



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA



**Características y durabilidad del concreto con humo de sílice y
agregado de origen basáltico en medios agresivos**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

José Xavier Miyoshi Sato Matsumoto Miranda

DIRECTOR DE TESIS

M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/060/15

Señor
JOSÉ XAVIER MIYOSHI SATO MATSUMOTO MIRANDA
Presente

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.

"CARACTERÍSTICAS Y DURABILIDAD DEL CONCRETO CON HUMO DE SÍLICE Y AGREGADO DE ORIGEN BASÁLTICO EN MEDIOS AGRESIVOS"

- OBJETIVO
- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- ANTECEDENTES
- INTRODUCCIÓN
- I. DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO
- II. PRUEBAS
- III. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- IV. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

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 16 de junio del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN

Designación de sinodales de Examen Profesional

A los señores profesores:

Presidente: **M.I. LUIS CANDELAS RAMIREZ**
Vocal: **M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**
Secretario: **M.I. MIGUEL ANGEL RODRIGUEZ VEGA**
1er. Suplente: **ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES**
2do. Suplente: **ING. EDMUNDO SANCHEZ RAMIREZ**

Conforme a la encomienda que hace el Director de la Facultad a este Comité de Titulación para la integración de jurados, me permito informar a ustedes que han sido designados sinodales del Examen Profesional de: SATO MATSUMOTO MIRANDA JOSE XAVIER MIYOSHI, registrado con número de cuenta 306535374 en la carrera de INGENIERÍA CIVIL; quien ha concluido el desarrollo del tema que le fue autorizado.

Ruego a ustedes se sirvan revisar el trabajo adjunto y manifestar a la Dirección de la Facultad, si es el caso, la aceptación mediante la firma en el oficio FEX-2 en el plazo indicado a continuación.

Por indicaciones del Sr. Director, con el fin de asegurar el pronto cumplimiento de las disposiciones normativas correspondientes y de no afectar innecesariamente los tiempos de titulación, les ruego tomar en consideración que para lo anterior cuentan ustedes con un plazo máximo de **cinco días hábiles** contados a partir del momento en que ustedes **acusen recibo de esta notificación**. Si transcurrido este plazo el interesado no tuviera observaciones de su parte, se entendería que el trabajo ha sido aprobado, por lo que deberán **firmar el oficio de aceptación del trabajo escrito**.

Doy a ustedes las más cumplidas gracias por su atención y les reitero las seguridades de mi consideración más distinguida.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, D.F. a 06 de Agosto de 2015.

EL PRESIDENTE DEL COMITÉ


M.I. GERMAN LÓPEZ RINCÓN

CARACTERÍSTICAS Y DURABILIDAD DEL CONCRETO CON HUMO DE SÍLICE Y AGREGADO DE ORIGEN BASÁLTICO EN MEDIOS AGRESIVOS

OBJETIVO	1
General	1
Específico	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
ANTECEDENTES	3
Tecnología del concreto	3
Durabilidad	3
INTRODUCCIÓN	5
I.1.- Concreto	5
I.2.- Puzolanas	15
I.3.- Aportaciones de humo de sílice al concreto	19
1.- DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO	23
1.1.- Características	23
1.2.- Consideraciones	32
1.3 Dosificación de la mezcla	34
2.- PRUEBAS	37
2.1.- Concreto en estado fresco	37
2.2.- Concreto endurecido	38
3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
3.1.- Concreto en estado fresco	45
3.2.- Concreto endurecido	45
4.- RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	61



Objetivo

General

A través de este trabajo, pretendo profundizar y demostrar algunos de los conocimientos adquiridos durante mi formación profesional como Ingeniero Civil. Además aprender los lineamientos necesarios para realizar un estudio científico basado en resultados experimentales y aplicables a diferentes problemas que se presentarán en el día a día del trabajo profesional en el ámbito de la ingeniería.

Específico

Determinar el comportamiento de una mezcla de concreto a la que se le adicionó humo de sílice (SF, por sus siglas en inglés) como material cementante suplementario ante la presencia de un suelo y agua intersticial con alta salinidad, caracterizada por tener una alta concentración de cloruros y sulfatos, compuestos altamente agresivos y corrosivos al concreto reforzado. Estas peculiaridades, han sido localizadas en zonas lacustres y pantanosas debido a la gran cantidad de materia orgánica en descomposición. La Zona del Valle de México tiene altas probabilidades de poseer estos compuestos tanto en el suelo como en sus mantos freáticos.



Planteamiento del problema

Los materiales que componen el concreto son altamente susceptibles a la presencia de sulfatos, estos compuestos deterioran las características deseables en el concreto endurecido, alterando y debilitando su microestructura, además de las características geométricas de los elementos estructurales formados con este material. Al desaparecer o fracturarse la cubierta de concreto, facilita la corrosión del acero de refuerzo por lo que, las fuerzas actuantes en los elementos estructurales podrían provocar que no solamente alcancen los estados límite de servicio, sino que podrían producirse esfuerzos últimos en la estructura que la hagan colapsar.

El ataque de los sulfatos al concreto de cemento Portland (CP), se debe a la reacción de estas sales con el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento, dando lugar a la formación de sulfoaluminato de calcio hidratado o etringita. Dicha reacción se asocia con un incremento de volumen, capaz de desintegrar el concreto; la formación de estos productos se acompaña de reblandecimiento del concreto y aumento de volumen que generan presiones internas capaces de fracturarlo y desintegrarlo. De esta reacción se deriva la principal medida de defensa del concreto contra el ataque de los sulfatos que consiste en reducir el contenido de C_3A en el cemento Portland para hacerlo menos susceptible a dicha agresión.

Por ello, para proteger una estructura de concreto que debe prestar servicio en contacto con agua o suelo potencialmente agresivos por su alto contenido de sulfatos, existen tres importantes consideraciones:

- A) Inhibir la reacción de los sulfatos con el cemento, seleccionando un cemento de composición química apropiada.
- B) Evitar la penetración de los sulfatos en solución acuosa a través del concreto, produciendo un concreto compacto e impermeable.
- C) Impedir el contacto directo de los sulfatos con el concreto, interponiendo entre ambos una barrera de separación, o cualquier medida que sirva para el mismo fin.

Normalmente, las primeras dos medidas se aplican de manera simultánea y complementaria, en tanto que la tercera generalmente representa una medida adicional para condiciones muy severas, o bien un medio alternativo cuando no es posible aplicar las primeras dos, e incluso para estructuras ya realizadas en que no se tomaron las precauciones adecuadas en su construcción.

Para que los sulfatos ataquen al concreto es necesario que penetren por sus poros, y para ello se requiere la presencia de un medio acuoso; es decir, si los sulfatos se encuentran en estado sólido el riesgo de ataque es mínimo, pues al no penetrar por los poros del concreto, sus efectos se limitan a la superficie de contacto. Esto pone en evidencia la influencia que tiene la permeabilidad del concreto en su resistencia a los sulfatos.

A lo largo de esta investigación, se tratará de mejorar las características del concreto con el fin de disminuir la susceptibilidad de deterioro ante la presencia de suelos con un alto contenido de sales.



Antecedentes

Tecnología del concreto

La tecnología del concreto, contempla todas aquellas acciones demandadas para la elaboración de mezclas de concreto capaces de poseer las propiedades necesarias y deseadas para los elementos de concreto a diseñar. Estas características, son seleccionadas y diseñadas dependiendo del tipo de elemento que integrará la estructura de concreto, el medio en el cual se encontrará y la susceptibilidad del concreto a ser deteriorado en dicho medio.

Los principales aspectos que la tecnología del concreto se encarga de investigar y proponer, comienzan desde la selección de los componentes; dependerá de la composición química y del tamaño de la partícula de cemento, el tiempo de fraguado, calor de hidratación y el periodo en el que el concreto obtendrá la resistencia deseada. Así mismo, con la selección y análisis de las propiedades de los agregados, no solamente de su tamaño, forma y textura. Adicionalmente se debe considerar su composición mineral y contenido de materia orgánica con el fin de eliminar el riesgo de posibles reacciones perjudiciales para el concreto.

Otro elemento muy importante es el agua que se utilizará, no solamente durante la elaboración de la mezcla, sino también posterior a esta durante el curado del elemento; con estos tres elementos básicos podría elaborarse una mezcla apropiada. Sin embargo, existen materiales que, añadidos a la mezcla, mejoran sus propiedades e integran un concreto con la calidad deseada. Finalmente, la tecnología del concreto se encarga de integrar los elementos que formaran parte de la mezcla de este, de manera tal que cada uno de ellos aportará los rasgos necesarios para obtener el concreto deseado.

Durabilidad

La durabilidad del concreto es parte esencial en la planeación de cualquier proyecto, ya que impondrá el periodo de vida potencial de la estructura; ésta puede ser afectada por factores de tipo interno o externos. Los factores internos se relacionan con la calidad, idoneidad y capacidad de desempeño del concreto terminado; en tanto que los externos por lo general son consecuencia de la exposición y servicio de las estructuras.

Para evitar un deterioro prematuro, es fundamental lograr una calidad e idoneidad en el concreto, esto se consigue cuidando los siguientes requerimientos:

- Empleo de agregados apropiados.
- Selección y uso del cemento adecuado a la composición petrográfica de los agregados.
- Utilización de aditivos de calidad certificada.
- Uso de agua de calidad conforme a las especificaciones.
- Diseño y aplicación de la mezcla de concreto idónea.
- Utilización de equipos, procedimientos y personal adecuado y competente.
- Ejecución eficaz del procedimiento de protección y curado del concreto.
- Operación de un sistema de verificación y seguimiento de todas las etapas del proceso de producción y utilización del concreto

Las causas externas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio. En cuanto a las



condiciones de exposición, la temperatura y humedad son factores cuyas magnitudes y variaciones pueden afectar las propiedades y desempeño del concreto en sus diferentes etapas de vida.

Las altas temperaturas aceleran la hidratación del cemento y la pérdida de agua por evaporación, lo cual demerita su resistencia potencial y provoca cambios volumétricos capaces de agrietarlo en estado plástico y endurecido; así, el concreto que se elabora a una temperatura moderadamente baja, fragua y endurece con cierta lentitud pero posteriormente puede desarrollar a plenitud sus propiedades potenciales si se le cura a una temperatura conveniente. Sin embargo, si la temperatura de elaboración es demasiado baja y alcanza a congelar el concreto a edad temprana, puede dañarlo de forma irreversible.

En cuanto a la humedad ambiental, únicamente es adversa al concreto cuando es muy baja, pues representa una condición propicia para la pérdida de agua con sus consiguientes efectos inconvenientes sobre la hidratación del cemento.

Por otra parte, el deterioro del concreto debido a las condiciones de servicio, se origina por las acciones que recibe la estructura en el curso de su vida operativa. De acuerdo con su origen y frecuencia, estas acciones pueden considerarse como ordinarias o eventuales. Las primeras corresponden a las cargas, solicitaciones y fuerzas de diversa índole que actúan en la estructura como consecuencia de sus funciones normales; las acciones que rebasan las condiciones normales, se producen como consecuencia de eventos extraordinarios tales como sismos, incendios, inundaciones, etc.



Introducción

I.1.- Concreto

El concreto es uno de los materiales más utilizados para la construcción, posee una apariencia y composición similar a un conglomerado compuesto de material pétreo fino y grueso, además de un material aglutinante, capaz de unir todos sus componentes, formando un material con características homogéneas en la cual cada componente aporta propiedades fundamentales.

I.1.1.- Componentes del concreto

El concreto compuesto con cemento Portland (CP) se integra de la siguiente manera:

Cemento Portland

+ Agua + aditivos = **Pasta de cemento**

+ Agregados finos = **Mortero**

+ Agregados gruesos → **Concreto**

I.1.1.1.- Material aglutinante

Este es un material capaz de proporcionar la cohesión y adherencia necesarias para integrar otros componentes. Dentro de los aglutinantes inorgánicos existen dos grandes grupos; los no hidráulicos, que son aquellos que no presentan una reacción al estar en contacto con el agua (sin embargo algunos requieren la adición de agua para poder realizar esta función), como ejemplos comunes están la cal o el yeso. En el caso de los aglutinantes hidráulicos, al tener contacto con agua; ocurre una reacción de hidratación que ayuda a la mezcla a obtener las características deseadas de cohesión, tal es el caso del cemento Portland.

Ya que los elementos estudiados en esta tesis estarán compuestos únicamente de CP, esta sección se dedicará a hablar sobre éste.

I.1.1.1.1.- Cemento Portland

El Cemento Portland fue producido por primera vez en 1824 por Joseph Aspdin y recibió éste nombre debido a que posee la calidad y color característico de una roca caliza que se localiza en Portland, Inglaterra.

Para producir una tonelada de cemento Portland se requieren aproximadamente 1.5 toneladas de materiales crudos; la producción de CP requiere de una gran cantidad de energía para realizar el proceso y esto libera alrededor de una tonelada de dióxido de carbono (CO_2) a la atmosfera.

El proceso de elaboración de CP es el siguiente:

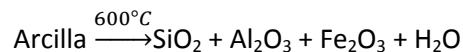
- (1) Se trituran y mezclan las cantidades correctas de arcilla o esquistos, mineral de hierro y roca caliza,
- (2) la mezcla se calienta dentro de un horno rotatorio a 1450°C ,
- (3) el producto extraído del horno denominado clinker es molido en partículas menores a $75\mu\text{m}$,
- (4) y por último se le añade entre 3% y 5% de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para formar un polvo gris tal y como conocemos el CP.



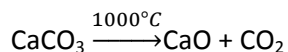
I.1.1.1.1.-Química del cemento

Durante el proceso de calcinación, la materia prima reacciona de la siguiente manera otorgando los principales componentes del CP:

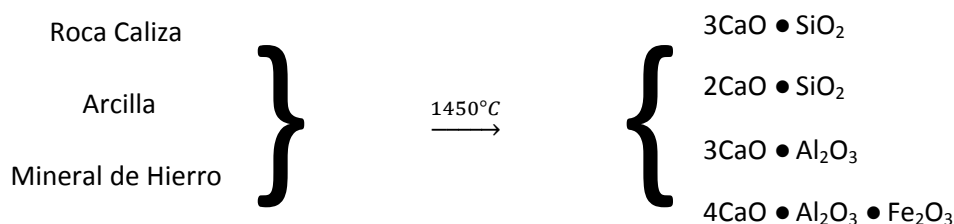
- a) Arcilla; es la principal fuente de silicatos



- b) Roca caliza o carbonato de calcio (CaCO_3)



- c) Mineral de hierro; provee óxido de hierro (Fe_2O_3) extra el cual ayuda a la formación de silicato de calcio a baja temperatura
- d) Temperatura: entre 1000 y 1450°C se llevan a cabo la mayoría de las reacciones donde se forman distintos compuestos químicos, los principales son:



Para facilitar el uso de los compuestos químicos que conforman el concreto se han establecido abreviaturas utilizadas frecuentemente en la química de cerámicos que se muestran en la tabla I.1.

Tabla I.1 Abreviaturas de la composición química del cemento										
Compuesto	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	H ₂ O	Ca(OH) ₂	3CaO	2CaO · SiO ₂
Abreviatura	C	S	A	F	Š	M	H	CH	C ₃	C ₂ S

Los principales compuestos del cemento Portland ordinario (CPO) se encuentran en la tabla I.2, además se puede notar que el silicato tricálcico (C₃S) y silicato dicálcico (C₂S) se encuentran en un 50% y 25% respectivamente del CP, por ello se podría definir al concreto como aquel material que combina óxido de calcio (CaO) y óxido de silicio (SiO₂) en una proporción tal que reacciona con agua a temperatura ambiente y presión media.



Compuesto	Composición	Nombre Común	Porcentaje en peso	Color
Silicato tricálcico	C ₃ S	Alita	50	Blanco
Silicato dicálcico	C ₂ S	Belita	25	Blanco
Aluminato tricálcico	C ₃ A	n/a	12	Blanco/Gris
Aluminoferrito tetracálcico	C ₄ AF	Ferrita	8	Negro

El silicato tricálcico (C₃S), se hidrata con rapidez, y su alto contenido en la composición del cemento, se refleja en mayores resistencias mecánicas en el curso del primer mes de vida del concreto, sin embargo, también aumenta considerablemente el desprendimiento de calor de hidratación de dicho cemento.

El silicato dicálcico (C₂S), es un compuesto cuya hidratación es posterior a la del compuesto anterior, de manera que su contribución a la resistencia mecánica y a la generación de calor ocurre más bien a mediano y largo plazo, aunque puede hacer modestas apariciones desde los primeros días de edad del concreto. Por tal motivo, un aumento en el contenido de este elemento en el cemento sólo es deseable para minimizar la generación de calor de hidratación, y tiene que considerarse el detrimento de las resistencias mecánicas a corto plazo que esto provoca.

El aluminato tricálcico (C₃A), es el compuesto del cemento Portland que se hidrata más rápidamente, por ello también es el que aporta más resistencia mecánica y genera más calor de hidratación en las primeras 24 horas de vida del concreto. Debido a ello y a su propensión para reaccionar desfavorablemente con los sulfatos; se limita su participación en la composición de los cementos.

El aluminoferrito tetracálcico (C₄AF), es el compuesto de menor importancia entre los cuatro principales del CP, pues contribuye poco a la resistencia mecánica, aunque su presencia favorece la hidratación de los silicatos. Es de poca relevancia en la evolución del endurecimiento del concreto.

Mediante el uso de estos cuatro compuestos en distintas proporciones se da un amplio rango para que el concreto adquiera el total de sus características mecánicas, ya que cada uno de ellos posee diferentes tiempos de hidratación.

En una menor proporción que los compuestos anteriores, podemos encontrar en el CP: yeso, magnesia y sulfatos alcalinos. El yeso (2CaSO₄ · 2H₂O) es añadido al clinker como último paso en la elaboración del CP; éste reacciona con el agua y forma un producto llamado etringita, el cual es necesario para disminuir la velocidad de reacción del C₃A, debido a que este producto crea una barrera alrededor del C₃A evitando el falso fraguado.

La formación de etringita debe darse durante el estado fresco del concreto, de otra manera los cristales romperán los enlaces de silicato de calcio hidratado C-S-H (principal producto de la hidratación del concreto) debilitando al elemento.

Cuando la cantidad de yeso es superior a 3% la formación de etringita está garantizada, sin embargo, la cantidad formada podría generar fallas internas afectando su durabilidad, cuando esta es de entre el 1% y 3% se formarán etringita y monosulfoaluminato; en esta proporción los cristales de etringita son los



suficientes para rodear los productos de C_3A y regular la velocidad del fraguado. Si la cantidad de yeso es menor a 1% solamente se formará monosulfoaluminato por lo que se aseguran problemas como el falso fraguado.

Los alcaloides incrementan el pH del concreto (por arriba de 13.5) lo que puede fomentar un ambiente de protección para el acero de refuerzo, sin embargo, un alto nivel de alcalinidad puede fomentar problemas de durabilidad como la reacción álcali agregado.

En la tabla I.3 se muestran los óxidos contenidos en el CPO con el porcentaje típico de contenido en el concreto.

Compuesto	Abreviatura	Nombre Común	Contenido Típico (%)
SiO_2	S	Sílice	21.03
Al_2O_3	A	Alúmina	6.16
Fe_2O_3	F	Oxido férrico	2.58
CaO	C	Cal	67.67
MgO	M	Magnesia	2.62
K_2O	K	Álcalis	0.61
Na_2O	N	Álcalis	0.34
SO_3	S̄	Trióxido de azufre	2.03
CO_2	C̄	Dióxido de carbón	n/a
H_2O	H	Agua	n/a

De acuerdo con la proporción de los distintos compuestos que lo forman, existen distintos tipos de cemento Portland, cada uno con características únicas. En la tabla I.4 se puede ver las cantidades típicas de los compuestos principales en los distintos tipos de cemento, de acuerdo con los estándares de la American Society for Testing Materials (ASTM, por sus siglas en inglés).

Tipo I Cemento regular, uso general (CPO).

Tipo II Cemento con moderada resistencia a los sulfatos y calor de hidratación.

Tipo III Alto contenido de C_3S , resistencia a temprana edad.

Tipo IV Cemento con bajo calor de hidratación.

Tipo V Cemento altamente resistente a los sulfatos.

Compuesto	Tipo de cemento Portland				
	I	II	III	IV	V
C_3S	50	45	60	25	40
C_2S	25	30	15	50	40
C_3A	12	7	10	5	4
C_4AF	8	12	8	12	10
CSH_2	5	5	5	4	4
Otros	0	1	2	4	2



1.1.1.2.- Agua

De acuerdo con el American Concrete Institute (ACI, por sus siglas en inglés) prácticamente cualquier agua sin sabor u olor puede utilizarse como agua de mezclado en la elaboración de concreto, siempre que sea posible, debe evitarse el agua con altas concentraciones de sólidos disueltos o impurezas excesivas ya que pueden afectar el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto, la estabilidad volumétrica e incluso, propiciar la corrosión del acero de refuerzo o provocar eflorescencia y por ende, una reducción en la durabilidad.

Normalmente, en las mezclas de concreto se debe encontrar una mayor cantidad de agua a la requerida para que se lleve a cabo la reacción de hidratación, esto se debe a que se necesita dar a la mezcla determinada consistencia para colocar el concreto en el lugar deseado. Por ello, se puede decir que dentro de la mezcla hay tres tipos de agua: la primera, es la necesaria para que se lleven a cabo las reacciones con C, S, A, F y \bar{S} y difícilmente puede ser removida de la mezcla; la segunda, es el agua absorbida que se encuentra entre las capas de gel formado por C-S-H; la pérdida de esta, causa el agrietamiento. Y por último, el agua libre, la cual rodea el gel C-S-H que forma la mayor parte de los poros, por lo que influye de manera importante en la resistencia y permeabilidad del concreto.

