede observar la tendencia que lleva la curva esfuerzo deformación en la figura 4.3. Con la información recabada, el módulo de elasticidad se obtiene con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

donde:

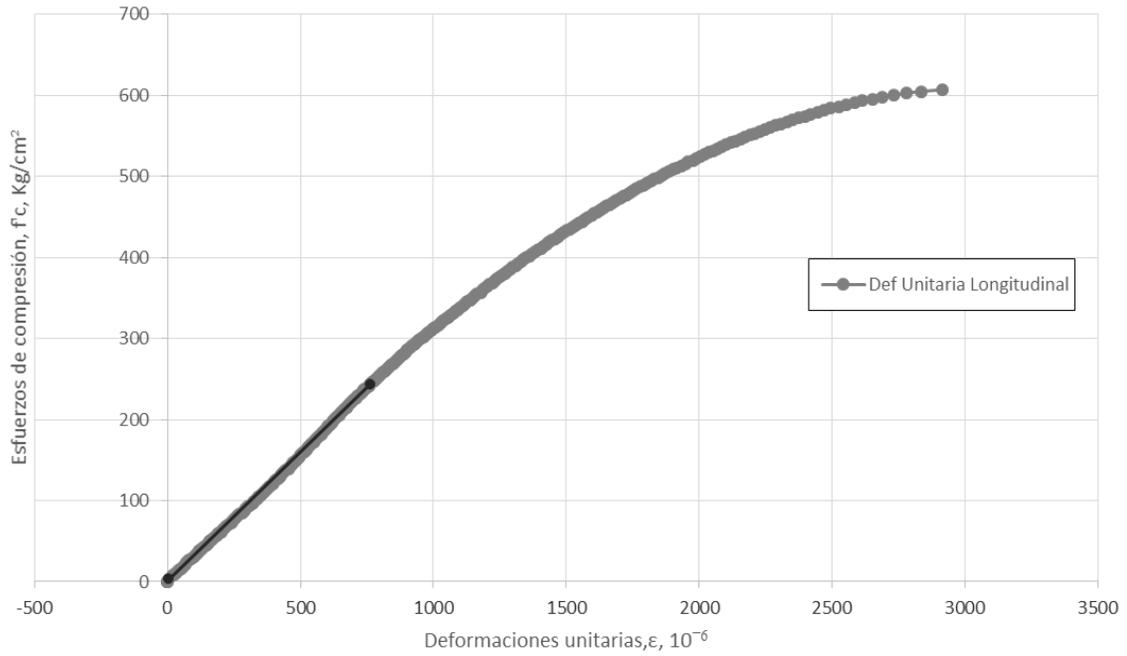
E, módulo de elasticidad

σ_1 , esfuerzo correspondiente a la 50 millonésima de deformación unitaria, kg/cm²

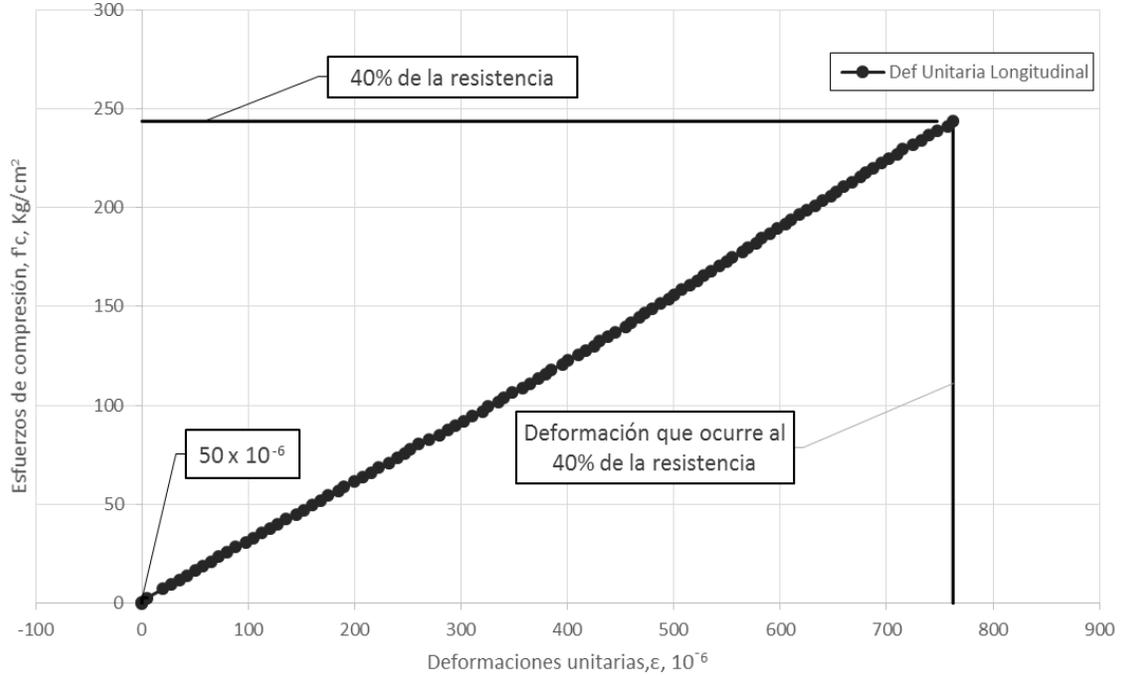
σ_2 , esfuerzo que corresponde al 40% de la resistencia, kg/cm²

ε_2 , deformación que ocurre al 40% de la resistencia

Con la fórmula anterior se obtuvo la pendiente de la secante a la curva esfuerzo contra deformación unitaria entre el 40 por ciento de la resistencia máxima y la deformación unitaria en compresión correspondiente a 50×10^{-6} , como se muestra en la figura 4.3. Los ensayos se realizaron conforme a la norma ASTM C 469 (ref. 15).



a) Gráfica mostrando el 40% de la resistencia, marcada en negro



b) Gráfica basada en los datos que cubren el 40% de la resistencia
 Figura 4.3. Gráficas representativas de las pruebas de módulo de elasticidad.

4.2.4. Relación de Poisson

En esta prueba se hace referencia a la proporción en que se deforma el espécimen transversalmente con respecto a lo que se deforma longitudinalmente. Es decir, el espécimen se carga axialmente de tal manera que se produce una distribución de esfuerzos a compresión, que originan deformaciones longitudinales y transversales, figura 4.4. Como se indicó en el módulo de elasticidad, en esta prueba el espécimen se somete a carga axial a una velocidad de carga de 25t/min hasta la falla.

Para determinar la relación de Poisson se utilizó la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{Tf} - \varepsilon_{Ti}}{\varepsilon_{Lf} - \varepsilon_{Li}}$$

donde:

μ , relación de Poisson

ε_{Ti} , deformación unitaria transversal inicial, correspondiente al esfuerzo de 50×10^{-6} de deformación longitudinal

ε_{Tf} , deformación unitaria transversal final, correspondiente al esfuerzo de 40% de la resistencia

ε_{Li} , deformación unitaria longitudinal inicial, igual a 50×10^{-6}

ε_{Lf} , deformación unitaria longitudinal final, correspondiente al 40% de la resistencia

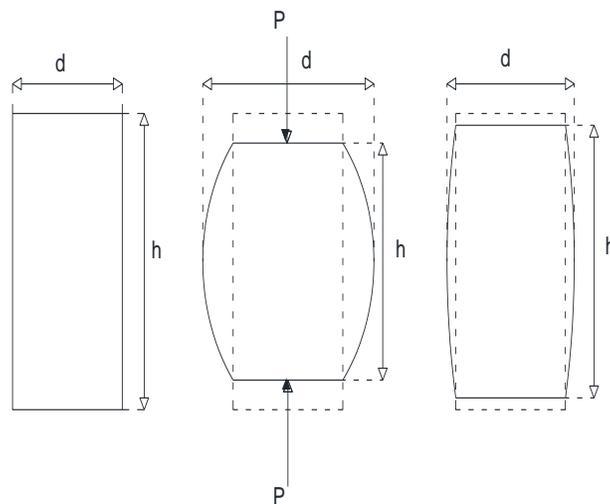


Figura 4.4. Descripción gráfica de la relación de Poisson, figura tomada de la referencia 10.

Los datos se pueden obtener realizando la prueba de módulo de elasticidad, ya que el cilindro se monta con dos deformímetros, uno de ellos se encarga de captar las deformaciones longitudinales y el segundo se encarga de captar las deformaciones

transversales del espécimen cilíndrico. Con las deformaciones se procede a graficar como se observa en la figura 4.5.

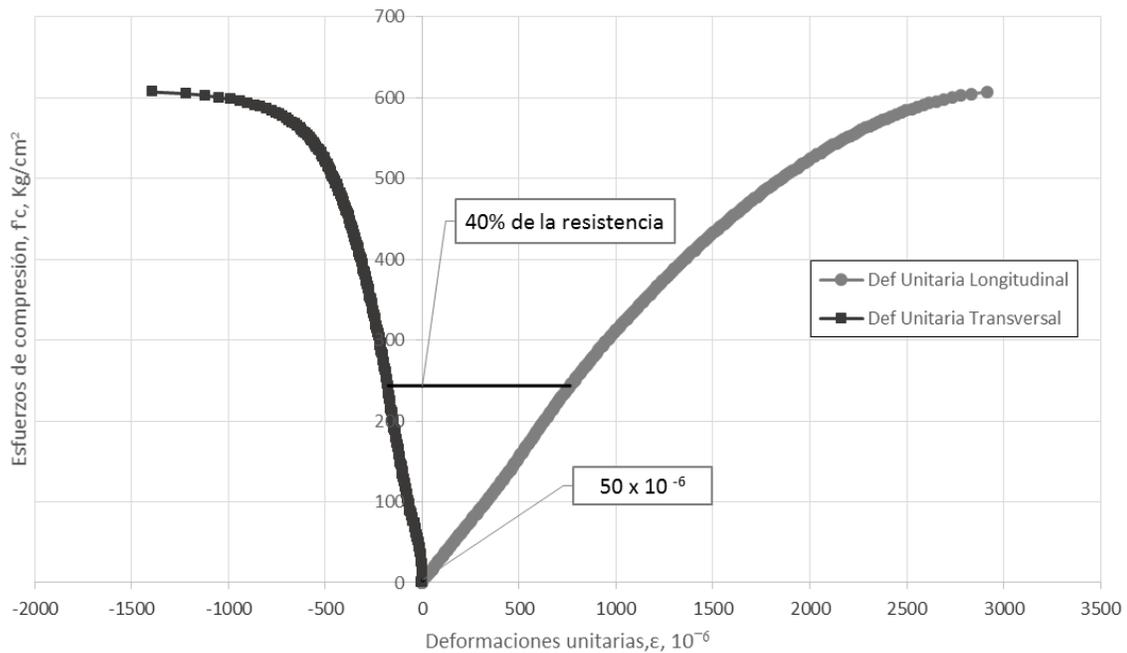


Figura 4.5. Gráfica representativa de las pruebas de módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Lo que representa la gráfica es la tendencia que llevan las deformaciones anteriormente mencionadas, hasta su punto de falla. Los ensayos se realizaron conforme a la norma ASTM C 469 (ref. 15).

4.2.5. Contracción por secado

Se sabe que el concreto sufre cambios volumétricos al término del mezclado, los cuales son consecuencia de la evaporación del agua que contiene y a la hidratación del cemento, esto quiere decir que el concreto se contrae al pasar al estado endurecido. Pero estos cambios deben de mantenerse de manera moderada ya que si no se controlan puede agrietar, alterar el comportamiento y la durabilidad del concreto.

En la práctica, las estructuras de concreto están expuestas a una continua pérdida de agua debido a la evaporación, principalmente pisos y pavimentos que se cuelean en clima cálido, seco y con viento, y esta reducción de agua progresa con la edad del concreto, lo cual genera que se contraiga a medida que se endurece el concreto. A este fenómeno se le conoce como contracción por secado.

Para el ensayo se utilizaron especímenes prismáticos de 75 x 75 x 285mm para cada mezcla, los cuales se curan sumergidos en agua con cal durante 28 días a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y llevan embebidos en sus extremos un par de pequeños tornillos con grosor

de cabeza de cinco milímetros y punta ovalada al final de la rosca, llamados índices, los cuales se utilizan para determinar la contracción en la longitud de medición del prisma de 250mm. Acabado su tiempo de curado los especímenes prismáticos se colocan en un cuarto donde se mantienen a humedad y temperatura controlados (50% HR y 23°C), además los especímenes se colocan en estantes donde esté expuesta la mayor parte del área superficial, a este cuarto se le denomina cámara seca, imagen 4.3.

La medición de la contracción por secado se basó en el cambio de longitud de los prismas, $\left(\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i}\right)$, que se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 490 (ref. 16). Para el cálculo de la contracción por secado última (ε_u) se utilizó la siguiente fórmula; la contracción última se obtiene mediante un ajuste de las mediciones efectuadas a diferentes tiempos t , en días, a la expresión con el criterio de mínimos cuadrados:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{a + t}\right) \varepsilon_u$$

donde:

ε_t , deformación unitaria de contracción por secado a la edad "t".

t , tiempo, días

a , constante que depende de las características de cada mezcla

ε_u , contracción por secado última

Dicho criterio permite que se obtengan los valores de la contracción por secado última (ε_u) y la constante que depende de las características de cada mezcla (a); al obtener el inverso de la pendiente, se obtiene ε_u y al multiplicar el inverso de la pendiente por la ordenada al origen, se obtiene a .



Imagen 4.3. Fotografía tomada de la cámara seca con los especímenes realizados en el estudio.

4.2.6. Resistencia a la abrasión

Esta forma de desgaste es muy común que se presente en superficie de pisos y pavimentos de concreto hidráulico, esto es debido al tránsito ya sea de vehículos o de personas. En términos simples y de acuerdo con el Comité ACI 116, la abrasión es el desgaste producido por acciones de fricción y frotamiento.

Con respecto a lo anterior, la abrasión depende de tres aspectos: la resistencia intrínseca de los agregados a las acciones abrasivas, su composición granulométrica y la resistencia mecánica del concreto. Los ensayos fueron realizados con base en la norma NMX-C-008-1974 (ref. 31), en la cual, el equipo de desgaste es un disco de esmeril que utiliza arena sílica húmeda, designación 50-60, 60-70 y 70-80.

Se obtuvieron 4 especímenes de 50 x 50 x 100mm a través del corte de un espécimen prismático de dimensiones 100 x 250 x 150mm por cada mezcla. En la máquina se colocaron dos especímenes prismáticos simultáneamente, los cuales se someten a desgaste durante un lapso de 12 minutos a una velocidad de 60 revoluciones por minuto. Acabada la prueba se registró el desgaste de los 4 especímenes, por diferencias en la dimensión de su altura y en su masa, imagen 4.4.

Para el cálculo de desgaste se tomaron tres medidas en las cuatro caras del prisma, realizando la resta del antes y el después de la prueba y se tomó el promedio de los cuatro especímenes de la mezcla junto con el promedio de la masa perdida.