1.1.1.3.- Aditivos

Un aditivo es cualquier material diferente a cemento, agregados pétreos, agua o fibras de refuerzo que es usado como un ingrediente más en la mezcla de concreto, estos pueden ser divididos en:

a) **Inclusores o incorporadores de aire:**

Como su nombre lo dice, son capaces de elevar el contenido de aire de la mezcla, lo cual es muy útil para la durabilidad del concreto ante ciclos de congelamiento y deshielo, además hace que la mezcla sea mucho más trabajable ya que el aire actúa como lubricante.

b) **Químicos:**

Son todos aquellos productos químicos añadidos a la mezcla de concreto con el fin de mejorar alguna de sus características ya sea en estado fresco o endurecido.

- I. **Reductores de agua:** estos aditivos reducen la demanda de agua manteniendo la consistencia de la mezcla; esta reducción, disminuye también la cantidad de cemento utilizado ya que la relación agua cemento (A/C) se mantiene constante. La reducción de agua, manteniendo la consistencia de la mezcla fomenta un aumento en la resistencia y durabilidad del concreto debido a la menor formación de poros.
 - i. **Normales (plastificantes):** reducen la demanda de agua entre 5% y 10%.
 - ii. **Alto Rango (Superplastificantes):** reducen la demanda de agua entre 15% y 40%
- II. **Reductores de agrietamiento:** a través de la reducción de la presión de poro durante el secado, estos aditivos logran minimizar la tensión a la que se expone el concreto y por lo mismo disminuyen la formación de grietas durante el secado de la mezcla.
- III. **Modificadores del tiempo de fraguado:** son utilizados para extender o acortar el tiempo de fraguado del concreto. Si estos son utilizados para disminuir el periodo plástico de la mezcla se conocen como acelerantes, en el caso contrario se conocen como retardantes.



- c) **Minerales:**
Son materiales muy finos con un alto contenido de sílice cuya función principal es tener un ahorro en el uso de cemento, incrementar la resistencia y durabilidad del concreto, así como descender el calor de hidratación.
- d) **Misceláneos**
Este grupo de aditivos tiene un campo de aplicación muy limitado o no se encuentra reglamentado, comprende una gran variedad de productos y algunos de ellos poseen efectos de utilidad discutible.

I.1.1.4.- Agregados pétreos

Los agregados pétreos constituyen aproximadamente tres cuartas partes del volumen de un concreto común, por lo cual no es extraño que estos influyan de manera fundamental en las características del concreto, tanto en estado fresco como endurecido.

I.1.1.4.1.- Clasificación de agregados

Existen distintas clasificaciones para los agregados, algunas de ellas son:

- a) De acuerdo a su tamaño
 - I. Agregado Grueso: aquellos cuyo tamaño máximo es de 150 mm hasta un mínimo de 5 mm, este material es aquel retenido por la malla número 4.
 - II. Agregados Finos: incluye aquel material que pasa por la malla número 4 y es retenido por la número 200.
- b) Tipo de fuente
 - I. Natural: tomado de depósitos naturales como arenas o gravas.
 - II. Sintético: aquellos materiales producto de la industria como espuma plástica o la escoria de alto horno.
- c) Según su peso
 - I. Ultraligeros: con un peso unitario de 500 kg/m³, logrando una densidad en la mezcla entre 800 y 1100 kg/m³, estos agregados son comúnmente utilizados para elementos no estructurales como muros divisorios.
 - II. Ligeros: con un peso unitario entre 500 y 1120 kg/m³, logrando una densidad en la mezcla entre 1200 y 1800 kg/m³.
 - III. Peso normal: con un peso unitario entre 1520 y 1680 kg/m³, logrando una densidad en la mezcla entre 2300 y 2400 kg/m³. La arena y grava pertenecen a esta categoría.
 - IV. Pesados: con un peso unitario mayor a 2100 kg/m³, logrando una densidad en la mezcla mayor a 3200 kg/m³. Este tipo de agregado tiene usos especiales como en plantas de energía nuclear, hospitales y laboratorios, típicamente consta de mineral de hierro o acero triturado.

I.1.1.4.2.- Propiedades de los agregados

- a) Contenido de humedad, ejemplificados en la figura I.1
 - I. Secado al horno: esta condición se logra manteniendo el agregado dentro de un horno a una temperatura de 110 °C el tiempo suficiente para que toda el agua se evapore y solamente quede el peso de los sólidos y el aire atrapado entre los poros.



- II. Secado al aire: este estado se obtiene dejando el agregado a temperatura y humedad ambiente por lo que los poros del agregado se encuentran parcialmente llenos de agua.
- III. Saturado y superficialmente seco (SSS): toda el agua se encuentra contenida dentro de los poros del agregado, esto se logra sumergiendo el agregado en agua durante 24 horas y después secando la superficie. Esta condición es óptima ya que el agregado no aporta ni quita agua de la mezcla de concreto.
- IV. Húmedo: en este estado la superficie se encuentra rodeada por una película de agua y los poros del agregado se encuentran llenos.

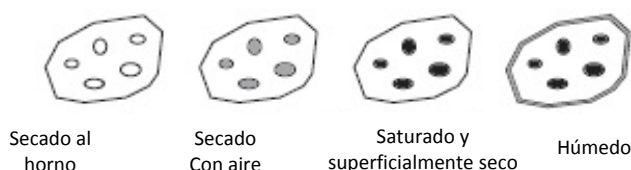


Figura I.1 Distintas condiciones de humedad en los agregados ⁽³⁰⁾

b) Densidad y Peso específico

La densidad de un cuerpo está definida como el peso que puede encontrarse en una unidad de volumen, pudiendo ser solamente la densidad de los sólidos (teniendo en cuenta solamente el peso y volumen de estos) o de todo el cuerpo (contemplando también el volumen de los poros que posee). El peso específico se refiere únicamente a una comparación entre la densidad de un material cualquiera y la densidad del agua.

c) Granulometría

Esta se refiere a la distribución del tamaño de las partículas que integran los agregados pétreos, con el fin de que todos los tamaños se encuentren representados por un intervalo dimensional de una composición uniforme para que las características y propiedades del concreto resulten dentro de un marco de variación predecible.

- I. Tamaño máximo del agregado (TMA): Se refiere al menor tamaño de tamiz por el que pasa la mayor parte del agregado grueso, y es retenido por la malla inmediatamente inferior. Normalmente este depende de las dimensiones y forma del miembro de concreto y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo.
- II. Módulo de finura: Esta característica del agregado fino indica el tamaño de las partículas, es decir, si se trata de una arena gruesa o una arena fina. El módulo de finura se obtiene mediante la suma de los porcentajes acumulados, retenidos por las mallas 8, 16, 30, 50 y 100 y ésta se divide entre 100; el rango va de 2.0, con una calidad de muy fina, hasta 3.5, como muy gruesa.

d) Geometría

La forma del agregado afecta la consistencia y resistencia del concreto, además de ser un factor importante debido a que de esta característica dependen la superficie de contacto con la pasta y la adherencia entre las partículas. Por ello se ha encontrado que los agregados esféricos, cúbicos e irregulares son los que brindan concretos con una mayor resistencia, caso contrario con los agregados planos, prismáticos o con forma de aguja. Algunos ejemplos se muestran en la figura I.2.

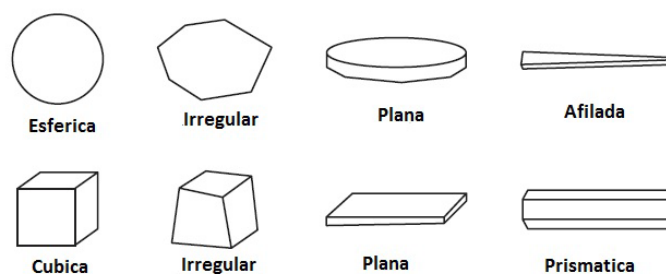


Figura I.2 Distintas formas básicas de los agregados ⁽³⁰⁾

e) Textura

Esta propiedad tiene una gran influencia en la fluidez del concreto en estado fresco y en la capa que se forma alrededor del agregado una vez endurecido el concreto; las principales texturas de los agregados son vítrea, suave, granular, áspera, cristalina y porosa.

I.1.2.- Propiedades deseables del concreto

En la figura I.3 se puede observar los distintos estados por los que pasa el concreto ordinario, estos inician desde que todos los componentes se han incorporado en la revolvedora y terminan al concluir la vida útil de la estructura o cuando todo el cemento de la mezcla ha sido hidratado.

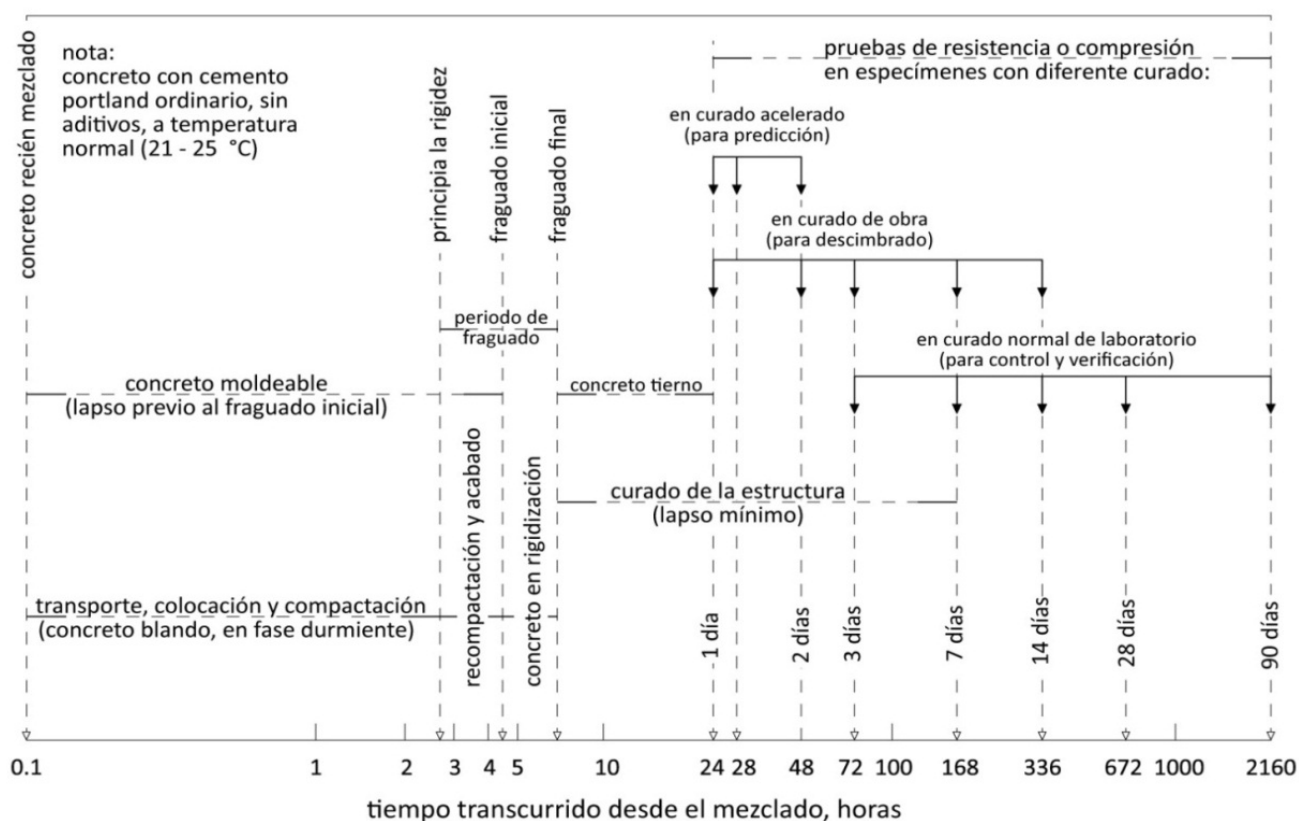


Figura I.3 Lapsos y actividades características en los diferentes estados de un concreto ordinario a temperatura normal. ⁽³²⁾



1.1.2.1.- En estado fresco

Como primera etapa se encuentra el estado fresco, este inicia en la revolvedora donde todos los elementos necesarios para la elaboración del concreto deseado son incorporados en una mezcla homogénea; esta primera etapa concluye con el fin del fraguado, se manifiesta con la resistencia a la penetración del concreto igual a 280 kg/cm^2 . En el lapso intermedio a estos dos puntos es importante que se lleven a cabo todas las acciones necesarias para el manejo del concreto.

La combinación del cemento con el agua, produce una mezcla cuyas propiedades dependen básicamente de la proporción entre ambos; si en esta combinación, predomina el agua, el resultado será una mezcla que tiende a comportarse como un líquido. En otro extremo, si en dicha combinación predomina el cemento, la mezcla tendrá un comportamiento de cuerpo plástico, un cuerpo susceptible a deformarse y fluir sin perder continuidad.

El estado plástico de una pasta de cemento se encuentra con una relación agua/cemento que fluctúa entre los valores de 0.4 y 0.8. Esto, sin la utilización de algún aditivo, ya que al utilizar un superplastificante de última generación, se puede lograr relaciones A/C mínimas (0.25) únicamente con la cantidad necesaria de agua para que se lleve a cabo la hidratación del cemento.

De lo anterior, se puede inferir que la propiedad más importante del concreto en estado fresco es la consistencia. Un concreto con una consistencia blanda, es decir, con exceso de pasta de cemento en la cual los agregados pétreos disponen de una gran movilidad, es altamente susceptible al denominado sangrado o exudación y a la segregación. Por el contrario, un concreto con deficiencia de pasta de cemento en el que las partículas presentan contacto permanente y transitorio entre sí, prácticamente no permite movilidad y por ello la mezcla de concreto resulta dura, por ello requiere de un gran esfuerzo para lograr su deformación y compactación.

Para lograr una buena consistencia en el concreto es necesario que la mezcla posea:

I.- Estabilidad: representa la capacidad de las mezclas para conservarse homogéneas, es decir, la resistencia que opone a la segregación y exudación del agua.

II.- Compactibilidad: corresponde a la facilidad con que las mezclas de concreto permiten la remoción de aire atrapado durante el moldeo, con el fin de lograr un alto nivel de compacidad.

III.- Movilidad: depende de la cohesión, viscosidad y ángulo de fricción interna en el concreto en estado fresco y representa la aptitud de las mezclas para deformarse y fluir.

Toda mezcla de concreto comienza a experimentar un cambio gradual de consistencia a los pocos minutos de salir de la mezcladora, como consecuencia de las reacciones iniciales entre el agua y el cemento, cuya primera manifestación, al cabo de aproximadamente diez minutos en condiciones ordinarias de temperatura, es la incipiente película gelatinosa que se forma alrededor de los granos de cemento que de este modo origina contacto entre ellos y los inmoviliza, pero sin que se produzca una verdadera aglutinación que le comunique resistencia mecánica a la pasta rigidizada.

Poco antes de que la velocidad de liberación de calor descienda a un valor cercano a 1 cal/g/h comienzan a desarrollarse filamentos tubulares en la costra gelatinosa que recubre los granos de cemento y conforme avanza la hidratación, estos filamentos crecen y se entrelazan para formar una especie de tejido que



aglutina firmemente los granos en proceso de hidratación y comienza a dar resistencia mecánica a la pasta solidificada. Esta trama filamentosa es conocida como gel de cemento, constituido principalmente por silicatos de calcio hidratados (S-C-H), responsable de las propiedades mecánicas de la pasta endurecida de cemento.

El seguimiento de la evolución del proceso de endurecimiento de la pasta de cemento en el curso de hidratación o del concreto del cual forma parte, se representa en la figura I.4. Este seguimiento de la rigidización del concreto es únicamente aplicable durante la formación de los filamentos tubulares, ya que en los momentos anteriores, no existe resistencia mecánica en el concreto. La formación de los filamentos marcada por el fraguado inicial del concreto, con una resistencia a la penetración de 35 kg/cm^2 , indica el momento último para el moldeado del concreto sin perjudicar sus propiedades.

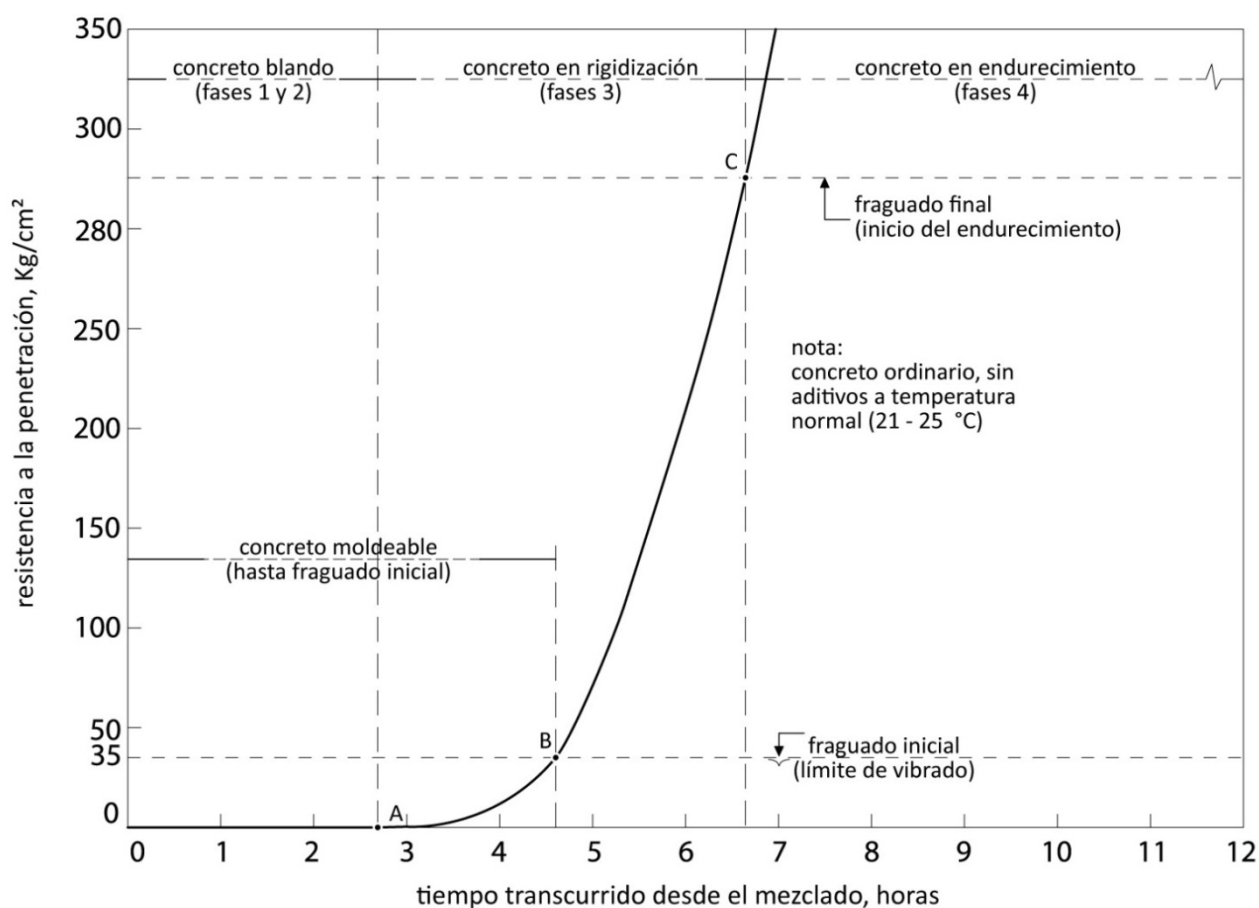


Figura I.4 Forma característica del proceso de fraguado del concreto, seguido mediante su resistencia a la penetración⁽³²⁾

1.1.2.2.- En estado endurecido

Una vez terminado el proceso de fraguado el concreto comienza a adquirir propiedades mecánicas, la principal de ellas es la resistencia a la compresión debido a la influencia que tiene en la capacidad de carga de las estructuras. Es la propiedad que se determina más fácilmente en el concreto endurecido y los resultados de estas pruebas pueden ser utilizados como datos índice de otras propiedades del concreto.

La resistencia mecánica del concreto se acostumbra medir de manera convencional en especímenes estándar de concreto simple, que se someten a condiciones de carga reglamentada. La resistencia se



identifica con el esfuerzo máximo generado en el concreto por la carga que produce la falla del espécimen. La resistencia mecánica del concreto es influida por la resistencia de los agregados, la pasta de cemento y la adherencia entre ambos componentes; a fin de cuentas la resistencia más débil de las tres es la que dicta cual será la del conjunto, comúnmente la resistencia de los agregados es la más alta.

La formación de la falla en especímenes de prueba a compresión, comienza comúnmente por el crecimiento progresivo de microfisuras y otras discontinuidades que existen en el concreto desde antes de ser sometido a carga, en tanto que los esfuerzos aplicados no sobrepasen del 30 a 40 por ciento del esfuerzo máximo. Al incrementarse los esfuerzos aplicados más allá de este nivel las grietas interfaciales comienzan a crecer y prolongarse a través de la pasta para unirse con grietas vecinas del mismo tipo, con lo que adquieren continuidad. Al aumentar el esfuerzo entre un 70 y 80 por ciento las grietas que tienen una tendencia paralela constituyen un daño irreversible a la integridad estructural.

I.2.- Puzolanas

Una puzolana es un material sílico o sílico-aluminoso que cuando está en forma de polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente a la hidratación del cemento Portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes.

I.2.1.- Ceniza volante

La ceniza volante (figura I.5) es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas de electricidad; durante la combustión, las impurezas minerales del carbón tales como: arcilla, feldespato, cuarzo y esquistos se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso el material fundido se enfría y solidifica como pequeñas esferas vítreas.

Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1 μm hasta más de 100 μm , siendo la partícula promedio de 20 μm y sólo del 10% al 30% es mayor a 45 μm . El área superficial es normalmente de 300 a 500 m^2/kg . Las cenizas volantes que no estén fuertemente compactadas presentan una masa unitaria (incluyendo el aire entre las partículas) que puede variar de 540 a 860 kg/m^3 mientras que las cenizas compactadas o vibradas presentan una masa unitaria que varía de 1120 a 1500 kg/m^3 .

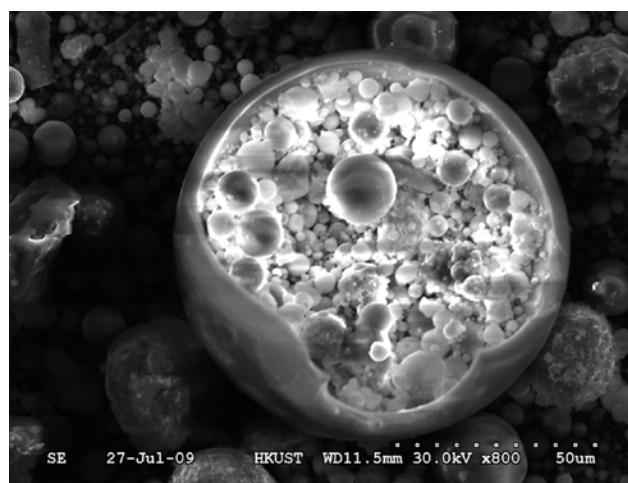


Figura I.5 Muestra de ceniza volante ⁽³⁰⁾



La dosificación de la ceniza volante varía con la reactividad de esta y con los efectos deseados en el concreto. En la tabla I.5 se puede observar la composición típica de acuerdo con la clasificación del ASTM.

Compuesto	Clase F	Clase C
SiO ₂	49.1	53.79
Al ₂ O ₃	16.25	15.42
Fe ₂ O ₃	22.31	5
TiO ₂	1.09	1.68
CaO	4.48	18
MgO	1	3.4
K ₂ O	1.42	0.05
Na ₂ O	0.05	0.05
C	n/a	n/a
SO ₃	0.73	1.44
Cl	n/a	n/a
S	n/a	n/a
P	n/a	n/a
LOI	1.18	0.8
Humedad	n/a	n/a

*LOI = perdida por ignición (Loss on ignition)

I.2.2.- Escoria

La escoria granulada de alto horno (figura I.6) es un cemento hidráulico no metálico, que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio, el cual se produce de la escoria de la siderúrgica de alto horno. Este es fundido simultáneamente con el acero a una temperatura cercana a los 1500 °C, se enfría rápidamente y se apaga en agua, para formar un material granulado vítreo, es molido hasta menos de 45 µm, tiene un área superficial Blaine de 400 a 600 m²/kg y la masa unitaria varia de 1050 a 1375 kg/m³.

La escoria granulada es áspera y tiene partículas de forma angular, en presencia de agua y un activador (NaOH o CaOH) suministrado por el cemento Portland, se hidrata y endurece de una manera similar al cemento mismo. La escoria granulada normalmente constituye de 30% a 45% de la masa del material cementante en la mezcla.

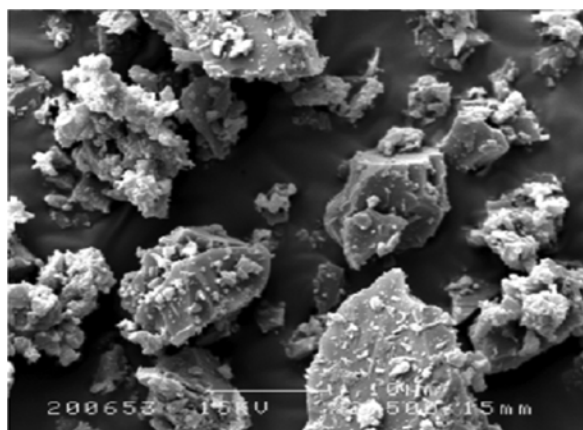


Figura I.6 Muestra de escoria granulada de alto horno ⁽³⁰⁾



Compuesto	Contenido Mínimo	Contenido Máximo
SiO ₂	30	30
Al ₂ O ₃	10	15
Fe ₂ O ₃	1	2
TiO ₂	n/a	n/a
CaO	30	45
MgO	< 6	< 6
K ₂ O	0.4	1.5
Na ₂ O	0.05	0.5
C	n/a	n/a
SO ₃	< 6	< 6
Cl	n/a	n/a
S	n/a	n/a
P	n/a	n/a
LOI	0.2	1
Humedad	n/a	n/a

*LOI = pérdida por ignición (Loss on ignition)

I.2.3.- Puzolanas naturales

Puzolana es un término que proviene de una ceniza volcánica extraída en Puzzuoli, Italia, resultado de la erupción del Monte Vesubio (79 DC). Actualmente estas puzolanas son el resultado de materiales tratados a altas temperaturas en hornos y después triturados hasta transformarlos en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita.

Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutos parciales del cemento normalmente entre 15% y 35%, aumentan la resistencia al ataque de los sulfatos, controlan la reactividad álcali-agregado y reducen la permeabilidad, tienen un área superficial Blaine de 650 a 1350 m²/Kg. El esquisto calcinado puede contener de 5% a 10% de calcio, resultando un material con alguna propiedad cementante o hidráulica.

La metacaolinita (figura I.7) se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolín de alta pureza, el producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a 2 μm. Esta se podría utilizar donde se necesite una baja permeabilidad y muy alta resistencia. Comúnmente se utiliza como un adicionante y no tanto como sustituto del cemento en una proporción de 10% de la masa del cemento.

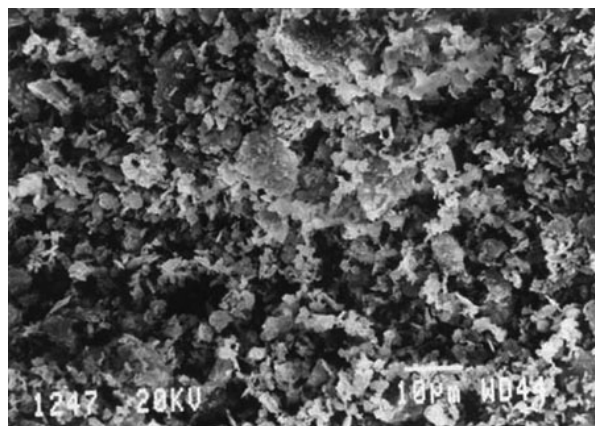


Figura I.7 Muestra de metacaolinita ⁽³⁰⁾



Compuesto	Contenido típico
SiO ₂	51.34
Al ₂ O ₃	41.95
Fe ₂ O ₃	0.52
TiO ₂	n/a
CaO	0.34
MgO	n/a
K ₂ O	n/a
Na ₂ O	n/a
C	n/a
SO ₃	n/a
Cl	n/a
S	n/a
P	n/a
LOI	0.72
Humedad	n/a

*LOI = pérdida por ignición (Loss on ignition)

I.2.4.- Humo de sílice

El humo de sílice o microsílíce (figura I.8) es un subproducto resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio, este sube como vapor oxidado de los hornos a 2000 °C. Cuando se enfría, el humo se condensa y es procesado para remover las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas.

El humo de sílice es básicamente dióxido de silicio en una forma no cristalina y una geometría esférica debido a que es transportada por el aire. Este material es extremadamente fino con partículas de menos de 1 µm con un tamaño promedio de 0.1 µm de diámetro, tiene un área superficial de aproximadamente 20000 m²/kg y su masa unitaria varía de 130 a 430 kg/m³.

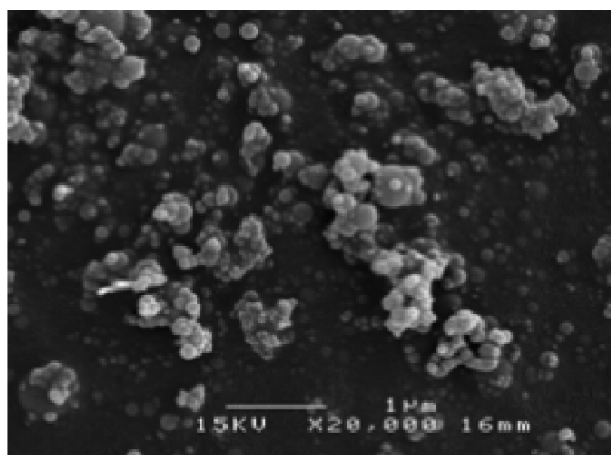


Figura I.8 Muestra de microsílíce⁽³⁰⁾

El microsílíce se utiliza en cantidades que varían de 5% a 10% de la masa total del material cementante. Debido a su alto contenido de sílice, como se muestra en la tabla I.8, se emplea en concretos donde es necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia mecánica.



Compuesto	Contenido típico	Contenido Mínimo	Contenido Máximo
SiO ₂	92.9	92	94
Al ₂ O ₃	0.69	0.52	0.86
Fe ₂ O ₃	1.25	0.74	2.39
TiO ₂	n/a	n/a	n/a
CaO	0.4	0.28	0.74
MgO	1.73	1.23	2.24
K ₂ O	1.19	1	1.53
Na ₂ O	0.43	0.37	0.49
C	0.88	0.01	0.03
SO ₃	n/a	n/a	n/a
Cl	0.02	0.01	0.03
S	0.2	0.1	0.3
P	0.07	0.03	0.12
LOI	1.18	0.79	0.73
Humedad	0.3	0.09	0.5

*LOI = pérdida por ignición (Loss on ignition)

I.3.- Aportaciones de humo de sílice al concreto

I.3.1.- Concreto en estado fresco.

El pequeño tamaño de la partícula de humo de sílice implica que tiene gran área superficial, lo que tiene un gran efecto en el concreto fresco. En una mezcla típica con el 8% de humo de sílice como material cementante suplementario, alrededor de 50 000 a 100 000 microesferas son añadidas por cada partícula de cemento aumentando la superficie interna con un factor de 5 a 6.

Este incremento en el área superficial aumenta también las fuerzas internas y, como consecuencia, la cohesión del concreto, por ello, el concreto se vuelve menos susceptible a la segregación. Otro efecto de esta cohesión, es la disminución o anulación del agua de sangrado. Sin embargo esto puede causar fisuras por contracción plástica, debido a la ausencia de la fina película de agua que protege al concreto.

I.3.1.1.- Demanda de agua.

Los materiales añadidos en las cantidades normales hacen variar la demanda de agua en comparación a un concreto que solo contenga cemento Portland. Cuanto mayor sea la cantidad de humo de sílice, mayor será la demanda de agua en el concreto, a menos que se use un reductor de agua o un plastificante.

I.3.1.2.- Consistencia

El humo de sílice puede contribuir para la cohesión de la mezcla por lo que puede ser necesaria la adición de reductores de agua de alto rango para mejorar el estado plástico de la mezcla de concreto en estado fresco.

I.3.1.3.- Sangrado y segregación.

El menor sangrado y segregación es un efecto especialmente valioso en mezclas producidas con agregados deficientes en finos. La reducción del agua exudada se debe principalmente a la disminución en la demanda de agua. El humo de sílice es muy efectivo en la reducción de ambos y como resultado se pueden utilizar concretos con revenimiento mayor.



1.3.1.4.- Contenido de aire.

La cantidad de aditivo inclusor de aire en el concreto es función de la finura y contenidos de carbono, álcalis y material orgánico, la pérdida por ignición y presencia de impurezas. El humo de sílice tiene una influencia notable sobre los requisitos de aditivos inclusores de aire, aumentándolos rápidamente al incrementar la cantidad de humo de sílice.

1.3.1.5.- Calor de hidratación.

El humo de sílice puede o no reducir el calor de hidratación del cemento Portland, esto dependerá de la calidad del microsílíce que se utilice.

1.3.1.6.- Tiempo de fraguado.

El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento Portland, la demanda de agua, el tipo, la reactividad, la dosis de puzolana y la temperatura del concreto. El retardo del tiempo puede ser favorable en climas calurosos, ganando tiempo para la colocación y acabado del concreto, sin embargo en climas fríos, puede ocurrir un retardo importante con ciertos materiales, dificultando las operaciones de acabado. Se pueden utilizar aditivos aceleradores para disminuir el tiempo de fraguado.

1.3.1.7.- Acabado

Las mezclas que contienen grandes cantidades de estos materiales, especialmente humo de sílice, pueden ser pegajosas y de una consistencia dura, lo cual dificulta su trabajabilidad lo que puede hacer que sea difícil lograr el acabado deseado.

1.3.1.8.- Bombeado

El uso de materiales cementantes suplementarios generalmente ayuda al bombeado del concreto. El humo de sílice es el material más eficiente, especialmente en mezclas pobres; debido al aumento en la cohesión facilita el bombeado evitando la segregación y la exudación.

1.3.1.9.- Fisura por contracción plástica

Debido a su bajo sangrado el concreto con humo de sílice puede presentar un aumento en la formación de fisuras por contracción plástica. Se puede evitar este problema garantizando que el concreto este protegido de la desecación, tanto durante como después del acabado.

1.3.2.- Concreto endurecido

Una vez que el concreto se endurece, la acción del humo de sílice comienza. Este reacciona con el hidróxido de calcio y produce una gran cantidad de silicato de calcio hidratado.

El concreto con humo de sílice es muy homogéneo, denso y tiene una gran mejoría en resistencia e impermeabilidad. Se ha encontrado que la interfaz de poros existente en el concreto con solo cemento Portland (hidróxido de calcio) que rodea a las partículas de agregado, es virtualmente ausente en el concreto con microsílíce, lo que significa que la capa entre el agregado y la mezcla es de mayor calidad en el concreto con humo de sílice.

1.3.2.1.- Resistencia

Estos materiales contribuyen al aumento de resistencia del concreto, especialmente el humo de sílice que iguala o supera la resistencia de una mezcla de sólo cemento Portland a un día, principalmente entre el tercer y vigésimo octavo día.



Se puede mejorar el desarrollo de la resistencia del concreto: aumentando la cantidad de material cementante, adicionando materiales cementantes de alta resistencia inicial, disminuyendo la relación agua-cemento, aumentando la temperatura de curado o empleando un aditivo acelerador.

1.3.2.2.- Permeabilidad.

Un efecto importante del humo de sílice en el concreto es la reducción en la permeabilidad; este parámetro describe la velocidad a la cual sustancias nocivas penetran en él, además describe la facilidad con que estas sustancias pueden filtrarse. El humo de sílice logra la disminución del área de los intersticios del concreto.

1.3.2.3.- Resistencia al impacto y a la abrasión

Los materiales cementantes suplementarios normalmente no afectan estas propiedades. Generalmente son características que dependen del agregado pétreo utilizado. Sin embargo el concreto con microsílíce muestra un gran incremento en la resistencia a la abrasión o erosión, fundamental en superficies de rodamiento

1.3.2.4.- Contracción por secado y fluencia

En pequeñas cantidades, el efecto de los materiales sobre la contracción por secado y la fluencia del concreto, es generalmente pequeño y poco significativo, sin embargo existen estudios que indican que el humo de sílice puede reducir la fluencia.

1.3.2.5.- Reactividad Álcali-Agregado

Para que esta reacción se lleve a cabo es necesario que el concreto presente: un alto contenido alcalino en la mezcla (normalmente suministrado por el cemento), agregados reactivos que contengan sílice y agua.

La reactividad álcali-agregado se puede reducir sustancialmente mediante el uso de materiales cementantes suplementarios, proveen hidratos de silicato de calcio adicionales para fijar los álcalis en el concreto. Sin embargo, no reducen la reacción álcali-carbonato, es un tipo de reacción que envuelve los álcalis del cemento y ciertos calcáreos dolomíticos.

1.3.2.6.- Resistencia a los sulfatos

Se ha demostrado que el concreto con 15% de microsílíce y una relación agua-cemento de 0.6, iguala la resistencia de un concreto fabricado con cemento resistente a los sulfatos y una relación agua-cemento de 0.45. Principalmente se debe a: los finos poros que reducen el paso de los iones destructivos y el bajo contenido de hidróxido de calcio disminuye la formación de sulfato de calcio y como consecuencia el desarrollo de etringita.

1.3.2.7.- Corrosión del acero de refuerzo.

El humo de sílice disminuye grandemente la permeabilidad, la entrada de iones cloruro y aumenta también la resistividad eléctrica, provocando una disminución en la reacción electroquímica de corrosión.

1.3.2.8.- Carbonatación.

La carbonatación es el proceso por el cual el dióxido de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos formando carbonatos, este proceso baja la alcalinidad del concreto. La alta alcalinidad es necesaria para proteger el refuerzo de la corrosión. La cantidad de carbonatación es ampliamente aumentada en concretos con relación agua-cemento alta, bajo contenido de cemento, periodo de curado corto, baja resistencia y pasta altamente permeable o porosa.



1.3.2.9.- Resistencia química

Los materiales cementantes suplementarios reducen el ataque químico gracias a la reducción de la permeabilidad del concreto, a pesar de ello, no vuelven al concreto inmune, por lo que si el concreto estará expuesto a condiciones químicas severas se deberá proteger con sistemas de barrera.

1.3.2.10.- Sanidad

Dosificaciones normales de estos materiales no afectan la sanidad del concreto.

1.3.2.11.- Color del Concreto

Los materiales cementantes suplementarios pueden alterar ligeramente el color del concreto endurecido.

1.3.2.12.- Ciclo de vida.

El concreto provee protección al ataque por un lapso de tiempo (periodo inicial), después el ataque progresa durante el periodo de propagación hasta que este es lo suficientemente severo como para afectar el nivel de servicio de la estructura; por ello, el criterio tradicional incluye solamente el periodo inicial para considerar el tiempo de vida de un concreto, sin embargo, al adicionar humo de sílice con una alta resistencia eléctrica puede incluirse también el periodo de propagación dentro del ciclo de vida del concreto. Especialmente cuando se consideran estructuras con fisuras.



1.- Diseño de la mezcla de concreto

Se elaboraron 255 litros de mezcla divididos en tres tandas de 85 litros cada una con las siguientes proporciones de materiales, como se ve en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Dosificación de materiales componentes de las mezclas de concreto							
Mezcla	Consumo por m ³						
	Cemento	Sílica Fume	Grava Basáltica	Arena Andesítica	Agua	Plastol Precast	Relación A/C
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	l/m ³	ml/m ³	
M1-C411-SF0-GB20	411.0	0.00	943	693	185	3288	0.45
M2-C390-SF21-GB20	390.0	21.00	943	687	185	3288	0.45
M3-C370-SF42-GB20	370.0	41.00	943	681	185	3699	0.45
M4-C462.5-SF0-GB20	462.5	0.00	919	675	185	3700	0.40
M5-C439.4-SF23.1-GB20	439.4	23.10	919	669	185	4163	0.40
M6-C416.2-SF46.3-GB20	416.2	46.30	919	662	185	4625	0.40

1.1.- Características

En la búsqueda por la idoneidad del concreto, es necesario evaluar sus componentes, de modo que estos posean las características óptimas para la obtención del concreto deseado, así como la capacidad para integrar el concreto sin producir ninguna reacción perjudicial.

1.1.1.- Características físicas de los agregados

De acuerdo con la práctica *ASTM D 75 Practice for Sampling Aggregates*, mediante el método B "cuarteo" se homogeneizaron y redujeron las muestras de agregado fino y grueso obteniendo la cantidad necesaria para elaborar las siguientes pruebas, según las normas ASTM:

- a) Agregado Grueso: Se utilizó agregado grueso basáltico con un tamaño máximo (TMA) de 19mm (3/4") proveniente del Banco Trituradora la Loma en el estado de Querétaro.

Tabla 1.2 Características del Agregado Grueso	
Propiedades del Agregado Grueso	Basalto
Tamaño máximo, mm (pulg)	19 (3/4)
Peso específico, seco	2.75
Peso específico, SSS	2.81
Absorción, %	1.67
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m ³	1 544
Peso volumétrico seco (compacto), kg/m ³	1 712
Vacíos (suelto), %	44
Vacíos (compactado), %	39

- Granulometría

Se obtuvo después de haber pasado 2 kg de muestra por las mallas 1.5''(37.5 mm), 1''(25 mm), ¾''(19 mm), ½''(12.5 mm), 3/8''(9.5 mm) y la malla número 4 obteniendo la siguiente distribución de los tamaños contenidos en las muestras.

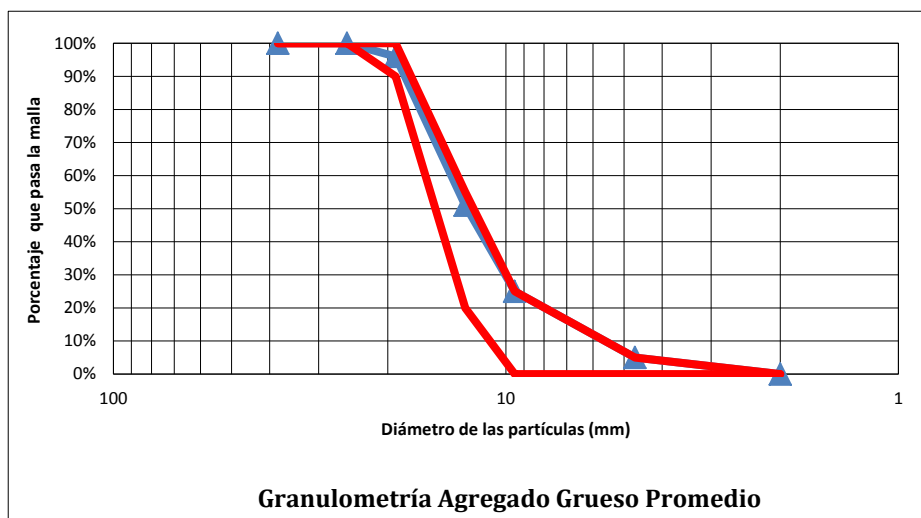


Tabla 1.2.1 Granulometría M1 Agregado Grueso					
Nomenclatura	Tamaño (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Acumulado	% pasa
1 1/2	37.5	0	0.0	0.00	100.00
1	25	0	0.0	0.00	100.00
3/4	19	102.1	5.1	5.10	94.90
1/2	12.5	825.3	41.3	46.36	53.64
3/8	9.5	504	25.2	71.56	28.44
No. 4	4.75	433.9	21.7	93.25	6.75
Charola	0	135	6.7	100.00	0.00
Peso de la muestra	2000.1	2000.3	100.0		
Perdida o Ganancia de material					0.010%

Tabla 1.2.2 Granulometría M2 Agregado Grueso					
Nomenclatura	Tamaño (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Acumulado	% pasa
1 1/2	37.5	0	0.0	0.00	100.00
1	25	0	0.0	0.00	100.00
3/4	19	38.6	1.9	1.93	98.07
1/2	12.5	898.5	44.9	46.84	53.16
3/8	9.5	541.9	27.1	73.92	26.08
No. 4	4.75	418.5	20.9	94.84	5.16
Charola	0	103.2	5.2	100.00	0.00
Peso de la muestra	2000.6	2000.7	100.0		
Perdida o Ganancia de material					0.005%



Tabla 1.2.3 Granulometría M3 Agregado Grueso					
Nomenclatura	Tamaño (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Acumulado	% pasa
1 1/2	37.5	0	0.0	0.00	100.00
1	25	0	0.0	0.00	100.00
3/4	19	84.5	4.2	4.22	95.78
1/2	12.5	1022.1	51.0	55.26	44.74
3/8	9.5	501.8	25.1	80.32	19.68
No. 4	4.75	309.4	15.4	95.77	4.23
Charola	0	84.8	4.2	100.00	0.00
Peso de la muestra	2002.8	2002.6	100.0		
Perdida o Ganancia de material					0.010%

Utilizando como referencia el tamaño número 67 marcado en la *tabla 2 Grading Requirements for Coarse Aggregates* de la norma ASTM C 33 obtenemos un agregado grueso con una granulometría que cumple el estándar.