Imagen 4.4. Fotografía tomada de especímenes de la mezcla 6 a 28 días.

4.2.7. Permeabilidad al agua

Esta prueba se realizó con carácter comparativo para la selección de la mezcla con mejor desempeño; puede dar noción de la porosidad del concreto ya que los resultados dependen del tamaño, distribución y continuidad de los poros. Por ello es que las pruebas de permeabilidad son adaptadas a los requerimientos del estudio.

La permeabilidad depende de la permeabilidad de los elementos que componen al concreto, en este caso de los agregados y de la pasta. En términos simples, la permeabilidad es la facilidad con la que un fluido, ya sea un líquido o un gas, puede penetrar a través de un material sólido. Para este caso de estudio los ensayos fueron realizados en cilindros de tamaño estándar cortados a la mitad, en donde la cara resultante del corte es la que se somete a presión hidráulica; se emplearon dos especímenes cilíndricos para realizar cuatro pruebas para cada mezcla.

Para realizar el cálculo de la permeabilidad, el aparato arrojó datos en milímetros los cuales se tomaron en lapsos de cinco minutos, hasta los treinta minutos para cada una de las cuatro pruebas. Se tomó como referencia el primer dato y el último dato de la lectura promedio y de este modo se calcula el flujo de penetración del agua en el espécimen con la siguiente fórmula:

$$q = \frac{B(g_1 - g_2)}{A * t} = \frac{78.6(g_1 - g_2)}{3018 * t} = \frac{0.026(g_1 - g_2)}{t}$$

donde:

q, flujo de penetración del agua, mm/s

B, área del tornillo micrométrico, mm²

g₁, g₂, lecturas del micrómetro, mm

A, área superficial de presión del agua, mm²

t, tiempo, s

El valor de la permeabilidad al agua, se obtiene como el promedio de las cuatro determinaciones realizadas. Los ensayos se efectuaron conforme al manual del equipo GTW-4140 (ref. 26).

4.2.8. Permeabilidad al ión cloruro

En muchas construcciones se utiliza el concreto reforzado dado que el trabajo conjunto de concreto y acero favorece a la estructura para alcanzar un buen desempeño en cuanto a resistencia y durabilidad. Sin embargo, este refuerzo a pesar de estar embebido en el concreto puede corroerse, por lo que es necesario que el concreto tenga baja permeabilidad al ión cloruro, ya que una baja permeabilidad protegerá al acero de

refuerzo y permite que la estructura tenga una vida útil prolongada, cuando menos por este concepto.

En este ensayo lo que se mide es la cantidad de corriente eléctrica, en Coulombs, que pasa a través de las muestras de concreto de 50mm de espesor y 100mm de diámetro, durante un periodo de 6h; se hicieron determinaciones a las edades de 28 y 91 días de curado. Todo el ensayo se realizó conforme a la norma ASTM C 1202 (ref. 20).

4.2.9. Resistencia al ataque de sulfatos

Los sulfatos son sales que comúnmente se encuentran en las aguas freáticas y superficiales, que no afectan al concreto cuando la concentración en que se encuentra es inferior a 0.015 por ciento de sulfatos solubles en agua. Cuando la concentración de sulfatos aumenta, se incrementa la posibilidad de daño al concreto en estado endurecido.

Las reacciones químicas que resultan agresivas al concreto por el contacto de los sulfatos en el medio ambiente con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) que se libera durante la hidratación del cemento, da como resultado sulfato de calcio o yeso, y con los compuestos hidratados del cemento que provienen del aluminato tricálcico (C_3A), se genera sulfoaluminato de calcio, conocido como etringita.

Los nuevos compuestos que se generan por las reacciones químicas anteriores, producen el doble de volumen al reaccionar con los compuestos del concreto; los nuevos compuestos no pueden acomodarse debidamente en los espacios o cavidades que tiene el concreto en estado endurecido, esto ocasiona que se generen esfuerzos internos de tensión que con el paso del tiempo causan que el concreto se expanda creando microfisuras y que el elemento se despedace gradualmente.

Para el ensayo de estas pruebas se utilizaron especímenes prismáticos de 75 x 75 x 285mm con índices en los extremos del prisma; los especímenes fueron colocados en tinajas con capacidad de almacenar 8 especímenes, sumergidos en agua con sulfato de sodio (SO_4) al 5%, imagen 4.5. La toma de datos se realizó de manera prolongada para cuatro especímenes, los primeros dos sumergidos a la edad de 28 días y los últimos dos a la edad de 90 días. La medición de la expansión se basó en el cambio de longitud de los prismas, que se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 490 (ref. 16). Para el cálculo de la expansión última se utilizó la siguiente fórmula, ajustada a los datos obtenidos de las lecturas efectuadas a diferentes tiempos t , en días, con el criterio de mínimos cuadrados:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{t}{a + t} \right) \varepsilon_u$$

donde:

ε_t , deformación unitaria de la expansión a la edad "t"

t, tiempo, días

a, constante que depende de las características de cada mezcla

ε_u , expansión última

Con el fin de estudiar los efectos del ataque al concreto por sulfatos en solución saturada, se colaron seis especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro por 20cm de alto de cada mezcla, los cuales se sumergieron en agua con sulfato de sodio al 15% (150,000 ppm) a la edad de 28 días.



Imagen 4.5. Fotografía tomada de algunos de los especímenes sometidos al ataque se sulfatos.

5. RESULTADO DE ENSAYES Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

5.1. Ensayes de concreto en estado fresco

Los ensayos realizados al concreto en estado fresco fueron revenimiento, peso volumétrico y aire atrapado. El resultado de los ensayos de revenimiento estuvieron en el intervalo de 0.3 a 2.9cm sin aditivo y de 10 a 22cm con aditivo hiperfluidificante; por lo tanto, los resultados fueron aproximadamente, los esperados de acuerdo con los rangos propuestos de 2 a 5cm sin aditivo y de 10 a 15cm con él (ref. 1).

El peso volumétrico varió entre 2274 y 2306kg/m³, siendo menor a medida que se incrementó la cantidad de humo de sílice añadida, debido a la baja densidad del adicionante mineral que es de 2.2g/cm³ en comparación con la densidad del cementante que es de 3.1g/cm³.

Con respecto al aire atrapado, se obtuvo un promedio de 2.37%, el cual varió entre 2.1 y 2.50%. El aire atrapado se incrementó a medida que aumentó el consumo de humo de sílice, además de que el revenimiento descendió conforme el consumo de humo de sílice fue aumentando. En la tabla 5.1 se tienen los resultados en cada ensaye.

Tabla 5.1. Propiedades del concreto en estado fresco.

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	Revenimiento, cm (sin aditivo)	Revenimiento, cm (con aditivo)	Peso volumétrico, kg/m ³	Contenido de aire atrapado, %
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	2.9	22	2299	2.1
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	1.1	16	2285	2.3
	M3-C370-SF41.11-GC20	0.6	8	2274	2.5
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	1.1	16	2296	2.4
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	0.4	12	2306	2.4
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	0.3	10	2277	2.5

5.2. Ensayes de concreto en estado endurecido

5.2.1. Ensayes a compresión

La tabla 5.2 muestra los parámetros que se utilizaron en la determinación de la resistencia a compresión. En esta tabla se presenta las determinaciones que se realizaron a la mezcla M1 a la edad de 7 días; determinaciones similares se realizaron para las demás edades. En la tabla 5.3 se muestran los resultados de todas las mezclas junto con las respectivas relaciones agua/cemento.

Como se observa en la tabla 5.3, para las mezclas de relación agua/cemento de 0.45 a la edad de 7 días, la resistencia a compresión disminuye conforme aumenta el adicinante mineral, debido a la velocidad más lenta de reacción del humo de sílice con el hidróxido de calcio. A partir de la edad de 14 días, la velocidad de reacción aumentó, de tal forma que el concreto incrementó también su resistencia a edades posteriores. Para las mezclas de relación agua/cemento de 0.40 y adicinante mineral, el incremento de resistencia se observa desde edades tempranas, como lo son los 7 y 14 días.

Tabla 5.2. Parámetros utilizados para la determinación de la resistencia a compresión y peso volumétrico.

Prueba de compresión a 7 días									
Cilindro	Diámetro	Promedio	Altura	Promedio	Peso	Volumen	Peso volumétrico	Carga máxima	Esfuerzo máximo
	cm	cm	cm	cm	kg	cm ³	kg/cm ³	kg	kg/cm ²
M1-T1-C1	15.2	15.17	29.8	29.87	12.230	5,395.81	2.267	71200	394.10
	15.1		29.9						
	15.2		29.9						
M1-T1-C2	15.2	15.20	30.5	30.47	12.725	5,528.43	2.302	72300	398.44
	15.2		30.4						
	15.2		30.5						
M1-T1-C3	15.1	15.17	30.7	30.60	12.690	5,528.30	2.295	66100	365.87
	15.2		30.5						
	15.2		30.6						
PROMEDIO									396.27

Tabla 5.3. Resistencia a compresión

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	Resistencia a compresión, kg/cm ²				Relación A/C
		7 días	14 días	28 días	91 días	
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	396.27	434.37	493.85	587.80	0.45
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	389.39	461.69	541.87	625.67	0.45
	M3-C370-SF41.11-GC20	370.11	461.21	523.78	536.77	0.45
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	456.52	509.78	559.12	652.70	0.40
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	475.36	542.20	583.84	674.39	0.40
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	485.00	577.31	631.28	648.20	0.40

Haciendo una comparación de la resistencia a compresión a las diferentes edades con la resistencia a 28 días, se obtuvieron los siguientes porcentajes promedios: para la edad de 7 días fue de 77%, para la edad de 14 días fue de 89% y para 91 días de edad fue de 112% de la resistencia a 28 días. Datos que se pueden observar en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Variación de la resistencia a compresión con la edad del concreto.

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	Resistencia a compresión			
		7 días	14 días	28 días	91 días
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	80%	88%	100%	119%
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	72%	85%	100%	115%
	M3-C370-SF41.11-GC20	71%	88%	100%	102%
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	82%	91%	100%	117%
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	81%	93%	100%	116%
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	77%	91%	100%	103%

En la figura 5.1 se puede observar que las mezclas que alcanzaron mayor resistencia fueron las fabricadas con humo de sílice. En la figura 5.2, se observa que la resistencia de las mezclas con cinco por ciento de humo de sílice, obtienen mejores resultados a edades posteriores a 28 días que los fabricados con diez por ciento del adicionante mineral.

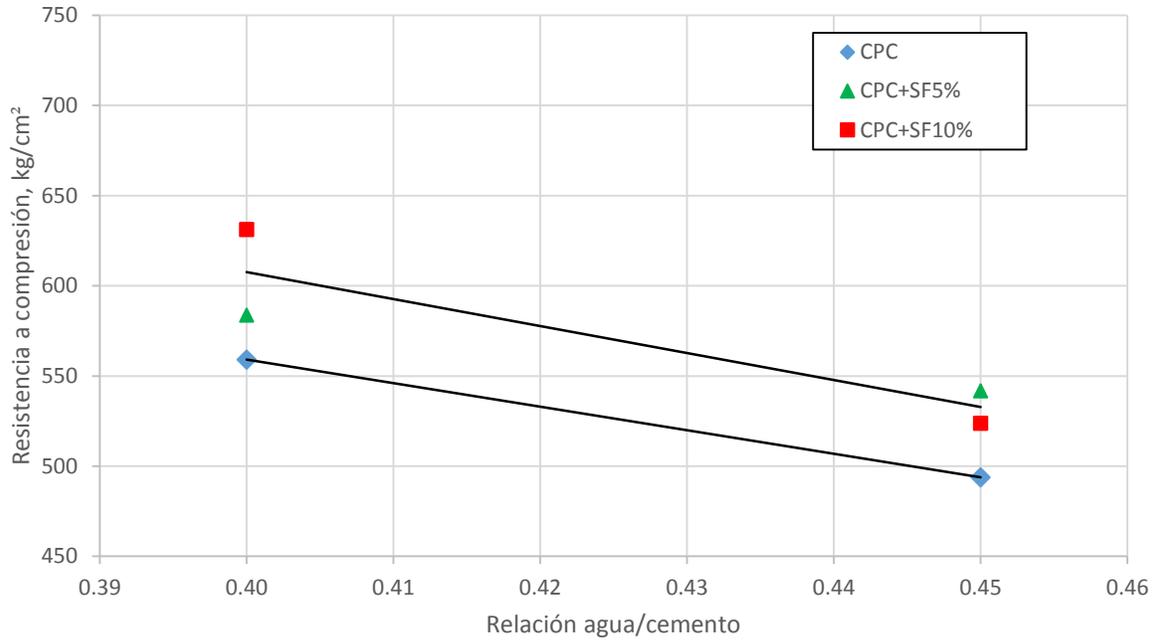


Figura 5.1. Variación de la resistencia a compresión a 28 días con la relación agua/cemento.

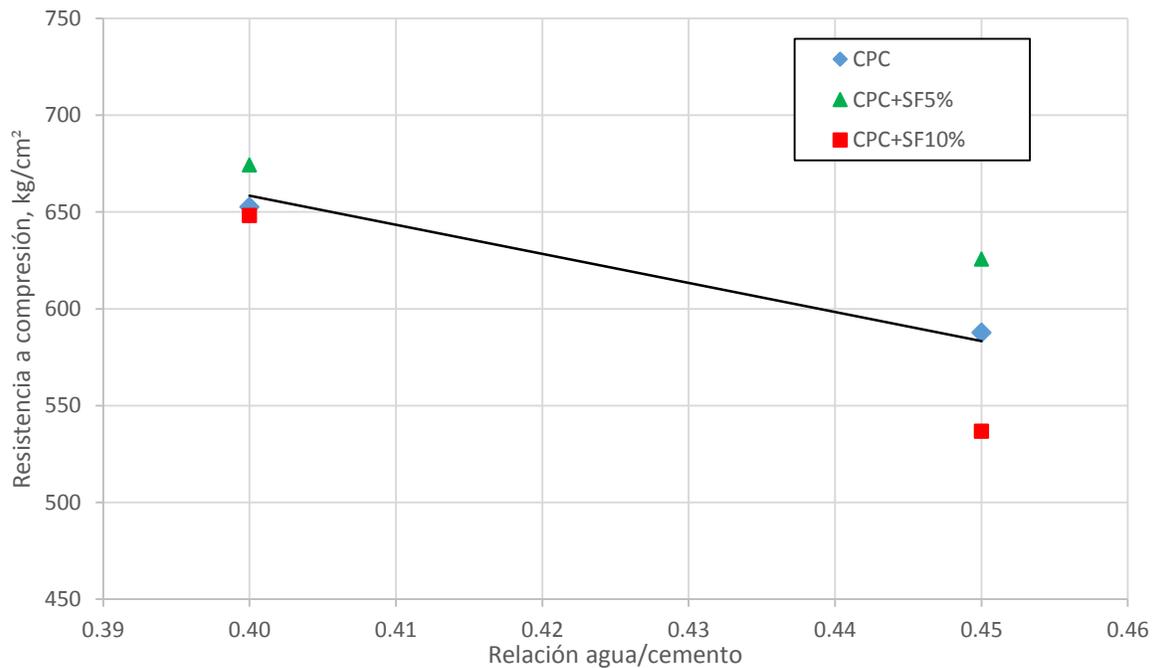


Figura 5.2. Variación de la resistencia a compresión a 91 días con la relación agua/cemento.

Con los datos anteriores se determinaron las expresiones que permiten estimar las resistencias a compresión a cualquier edad t , en días, en función de la resistencia a 28 días de edad. Partiendo del ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación:

$$\frac{t}{\frac{f_c}{f'_c}} = b + mt$$

Al cambiar las variables por:

$$\frac{t}{\frac{f_c}{f'_c}} = y ; b = A ; m = B ; t = x$$

Se obtiene la ecuación lineal:

$$y = A + Bx$$

Multiplicando la ecuación por "x", se tienen lo siguiente:

$$xy = Ax + Bx^2$$

Y sumando los términos de las dos ecuaciones, se tiene:

$$\Sigma y = nA + B\Sigma x$$

$$\Sigma xy = A\Sigma x + B\Sigma x^2$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, las constantes:

$$A = \frac{(\Sigma x^2)(\Sigma y) - (\Sigma x)(\Sigma xy)}{n(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2}$$

$$B = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{n(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2}$$

Sustituyendo los valores se obtiene la siguiente tabla para las mezclas que se realizaron con solo cemento, figura 5.4:

		CPC			
		x	y	x ²	xy
M1		7	8.724	49	61.066
		14	15.917	196	222.837
		28	28.000	784	784.000
		91	76.455	8281	6957.419
M4		7	8.573	49	60.013
		14	15.355	196	214.969
		28	28.000	784	784.000
		91	77.953	8281	7093.702
$\Sigma =$	280	258.977	18620.000	16178.006	
$(\Sigma x)^2$	78400				

$$A = 4.143$$

$$B = 0.807$$

Con los datos que corresponden a la pendiente y la ordenada al origen, se procede a sustituir los datos en la siguiente fórmula:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{t}{b + mt}$$

donde:

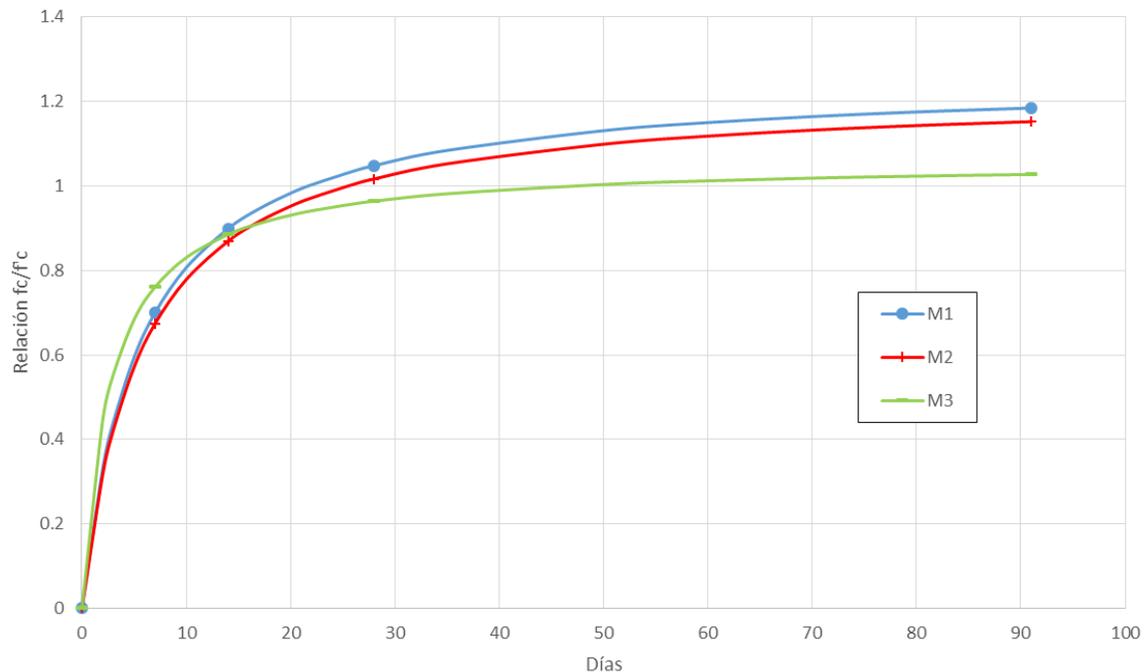
t, Tiempo, días

m, Pendiente

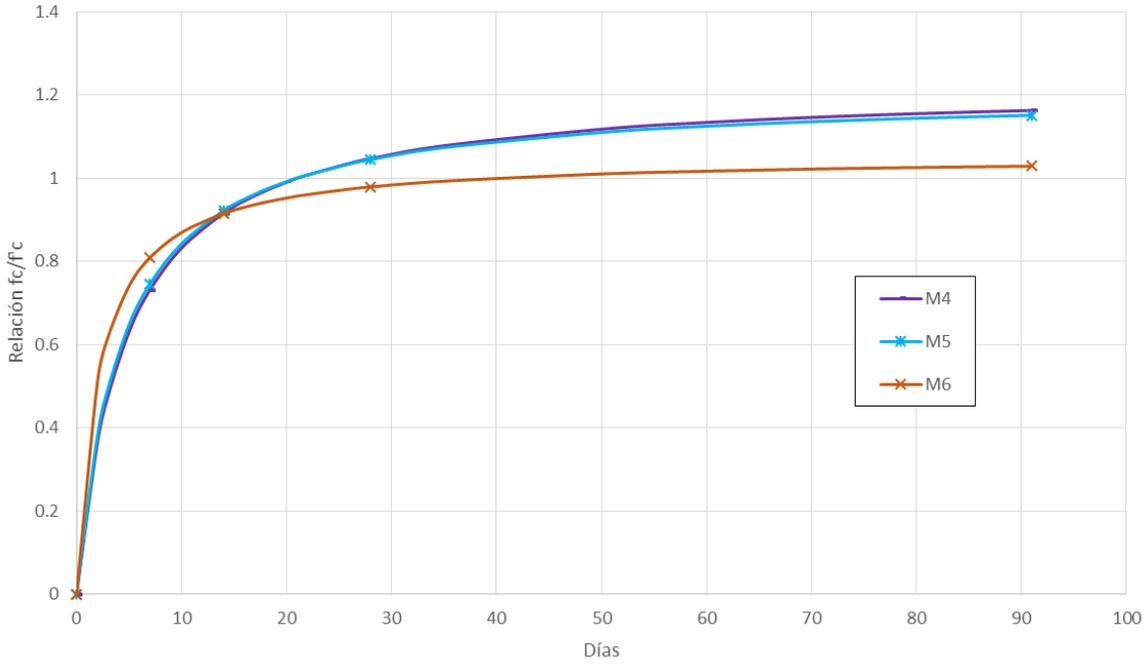
b, Ordenada al origen

$\frac{f_c}{f'_c}$, Relación entre esfuerzos

En la figura 5.3 se muestra la tendencia de las mezclas de relación agua/cemento de 0.45 y 0.40. En la gráfica 5.3 a), la tendencia de los concretos con relación agua/cemento de 0.45 y 5% de humo de sílice es similar a la de los concretos sin humo de sílice, sin embargo, con 10% de humo de sílice el incremento de resistencia después de 28 días es proporcionalmente menor. Lo anterior no significa que las resistencias sean menores, sino que a los 28 días han desarrollado la mayor parte de su resistencia potencial. El desempeño de los concretos con agua/cemento de 0.40, figura 5.3 b), fue similar.



a) Concretos con relación agua/cemento de 0.45



b) Concretos con relación agua/cemento de 0.40

Figura 5.3. Variación de la resistencia a compresión, con la edad del concreto.

Debido a que la tendencia de las gráficas anteriores no difiere, en la figura 5.4 se muestra la tendencia general independientemente de su relación agua/cemento, diferenciándose únicamente por la cantidad de adicinante mineral.

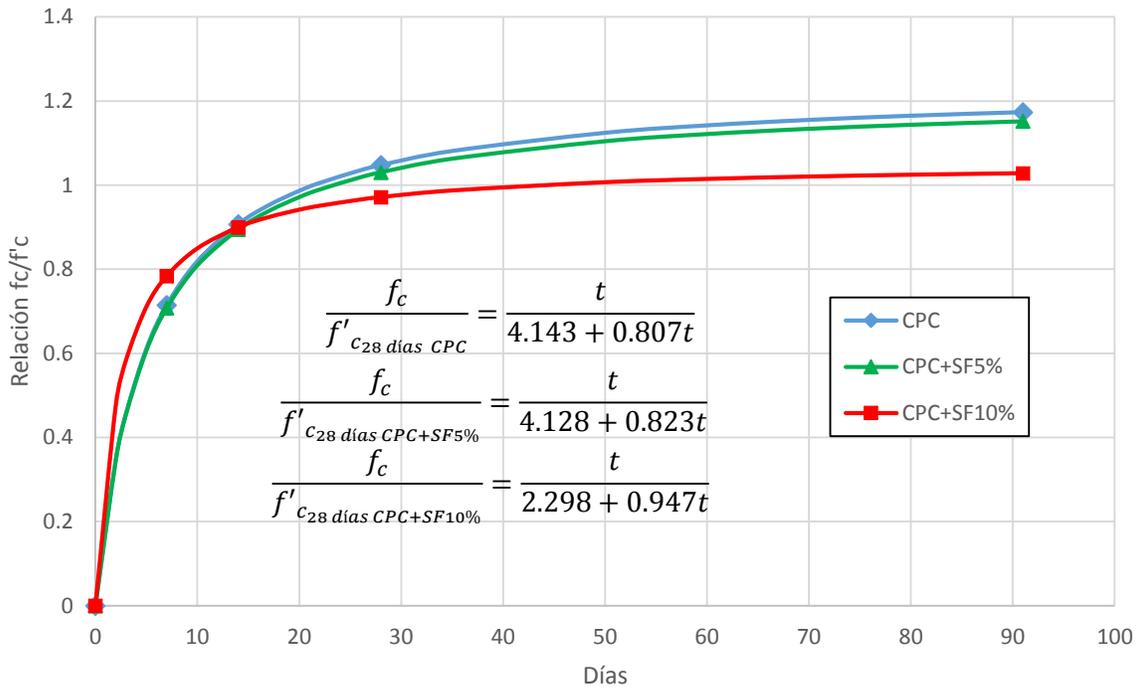


Figura 5.4. Variación de la resistencia a compresión promedio, con la edad del concreto.

5.2.2. Ensayes a tensión

A) Prueba de tensión por compresión diametral

Como se mencionó en el capítulo 4, los ensayes a tensión por compresión diametral se realizaron para las edades de 28 y 91 días; los datos que se recabaron fueron el diámetro, la altura y el peso de los especímenes para determinar el volumen, peso volumétrico y con la obtención de la carga máxima, calcular el esfuerzo que resistió el concreto; el esfuerzo se calculó con la ecuación (ref. 29):

$$f_t = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Para ejemplificar, los datos que se tomaron para la mezcla M1 se muestran éstos en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Datos utilizados para prueba de tensión por compresión diametral (prueba brasileña) y peso volumétrico.

Prueba de tensión a 28 días									
Cilindro	Diámetro	Promedio	Altura	Promedio	Peso	Volumen	Peso volumétrico	Carga máxima	Esfuerzo máximo
	cm	cm	cm	cm	kg	cm ³	kg/cm ³	kg	kg/cm ²
M1-T1-C10	15.0	15.07	30.0	30.03	12.110	5,354.61	2.262	29010	40.81
	15.1		30.1						
	15.1		30.0						
M1-T1-C11	15.1	15.13	30.5	30.50	12.665	5,486.04	2.309	28010	38.63
	15.1		30.6						
	15.2		30.4						
M1-T1-C12	15.2	15.17	30.6	30.63	12.695	5,534.32	2.294	22080	30.25
	15.1		30.8						
	15.2		30.5						
PROMEDIO									39.72

Al recabar todos los datos para las 6 mezclas se obtuvo la tabla 5.6 donde se presentan los resultados del ensaye a tensión indirecta y en la figura 5.5 se ilustra como varía este parámetro con la resistencia a compresión; en dicha figura se observa que la tensión alcanzada no tuvo una diferencia significativa con la inclusión de humo de sílice. Con los datos de la tabla 5.6 se estableció una expresión que marca la tendencia de los resultados, así como su variación.

Tabla 5.6. Variación de la resistencia a tensión por compresión diametral a 28 días y a 91 días con la resistencia a compresión.

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	Resistencia a compresión, f'c, kg/cm ² (28 días)	Resistencia a compresión, f'c, kg/cm ² (91 días)	Resistencia a tensión, f _t , kg/cm ² (28 días)	Resistencia a tensión, f _t , kg/cm ² (91 días)	f _t /√f'c (28 días)	f _t /√f'c (91 días)
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	493.85	587.80	39.72	33.66	1.79	1.39
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	541.87	625.67	43.01	44.97	1.85	1.80
	M3-C370-SF41.11-GC20	523.78	536.77	42.58	34.06	1.86	1.47
462.5	M4-C462.5-SF0-GC20	559.12	652.70	33.14	44.70	1.40	1.75
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	583.84	674.39	39.43	40.53	1.63	1.56
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	631.28	648.20	38.52	40.77	1.53	1.60

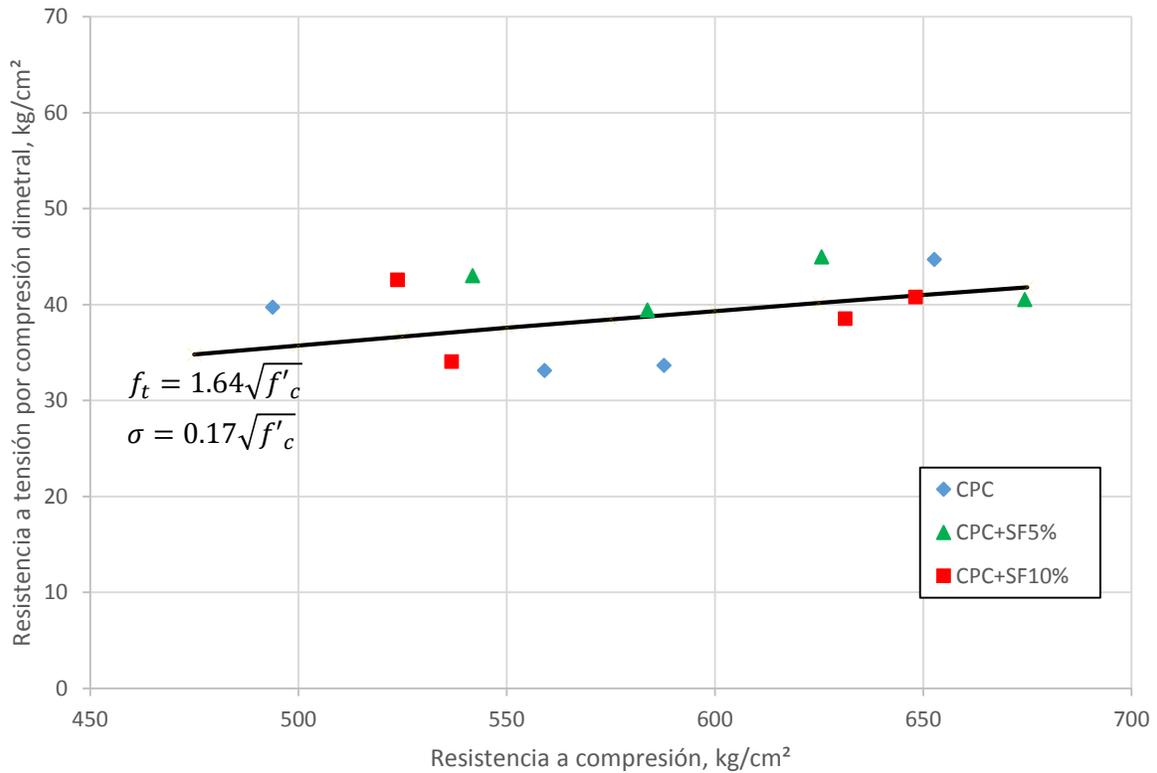


Figura 5.5. Relación de las resistencias a tensión por compresión diametral (prueba brasileña) y compresión.