- **Peso específico**

Siguiendo la norma ASTM C 127 se secó la muestra de agregado grueso en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, después de esto, una vez que se encontró a una temperatura manejable, se sumergió en agua con el fin de saturar todos los poros de las partículas del agregado. Después, utilizando una franela, se secó la superficie de las partículas, lo cual se percibía a simple vista cuando estas adquirirían un color oscuro y sin brillo; como siguiente paso, se pesaron 1500 g de material SSS para después sumergirlo en agua y determinar la masa aparente sumergida. Por último, la muestra regresó al horno para ser secada y obtener ahora la masa de la muestra secada al horno.

a) Secado al horno:

$$OD = A / (B - C)$$

Dónde:

OD = Peso específico secado al horno

A = Masa de la muestra secada al horno

B = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca

C = Masa aparente de la muestra saturada en agua

b) Saturado y superficialmente seco (SSS)

$$SSS = B / (B - C)$$

Dónde:

SSS = Peso específico saturado y superficialmente seco

- **Absorción**

De acuerdo con la norma ASTM C 127

$$\% \text{ Absorción} = [(B - A) / A] * 100$$

Dónde:

A = Masa de la muestra secada al horno

B = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca



- **Peso Volumétrico del material secado al horno**
De acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM C 29 se logró determinar las características correspondientes a un agregado de peso normal.

De acuerdo con la norma ASTM C29, el peso volumétrico se obtiene de la siguiente manera:

$$M = (G - T) / V$$

Dónde:

M = Peso Volumétrico

G = Masa del agregado más la masa del recipiente utilizado

T = Masa del recipiente utilizado

V = Volumen del recipiente utilizado; en este caso es de 7.08 l

- a) **Suelto:** Después de obtener el volumen exacto del recipiente utilizado, se procedió a llenar dicho recipiente evitando que la altura de caída del agregado fuera mayor a 5 cm, con el fin de evitar su compactación. Una vez lleno el recipiente, se procedió a eliminar aquel agregado que sobrepasara el nivel máximo del recipiente, tratando que la superficie quedara lo más pareja posible y así obtener la masa del material suelto dentro de un volumen conocido.
- b) **Compactado:** El peso volumétrico del material compactado se obtuvo con una simple diferencia al del material suelto. En la que el volumen total de la muestra debe contener la menor cantidad de aire posible entre las partículas; para ello el recipiente debe ser llenado y al alcanzar cada tercio de la capacidad del recipiente, el cual deberá ser compactado mediante el uso de una varilla de apisonamiento, distribuyendo en toda la superficie 25 penetraciones, evitando que la varilla golpee el fondo, en el caso del primer tercio, o que penetre la capa ya compactada en los siguientes tercios.
- c) **Saturado y superficialmente seco:** para obtener esta característica la norma indica el uso de la siguiente ecuación:

$$M_{SSS} = M [1 + (A/100)]$$

Dónde:

M_{SSS} = Peso volumétrico en condición SSS

M = Peso volumétrico

A = Porcentaje de absorción

- **Contenido de vacíos:** de acuerdo con la norma ASTM C 29 lo obtenemos de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Vacíos} = 100 [(S * W) - M] / (S * W)$$

Dónde:

M = Peso volumétrico

S = Peso específico seco

W = Densidad del agua; 997.5 kg/m³

- b) **Agregado Fino:** el agregado fino utilizado es de origen andesítico proveniente de la mina Santiago, en Huixquilucan, Estado de México.



Tabla 1.3 Características del Agregado Fino	
Propiedades del Agregado Fino	Arena
Módulo de Finura	3.03
Peso específico, seco	2.19
Peso específico, SSS	2.34
Absorción, %	6.79
Pasa malla No. 200, %	18.58
Peso volumétrico seco (suelto), kg/m ³	1 502
Peso volumétrico seco (compacto), kg/m ³	1 646
Vacios (suelto), %	31
Vacios (compactado), %	29

- Granulometría y módulo de finura

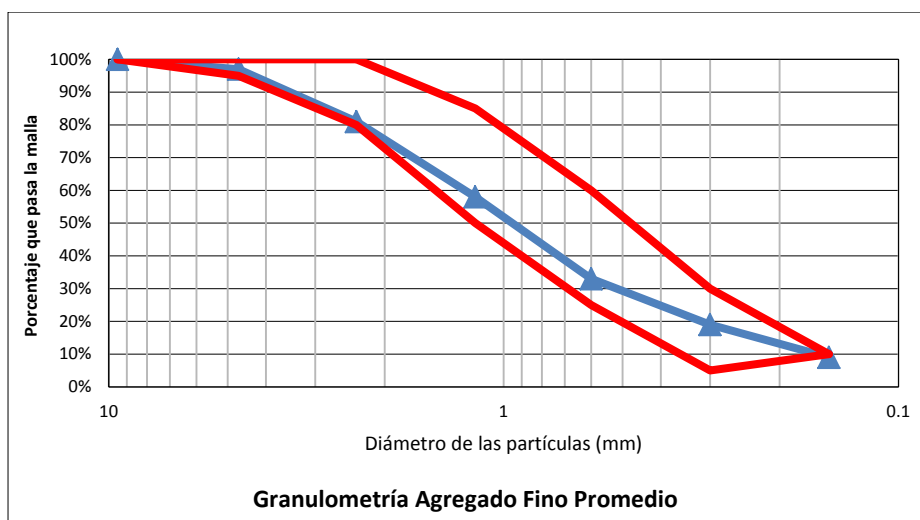


Tabla 1.3.1 Granulometría M1 Agregado Fino					
Nomenclatura	Tamaño (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Acumulado	% pasa
3/8	9.5	0	0.0	0.00	100.00
No. 4	4.75	55.5	2.8	2.77	97.23
No. 8	2.36	319.1	15.9	18.72	81.28
No. 16	1.18	451.5	22.6	41.28	58.72
No. 30	600x10 ⁻³	495.7	24.8	66.05	33.95
No. 50	300x10 ⁻³	292.7	14.6	80.68	19.32
No. 100	150x10 ⁻³	206.1	10.3	90.98	9.02
Charola	0	180.6	9.0	100.00	0.00
Peso de la muestra	2001.2				
Módulo de finura				3.00	



Tabla 1.3.2 Granulometría M2 Agregado Fino					
Nomenclatura	Tamaño (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Acumulado	% pasa
3/8	9.5	0	0.0	0.00	100.00
No. 4	4.75	48.7	2.4	2.43	97.57
No. 8	2.36	341.8	17.0	19.45	80.55
No. 16	1.18	486.2	24.2	43.68	56.32
No. 30	600x10 ⁻³	507.6	25.3	68.96	31.04
No. 50	300x10 ⁻³	275.6	13.7	82.69	17.31
No. 100	150x10 ⁻³	187.4	9.3	92.03	7.97
Charola	0	160	8.0	100.00	0.00
Peso de la muestra	2007.3				
Módulo de finura				3.09	

Tabla 1.3.3 Granulometría M3 Agregado Fino					
Nomenclatura	Tamaño (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Acumulado	% pasa
3/8	9.5	0	0.0	0.00	100.00
No. 4	4.75	49.7	2.5	2.45	97.55
No. 8	2.36	316	15.6	18.03	81.97
No. 16	1.18	477.9	23.6	41.59	58.41
No. 30	600x10 ⁻³	519.8	25.6	67.22	32.78
No. 50	300x10 ⁻³	291.2	14.4	81.57	18.43
No. 100	150x10 ⁻³	201	9.9	91.48	8.52
Charola	0	172.8	8.5	100.00	0.00
Peso de la muestra	2028.4				
Módulo de finura				3.02	

De los estudios de granulometría se puede observar que la arena andesítica posee más finos de los deseables (5% máximo).

El módulo de finura promedio para esta arena andesítica es de 3.03 lo que nos indica que el tamaño de las partículas del agregado fino es de un tamaño relativamente grande.

Ejemplo del Cálculo del Módulo de Finura (MF).

$$MF = \sum \text{Acumulado de los porcentajes retenidos}$$

Del M3 Agregado fino tenemos

$$MF = (0.00 + 2.45 + 18.02 + 41.58 + 67.21 + 81.57 + 91.48)/100 = 3.02$$

$$MF = 3.02$$

- Perdida por lavado

De acuerdo con la norma ASTM C 117 se determinó que el porcentaje promedio del peso de partículas menores a 75 µm en el agregado fino corresponde a 19.58%, lo que nos indica un elevado contenido de finos.



Tabla 1.3.4 Cálculo del porcentaje de partículas menores a 75 μm (No.200)				
		M1	M2	M3
Peso del material seco	g	1 034.3	1 036.3	1 000
Peso charola	g	1 266	1 188.4	1 269.9
Peso material lavado + charola	g	2 062.9	2 034.8	2 095.2
Peso material lavado seco	g	796.9	846.4	825.3
Peso material perdido por lavado	g	237.4	189.9	174.7
Porcentaje de partículas menores a 75 μm	%	22.95	18.32	17.47

- **Peso específico**

De acuerdo con la norma ASTM C 128 y siguiendo el método gravimétrico, en el cual se indica que el agregado fino debe ser secado al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, y una vez que este alcanza una temperatura manejable, entonces deberá sumergirse en agua permitiendo que todos los poros del agregado se saturen.

Continuando con el procedimiento, el agregado una vez saturado deberá colocarse sobre una superficie plana y no absorbente en la cual se permitirá el secado y paso de aire caliente entre las partículas, con el fin de que este proceso sea uniforme. El agregado deberá estar en constante movimiento lo cual permitirá que se alcance un secado superficial uniforme.

Para determinar el punto en que las partículas del agregado se encuentren saturadas y superficialmente secas, se debe utilizar un molde cónico de 75 mm de altura y diámetros de 40 y 90 mm en el cual se introduce agregado fino hasta que quede al ras mediante veinticinco compresiones con un pisón de 340 g. Si la humedad superficial está todavía presente, el agregado fino conservará la forma del molde. Un leve hundimiento del agregado fino moldeado indica que se ha alcanzado una condición de superficie seca.

El procedimiento anterior sirve únicamente para preparar el agregado fino dejándolo en estado saturado y superficialmente seco, posteriormente se introducen 500 g de material en el picnómetro y se añade agua adicional a aproximadamente el 90% de la capacidad. Sin embargo este proceso genera burbujas de aire por lo que es necesario agitar el picnómetro para eliminarlas.

Después de eliminar todas las burbujas de aire, es necesario llevar el nivel de agua en el picnómetro a su capacidad de calibrado y determinar la masa total del picnómetro, espécimen, y agua.

Por último se retira el agregado fino del picnómetro dejándolo secar al horno hasta que este adquiera una masa constante, una vez que alcanza una temperatura manejable, se determina la masa del agregado seco.

a) Secado al horno:

$$OD = A / (B+S-C)$$

Dónde:

OD = Peso específico secado al horno

A = Masa de la muestra secada al horno

B = Masa del picnómetro con agua



C = Masa del picnómetro con agua y muestra de agregado fino

S = Masa de agregado fino en estado SSS

b) Saturado y superficialmente seco (SSS)

$$SSS = S / (B+S-C)$$

Dónde:

SSS = Peso específico saturado y superficialmente seco

- Absorción

De acuerdo con la norma ASTM C 128

$$\% \text{ Absorción} = [(S - A)/A] * 100$$

- Peso Volumétrico

De acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM C 29 y del mismo modo que el agregado grueso, se logró determinar lo siguiente:

$$M = (G - T)/V$$

Dónde:

M = Peso Volumétrico

G = Masa del agregado más la masa del recipiente utilizado

T = Masa del recipiente utilizado

V = Volumen del recipiente utilizado; en este caso es de 7.08 l

d) Suelto: Después de obtener el volumen exacto del recipiente utilizado, se procedió a llenar dicho recipiente, evitando que la altura de caída del agregado fuera mayor a 5 cm, con el fin de evitar su compactación. Una vez lleno el recipiente se procedió a eliminar aquel agregado que sobrepasara el nivel máximo del recipiente, tratando que la superficie quedara lo más pareja posible y, por último, obtener la masa del material suelto dentro de un volumen conocido.

e) Compactado: El peso volumétrico del material compactado se obtuvo con una simple diferencia al del material suelto. En la que el volumen total de la muestra debe contener la menor cantidad de aire posible entre las partículas; para ello, el recipiente debe ser llenado y al alcanzar cada tercio de la capacidad del recipiente, este deberá ser compactado mediante el uso de una varilla de apisonamiento, distribuyendo en toda la superficie 25 penetraciones, evitando que la varilla golpee el fondo, en el caso del primer tercio, o que penetre la capa ya compactada en los siguientes tercios.

f) Saturado y superficialmente seco(SSS) para obtener esta característica la norma indica el uso de la siguiente ecuación:

$$M_{SSS} = M [1 + (A/100)]$$

Dónde:

M_{SSS} = Peso volumétrico en condición SSS

A = Porcentaje de absorción

- Contenido de Vacíos:

De acuerdo con la norma ASTM C 29 lo obtenemos de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Vacíos} = 100 [(S*W) - M] / (S*W)$$



Dónde:

M = Peso volumétrico

S = Peso específico seco

W = Densidad del agua; 997.5 kg/m³

1.1.2.- Cemento

En la tabla 1.4 se presentan las propiedades del cemento Portland utilizado.

Tabla 1.4 Características físico-químicas del cemento CPC 40RS					
	Determinación	Unidades	Resultados	Especificación	
Pruebas Físicas	Consistencia normal	% de agua	25.4	45 min	
	Tiempo de fraguado inicial	min	112		
	Tiempo de fraguado final	min	275	600 máx.	
	Finura en la malla No. 325 (0.045 mm)	% pasa	90.7	n/a	
	Superficie específica, Blaine	m ² /kg	418	n/a	
	Sanidad: expansión o contracción en autoclave	%	-0.01	-0.02 a 0.80 máx.	
	Fraguado falso: penetración final	%	43	n/a	
	Resistencia a la compresión:				
		A 3 días	MPa	28.7	30
		A 7 días	MPa	36.1	n/a
		A 28 días	MPa	42.9	40
	Relación A/C		0.53	n/a	
	Fluidez	%	105	n/a	
Análisis químico	SiO ₂ Sílice	%	18.53	n/a	
	Al ₂ O ₃ Alúmina	%	5.32	n/a	
	Fe ₂ O ₃ Óxido Férrico	%	2.72	n/a	
	CaO Cal combinada	%	59.23	n/a	
	CaO Cal libre	%	2.41	n/a	
	MgO Magnesio	%	1.39	n/a	
	SO ₃ Trióxido de azufre	%	3.75	n/a	
	Residuo Insoluble	%	1.47	n/a	
	Pérdida por calcinación	%	4.02	n/a	
		Suma		98.85	n/a
		Na ₂ O Óxido de sodio	%	0.45	n/a
		K ₂ O Óxido de potasio	%	0.57	n/a
		Total de álcalis (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	%	0.83	n/a
Compuestos potenciales	C ₃ S Silicato tricálcico	%	59.78	n/a	
	C ₂ S Silicato dicálcico	%	8.02	n/a	
	C ₃ A Aluminato tricálcico	%	9.5	n/a	
	C ₄ AS Ferr. Alum. Tretracálcico	%	8.28	n/a	
		Suma		85.58	n/a



1.1.3.- Humo de sílice

Del mismo modo que el cemento, con el humo de sílice se determinaron todas sus características físico-químicas de acuerdo con las normas.

Tabla 1.5 Características físico-químicas del humo de sílice

	Determinación	Unidades	Resultados	Especificación Clase F
Requerimientos físicos	Índice de actividad puzolánica, mínimo del control 7 días	%	94	75
	Índice de actividad puzolánica, mínimo del control 28 días	%	109	75
	Expansión en autoclave, máx.	%	-0.03	0.8
	Densidad	g/cm ³	2.2	N/A
Requerimientos químicos	Dióxido de silicio (SiO ₂) + Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) + Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), min	%	95	70
	Trióxido de azufre (SiO ₃), máx.	%	0.3	5
	Perdida por calcinación, máx.	%	2.8	6
	Humedad, máx.	%	0.005	3
	Alcalis disponibles, máx.	%	0.3	1.5

1.1.4.- Aditivos

Para estas mezclas se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante a base de policarboxilato llamado PLASTOL PRECAST, diseñado especialmente para dar alta fluidez y reducción de agua con el empleo de una menor dosis respecto a otros aditivos de la misma línea Plastol. Con un consumo recomendado de entre 4 y 10 ml/kg de material cementante.

Este producto es de color café y una consistencia líquida y viscosa de 900 a 1000 Poise (cps). Además tiene un pH de 6.50 +/- 1.00 y una densidad de 1.09 +/- 0.01 g/ml. De acuerdo con la norma ASTM C 494 es un aditivo tipo F, este producto no contiene iones cloruro adicionados que puedan promover la corrosión del acero de refuerzo.

1.2.- Consideraciones

Debido a que el principal objetivo de la investigación es la durabilidad del concreto con humo de sílice, en el método de diseño se tomaron como consideración los factores altamente perjudiciales al concreto como los que se mencionan en el "Manual de tecnologías de concreto" publicado por CFE, donde se indica lo siguiente (tablas 1.6 y 1.7):



Tabla 1.6 Sustancias que atacan al concreto y sus respectivos grados de ataque ⁽³²⁾	
Sustancias químicas	Grado de ataque al concreto a temperatura ambiente
Ácidos Inorgánicos	
Clorhídrico	Rápido
Fluorhídrico	
Nítrico	
Sulfúrico	
Fosfórico	
Carbónico	Moderado
Ácidos Inorgánicos	
Acético	Rápido
Fórmico	
Lácteo	
Tánico	Moderado
Oxálico	Despreciable
Tartárico	
Soluciones Alcalinas	
Hidróxido de sodio > 20%	Moderado
Hidróxido de sodio 10-20%	Lento
Hipoclorito de sodio	
Hidróxido de sodio < 10%	Despreciable
Hidróxido de amonio	
Soluciones Salinas	
Cloruro de Aluminio	Rápido
Nitrato de Amonio	Moderado
Sulfato de Amonio	
Sulfato de Sodio	
Sulfato de Magnesio	
Sulfato de Calcio	
Cloruro de Amonio	Lento
Cloruro de Magnesio	
Cianuro de Sodio	
Cloruro de Calcio	Despreciable
Cloruro de Sodio	
Nitrato de Zinc	
Cromato de Sodio	
Diversas Sustancias	
Gas Bromo	Moderado
Solución de sulfito	
Gas Cloro	Lento
Agua de mar	
Agua blanda	
Amonio	Despreciable



Tabla 1.7 Consideraciones según el grado de agresividad al concreto ⁽³²⁾	
Concepto	Datos
Grado de agresividad del suelo según sulfatos solubles	
Benigno	Menos de 0.10%
Moderado	0.10 a 0.20%
Severo	0.20 a 2.00%
Muy Severo	Más de 2.00%
Grado de agresividad del agua según sulfatos solubles	
Benigno	Menos de 150 ppm
Moderado	150 a 1500 ppm
Severo	1500 a 10000 ppm
Muy Severo	Más de 10000 ppm
Relación A/C máxima recomendable	
Benigno	Sin limitación
Moderado	0.50
Severo	0.45
Muy Severo	0.40
Cementos Preferentes	
Benigno	Sin limitación
Moderado	Portland II
Severo	Portland V
Muy Severo	Portland- Puzolana con clinker V Portland V Portland- Puzolana con Clinker V más Protección externa
Cementos Alternativos	
Benigno	Sin limitación
Moderado	Portland- Puzolana con clinker II
Severo	Portland II con baja expansión por sulfatos
Muy Severo	Portland II con baja expansión por sulfatos más Protección externa

De las tablas anteriores, podemos deducir que la concentración de sulfato de sodio a la que expondremos los especímenes será alta, de modo que el grado de ataque será entre severo y muy severo, por lo que requeriremos tomar las medidas necesarias para que el concreto tenga una buena respuesta ante dichas sustancias. Para realizar la dosificación de las mezclas se parte de una relación agua cemento (A/C) baja (0.45 y 0.40), un cemento compuesto resistente a los sulfatos (CPC 40RS) y en los especímenes de prueba se utilizó 5 y 10 por ciento de humo de sílice como material cementante suplementario.

1.3 Dosificación de la mezcla

El criterio utilizado para la dosificación de los concretos fue el de volúmenes absolutos. Partiendo de un volumen de 185 litros de agua se calculó lo siguiente:

- a) Especímenes de control
Agua: 185 litros



$$\text{Relación } \frac{A}{C} = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Cemento}(kg)}$$

$$\text{Cemento}(kg) = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Relación } \frac{A}{C}}$$

$$\text{Cemento}(l) = \frac{\text{Cemento}(kg)}{\text{peso específico del cemento}(3.15 \frac{kg}{l})}$$

$$\text{Aditivo}(ml) = \frac{8(ml) \text{ de aditivo}}{\text{cemento}(Kg)} * \text{Cementante}(Kg)$$

2% de Aire incluido en la mezcla = 20 litros

$$\text{Vol Abs sin Grava}(l) = \text{Agua}(l) + \text{Cemento}(l) + \text{Aditivo}(l) + \text{Aire incluido}(l)$$

$$\text{Vol. Abs. con Grava}(l) = 1000(l) - \text{Vol Abs sin Grava}$$

$$\text{Grava}(l) = 52\% \text{ Vol. Abs. con Grava}(l)$$

$$\text{Grava}(kg) = \text{Grava}(l) * \text{peso específico de la grava}(2.8 \frac{kg}{l})$$

$$\text{Arena}(l) = 48\% \text{ Vol. Abs. con Grava}(l)$$

$$\text{Arena}(kg) = \text{Arena}(l) * \text{peso específico de la arena}(2.24 \frac{kg}{l})$$

b) Especímenes de prueba

Partiendo de la mezcla de control con la misma relación A/C y el mismo peso de grava ahora se diseña la dosificación para los especímenes de prueba con 5 y 10 por ciento de Humo de Sílice.

b.1) 5% de Humo de sílice

Agua: 185 litros

$$\text{Relación } \frac{A}{C+SF} = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Cemento}(kg) + \text{Humo de Sílice}(kg)}$$

$$\text{Cemento}(kg) = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Relación } \frac{A}{C+SF}} * 95\%$$

$$\text{Cemento}(l) = \frac{\text{Cemento}(kg)}{\text{peso específico del cemento}(3.15 \frac{kg}{l})}$$

$$\text{Humo de Sílice}(kg) = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Relación } \frac{A}{C+SF}} * 5\%$$

$$\text{Humo de Sílice}(l) = \frac{\text{Humo de Sílice}(kg)}{\text{peso específico del Humo de Sílice}(2.2 \frac{kg}{l})}$$

$$\text{Aditivo}(ml) = \frac{9(ml) \text{ de aditivo}}{C + SF(kg)} * \text{Cementante}(kg)$$

2% de Aire incluido en la mezcla = 20 litros

$$\text{Vol Abs sin Grava}(l) = \text{Agua}(l) + \text{Cemento}(l) + \text{Humo de Sílice}(l) + \text{Aditivo}(l) + \text{Aire incluido}(l)$$

$$\text{Vol. Abs. con Grava}(l) = \text{Vol Abs sin Grava} + \text{Vol de la Grava}$$

$$\text{Arena}(l) = 1000 - \text{Vol. Abs. con Grava}(l)$$

$$\text{Arena}(Kg) = \text{Arena}(l) * \text{peso específico de la arena}(2.24 \frac{Kg}{l})$$



b.2) 10% de Humo de sílice

Agua: 185 litros

$$\text{Relación } \frac{A}{C+SF} = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Cemento}(kg)+\text{Humo de Sílice}(kg)}$$

$$\text{Cemento}(kg) = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Relación } \frac{A}{C+SF}} * 90\%$$

$$\text{Cemento}(l) = \frac{\text{Cemento}(kg)}{\text{peso específico del cemento}(3.15 \frac{kg}{l})}$$

$$\text{Humo de Sílice}(kg) = \frac{\text{Agua}(kg)}{\text{Relación } \frac{A}{C+SF}} * 10\%$$

$$\text{Humo de Sílice}(l) = \frac{\text{Humo de Sílice}(kg)}{\text{peso específico del Humo de Sílice}(2.2 \frac{kg}{l})}$$

$$\text{Aditivo}(ml) = \frac{10(ml) \text{ de aditivo}}{C+SF(kg)} * \text{Cementante}(kg)$$

2% de Aire incluido en la mezcla = 20 litros

$$\text{Vol Abs sin Grava}(l) = \text{Agua}(l) + \text{Cemento}(l) + \text{Humo de Sílice}(l) + \text{Aditivo}(l) + \text{Aire incluido}(l)$$

$$\text{Vol. Abs. con Grava}(l) = \text{Vol Abs sin Grava} + \text{Vol de la Grava}$$

$$\text{Arena}(l) = 1000 - \text{Vol. Abs. con Grava}(l)$$

$$\text{Arena}(kg) = \text{Arena}(l) * \text{peso específico de la arena}(2.24 \frac{kg}{l})$$

2.- Pruebas

2.1.- Concreto en estado fresco

Una vez homogénea la mezcla de agregados, agua y materiales cementantes, es importante realizar tres pruebas para conocer las características del concreto recién mezclado y así utilizar o proponer el método correcto para manejarlo.

Mezcla	Revenimiento		Masa volumétrica	Contenido de aire atrapado
	Sin Aditivo	Con Aditivo		
	cm	cm	kg/m ³	%
M1-C411-SF0-GB20	3.5	18.9	2347	2.0
M2-C390-SF21-GB20	0.4	12.4	2322	2.4
M3-370-SF42-GB20	0.7	11.8	2330	2.3
M4-C462.5-SF0-GB20	1.0	14.4	2329	2.3
M5-C439.4-SF23.1-GB20	0.6	15.0	2356	2.3
M6-C416.2-SF46.3-GB20	0.3	16.2	2294	2.4

2.1.1.- Consistencia

Como se mencionó anteriormente un concreto con una buena consistencia debe poseer estabilidad, compactibilidad y movilidad; en un concreto de consistencia plástica estas características las podemos determinar mediante el asentamiento que se presenta en el “Cono de Abrams”, figura 2.1.

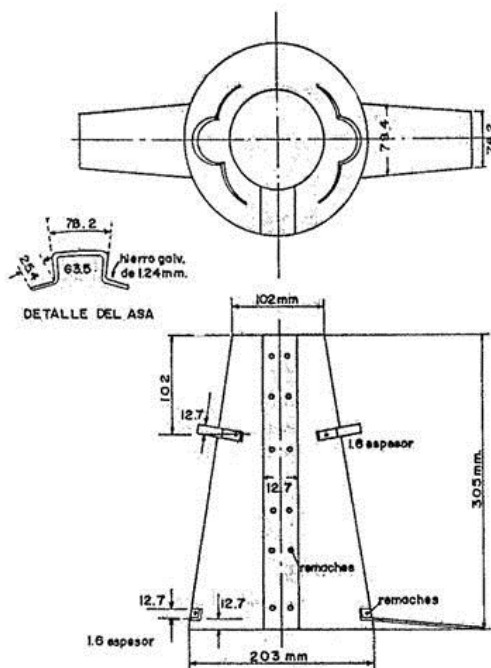


Figura 2.1 Especificaciones del Cono de Abrams o cono de revenimiento ⁽²⁶⁾



Esta prueba comúnmente conocida como prueba de revenimiento, consiste en colocar una muestra de concreto fresco en el Cono de Abrams y cada vez que un tercio del volumen del recipiente sea llenado deberá ser compactado veinticinco veces, mediante el uso de una varilla. Una vez lleno y enrasado, se debe retirar el molde, elevándolo y permitiendo que el concreto se asiente. Reportando como asentamiento o revenimiento del concreto, la diferencia entre la altura original y la altura del concreto una vez asentado. Este procedimiento no deberá realizarse en más de dos minutos y medio.

Es importante destacar que la prueba de revenimiento no debe realizarse en concretos no plásticos o con agregados de tamaño mayor a 38.1 mm (1 ½''), además la norma ASTM C 143 advierte que concretos con un asentamiento menor a 15mm podrían no ser suficientemente plásticos y aquellos con asentamientos mayores a 230 mm podrían ser muy poco cohesivos para que esta prueba tenga validez.

2.1.2.- Contenido de aire y Masa Volumétrica

Con el fin de determinar la calidad del concreto se realizaron pruebas para determinar el contenido de aire, siguiendo el método para un molde tipo B, de acuerdo con la norma ASTM C 231. Del mismo modo la prueba para conocer la masa volumétrica se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM C 138.

2.2.- Concreto endurecido

Buscando conocer las propiedades del concreto en estado endurecido, se fabricaron distintas probetas dependiendo del tipo de prueba para la cual se utilizarían; para los ensayos de resistencia a compresión, tensión mediante la prueba brasileña, módulo de elasticidad y módulo de Poisson se utilizaron especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm. Para el módulo de rotura, se elaboraron vigas de concreto simple de 15 x 15 x 60 cm. También se utilizaron probetas cilíndricas de 5 x 10 cm para la prueba de penetración al ion cloruro y barras de 7.5 x 7.5 x 25 cm para los ensayos de contracción por secado y resistencia al ataque de los sulfatos.

De acuerdo con la norma ASTM C 192 fue que se realizaron dichos especímenes, llenando los moldes en dos capas y cada una de ellas, fue compactada en una mesa vibradora, después se enrasaron y 24 horas después se desmoldaron y llevaron a la cámara de curado húmedo, a temperatura y humedad controladas, donde permanecieron hasta la fecha de ensayo.

Un día antes del ensayo, los especímenes fueron medidos y pesados, además se aplicó una capa de azufre para asegurar el paralelismo y uniformidad en las caras de apoyo en aquellos especímenes que serían sometidos a carga axial, de acuerdo con la norma ASTM C 617.

2.2.1.- Mecánicas

2.2.1.1.- Resistencia a compresión

La determinación de la resistencia a compresión del concreto, se efectúa mediante la aplicación de una carga axial y llevando hasta la ruptura los especímenes representativos, esto, con la finalidad de comprobar las previsiones que se hacen al diseñar una mezcla de concreto, además, se controla la uniformidad de las resistencias y el nivel de calidad requerido durante la producción de concreto e incluso verificar la resistencia del concreto que integra una estructura.

Esta prueba se realizó a distintas etapas de la edad del concreto: 7, 14, 28, y 90 días, siguiendo la norma ASTM C 39 la cual indica que para especímenes con una relación de esbeltez $H/D = 2$ y diámetro mayor a 3



veces el TMA la velocidad de carga deberá ser entre 16 y 38 ton/ min; por lo que la establecida para estas pruebas fue de 25 ton/ min.

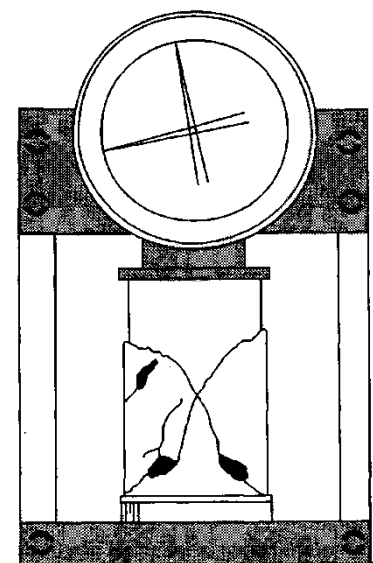


Figura 2.4 Falla a compresión de un cilindro de concreto simple. ⁽²⁶⁾

En la figura 2.4 se muestra la falla típica de un cilindro de concreto simple sujeto a carga axial, la falla suele presentarse a través de planos inclinados con respecto a la dirección de la carga

Tabla 2.2 Resistencia a la compresión					
Mezcla	Resistencia a compresión, kg/cm ²				Relación A/C
	7 días	14 días	28 días	90 días	
M1-C411-SF0-GB20	405	460	544	604	0.45
M2-C390-SF21-GB20	444	507	598	632	0.45
M3-370-SF42-GB20	420	537	595	608	0.45
M4-C462.5-SF0-GB20	483	552	627	721	0.40
M5-C439.4-SF23.1-GB20	493	547	657	724	0.40
M6-C416.2-SF46.3-GB20	479	547	677	706	0.40

2.2.1.2.- Resistencia a tensión

El concreto endurecido se manifiesta como un material frágil, ya que su ruptura se produce con una deformación unitaria relativamente reducida, por ello, al diseñar una estructura, se procura que el concreto no trabaje a tensión directa; sin embargo, casi siempre es inevitable que el concreto deba soportar ciertos esfuerzos de tensión, ya sea como consecuencia de determinadas condiciones de carga que involucran flexión o cortante. Esta es una propiedad que requiere consideración específica en el diseño de estructuras con mayor influencia como presas en arco, pavimentos de concreto hidráulico.

2.2.1.2.1.- Tensión por Compresión Diametral

Siguiendo la norma ASTM C 496 la cual indica una velocidad de aplicación de carga de entre 5 y 10 ton/min. se realizaron ensayos a 28 y 90 días en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm en una prensa universal con capacidad de 250 ton a una velocidad de carga de 8 ton/min.



Tabla 2.3 Resistencia a Tensión Indirecta		
Mezcla	Resistencia a tensión, kg/cm ²	Resistencia a tensión, kg/cm ²
	28 días	90 días
M1-C411-SF0-GB20	39.05	38.30
M2-C390-SF21-GB20	41.77	39.05
M3-370-SF42-GB20	39.76	35.46
M4-C462.5-SF0-GB20	41.96	46.80
M5-C439.4-SF23.1-GB20	42.04	48.77
M6-C416.2-SF46.3-GB20	38.86	45.41

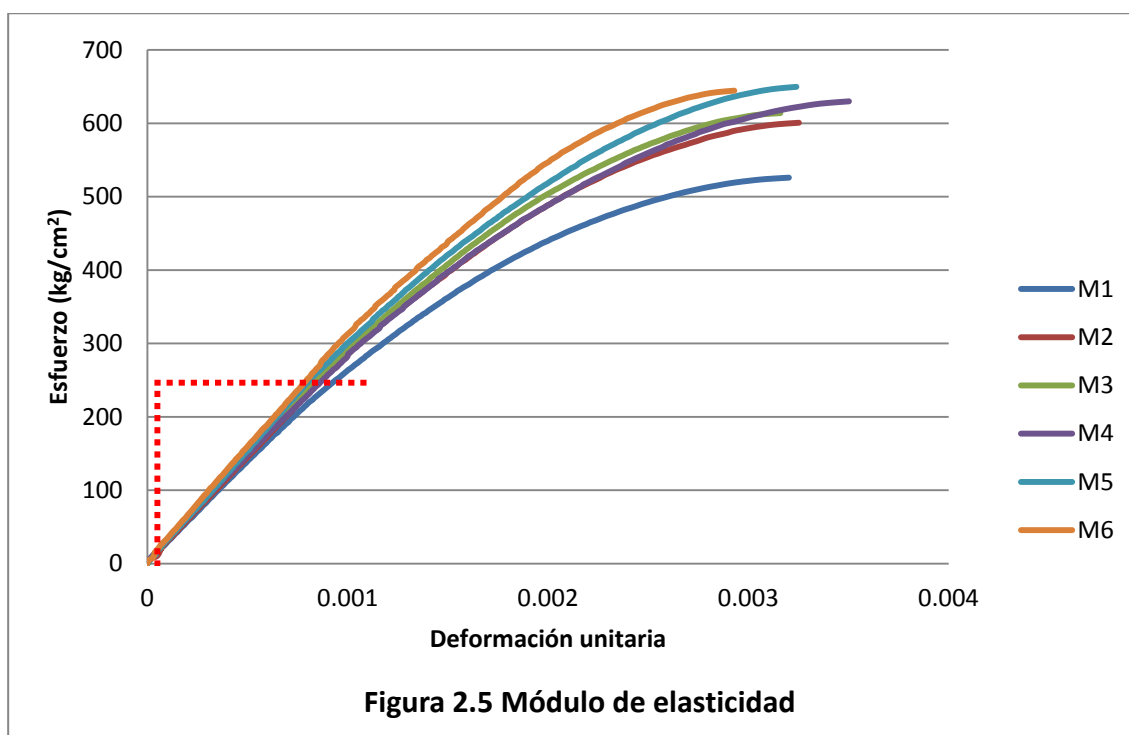
2.2.1.2.2.- Flexión

De acuerdo con los estándares de la norma ASTM C 78 se logró determinar el módulo de rotura a los 28 días de edad en especímenes de concreto simple con carga ubicada en los extremos del tercio medio de la viga de 15 x 15 x 60 cm. y una velocidad de carga de 800 kg/min con ayuda de una prensa universal con capacidad de 250 ton.

Tabla 2.4 Resistencia a Flexión	
Mezcla	Módulo de rotura, kg/cm ²
	28 días
M1-C411-SF0-GB20	63.15
M2-C390-SF21-GB20	57.84
M3-370-SF42-GB20	60.12
M4-C462.5-SF0-GB20	67.53
M5-C439.4-SF23.1-GB20	67.59
M6-C416.2-SF46.3-GB20	64.83

2.2.1.3.- Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es conocido como la pendiente de la curva esfuerzo deformación unitaria en compresión, cuyo valor está asociado con la resistencia a compresión del concreto ($f'c$). Para calcularlo se utilizó la pendiente de la recta que pasa por el 40% del esfuerzo máximo y la deformación unitaria correspondiente a 0.00005.



Las pruebas se realizaron en probetas de 15 x 30 cm a 28 y 90 días siguiendo la norma ASTM C 469; al igual que en las pruebas de resistencia a compresión se utilizó una prensa universal de 250 toneladas de capacidad y una velocidad de carga de 25 ton/min. Con el fin de determinar las deformaciones axiales y transversales se utilizó un compresómetro con transductores de desplazamiento tipo LVDT y para la adquisición de datos un sistema de captura multicanal TDS-302.

Tabla 2.5 Módulo de elasticidad		
Mezcla	Módulo de elasticidad, E_c , kg/cm ²	
	28 días	90 días
M1-C411-SF0-GB20	274 620	314 580
M2-C390-SF21-GB20	289 333	314 580
M3-370-SF42-GB20	298 864	319 795
M4-C462.5-SF0-GB20	300 501	319 960
M5-C439.4-SF23.1-GB20	300 275	319 038
M6-C416.2-SF46.3-GB20	311 638	325 483

2.2.1.4.- Relación de Poisson

La relación de Poisson es la relación entre la deformación transversal que se genera cuando el espécimen se deforma debido a una carga axial, y la deformación axial. Para su cálculo se utilizaron los datos adquiridos durante las pruebas de Módulo de Elasticidad, dividiendo las deformaciones unitarias transversales entre las longitudinales.



Tabla 2.6 Relación de Poissón		
Mezcla	28 días	
	28 días	90 días
M1-C411-SF0-GB20	0.25	0.21
M2-C390-SF21-GB20	0.20	0.21
M3-370-SF42-GB20	0.20	0.23
M4-C462.5-SF0-GB20	0.22	0.22
M5-C439.4-SF23.1-GB20	0.19	0.22
M6-C416.2-SF46.3-GB20	0.21	0.22

2.2.2.- Durabilidad

2.2.2.1.- Resistencia a la abrasión

Debido a fallas en las máquinas utilizadas para medir abrasión en concreto de acuerdo con la norma ASTM C 779, se optó por realizarla de acuerdo a la norma NMX C 008, la cual se refiere a las especificaciones para mosaicos, formados con base de cemento Portland. Para realizar esta prueba se utilizó una máquina de disco giratorio a la cual se le agrega arena sílicea designación 16-100 que pase por la malla No. 50 y sea retenida por la No. 80, que presente características invariables y debe estar mojada.

Los especímenes de la prueba fueron prismas rectangulares de 5 X 5 X 10 cm. Los cuales fueron medidos y pesados antes de ser colocados sobre el disco con una presión de 250 g/cm² y sometiéndolos a una velocidad de giro de 70 rpm durante 10 minutos, al finalizar se determinó el desgaste de las muestras como la diferencia entre los pesos y longitudes.

Tabla 2.7 Resistencia a la abrasión		
Mezcla	28 días	
	Desgaste (mm)	Peso(g)
M1-C411-SF0-GB20	7.24	51.45
M2-C390-SF21-GB20	7.21	47.90
M3-370-SF42-GB20	7.22	46.15
M4-C462.5-SF0-GB20	7.69	46.95
M5-C439.4-SF23.1-GB20	5.94	37.38
M6-C416.2-SF46.3-GB20	6.05	35.65

2.2.2.2.- Contracción por secado

En forma paralela a la obtención de las propiedades mecánicas típicas del concreto, los especímenes formados de este material manifiestan cambios en su volumen que si se mantienen en un orden moderado no deben afectarlo, pero al darse en exceso pueden agrietarlo y alterar desfavorablemente su comportamiento y durabilidad.

La rápida pérdida de agua interna del concreto recién colado, es la causa principal de la contracción plástica que este experimenta en sus primeras horas de edad, el concreto, después de fraguado sigue expuesto a perder más agua por efecto de la evaporación y por el consumo debido a la hidratación del cemento; esta reducción de agua paulatina es motivo de que el concreto se contraiga gradualmente a medida que endurece.



Para medir la contracción por secado se fabricaron barras prismáticas de 7.5 x 7.5 x 25 cm y se curaron por 28 días sumergidas en agua con cal, dentro de un cuarto de curado con temperatura y humedad controlada. La prueba se hizo siguiendo la norma ASTM C 157.

La medición de la contracción por secado se basó en el cambio de longitud de los prismas, que se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 490.