La expresión mostrada en la figura 5.5 se obtuvo realizando un promedio de los resultados de las relaciones $f_t/\sqrt{f'_c}$ de los concretos con y sin adicinante mineral, ensayados a 28 y 91 días de edad.

B) Prueba de tensión por flexión

El ensaye por flexión se realizó únicamente a 28 días de edad; requirió determinar las dimensiones por medio del promedio de cuatro alturas (h), cuatro anchos de dos caras del espécimen (b) y la distancia entre apoyos (L) que fue de 450mm; con la carga máxima se determinó el módulo de rotura con la expresión:

$$f_f = \frac{PL}{bh^2}$$

Para ejemplificar, los datos que se tomaron para la mezcla M1 se muestran la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Datos utilizados para prueba a tensión por flexión.

Resistencia a Flexión a 28 días									
Barras	Alturas		Anchos				Peso kg	Carga kg	Módulo de rotura kg/cm ²
			Cara A		Cara B				
	cm		cm		cm				
M1-T3-1	15.10	15.10	15.20	15.18	15.20	15.20	31.840	4240.00	56.08
	15.10		15.10		15.20				
	15.10		15.20		15.20				
	15.10		15.20		15.20				
M1-T3-2	15.10	15.10	15.10	15.13	15.20	15.20	31.765	4160.00	55.11
	15.10		15.10		15.20				
	15.10		15.10		15.20				
	15.10		15.20		15.20				
M1-T3-3	15.10	15.10	15.20	15.20	15.20	15.25	31.755	3920.00	51.72
	15.10		15.20		15.30				
	15.10		15.20		15.20				
	15.10		15.20		15.30				
PROMEDIO								54.30	

En la tabla 5.8 se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a tensión por flexión (módulo de rotura), junto con los resultados de la resistencia a compresión a 28 días y en la figura 5.6 se muestra la tendencia que lleva la relación de los dos parámetros mencionados. En estos ensayos no hubo diferencia por el empleo de humo de sílice.

Tabla 5.8. Variación del módulo de rotura a 28 días con la resistencia a compresión.

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	Resistencia a compresión, f' _c , kg/cm ²	Módulo de rotura, f _f , kg/cm ²	$f_f / \sqrt{f'_c}$
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	493.85	54.30	2.44
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	541.87	60.51	2.60
	M3-C370-SF41.11-GC20	523.78	52.70	2.30
462.5	M4-C462.5-SF0-GC20	559.12	62.88	2.66
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	583.84	59.46	2.46
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	631.28	65.03	2.59

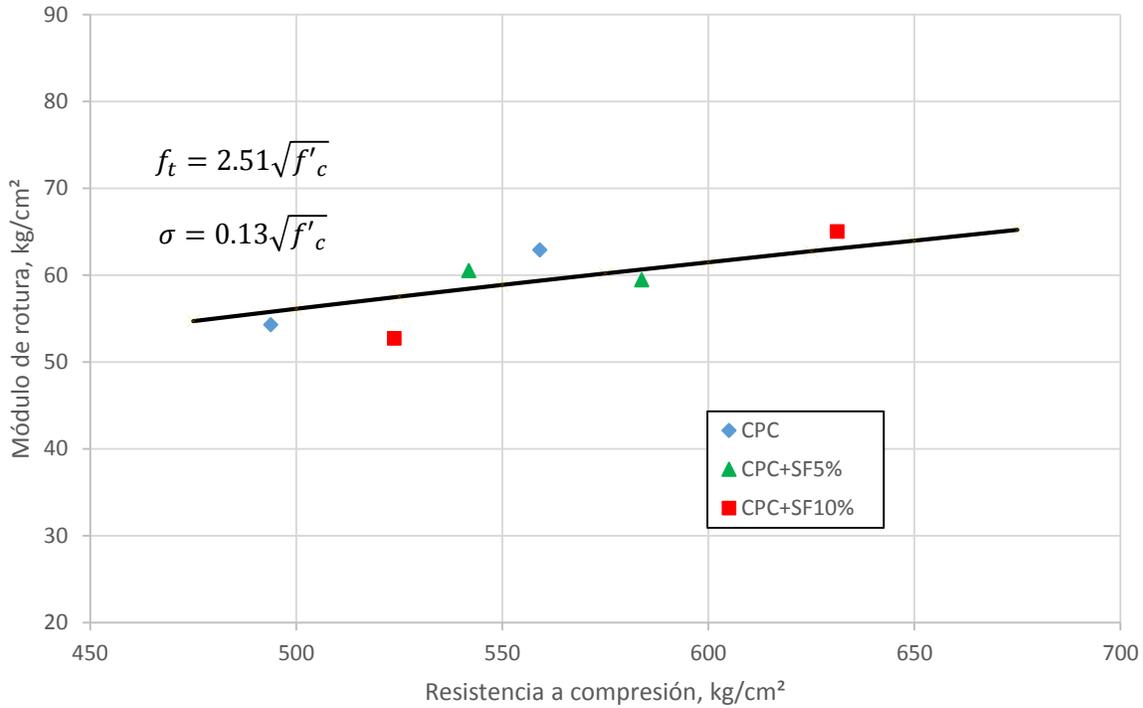


Figura 5.6. Variación del módulo de rotura a 28 días con la resistencia a compresión.

5.2.3. Ensayes de módulo de elasticidad

Para determinar la relación que existe entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión, se determinó la expresión que engloba todas las mezclas ensayadas a las edades de 28 y 91 días; los resultados se muestran en la tabla 5.9. En la figura 5.7 se muestra la tendencia de ambos parámetros. Se puede observar que la tendencia no se ve afectada por la incorporación de humo de sílice.

Tabla 5.9. Variación del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión a 28 y 91 días de edad.

Consumo de Cementante, kg/m^3	Mezcla	Resistencia a compresión, f'_c kg/cm^2	Módulo de elasticidad, E_c kg/cm^2	$E_c/\sqrt{f'_c}$	Resistencia a compresión, f'_c kg/cm^2	Módulo de elasticidad, E_c kg/cm^2	$E_c/\sqrt{f'_c}$
		28 días			91 días		
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	493.85	265018	11925.53	587.80	292038	12045.51
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	541.87	279674	12014.53	625.67	305991	12233.08
	M3-C370-SF41.11-GC20	523.78	274620	11999.39	536.77	302597	13060.79
462.5	M4-C462.5-SF0-GC20	559.12	308214	13034.64	652.70	311856	12206.63
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	583.84	301014	12457.79	674.39	317604	12230.10
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	631.28	283979	11302.55	648.20	307560	12080.21

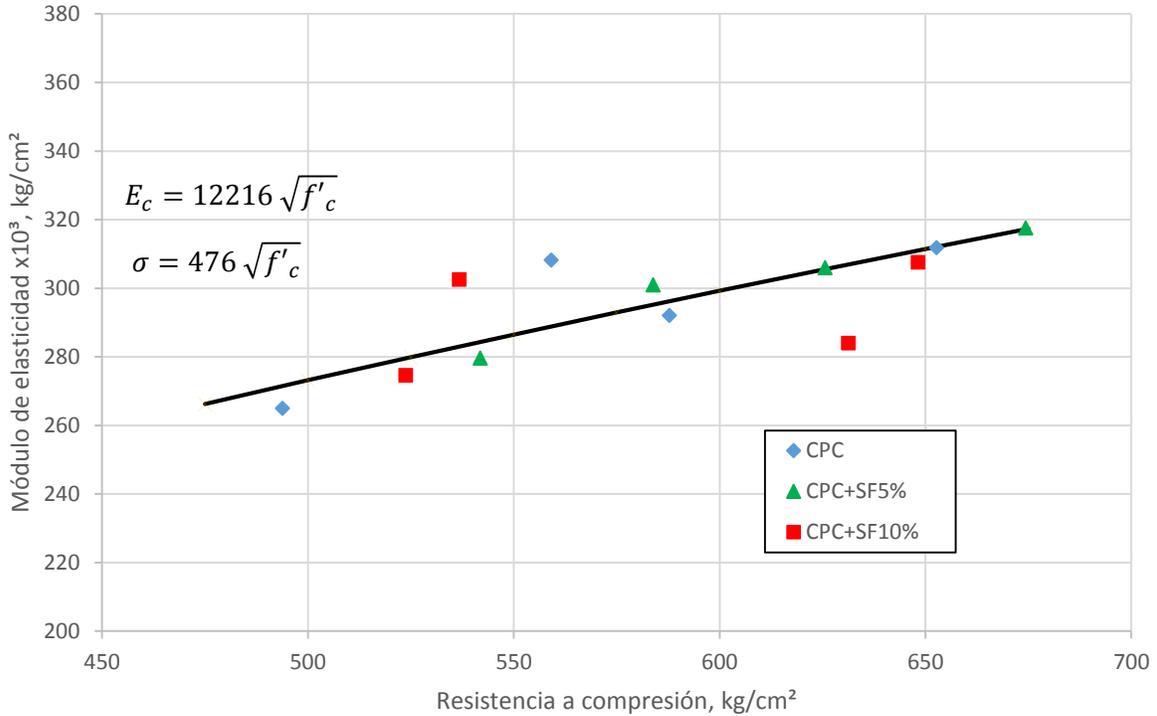


Figura 5.7. Relación entre módulo de elasticidad y resistencia a compresión.

De la misma manera en que se determinó la función que relaciona la resistencia a tensión con la resistencia a compresión, se realizó el promedio de los resultados de las relaciones $E_c/\sqrt{f'_c}$ y se determinó la desviación estándar, incluyendo los resultados a las edades de 28 y 91 días para los concretos con y sin humo de sílice.

A pesar de que la tendencia de la relación $E_c/\sqrt{f'_c}$ no difiere significativamente, en la tabla 5.10, se observa que las deformaciones unitarias máximas disminuyen con el consumo de adicionante mineral, para ambas relaciones agua/cementante y ambas edades de ensaye.

El módulo de elasticidad determinado a los 28 días disminuye con el consumo de humo de sílice en los concretos con relación agua/cementante de 0.40, no así para los de relación de 0.45. Para los ensayes a 91 días de edad, el módulo de elasticidad no varía en forma significativa para los concretos con y sin humo de sílice, dentro de cada grupo de relación agua/cementante.

Tabla 5.10. Resultado de esfuerzo máximo y compresión máxima de pruebas de módulo de elasticidad.

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	Esfuerzo de compresión máxima, f _c kg/cm ²	Módulo de elasticidad, E _c , kg/cm ²	Deformación unitaria máxima, ε _{u max} 10 ⁻⁶	Esfuerzo de compresión máxima, f _c kg/cm ²	Módulo de elasticidad, E _c , kg/cm ²	Deformación unitaria máxima, ε _{u max} 10 ⁻⁶
		28 días			91 días		
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	486.61	265017.67	3231.67	587.55	292038.00	2970.83
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	490.10	279674.33	2460.00	622.56	305991.33	2790.83
	M3-C370-SF41.11-GC20	525.55	274620.33	2938.33	536.14	302597.00	2653.33
462.5	M4-C462.5-SF0-GC20	571.11	308214.00	2810.83	662.28	311856.00	3062.50
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	554.64	301014.33	2524.17	666.25	317603.67	2771.67
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	576.25	283979.33	2700.83	561.95	307560.00	2348.33

5.2.4. Ensayes de relación de Poisson

En la tabla 5.11 se presentan los datos obtenidos para cada mezcla en el ensaye de relación de Poisson. Con respecto a estos resultados, en la figura 5.8 se observa que este parámetro se reduce en los concretos con adiconante mineral a la edad de 91 días; sin embargo, el valor promedio de $\bar{\mu} = 0.23$ representa bien la tendencia global.

Tabla 5.11. Relación de Poisson a las edades de 28 y 91 días.

Consumo de Cementante, kg/m ³	Mezcla	28 días	91 días
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	0.24	0.24
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	0.24	0.20
	M3-C370-SF41.11-GC20	0.25	0.19
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	0.23	0.25
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	0.22	0.22
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	0.22	0.21

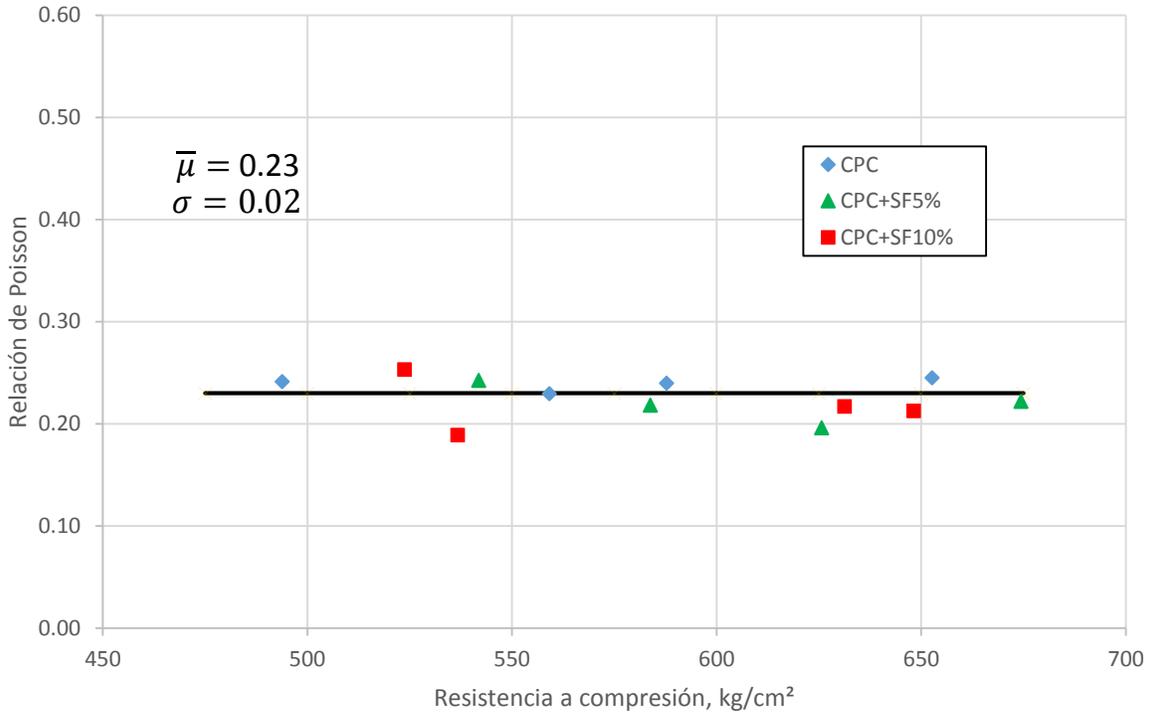


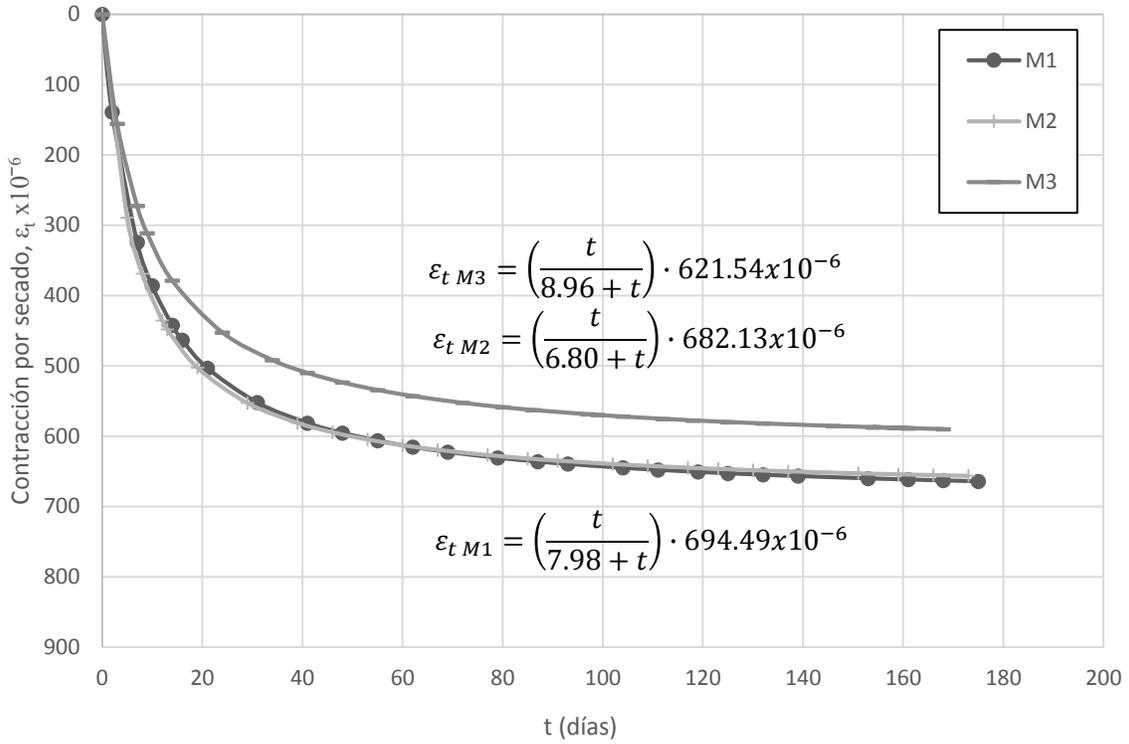
Figura 5.8. Variación de la relación de Poisson con la resistencia a compresión.

5.2.5. Ensayes de contracción por secado

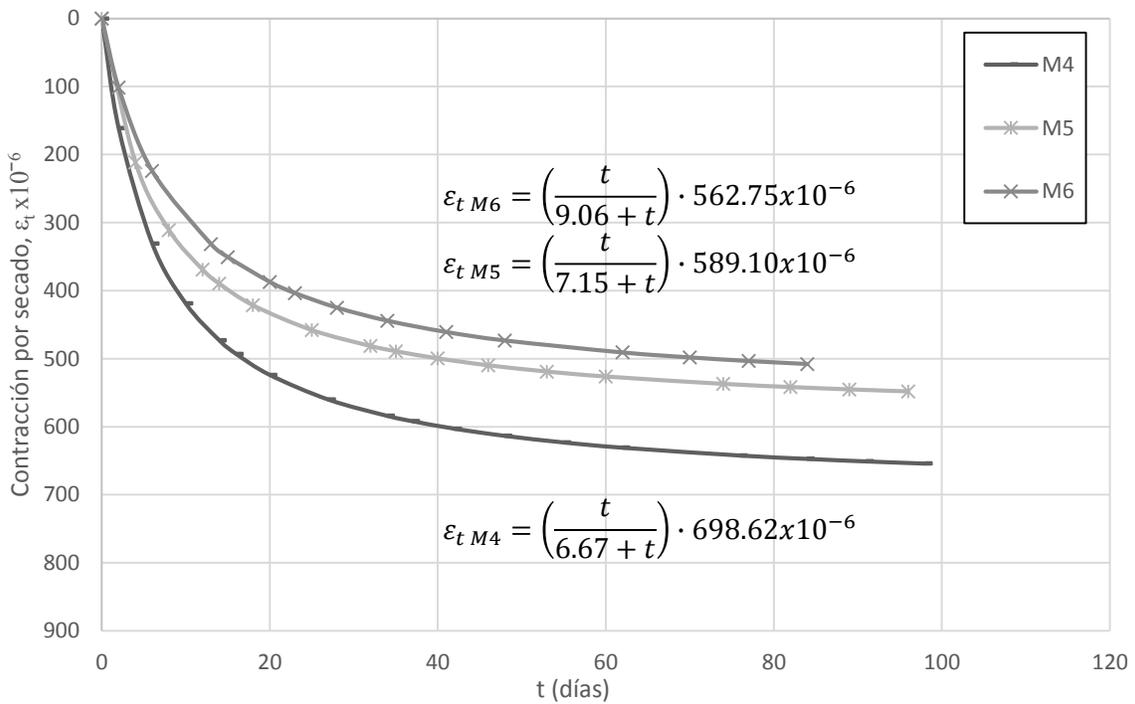
En la figura 5.9 se muestran el desempeño de los concretos con relaciones agua/cemento de 0.40 y 0.45. En las gráficas se observa que la incorporación de humo de sílice redujo la contracción, obteniendo un mejor desempeño en los concretos con relación agua/cemento de 0.40 que incluyeron humo de sílice. Las deformaciones últimas de cada mezcla, junto con las expresiones que permiten estimar la contracción que se alcanza a cualquier edad t , en días, se muestran en la tabla 5.12 para cada mezcla.

Tabla 5.12. Contracción por secado

Consumo de Cementante, kg/m³	Mezcla	Contracción por secado última x10 ⁻⁶	Expresión para estimar la contracción a diferentes edades, t en días
411.11	M1-C411-SF0-GC20	694.49	$\varepsilon_{tM1} = \left(\frac{t}{7.98 + t}\right) \cdot 694.49x10^{-6}$
	M2-C390-SF21-GC20	682.13	$\varepsilon_{tM2} = \left(\frac{t}{6.80 + t}\right) \cdot 682.13x10^{-6}$
	M3-370-SF42-GC20	621.54	$\varepsilon_{tM3} = \left(\frac{t}{8.96 + t}\right) \cdot 621.54x10^{-6}$
462.50	M7-C462.5-SF0-GC20	698.62	$\varepsilon_{tM4} = \left(\frac{t}{6.67 + t}\right) \cdot 698.62x10^{-6}$
	M8-C439.4-SF23.1-GC20	589.10	$\varepsilon_{tM5} = \left(\frac{t}{7.15 + t}\right) \cdot 589.10x10^{-6}$
	M9-C416.2-SF46.3-GC20	562.75	$\varepsilon_{tM6} = \left(\frac{t}{9.06 + t}\right) \cdot 562.75x10^{-6}$



a) Concreto con relación agua/cemento de 0.45



b) Concreto con relación agua/cemento de 0.40

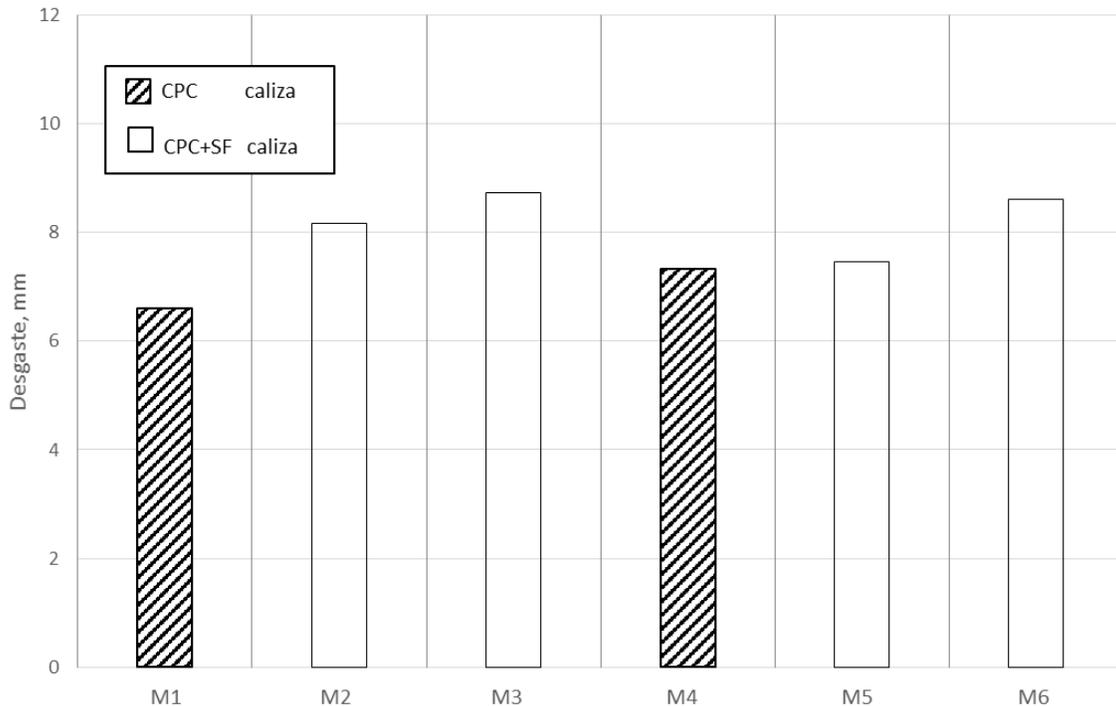
Figura 5.9. Contracción por secado

5.2.6. Resistencia a la abrasión

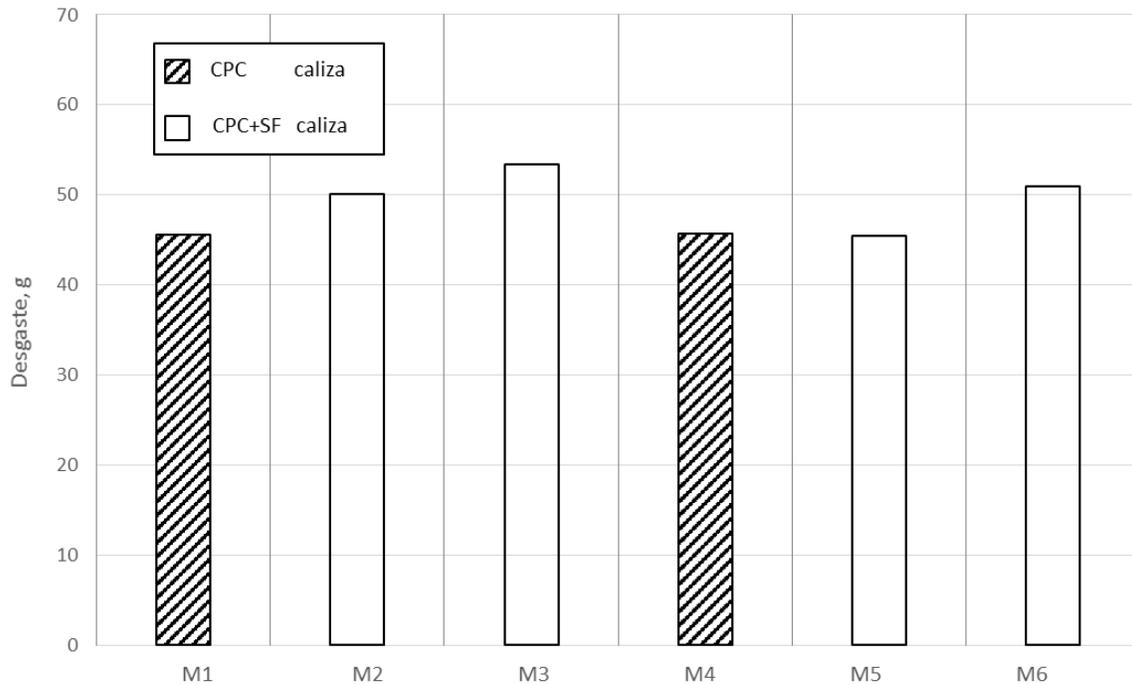
La resistencia a la abrasión se determinó a los 28 días de edad de las mezclas; como se observa en la tabla 5.13, la resistencia a la abrasión disminuyó con la incorporación del humo de sílice; se muestra el desgaste medido tanto por reducción del largo de los especímenes (mm) como por la pérdida de peso (g). En la figura 5.10 se muestran gráficamente los resultados.

Tabla 5.13. Resistencia a la abrasión a 28 días de edad.