Tabla 2.8 Contracción por secado última	
Mezcla	Contracción por secado última x 10 ⁻⁶
M1-C411-SF0-GB20	866.93
M2-C390-SF21-GB20	734.59
M3-370-SF42-GB20	900.09
M4-C462.5-SF0-GB20	888.97
M5-C439.4-SF23.1-GB20	863.41
M6-C416.2-SF46.3-GB20	814.80

2.2.2.3.- Resistencia al ataque de sulfatos

Las pruebas de resistencia al ataque de sulfatos se hicieron tomando como base la norma ASTM C 1012 “Cambio de longitud de morteros con cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfato de sodio”, modificando las partes en que la norma no cumplía con los objetivos y alcances del estudio. La diferencia principal radica en que la norma es para ensayar morteros; morteros con una relación cemento/arena y agua/cementantes fijas, y los resultados permiten comparar la resistencia al ataque de sulfatos de los diferentes cementos usados en estos morteros. El objetivo del estudio es comparar las mejoras o cambios que el humo de sílice puede introducir en las propiedades del concreto, esto para diferentes consumos de cementante.

Las probetas utilizadas, a diferencia de la norma, fueron similares a las probetas prismáticas de 7.2 x 7.5 x 25 cm utilizadas para las pruebas de contracción por secado. Las probetas se dejaron en un recipiente de agua con cal dentro del cuarto de curado húmedo, a temperatura y humedad controladas (ASTM C 192), durante 28 y 90 días, tiempo después, fueron sumergidas en una solución de sulfato de sodio al 5%.

La preparación de la solución de sulfato de sodio, el almacenamiento de las probetas dentro de la solución de sulfato de sodio, la frecuencia y forma de medición se hicieron respetando la norma ASTM C 1012.

Tabla 2.9 Expansión última al ataque de sulfatos	
Mezcla	Expansión última x 10 ⁻⁶
M1-C411-SF0-GB20	139.34
M2-C390-SF21-GB20	129.87
M3-370-SF42-GB20	154.96
M4-C462.5-SF0-GB20	170.38
M5-C439.4-SF23.1-GB20	128.69
M6-C416.2-SF46.3-GB20	73.13



2.2.2.4.- Resistencia a la permeabilidad del ion cloruro

La permeabilidad está relacionada con la porosidad, por eso depende del contenido de agua y la relación $A/(C+SF)$ en forma inversa. Es por esto que está ligada a la resistencia a compresión. Es importante resaltar que el ion cloruro tiene una acción directa insignificante sobre el concreto; la acción perjudicial de los cloruros en el concreto es a través de su participación en el mecanismo de corrosión del acero de refuerzo, produciéndose compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y los agregados.

Mediante el uso de probetas cilíndricas de 10 x 20 cm, las cuales se cortaron para obtener unas de 10 x 5 cm y siguiendo la norma ASTM C 1202, se obtuvieron en un laboratorio externo, los valores de la carga eléctrica que es conducida a través del concreto, logrando así obtener el grado de permeabilidad del material estudiado.

Mezcla	28 días		90 días	
	Coulomb	Categoría	Coulomb	Categoría
M1-C411-SF0-GB20	4 614	Alta	1 741	Baja
M2-C390-SF21-GB20	2 104	Moderada	1 067	Baja
M3-370-SF42-GB20	1 399	Baja	843	Muy baja
M4-C462.5-SF0-GB20	4 328	Alta	2 110	Moderada
M5-C439.4-SF23.1-GB20	1 829	Baja	874	Muy baja
M6-C416.2-SF46.3-GB20	1 114	Baja	604	Muy baja



3.- Análisis de Resultados

3.1.- Concreto en estado fresco

Mezcla	Revenimiento				Masa volumétrica		Contenido de aire atrapado	
	Sin Aditivo		Con Aditivo		kg/m ³		%	
	cm		cm					
M1-C411-SF0-GB20	3.5	100%	18.9	100%	2 347	100%	2.0	100%
M2-C390-SF21-GB20	0.4	-89%	12.4	-34%	2 322	-1%	2.4	+20%
M3-370-SF42-GB20	0.7	-80%	11.8	-38%	2 330	-1%	2.3	+15%
M4-C462.5-SF0-GB20	1.0	100%	14.4	100%	2 329	100%	2.3	100%
M5-C439.4-SF23.1-GB20	0.6	-40%	15.0	+4%	2 356	+1%	2.3	+0%
M6-C416.2-SF46.3-GB20	0.3	-70%	16.2	+12%	2 294	-1%	2.4	+4%

Al realizar el diseño por durabilidad para resistir sustancias altamente perjudiciales, se propuso una muy baja relación agua-cemento, lo que provoca una cantidad de agua muy baja y sumado a la alta cohesión del humo de sílice se puede observar un muy bajo nivel de revenimiento; lo que se traduce como una mezcla de concreto muy difícil de manipular, un concreto poco moldeable. Sin embargo, gracias al aditivo superplastificante utilizado, la mezcla adquiere una consistencia plástica aunque sigue siendo extremadamente cohesiva.

En la tabla 3.1 se puede observar el cambio en el revenimiento comparándolo con las mezclas sin humo de sílice y se observa que en las mezclas con 0.45 relación A/C el comportamiento es como se esperaba, a medida que aumenta la cantidad de humo de sílice en la muestra, el revenimiento disminuye al agregar el aditivo; por otra parte, el concreto con 0.40 relación A/C solamente presenta este comportamiento antes de agregar el aditivo superplastificante.

Por otra parte, debido a la pequeña cantidad de humo de sílice empleado, los cambios en el peso del concreto son mínimos, aunque cumplen con la teoría de que al emplear un mayor porcentaje de humo de sílice en la mezcla se obtiene un concreto más ligero por unidad de volumen debido a la diferencia en el peso específico del cemento y el humo de sílice.

El aire atrapado varió entre 2.0 y 2.4 % con un valor promedio de 2.28% lo que es adecuado, ya que se consideró un volumen aproximado de 20 litros por metro cubico al diseñar la mezcla.

3.2.- Concreto endurecido

3.2.1.- Mecánicas

3.2.1.1.- Resistencia compresión

En la tabla 3.2 se puede observar el comportamiento de la ganancia de resistencia a compresión de las mezclas, respecto a las mezclas de control (M1 y M4).

En las mezclas con relación A/C de 0.45 se manifestó claramente el comportamiento esperado, en el cual, las mezclas con humo de sílice presentaron un incremento significativamente mayor que la muestra de control. Además, se observó que el comportamiento de la mezcla con 5% de material cementante



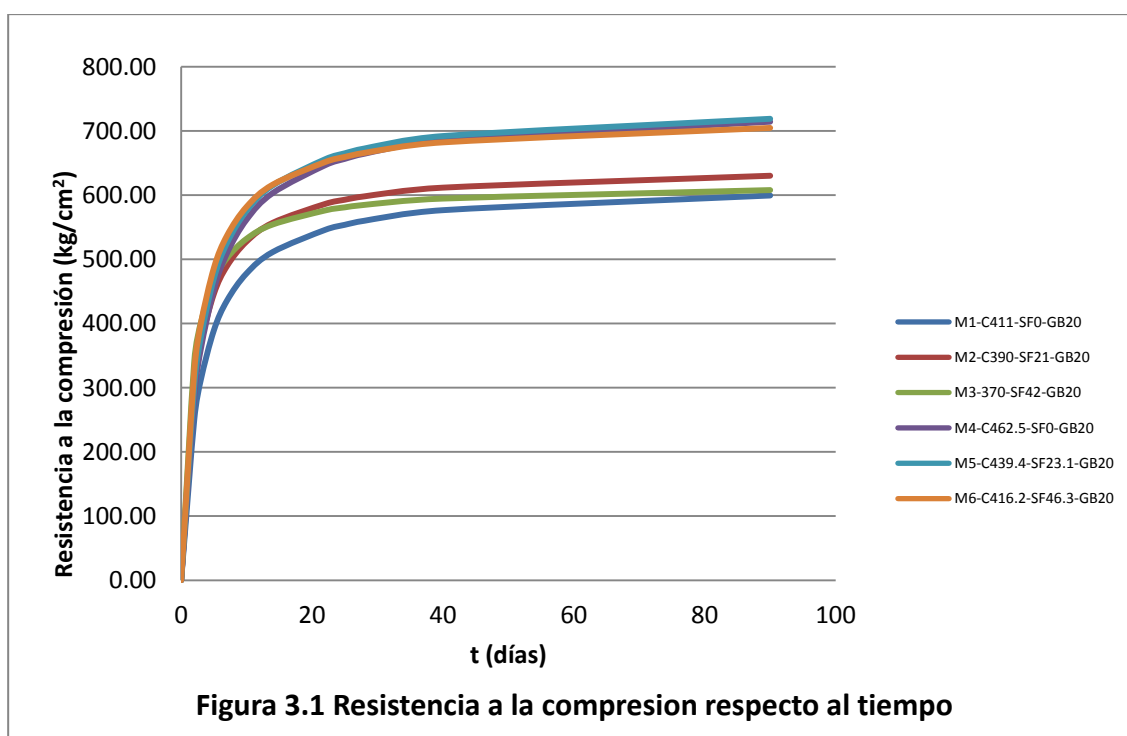
suplementario, presentó un comportamiento constante hasta alcanzar los 28 días de edad, incrementando la resistencia en 10% en cada una de las edades medidas.

Sin embargo, no se debe decir que el comportamiento de las mezclas con relación A/C de 0.40 es del todo errático ya que las variaciones respecto al control no son significativas y a los 28 días de edad presentaron un comportamiento ligeramente parecido al esperado. Este comportamiento puede deberse a cambios en la velocidad de reacción entre el hidróxido de calcio y la sílice contenido en el material adicionado.

Tabla 3.2 Variación de la resistencia a la compresión respecto a las mezclas de control

Mezcla	Resistencia a compresión, kg/cm ²								Relación A/C
	7 días		14 días		28 días		90 días		
M1-C411-SF0-GB20	405	100%	460	100%	544	100%	604	100%	0.45
M2-C390-SF21-GB20	444	+10%	507	+10%	598	+10%	632	+5%	0.45
M3-370-SF42-GB20	420	+4%	537	+17%	595	+9%	608	+1%	0.45
M4-C462.5-SF0-GB20	483	100%	552	100%	627	100%	721	100%	0.40
M5-C439.4-SF23.1-GB20	493	+2%	547	-1%	657	+5%	724	+0%	0.40
M6-C416.2-SF46.3-GB20	479	-1%	547	-1%	677	+8%	706	-2%	0.40

Los resultados de la tabla 3.2 se presentan en la figura 3.1 con el fin de lograr una mejor apreciación en el comportamiento de las distintas mezclas, en donde debido al aumento en el contenido de material cementante y humo de sílice se presentan resistencias mayores en las mezclas con una menor relación A/C.

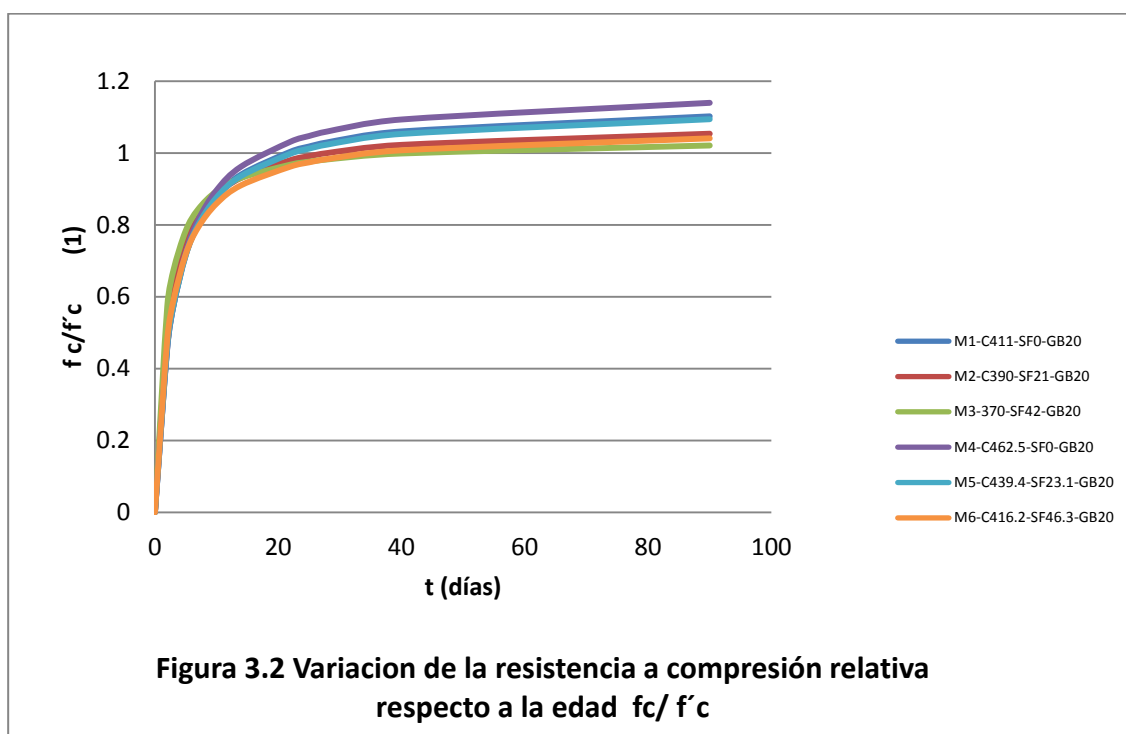


Continuando con las comparaciones de las resistencias a compresión logradas, pero ahora para las distintas edades de la misma mezcla, se logra observar que conforme aumenta el contenido de humo de sílice el desarrollo de la resistencia a compresión es más rápido, es decir, se alcanzan resistencias mayores a edades



tempranas; este comportamiento es similar para ambas relaciones A/C, sin embargo se observa más claramente para las mezclas con relación A/C de 0.45. Esta información se ve reflejada en la tabla 3.3

Mezcla	f_c / f'_c				Relación A/C
	7 días	14 días	28 días	90 días	
M1-C411-SF0-GB20	0.7442	0.8456	1.0000	1.1101	0.45
M2-C390-SF21-GB20	0.7422	0.8477	1.0000	1.0576	0.45
M3-370-SF42-GB20	0.7054	0.9016	1.0000	1.0217	0.45
M4-C462.5-SF0-GB20	0.7704	0.8808	1.0000	1.1507	0.40
M5-C439.4-SF23.1-GB20	0.7497	0.8329	1.0000	1.1015	0.40
M6-C416.2-SF46.3-GB20	0.7071	0.8078	1.0000	1.0427	0.40



Con los datos obtenidos de la Variación de la resistencia a compresión relativa respecto a la edad y mediante un ajuste de mínimos cuadrados, se logra obtener las ecuaciones que nos permiten calcular la resistencia a compresión para cualquier edad deseada, en función de la de 28 días (f'_c).



Tabla 3.4 Ecuaciones para determinar la variación de la resistencia a compresión relativa con la edad del concreto en t, días	
Mezcla	Expresión para estimar la resistencia a compresión a diferentes edades, t en días
M1-C411-SF0-GB20	$\frac{f'_{cM1}}{f'_{cM1}} = \left(\frac{t}{3.96 + 0.86t} \right)$
M2-C390-SF21-GB20	$\frac{f'_{cM2}}{f'_{cM2}} = \left(\frac{t}{3.17 + 0.91t} \right)$
M3-370-SF42-GB20	$\frac{f'_{cM3}}{f'_{cM3}} = \left(\frac{t}{2.40 + 0.95t} \right)$
M4-C462.5-SF0-GB20	$\frac{f'_{cM4}}{f'_{cM4}} = \left(\frac{t}{4.10 + 0.83t} \right)$
M5-C439.4-SF23.1-GB20	$\frac{f'_{cM5}}{f'_{cM5}} = \left(\frac{t}{3.91 + 0.86t} \right)$
M6-C416.2-SF46.3-GB20	$\frac{f'_{cM6}}{f'_{cM6}} = \left(\frac{t}{4.03 + 0.92t} \right)$

Gracias al comportamiento similar de las mezclas con 0%, 5% y 10% de humo de sílice es posible simplificar los resultados mostrados anteriormente en las tablas 3.3 y 3.4 y grafica 3.2 de la siguiente manera:

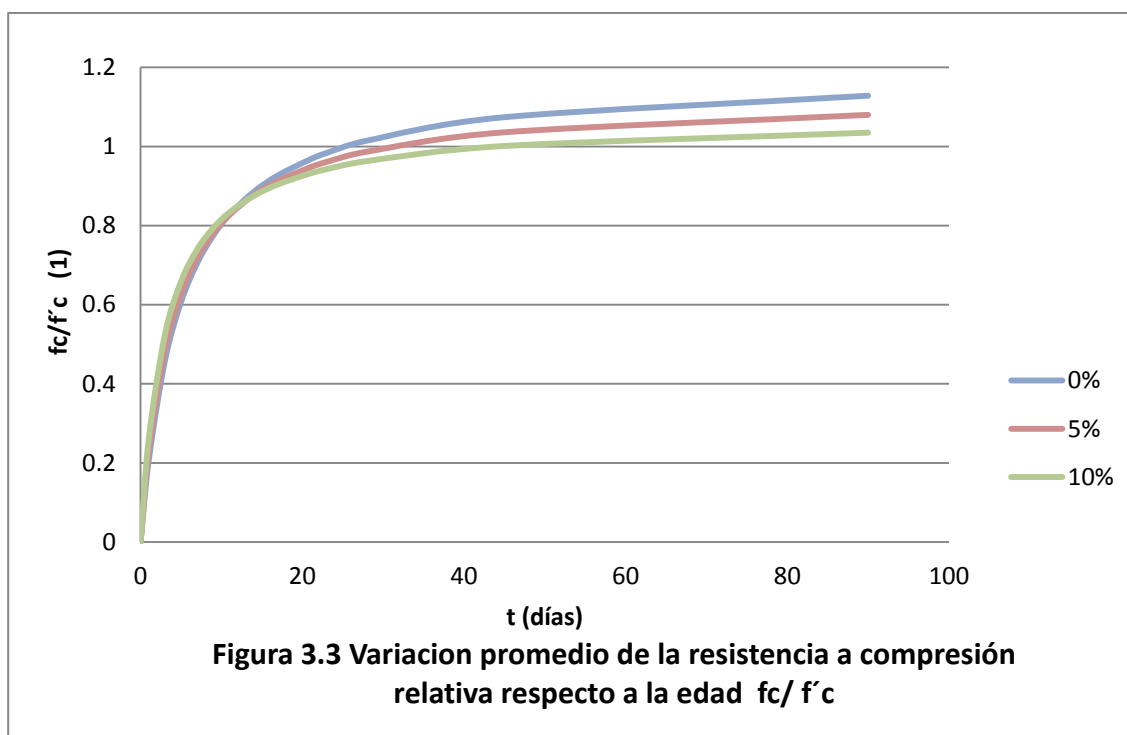




Tabla 3.5 Ecuaciones para determinar la variación de la resistencia a compresión relativa con la edad del concreto en t, días	
Mezcla	Expresión para estimar la resistencia a compresión a diferentes edades, t en días
Promedio de mezclas con 0% de SF	$\frac{f_{c_{0\%SF}}}{f'_{c_{0\%SF}}} = \left(\frac{t}{4.03 + 0.84t} \right)$
Promedio de mezclas con 5% de SF	$\frac{f_{c_{5\%SF}}}{f'_{c_{5\%SF}}} = \left(\frac{t}{3.55 + 0.89t} \right)$
Promedio de mezclas con 10% de SF	$\frac{f_{c_{10\%SF}}}{f'_{c_{10\%SF}}} = \left(\frac{t}{2.93 + 0.93t} \right)$

A pesar de contar con personal capacitado y el material adecuado para realizar cada una de las pruebas, en ocasiones se tuvo problemas con los cilindros ensayados a compresión debido a que el cabeceo de los especímenes no fue correctamente realizado, por lo que este se desprendía o fallaba antes que el concreto. Motivo por el cual dichos especímenes de prueba fueron rechazados.

3.2.1.2.- Resistencia a tensión

De los resultados obtenidos tanto de la prueba de tensión por compresión diametral (tabla 3.7) como por flexión o módulo de rotura (tabla 3.9), se logra observar que el comportamiento de las mezclas a tensión no tiene una variación significativa con o sin el humo de sílice. Como ya se ha mencionado, la resistencia a compresión en el concreto $f'c$ es el principal indicador de sus características en estado endurecido, por ello se presentan en las tablas 3.6 y 3.8 las respectivas ecuaciones para determinar el valor de la resistencia a tensión a los 28 días de edad del concreto, lo cual arroja que éste tiene una resistencia a tensión ligeramente menor al agregar humo de sílice como material cementante suplementario.

3.2.1.2.1.- Tensión por Compresión Diametral

Tabla 3.6 Relación promedio entre las resistencias a tensión indirecta y compresión	
Concreto con cemento CPC sin microsílíce y agregado grueso basáltico	$f_t = 1.68\sqrt{f'c}$
Concreto con cemento CPC con microsílíce y agregado grueso basáltico	$f_t = 1.62\sqrt{f'c}$

Tabla 3.7 Variación de la tensión indirecta con la resistencia a compresión a 28 y 90 días						
Mezcla	Resistencia a compresión, $f'c$, kg/cm ²		Resistencia a tensión, kg/cm ²		$f_t / \sqrt{f'c}$	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
M1-C411-SF0-GB20	544	604	39.05	38.30	1.67	1.56
M2-C390-SF21-GB20	598	632	41.77	39.05	1.71	1.55
M3-370-SF42-GB20	595	608	39.76	35.46	1.63	1.44
M4-C462.5-SF0-GB20	627	721	41.96	46.80	1.68	1.74
M5-C439.4-SF23.1-GB20	657	724	42.04	48.77	1.64	1.81
M6-C416.2-SF46.3-GB20	677	706	38.86	45.41	1.49	1.71



3.2.1.2.2.- Flexión

Tabla 3.8 Relación entre las resistencias a tensión por flexión y compresión	
Concreto con cemento CPC sin microsílíce y agregado grueso basáltico	$f_f = 2.70\sqrt{f'c}$
Concreto con cemento CPC con microsílíce y agregado grueso basáltico	$f_f = 2.49\sqrt{f'c}$

Tabla 3.9 Variación del módulo de rotura con la resistencia a compresión a 28 días			
Mezcla	Resistencia a compresión, $f'c$, kg/cm ²	Módulo de rotura, kg/cm ²	$f_f / \sqrt{f'c}$
	28 días	28 días	28 días
M1-C411-SF0-GB20	544	63.15	2.71
M2-C390-SF21-GB20	598	57.84	2.37
M3-370-SF42-GB20	595	60.12	2.46
M4-C462.5-SF0-GB20	627	67.53	2.70
M5-C439.4-SF23.1-GB20	657	67.59	2.64
M6-C416.2-SF46.3-GB20	677	64.83	2.49

3.2.1.3.- Modulo de elasticidad

De acuerdo con la información contenida en la tabla 3.10 se encuentra que la variación del módulo de elasticidad es mínima respecto a las mezclas de control y las mezclas con material adiconante, además en ambos casos, las ecuaciones mostradas en la tabla 3.11 demostraron que se alcanzaron valores por encima de los sugeridos en las NTC para concretos de alta resistencia donde $E_c = 8500\sqrt{f'c} + 50\,000$, lo cual nos habla de un concreto menos dúctil que el común.

Tabla 3.10 Variación del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión a 20 y 90 días								
Mezcla	Resistencia a compresión, $f'c$, kg/cm ²		Módulo de elasticidad, E_c , kg/cm ²				$E_c / \sqrt{f'c}$	
	28 días	90 días	28 días		90 días		28 días	90 días
M1-C411-SF0-GB20	544	604	274620	100%	314580	100%	11776	12804
M2-C390-SF21-GB20	598	632	289333	+5%	314580	+0%	11832	12509
M3-370-SF42-GB20	595	608	298864	+9%	319795	+2%	12250	12967
M4-C462.5-SF0-GB20	627	721	300501	100%	319960	100%	12003	11914
M5-C439.4-SF23.1-GB20	657	724	300275	+0%	319038	+0%	11715	11859
M6-C416.2-SF46.3-GB20	677	706	311638	+4%	325483	+2%	11978	12251



Mezcla	Módulo de elasticidad promedio, kg/cm ²	Desviación estándar, kg/cm ²
Concreto con agregado grueso basáltico sin humo de sílice a 28 días	$E_{c_{0\%}} = 11890 \sqrt{f'c}$	$\sigma_{0\%} = 160\sqrt{f'c}$
Concreto con agregado grueso basáltico con humo de sílice a 28 días	$E_{c_{SF}} = 11944 \sqrt{f'c}$	$\sigma_{SF} = 230\sqrt{f'c}$

3.2.1.4.- Relación de Poisson

En la tabla 3.12 se establecen los resultados obtenidos mediante las pruebas de esfuerzo – deformación; observando una menor relación de Poisson en las mezclas con mayor contenido de humo de sílice, y lo que se encuentra es que el valor promedio para las muestras de control es $\mu_{0\%} = 0.24$ y para las muestras con contenido de humo de sílice es $\mu_{SF} = 0.20$

Mezcla	28 días		90 días	
	M1-C411-SF0-GB20	0.25	100%	0.21
M2-C390-SF21-GB20	0.20	-21%	0.21	+0%
M3-370-SF42-GB20	0.20	-22%	0.23	+12%
M4-C462.5-SF0-GB20	0.22	100%	0.22	100%
M5-C439.4-SF23.1-GB20	0.19	-14%	0.22	-1%
M6-C416.2-SF46.3-GB20	0.21	-3%	0.22	-1%

3.2.2.- Durabilidad

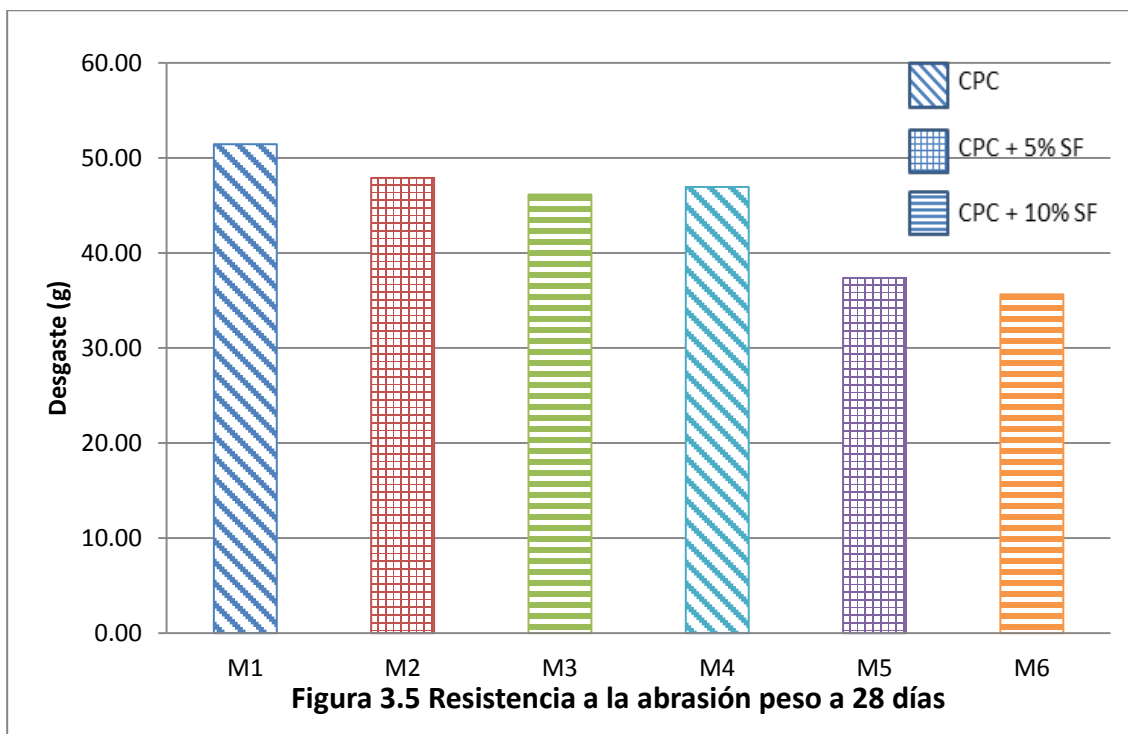
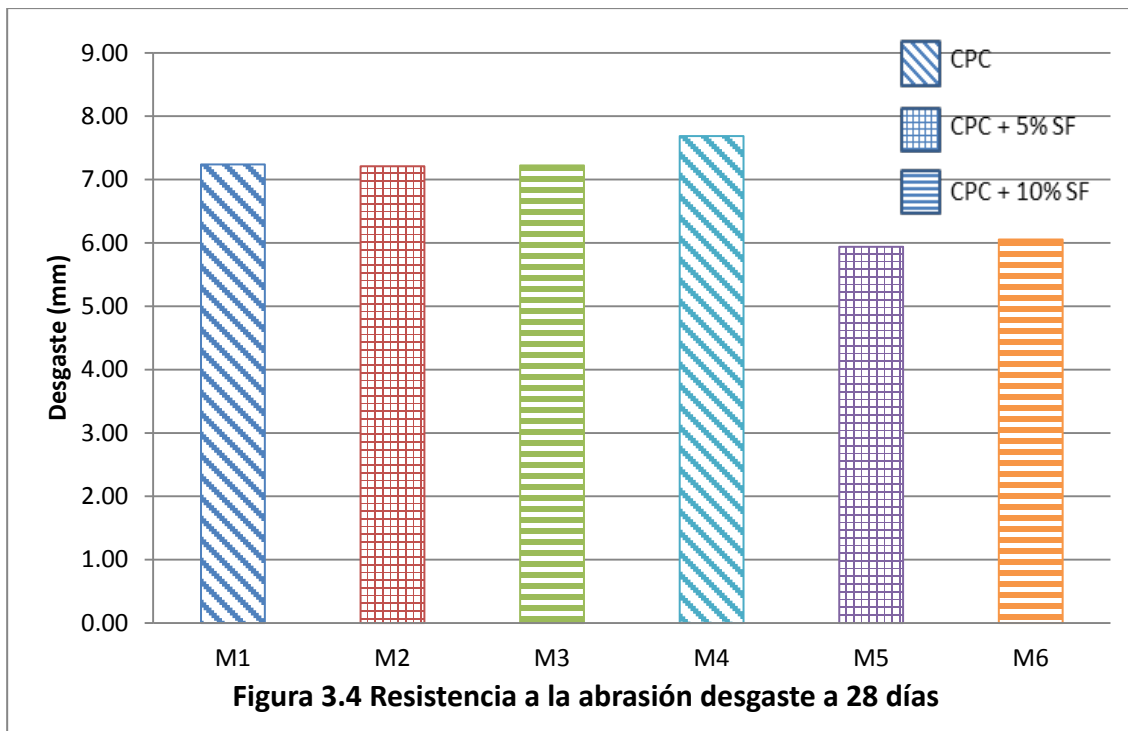
3.2.2.1.- Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión se determinó a los 28 días de edad; en la tabla 3.13 se presentan los resultados, del desgaste medido tanto por reducción de la longitud del espécimen (mm) como por la pérdida de peso (g). Para los concretos con 0.40 A/C la incorporación de humo de sílice redujo el desgaste en cantidades similares para cada mezcla, tanto en longitud como en peso, siendo este último más notorio en ambos casos.

Mezcla	28 días			
	Desgaste (mm)		Desgaste(g)	
M1-C411-SF0-GB20	7.24	100%	51.45	100%
M2-C390-SF21-GB20	7.21	+0%	47.90	-7%
M3-370-SF42-GB20	7.22	+0%	46.15	-10%
M4-C462.5-SF0-GB20	7.69	100%	46.95	100%
M5-C439.4-SF23.1-GB20	5.94	-23%	37.38	-20%
M6-C416.2-SF46.3-GB20	6.05	-21%	35.65	-24%



En las figura 3.4 y 3.5 se presentan en forma gráfica estos resultados.



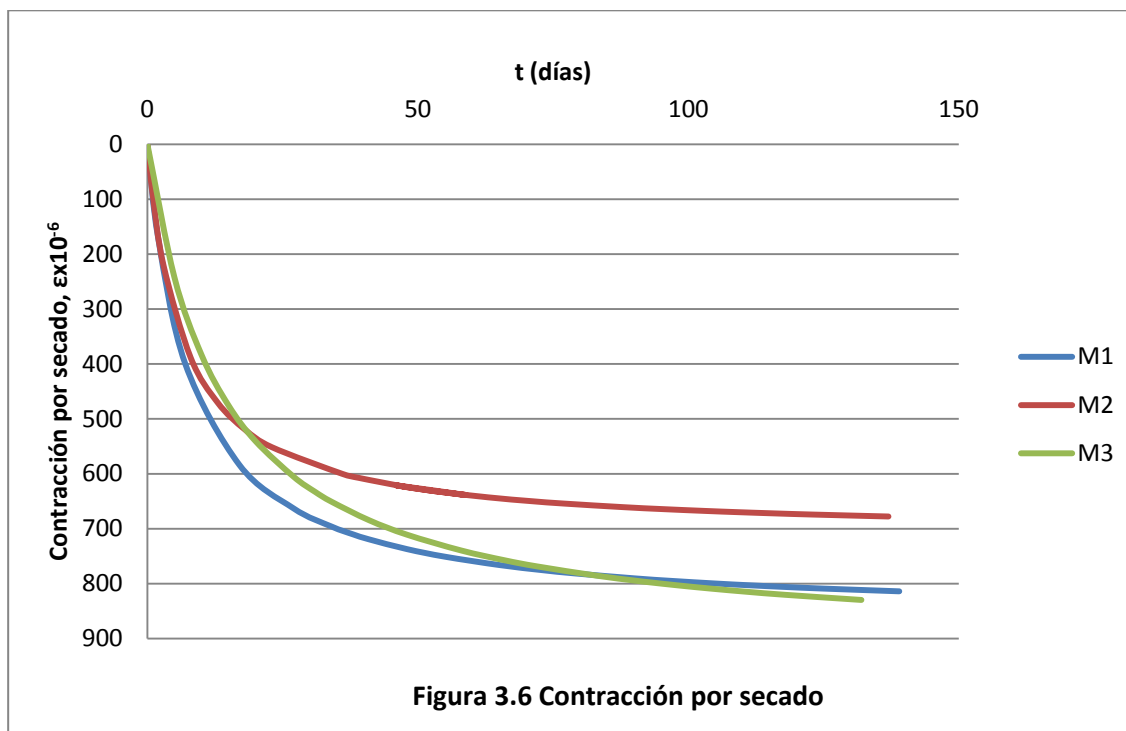


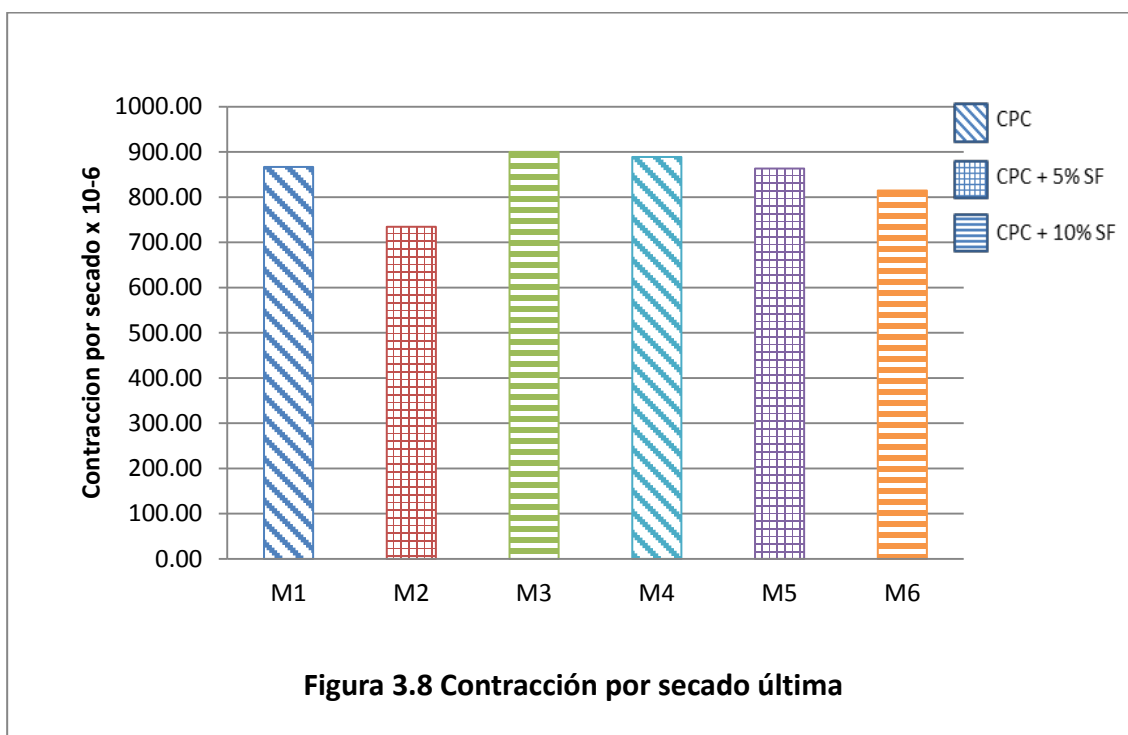
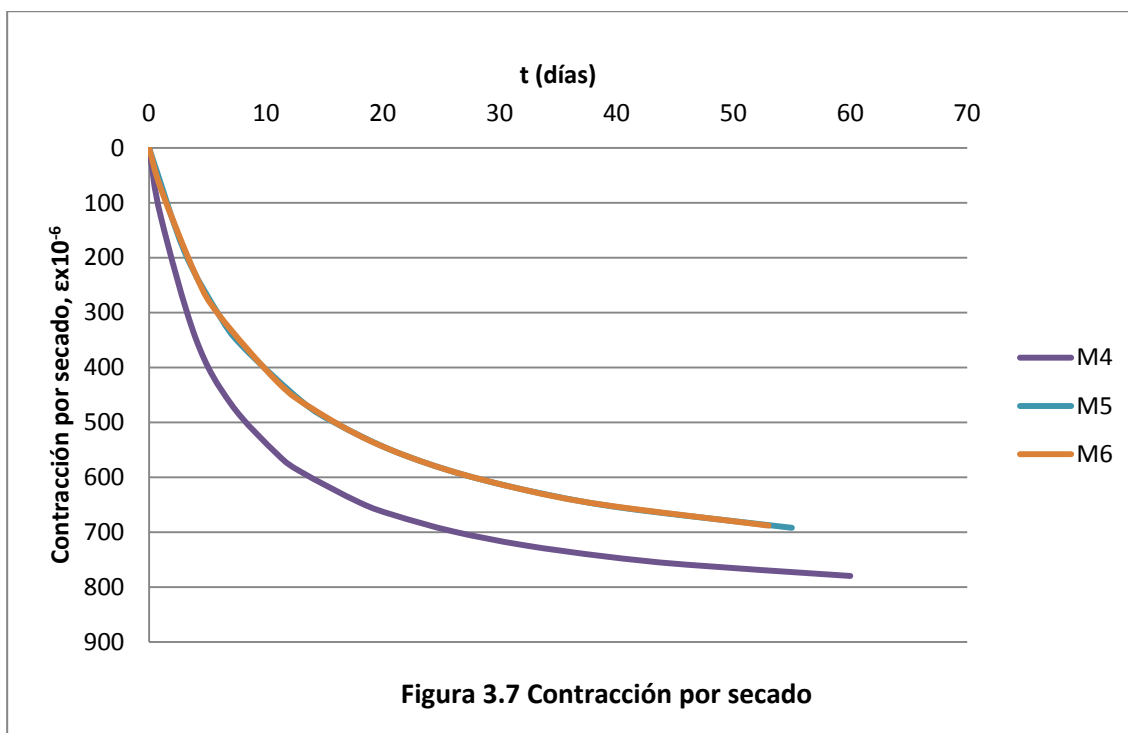
3.2.2.2.- Contracción por secado

En la tabla 3.14 se presenta la contracción última calculada a partir de los resultados obtenidos en un lapso que varió entre 3 y 6 meses de exposición. En un ambiente de 50% de humedad relativa y 23 ± 1.7 °C. También, se incluyen las expresiones que permiten estimar la contracción que se alcanza a cualquier edad t , en días a partir de la contracción última calculada para cada mezcla.

Tabla 3.14 Contracción por secado		
Mezcla	Contracción por secado última $\times 10^{-6}$	Expresión para estimar la contracción a diferentes edades t , en días
M1-C411-SF0-GB20	866.93	$\varepsilon_{t_{M1}} = \left(\frac{t}{8.46 + t} \right) 866.93 \times 10^{-6}$
M2-C390-SF21-GB20	734.59	$\varepsilon_{t_{M2}} = \left(\frac{t}{8.47 + t} \right) 734.59 \times 10^{-6}$
M3-370-SF42-GB20	900.09	$\varepsilon_{t_{M3}} = \left(\frac{t}{10.80 + t} \right) 900.09 \times 10^{-6}$
M4-C462.5-SF0-GB20	888.97	$\varepsilon_{t_{M4}} = \left(\frac{t}{6.72 + t} \right) 888.97 \times 10^{-6}$
M5-C439.4-SF23.1-GB20	863.41	$\varepsilon_{t_{M5}} = \left(\frac{t}{11.50 + t} \right) 869.41 \times 10^{-6}$
M6-C416.2-SF46.3-GB20	814.80	$\varepsilon_{t_{M6}} = \left(\frac{t}{13.61 + t} \right) 814.80 \times 10^{-6}$

En las figuras 3.6 y 3.7 se presentan gráficamente la variación de la contracción con el tiempo y en la figura 3.8 se comparan los valores de las contracciones por secado últimas estimadas para cada mezcla. Se puede observar que las mezclas fabricadas con humo de sílice, salvo en el caso de M3, redujo la contracción por secado última; aunque su efecto fue poco significativo. La contracción última promedio fue de 844.80×10^{-6} .





3.2.2.3.- Resistencia al ataque de sulfatos

En la tabla 3.15 se presentan las expansiones últimas a partir de los resultados obtenidos en lapsos de mediciones que van de 3 a 6 meses; también se presentan las expresiones que permiten estimar la expansión alcanzada, a diferentes edades t en días. Las expresiones se obtuvieron a partir de las determinaciones realizadas, mediante regresiones utilizando el método de mínimos cuadrados.



Tabla 3.15 Resistencia al ataque de sulfatos		
Mezcla	Expansión última x 10 ⁻⁶	Expresión para estimar la expansión a diferentes edades t, en días
M1-C411-SF0-GB20	139.34	$\varepsilon_{t_{M1}} = \left(\frac{t}{27.50 + t}\right) 139.34 \times 10^{-6}$
M2-C390-SF21-GB20	129.87	$\varepsilon_{t_{M2}} = \left(\frac{t}{98.28 + t}\right) 129.87 \times 10^{-6}$
M3-370-SF42-GB20	154.96	$\varepsilon_{t_{M3}} = \left(\frac{t}{91.36 + t}\right) 154.96 \times 10^{-6}$
M4-C462.5-SF0-GB20	170.38	$\varepsilon_{t_{M4}} = \left(\frac{t}{26.79 + t}\right) 170.38 \times 10^{-6}$
M5-C439.4-SF23.1-GB20	128.69	$\varepsilon_{t_{M5}} = \left(\frac{t}{31.36 + t}\right) 128.69 \times 10^{-6}$
M6-C416.2-SF46.3-GB20	73.13	$\varepsilon_{t_{M6}} = \left(\frac{t}{15.57 + t}\right) 73.13 \times 10^{-6}$

Como se puede observar en las figuras 3.9 y 3.10, los resultados obtenidos para las diferentes mezclas indican que las expansiones últimas esperadas, son bastante menores que 500×10^{-6} (0.05%). Las recomendaciones sobre la expansión máxima en morteros que se admite como prueba de su resistencia a los sulfatos indican que ésta debe de ser menor que 0.05% a la edad de un año de inmersión. Aunque el ensayo se realizó en especímenes de concreto y, por lo tanto este límite no es aplicable directamente pero se puede tomar como indicativo del desempeño que se puede esperar de los concretos en estudio.