Consumo de Cementante, kg/m^3	Mezcla	Desgaste en mm	Desgaste en g
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	6.61	45.58
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	8.17	50.13
	M3-C370-SF41.11-GC20	8.74	53.35
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	7.33	45.70
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	7.46	45.50
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	8.61	51.00



a) Reducción en la longitud



b) Perdida en peso

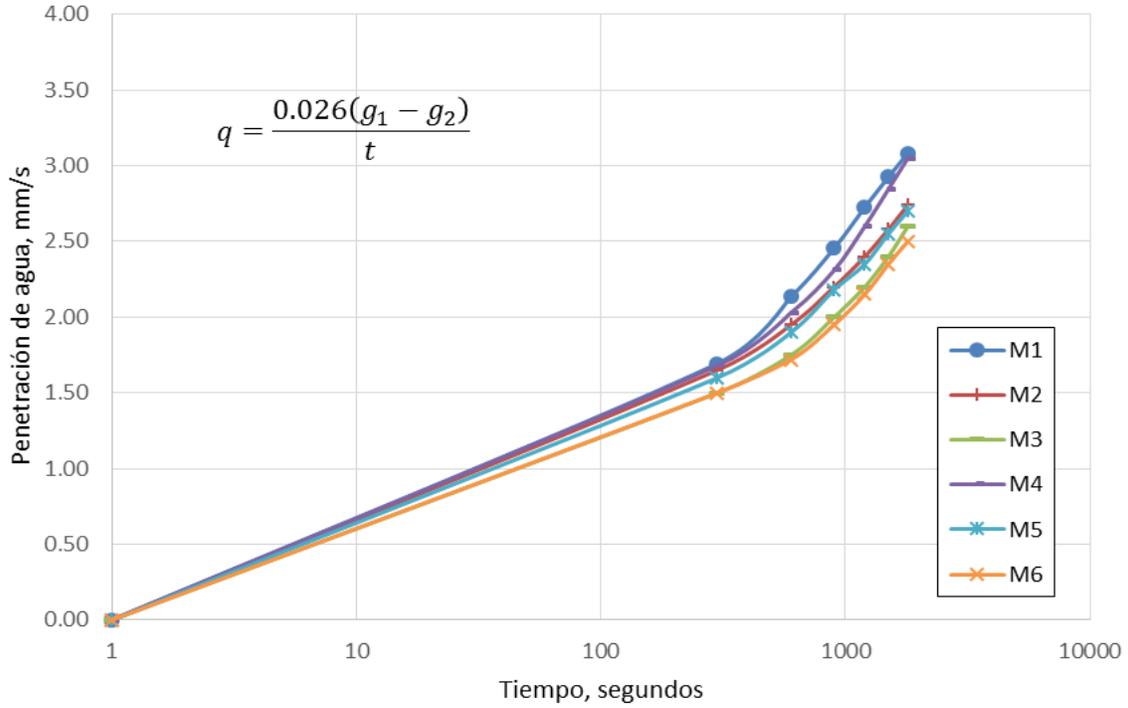
Figura 5.10. Desgaste superficial por abrasión.

5.2.7. Ensayes de permeabilidad al agua

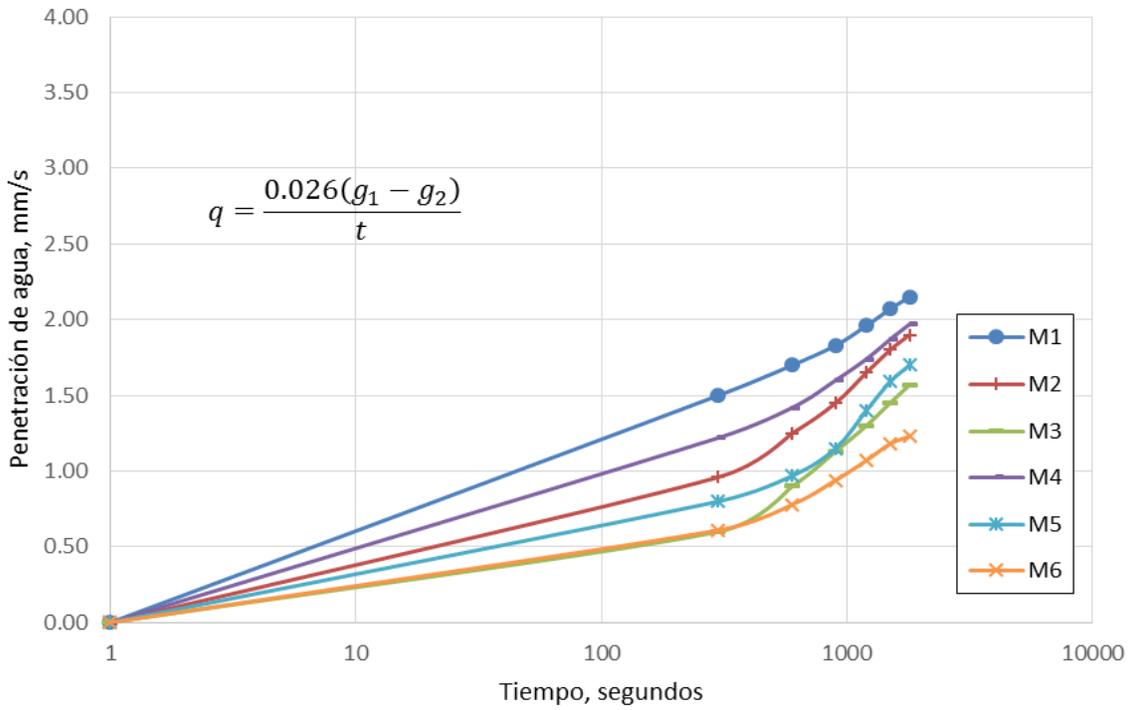
En estos ensayos se puede observar que la penetración del agua es un poco mayor a 28 días, figura 5.11 a), en comparación con los ensayos realizados a 91 días, figura 5.11 b); a ambas edades, la permeabilidad disminuyó con la incorporación del aditivo mineral. La variación que hubo entre las relaciones agua/cemento no fue tan significativa, sin embargo, se debe notar que la permeabilidad es un poco menor en la relación agua/cemento de 0.40 que en la de 0.45; dicha diferencia se puede notar tanto en las gráficas como en la tabla 5.14.

Tabla 5.14. Estimación de la permeabilidad al agua de cada mezcla.

Consumo de Cementante kg/m ³	Mezcla	Flujo de penetración del agua, q, mm/s	
		28 días	91 días
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	4.45×10^{-5}	3.11×10^{-5}
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	3.96×10^{-5}	2.74×10^{-5}
	M3-C370-SF41.11-GC20	3.76×10^{-5}	2.27×10^{-5}
462.5	M4-C462.5-SF0-GC20	4.41×10^{-5}	2.85×10^{-5}
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	3.90×10^{-5}	2.46×10^{-5}
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	3.61×10^{-5}	1.78×10^{-5}



a) Permeabilidad de los concretos de 28 días de edad.



b) Permeabilidad de los concretos de 91 días de edad.

Figura 5.11. Velocidad de penetración del agua.

Los resultados de ambas gráficas se determinaron por medio de la ecuación mostrada en ellas; en el capítulo 4 se muestra la determinación de la constante 0.026 y el significado de cada parámetro de la ecuación.

5.2.8. Ensayes de permeabilidad al ión cloruro

En la tabla 5.15 se presentan los resultados obtenidos de las muestras; como se mencionó en el capítulo cuatro, los especímenes de concreto son de 5cm de espesor y 10cm de diámetro; los resultados se muestran en términos de cantidad de corriente eléctrica (Coulombs) que pasa a través del espesor. Para determinar la permeabilidad de la mezcla, la norma ASTM C 1202 (ref. 20) proporciona la siguiente tabla:

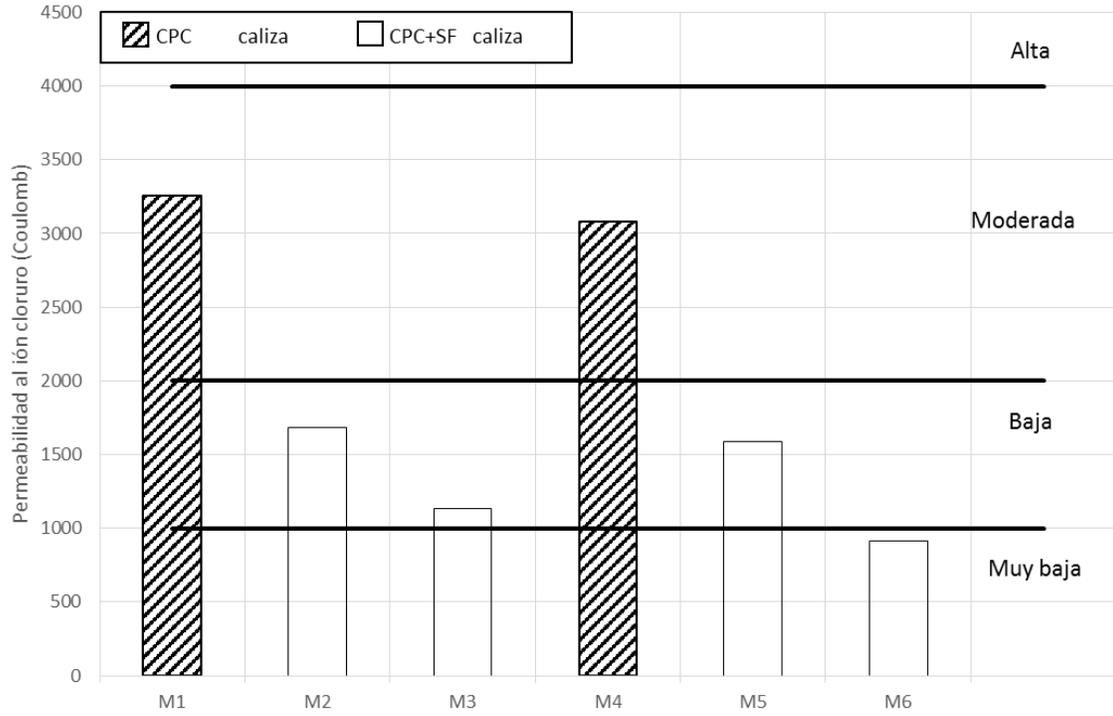
Carga que ha pasado (Coulombs)	Permeabilidad al ión cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Despreciable

De acuerdo con la tabla anterior, se obtuvieron los siguientes resultados:

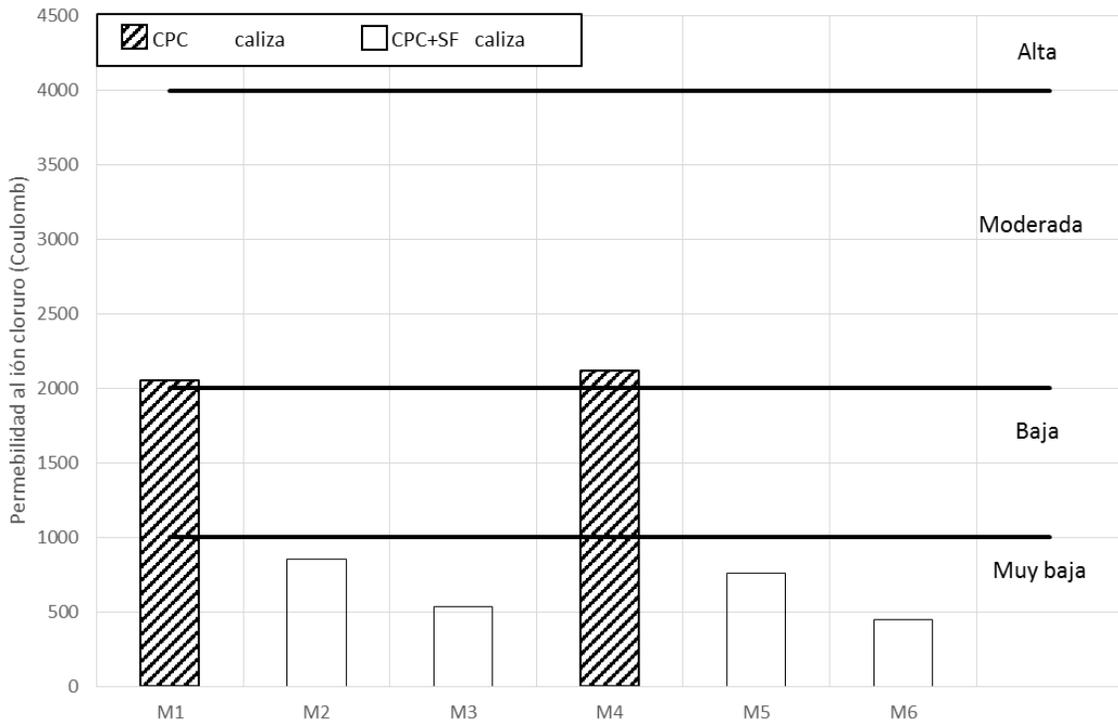
Tabla 5.15. Permeabilidad al ión cloruro.

Consumo de Cementante kg/m ³	Mezcla	28 días		91 días	
		Coulombs	Categoría	Coulombs	Categoría
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	3257	Moderada	2052	Moderada
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	1684	Baja	852	Muy baja
	M3-C370-SF41.11-GC20	1136	Baja	532	Muy baja
462.5	M4-C462.5-SF0-GC20	3078	Moderada	2121	Moderada
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	1585	Baja	760	Muy baja
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	915	Muy baja	446	Muy baja

Para realizar la comparación entre las mezclas, en la figura 5.12 se muestran los diagramas de barras a las edades de 28 y 91 días; en dichas gráficas se muestra que con la adición del humo de sílice se reduce considerablemente la permeabilidad al ión cloruro, pasando a los 28 días de edad de Moderada a Baja y a los 91 días de edad de Moderada a Muy baja.



a) Edad de ensaye: 28 días.



b) Edad de ensaye: 91 días.

Figura 5.12. Permeabilidad al ión cloruro.

5.2.9. Ensayes de resistencia al ataque de sulfatos

Las expresiones para estimar la expansión que sufre el concreto a cualquier edad t , en días, se establecieron de la misma manera que se determinaron las expresiones para la contracción por secado. Dicho lo anterior, en la tabla 5.16 se presentan las expansiones últimas de los resultados que van de tres a seis meses, junto con las expresiones correspondientes a cada mezcla.

Tabla 5.16. Resistencia al ataque de sulfatos.

Consumo de Cementante, kg/m^3	Mezcla	Expansión última $\times 10^{-6}$	Expresión para estimar la expansión a diferentes edades, t en días
411.11	M1-C411.11-SF0-GC20	138.08	$\varepsilon_{tM1} = \left(\frac{t}{55.13 + t} \right) \cdot 138.08 \times 10^{-6}$
	M2-C390.56-SF20.56-GC20	105.08	$\varepsilon_{tM2} = \left(\frac{t}{41.76 + t} \right) \cdot 105.08 \times 10^{-6}$
	M3-C370-SF41.11-GC20	110.59	$\varepsilon_{tM3} = \left(\frac{t}{35.39 + t} \right) \cdot 110.59 \times 10^{-6}$
462.50	M4-C462.5-SF0-GC20	103.07	$\varepsilon_{tM4} = \left(\frac{t}{31.91 + t} \right) \cdot 103.07 \times 10^{-6}$
	M5-C439.38-SF23.12-GC20	103.97	$\varepsilon_{tM5} = \left(\frac{t}{39.44 + t} \right) \cdot 103.97 \times 10^{-6}$
	M6-C416.25-SF46.25-GC20	73.37	$\varepsilon_{tM6} = \left(\frac{t}{21.71 + t} \right) \cdot 73.37 \times 10^{-6}$

Como se muestra en las figuras 5.13 y 5.14, las expansiones se reducen conforme aumenta el adicinante mineral, debido a que el adicinante mineral reduce el contenido de aluminato tricálcico (C_3A) disponible en el cemento reduciendo la formación de sulfoaluminato de calcio hidratado (etringita); los resultados muestran que las menores expansiones se presentan para la relación agua/cemento de 0.40.