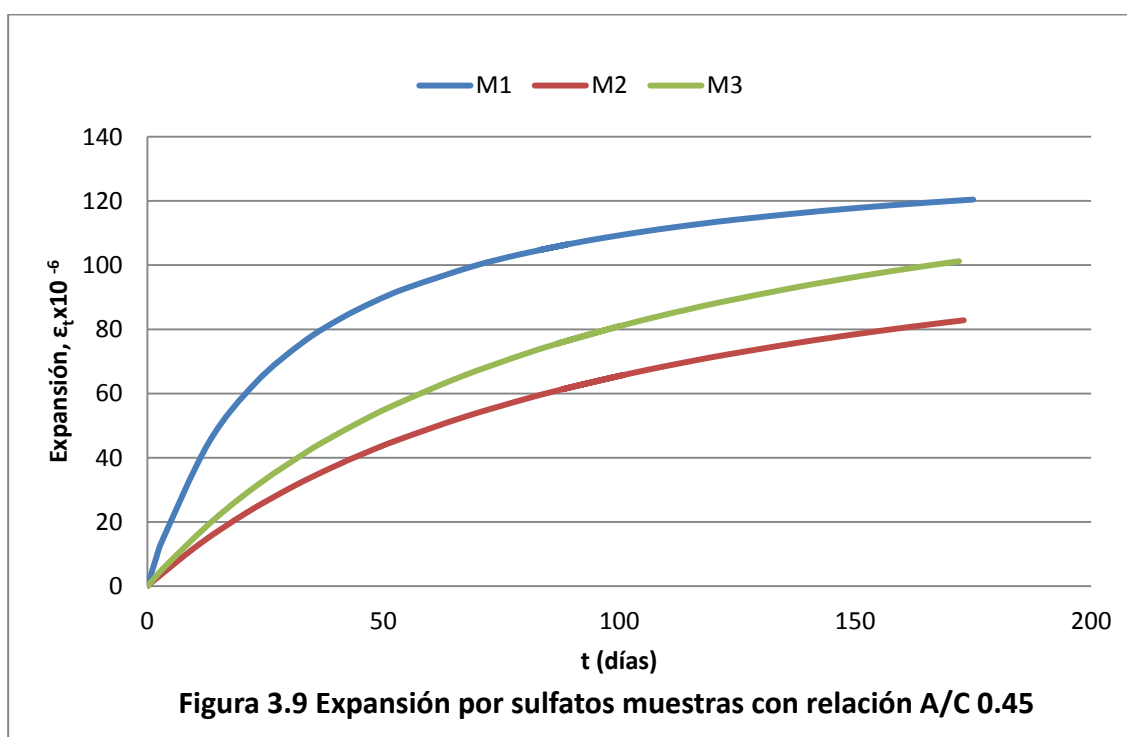
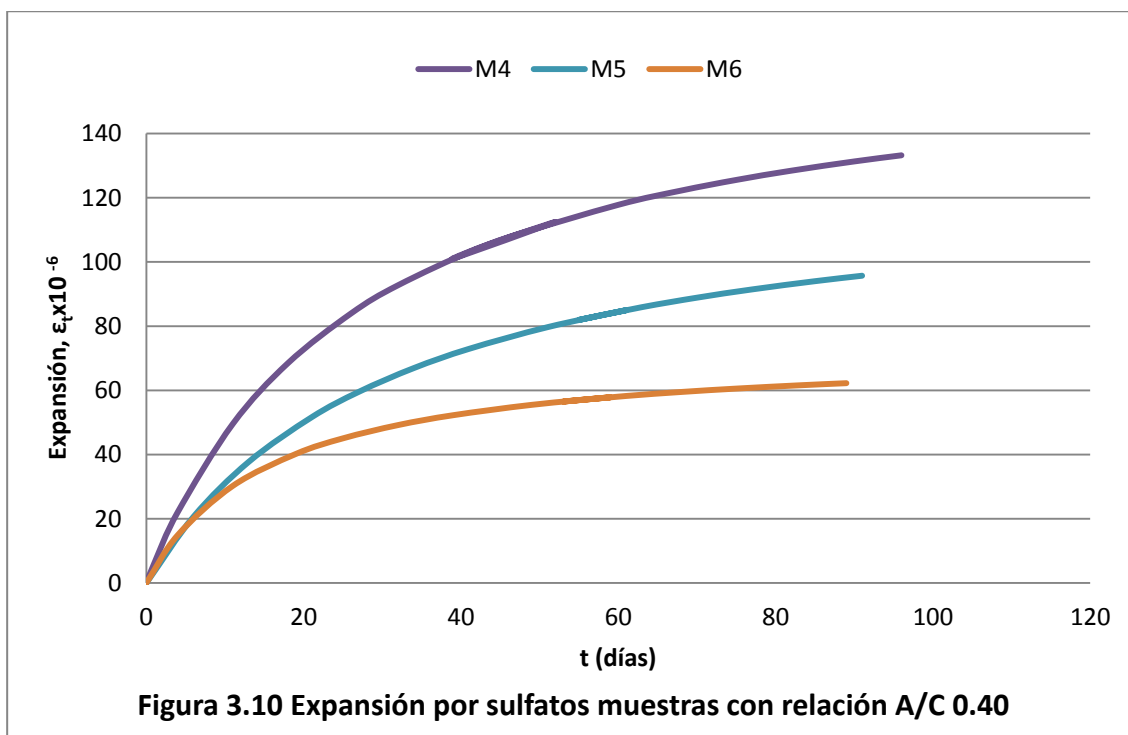
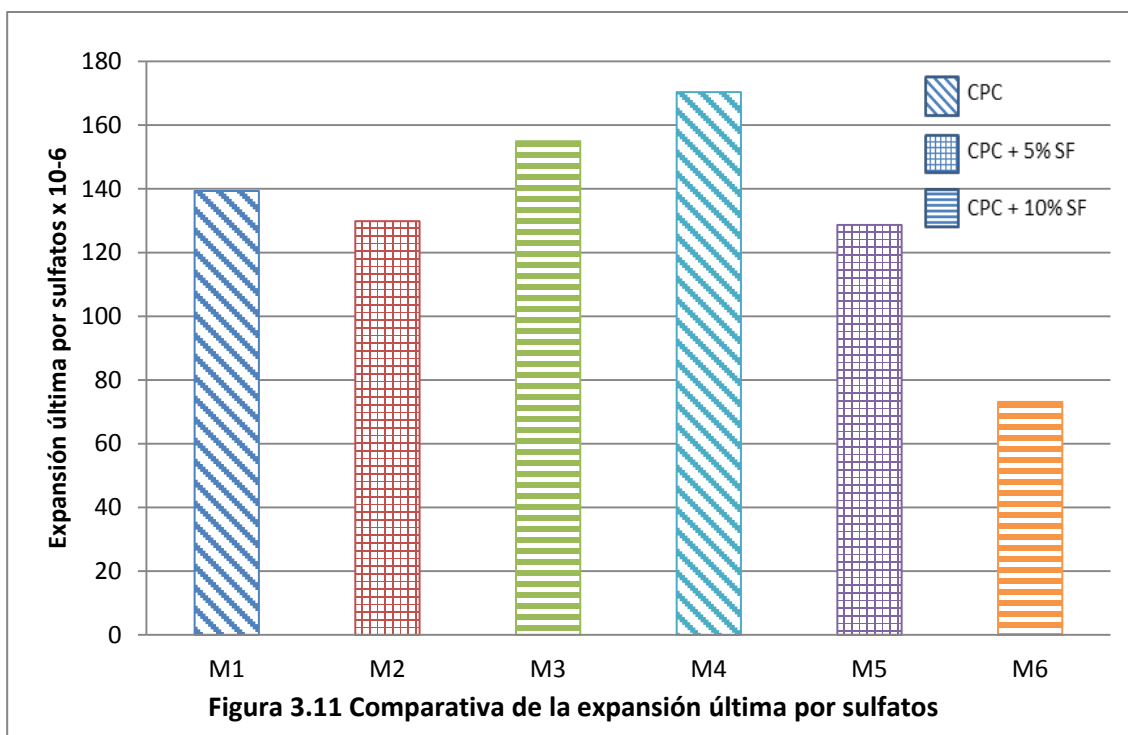


Figura 3.9 Expansión por sulfatos muestras con relación A/C 0.45



En la Figura 3.11 se presentan en un diagrama de barras las expansiones últimas obtenidas, las cuales permiten comparar objetivamente el efecto de las variables en estudio. Así, se puede observar que salvo en el caso de la M3, la incorporación de humo de sílice, redujo la expansión alcanzada en comparación con la de los concretos que no la incluyen. La inclusión de 10% de humo de sílice fue más efectiva que la de 5%.



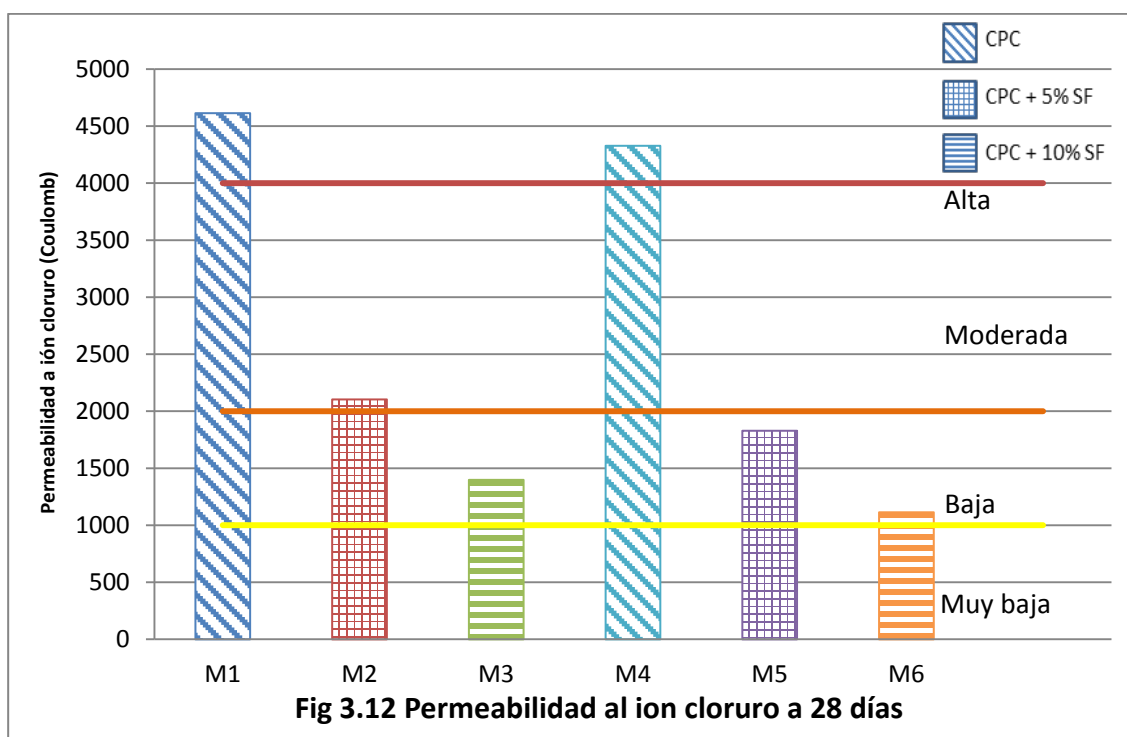


3.2.2.4.- Resistencia al ion cloruro

En la tabla 3.16 se presentan los resultados alcanzados en términos de la cantidad de corriente eléctrica, Coulomb, que pasa a través de las muestras de concreto de 5 cm de espesor y 10 de diámetro, durante un período de 6 horas.

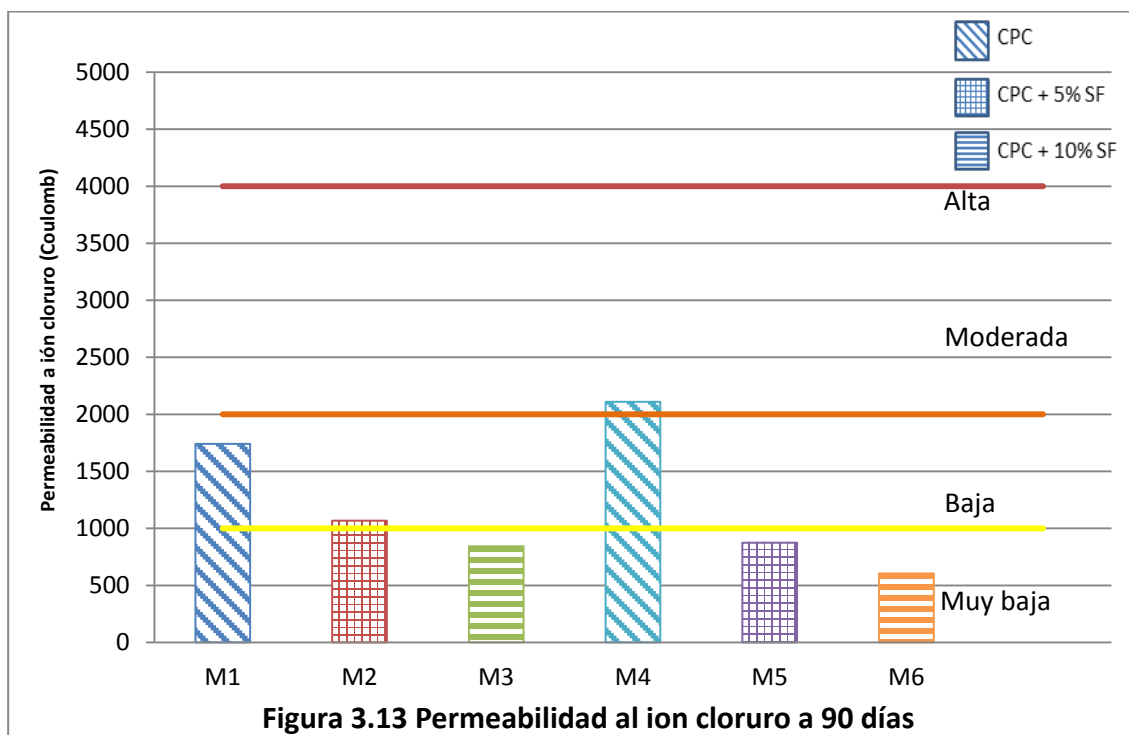
Mezcla	28 días			90 días		
	Coulomb		Categoría	Coulomb		Categoría
M1-C411-SF0-GB20	4614	100%	Alta	1741	100%	Baja
M2-C390-SF21-GB20	2104	-56%	Moderada	1067	-39%	Baja
M3-370-SF42-GB20	1399	-70%	Baja	843	-52%	Muy baja
M4-C462.5-SF0-GB20	4328	100%	Alta	2110	100%	Moderada
M5-C439.4-SF23.1-GB20	1829	-58%	Baja	874	-59%	Muy baja
M6-C416.2-SF46.3-GB20	1114	-74%	Baja	604	-71%	Muy baja

La figura 3.12 presenta en un diagrama de barras los valores de la corriente eléctrica que se transmite a través de los especímenes de ensaye a la edad de 28 días. En ellas se observa la gran influencia que tiene el empleo de humo de sílice al reducir cerca de 50% la permeabilidad al ion cloruro al agregar 5% de microsílíce, respecto a las mezclas de control. La permeabilidad al ion cloruro se redujo pasando de una clasificación alta a una baja.





Del mismo modo, en la figura 3.13 se observa el comportamiento de la cantidad de corriente eléctrica transmitida a través de las muestras de concreto a 90 días logrando el cambio de una clasificación baja a muy baja.





4.- Recomendaciones y conclusiones

El alto contenido de sílice (arriba del 90%) y el tamaño tan pequeño de las partículas de humo de sílice son las características principales del alto desempeño de esta puzolana en el concreto, ya que al disminuir el volumen de los intersticios del concreto y mejorar el S-C-H, es decir, el gel del cemento se logra un concreto sumamente compacto.

Dicha característica es una mejora fundamental en cuanto a la durabilidad del concreto, como se menciona al principio de esta tesis las condiciones de exposición son las principales causas del deterioro del concreto y, aunque no se logró un concreto totalmente durable, si se obtuvo un concreto con una mejora promedio del 15% al desgaste y 64% a la permeabilidad, lo que significa un alto desempeño.

Gracias a la oportunidad de colaborar en uno de los centros de investigación más importantes del país, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, apoyado por el M. I. Carlos J. Mendoza E. e instruido por su colaborador, el Ing. Jorge Villegas G., a continuación presento los principales resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

1. La implementación de humo de sílice como material cementante suplementario crea un concreto en estado fresco altamente cohesivo y con una consistencia muy seca.
2. El humo de sílice incrementa el volumen de aire atrapado en la mezcla de concreto.
3. El mayor incremento (10%) en la resistencia a compresión a 28 días respecto a las mezclas de control se presentó en la mezcla M2, la cual contenía 5% de humo de sílice como material cementante suplementario.
4. Se observa también que conforme aumenta el contenido de humo de sílice en las muestras, el valor de la variación de la resistencia a compresión relativa respecto a la edad disminuye. Esto se debe a que la resistencia a compresión del concreto con humo de sílice tiene un desarrollo considerablemente rápido y con una capacidad de resistencia mayor. Lo que implica un cociente menor.
5. La microsílice disminuye de manera poco significativa la relación entre la resistencia a tensión (indirecta y módulo de rotura) y la resistencia a compresión.
6. Debido a la mínima variación en el módulo de elasticidad del concreto con y sin humo de sílice es posible utilizar la ecuación $E_c = 11917 \sqrt{f'_c}$ para calcular esta característica en ambos casos.
7. Al disminuir la relación de Poisson en las mezclas a 28 días respecto a las de control, el concreto logrado es ligeramente menos deformable.
8. Sin duda, el humo de sílice mejora la resistencia a la abrasión del concreto con disminuciones que varían del 7% al 24% del desgaste en peso.
9. Las mezclas con humo de sílice mostraron una menor expansión ante la presencia de sulfatos, demostrando que el humo de sílice logra disminuir significativamente la porosidad del concreto; evitando que los cristales que forman los sulfatos penetren en el concreto, alteren sus fuerzas internas y por lo tanto su capacidad de carga.



10. Lo anterior se confirma al observar los resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad al Ion cloruro, ya que en las muestras con contenido de microsílíce se logró una disminución de hasta el 74% en la cantidad de corriente eléctrica transmitida por las pastillas de concreto.
11. En conclusión, el humo de sílice mejora las características mecánicas del concreto pero principalmente su durabilidad. Sin embargo, sería interesante comprobar el comportamiento del humo de sílice en mezclas de una resistencia normal, $f'c < 400 \text{ kg/cm}^2$ lo cual seguramente permitirá lograr un concreto con muy buenas características mecánicas y de durabilidad con una relación A/C mayor a 0.45 y así comparar los beneficios del Cemento Portland y el humo de sílice.
12. En este caso el costo de las mezclas no fue un factor influyente durante el diseño, sin embargo se sabe que el costo del cementante (cemento + SF) en los concretos con 5% y 10 % de humo de sílice se incrementó respecto al costo de solo cemento en 26% y 52% respectivamente. Se debe tomar en consideración que la relación agua-cemento utilizada es demasiado baja, implicando un costo muy elevado por unidad de volumen, debido al alto contenido de cemento.



Referencias

1. ACI Committee 211.1 – 91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
2. ASTM C 29 – 97 Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate
3. ASTM C 33 – 03 Standard Specification for Concrete Aggregates
4. ASTM C 39 – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
5. ASTM C 78 – 02 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
6. ASTM C 117 – 95 Standard Test Method for Materials Finer than 75 μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
7. ASTM C 136 – 01 Standard Test Method Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
8. ASTM C 138 – 01a Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete
9. ASTM C 143 – 00 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
10. ASTM C 157 – 99 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
11. ASTM C 192 – 02 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
12. ASTM C 231 – 97 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
13. ASTM C 469 -02 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
14. ASTM C 490 – 00a Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
15. ASTM C 494 – 99a Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
16. ASTM C 496 – 96 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
17. ASTM C 566 – 97 Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Concrete of Aggregate by Drying
18. ASTM C 617 – 98 Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
19. ASTM C 779 – 00 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces
20. ASTM C 1202 – 10 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration
21. ASTM C 1012 – 02 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
22. ASTM C 1064 – 01 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland Cement Concrete
23. ASTM D 75 Practice for Sampling Aggregates
24. Alvares Reyes, Adrián sustentante Concretos de alto desempeño con agregados basálticos 2001
25. Fidjestøl Per, autor High-Performance Prefabricated Silica Fume Concrete for Infraestructure, Proceedings of the PCI/FHWA, International Symposium on High Performance Concrete, New Orleans, Louisiana, 1997



26. González Cuevas, Oscar M., autor Aspectos fundamentales del concreto reforzado / México: Limusa, c2005
27. Hernández Castañeda, O., Mendoza Escobedo, C.J., autor Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, INGENIERÍA Investigación y Tecnología VII. 1. 57-70, 2006
28. Hooton, R.D., autor Influence of silica fume to the chloride penetration resistance of concrete, Proceedings of the PCI/FHWA, International Symposium on High Performance Concrete, New Orleans, Louisiana, 1997
29. Kosmatka, Steven H., autor Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association
30. Li, Zongjin, autor Advanced concrete technology Hoboken, New Jersey Wiley, c2011
31. Mena Ferrer, Manuel, autor Durabilidad de estructuras de concreto en México previsiones y recomendaciones, imcyc
32. Mena Ferrer, Manuel, autor Manual de Tecnología del Concreto, CFE, Tomos I, II, III
33. Siddique, Rafat, autor Supplementary cementing materials Berlin Springer, 2011
34. Vásquez Paniagua, Eric sustentante Concreto de alto desempeño con elevado consumo de ceniza volante 2007