En la figura 5.15 se muestra la pérdida en masa (desgaste) de los especímenes de concreto de cada mezcla, propiciando por un ataque de sulfatos en solución saturada. Como se observa, a partir de la segunda semana, se presenta un incremento en su masa debido a la formación de sulfoaluminato de calcio hidratado. Los concretos con relación agua/cemento de 0.45 presentan una reducción de masa (desgaste) a partir de la quinta semana; lo mismo ocurre para los concretos con relación agua/cemento de 0.40 pero iniciando el desgaste una semana después.

Cabe mencionar que la inclusión del humo de sílice permitió que los especímenes de concreto soportaran una semana más en comparación con la duración de los que no lo incorporaron; aunque la reducción en la velocidad de desgaste no fue significativa, los especímenes con mejor desempeño lograron soportar dos meses antes de su desintegración. Los especímenes que no incluyeron humo de sílice se desintegraron entre

6 y 7 semanas. Los concretos con relación agua/cementante de 0.40 y con humo de sílice fueron los que tuvieron el mejor desempeño relativo.

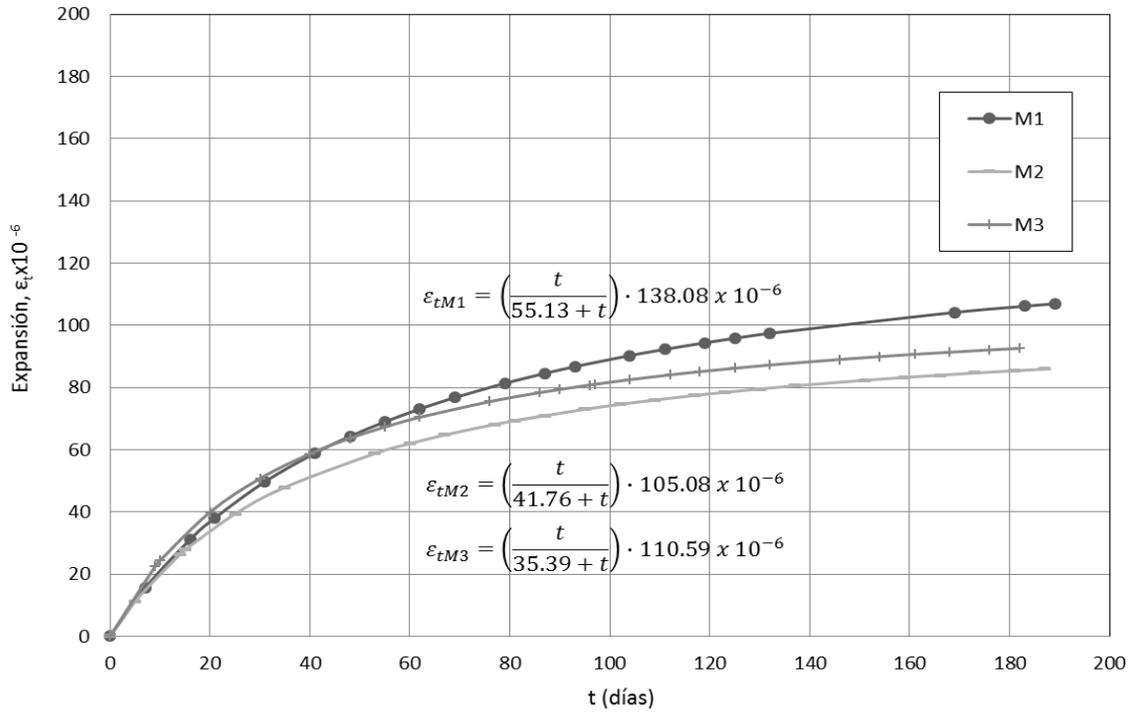


Figura 5.13. Expansiones por ataque de sulfatos con relación agua/cemento de 0.45.

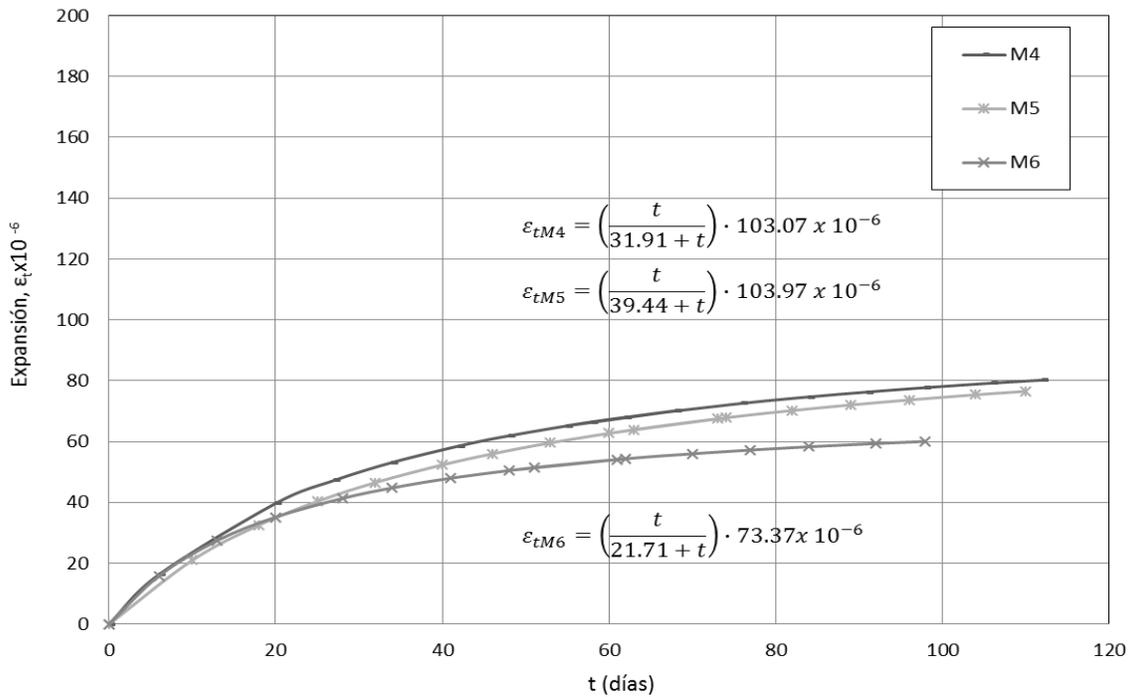
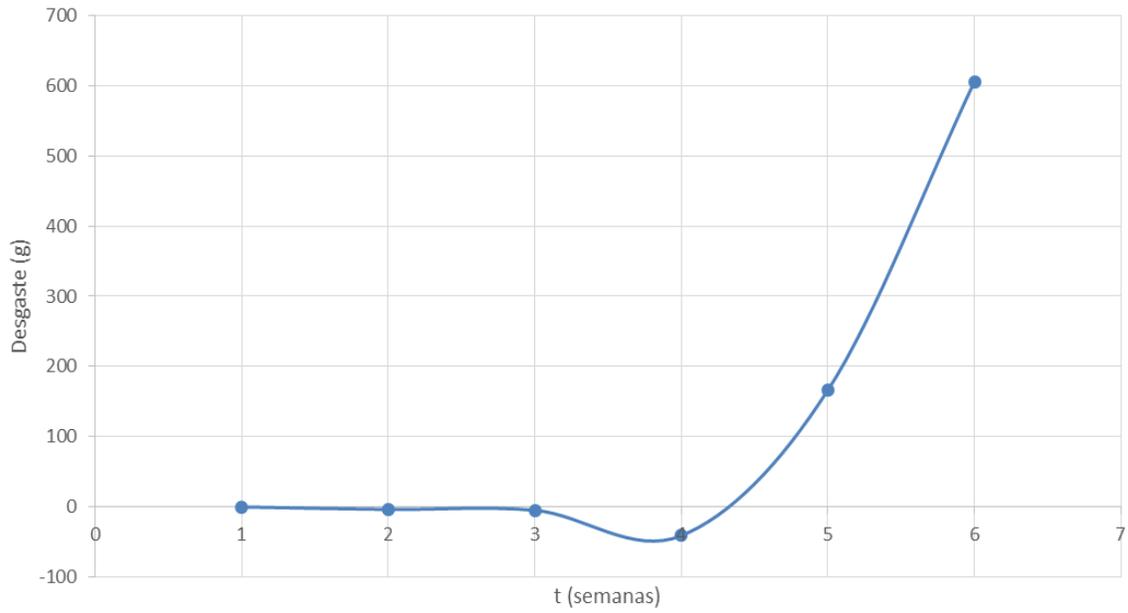


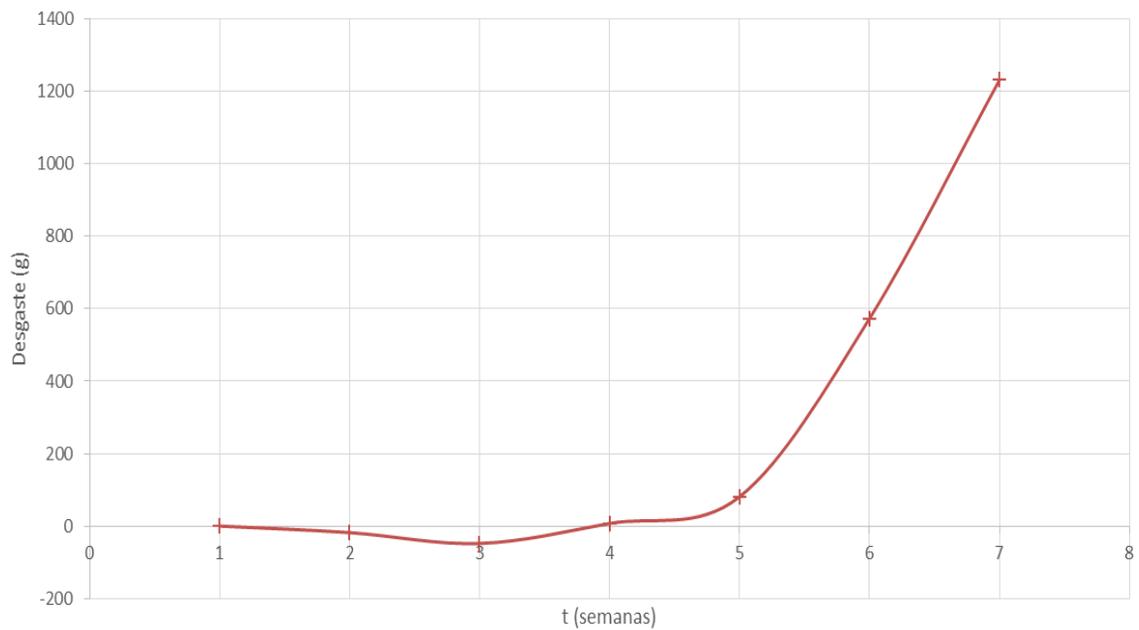
Figura 5.14. Expansiones por ataque de sulfatos con relación agua/cemento de 0.40.

Mezcla 1

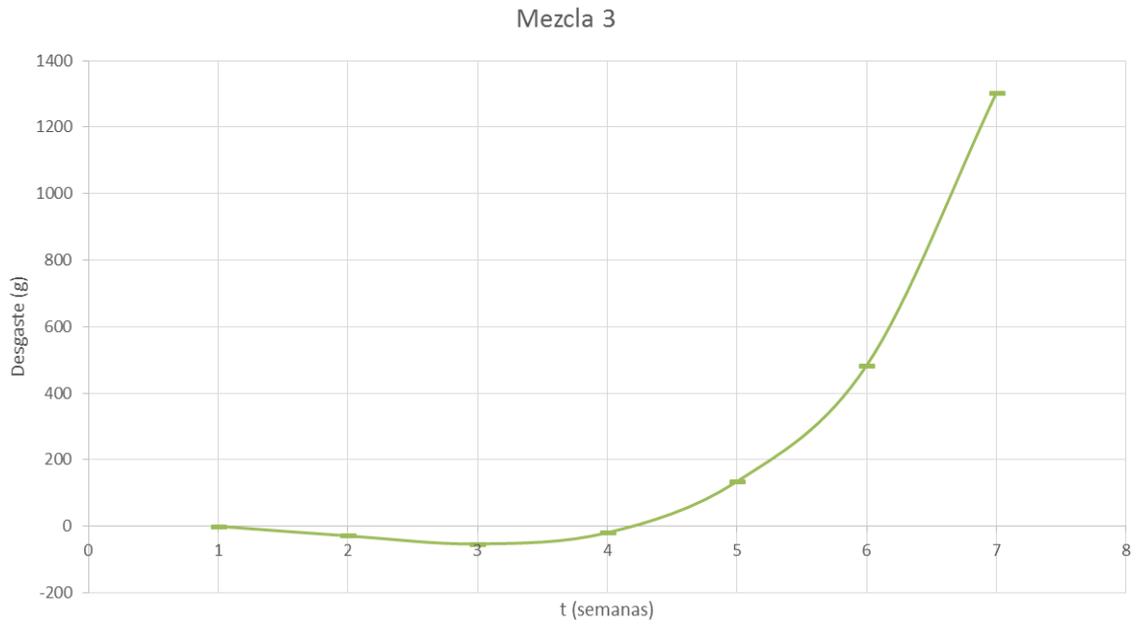


a) Ensaye saturado para M1-C411.11-SF0-GC20

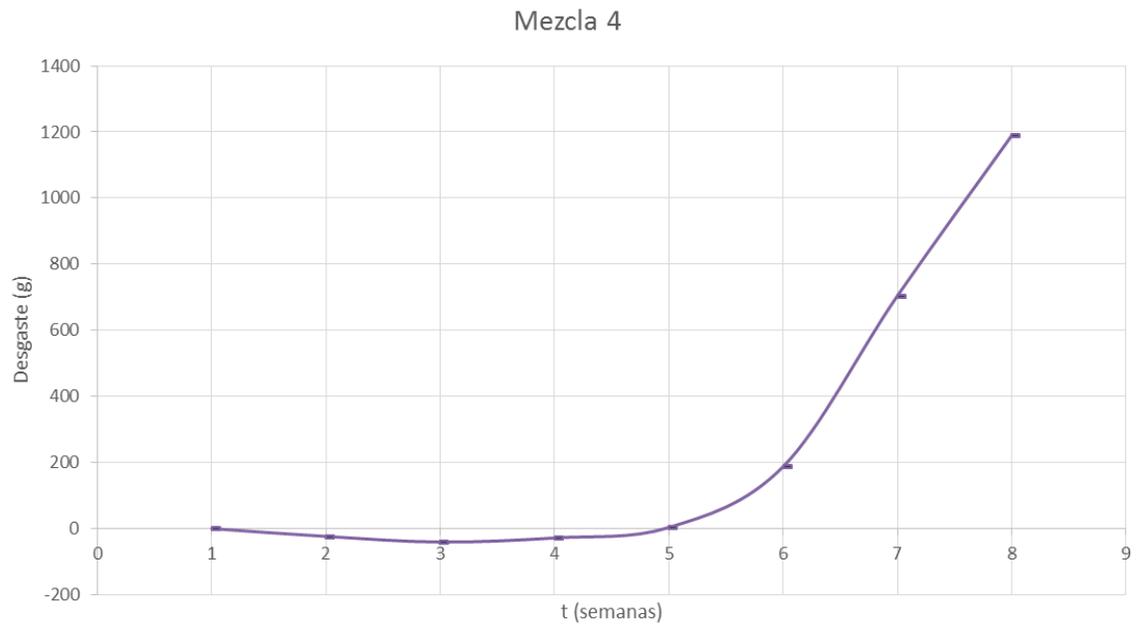
Mezcla 2



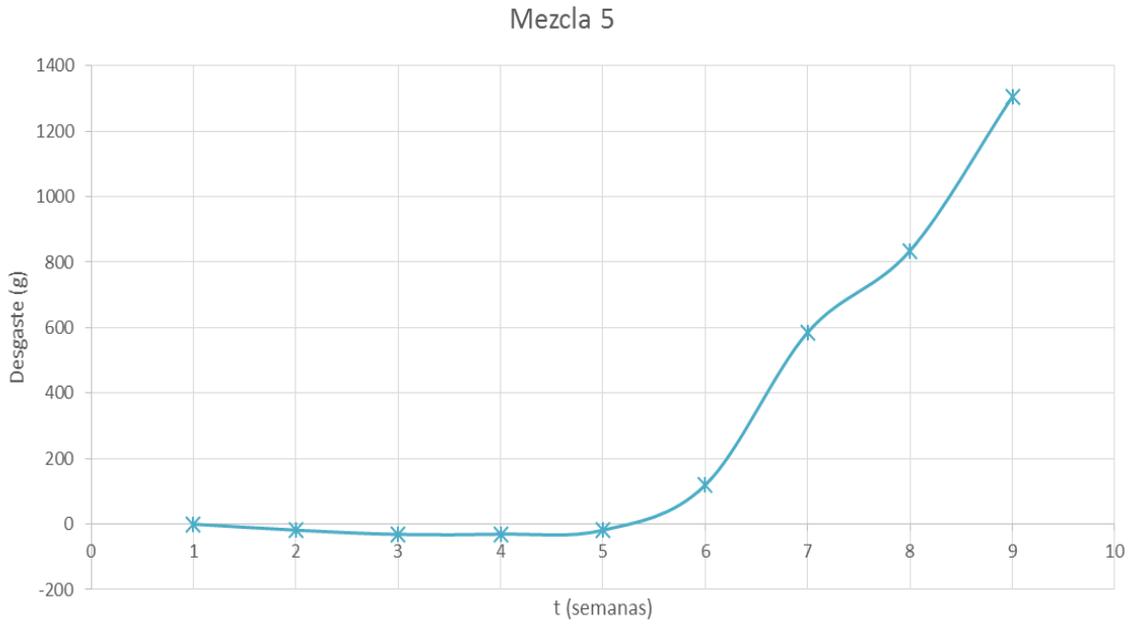
b) Ensaye saturado para M2-C390.56-SF20.56-GC20



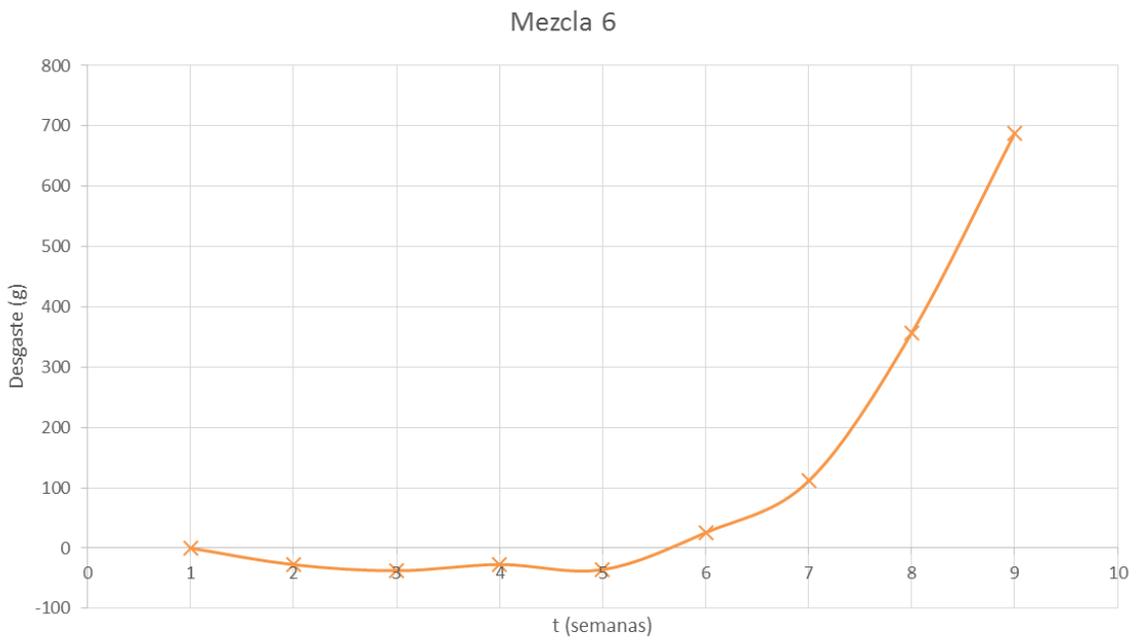
c) Ensaye saturado para M3-C370-SF41.11-GC20



d) Ensaye saturado para M4-C462.5-SF0-GC20



e) Ensaye saturado para M5-C439.38-SF23.12-GC20



f) Ensaye saturado para M6-C416.25-SF46.25-GC20

Figura 5.15. Ataque de sulfatos en solución saturada.

6. CONCLUSIONES

1. El peso volumétrico disminuyó y el contenido de aire atrapado aumentó con el consumo de humo de sílice aunque la diferencia no fue muy significativa.
2. Las mayores resistencias a compresión, se alcanzaron en las mezclas M2 y M5, con resistencias a 28 días de 541.87 y 583.84kg/cm², respectivamente, correspondientes a los concretos con 5% de humo de sílice.
3. La resistencia a compresión a cualquier edad t, en días, en función de la resistencia a 28 días, en kg/cm², para las mezclas con distintos porcentajes de humo de sílice, se puede estimar con las siguientes expresiones:

$$\frac{f_c}{f'_{c_{28 \text{ días CPC}}} = \frac{t}{4.143 + 0.807t}$$

$$\frac{f_c}{f'_{c_{28 \text{ días CPC+SF5\%}}} = \frac{t}{4.128 + 0.823t}$$

$$\frac{f_c}{f'_{c_{28 \text{ días CPC+SF10\%}}} = \frac{t}{2.298 + 0.947t}$$

4. En las mezclas de concreto estudiadas, la resistencia a tensión por compresión diametral, se puede estimar en función de la resistencia a compresión con la expresión $f_t = 1.64\sqrt{f'_c}$, en kg/cm², y la resistencia a tensión por flexión con la expresión $f_f = 2.51\sqrt{f'_c}$, en kg/cm², independientemente del consumo de humo de sílice.
5. El empleo de humo de sílice, no modificó la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión, por lo que el módulo de elasticidad de los concretos con y sin humo de sílice se puede estimar con la expresión $E_c = 12216\sqrt{f'_c}$, en kg/cm².

6. Para la relación de Poisson, la inclusión de humo de sílice no tuvo efecto significativo, debido a que se mantuvo prácticamente constante con un valor promedio de $\bar{\mu} = 0.23$.
7. La inclusión de humo de sílice modificó el desempeño del concreto, de tal manera que aumentó la abrasión y redujo la contracción por secado y la permeabilidad al agua.
8. Los concretos sin adicinante mineral tuvieron una permeabilidad al ión cloruro muy cercano al límite inferior de la clasificación Moderada, a la edad de 91 días, en tanto, que los concretos con humo de sílice tuvieron una permeabilidad clasificada como Muy baja a esa misma edad.
9. La resistencia al ataque de sulfatos mejora conforme aumenta el porcentaje de adicinante mineral utilizado en las mezclas de concretos; los mejores resultados se obtuvieron con la relación agua/cementante de 0.40 y 10% de humo de sílice.
10. Para obtener concretos durables y resistentes, se recomienda el empleo de agregados pétreos densos, relaciones agua/cementante menores que 0.45, consumos de cementantes superiores a 400kg/m^3 , compuesto por 95% de cemento Portland resistente a los sulfatos y 5% de humo de sílice.

ANEXO FOTOGRÁFICO

Con esta serie de fotografías lo que se pretende es mostrar la forma de falla que presentaron los especímenes para los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tensión, módulo de elasticidad y ataque de sulfatos en solución saturada.

En la figura A se muestra la prueba a compresión marcando el tipo de falla en la figura del lado derecho; del mismo modo aplica para la figura D.



Figura A. Ensayo a compresión de la mezcla 4 a 91 días.



Figura B. Ensayo de tensión por compresión diametral.

En la figura B se observa que la ruptura ocurrió atravesando el diámetro del espécimen y fracturando a los agregados gruesos, lo que indica que la adherencia entre los agregados pétreos y la pasta fue la adecuada. Para el ensayo de tensión por flexión, en la figura C, se observa que la ruptura se halla en el tercio medio, lo que presenta un buen desempeño del ensayo por flexión.

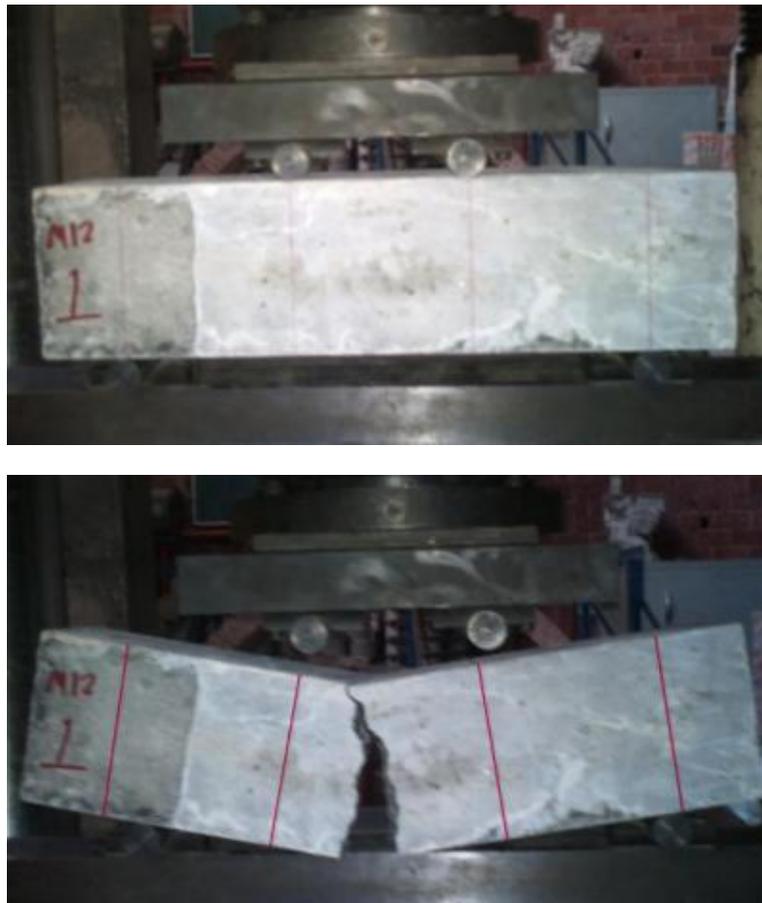


Figura C. Ensayo a tensión por flexión.



Figura D. Ensayo para las pruebas de módulo de elasticidad y relación de Poisson.



1.-Séptima semana de prueba



2.-Octava semana de prueba



3.-Novena semana de prueba

Figura F. Ensayo de ataque de sulfatos en solución saturada.

En la figura F se muestra el desprendimiento de los materiales por la expansión ocasionada por la solución saturada de sulfato de sodio.

REFERENCIAS

1. ACI 211.1 (2010), Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I.
2. ASTM C 29 (2010), Unit Weight and Voids in Aggregate, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
3. ASTM C 33 (2010), Standard Specification for Concrete Aggregates, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
4. ASTM C 39 (2010), Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
5. ASTM C 78 (2010), Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
6. ASTM C 117 (2010), Materials Finer Than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
7. ASTM C 125 (2010), Concrete and Concrete Aggregates, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
8. ASTM C 127 (2010), Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
9. ASTM C 128 (2010), Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
10. ASTM C 136 (2010), Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.

11. ASTM C 138 (2010), Unit Weight, Yield and Air Content (Gravimetric) of Concrete, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
12. ASTM C 143 (2010), Slump of Portland Cement Concrete, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
13. ASTM C 157 (2010), Standard Test Method for Length Change of Hardened Cement Mortar and Concrete, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
14. ASTM C 231 (2010), Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
15. ASTM C 469 (2010), Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
16. ASTM C 490 (2010), Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
17. ASTM C 494 (2010), Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
18. ASTM C 496 (2010), Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
19. ASTM C 1012 (2010), Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.01 Cement, Lime, Gypsum.
20. ASTM C 1202 (2010), Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
21. ASTM C 1240 (2010), Standard Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement Concrete and Mortar, 2010 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates.
22. A. M. NEVILLE (1963). *Properties of Concrete*. London. Gran Bretaña. pp. 532.
23. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Manual de Tecnología del Concreto*. Sección 1. Limusa. México, 1994. pp. 258.
24. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Manual de Tecnología del Concreto*. Sección 2. Limusa. México, 1994. pp. 262.
25. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Manual de Tecnología del Concreto*. Sección 3. Limusa. México, 1994. pp. 382.

26. Germann Instruments Inc. (2010), GWT 4000, Instruction and Maintenance Manual, July.
27. IMCYC. *Durabilidad de Concreto*. Limusa. México, D.F., 1989. pp. 87.
28. JOSEPH J. WADDELL (1984). *Manual de Inspección del Concreto*. Tomo I. International Conference of Building Officials. México, D.F. pp. 460.
29. LOBO B. CARNEIRO (1953), *Concrete Tensile Strength*, Boletín RILEM No. 13.
30. MENA FERRER, MANUEL (2005). *Durabilidad de Estructuras de Concreto en México*. IMCYC. México. pp. 139.
31. NMX C-008-1974, Industria de la Construcción-Mosaicos-Métodos de ensayo.
32. NMX C-122-ONNCCE-2004, Industria de la Construcción-Agua para concreto-Especificaciones.
33. NMX C-255-ONNCCE-1999, Industria de la Construcción-Aditivos Químicos para Concreto-Especificaciones y Métodos de Ensayo.
34. NMX C-403-ONNCCE-1999, Industria de la Construcción-Concretos Hidráulicos para Uso Estructural.
35. NMX C-414-ONNCCE-1999, Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos Especificaciones y Métodos de Prueba.
36. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto para el Distrito Federal (2004).
37. PCA. *Proyecto y Control de Mezclas de Concreto (1978)*. Limusa. México. pp. 163.
38. RAFAT SIDDIQUE (2011). *Supplementary Cementing Materials*. Springer. India. pp. 269.