

91
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“EL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, SU
ELABORACION Y SUS ALCANCES EN
NUESTRO PAIS.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
OSCAR AGUSTIN SEGURA GARFIAS

ASESOR: ING. SERGIO E. ZERECERO GALICIA.



MEXICO, D. F.

250564 1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-170/96

Señor
OSCAR AGUSTIN SEGURA GARFIAS
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. SERGIO E. ZERECERO GALICIA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"EL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, SU ELABORACION Y SUS ALCANCES EN NUESTRO PAIS."

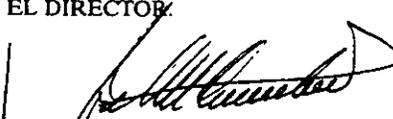
INTRODUCCION

- I. LOS ANTECEDENTES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**
 - II. CARACTERISTICAS GENERALES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**
 - III. LA NORMATIVIDAD Y LAS ESPECIFICACIONES QUE SE DEBEN CUMPLIR**
 - IV. ELABORACION DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**
 - V. LAS PRUEBAS DE LABORATORIO**
 - VI. ANALISIS ECONOMICO, CONSTRUCTIVO Y DE DISEÑO**
 - VII. APLICACIONES**
- CONCLUSIONES**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 21 de enero de 1997.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*lmf

... y pudiese dedicar este trabajo en primer lugar
a mis padres, a mis hermanos y a mis profesores, si embargo,
quiero también dedicarlo a la máxima casa de estudios de nuestro país,
la Universidad Nacional Autónoma de México
institución que me brindó la oportunidad de ser un profesionista.



“ Por mi Raza Hablará el Espíritu ”



índice

1	INTRODUCCION
1	1. El ingeniero civil y la sociedad
2	2. Trascendencia histórica del concreto
2	3. La búsqueda de nuevas alternativas para solucionar problemas de ingeniería
3	4. La utilización del concreto como la mejor alternativa
4	5. Las inovaciones en la tecnología del concreto
5	Capítulo I. LOS ANTECEDENTES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA
5	I.1 Definición
7	I.2 Comienzo de los estudios
8	I.3 Desarrollo de los estudios
11	I.4 Los resultados encontrados
15	I.5 La experiencia en nuestro país



17	Capítulo II. CARACTERISTICAS GENERALES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA
17	II.1 Propiedades físicas y químicas
17	II.1.1 Trabajabilidad
19	II.1.2 Bombeabilidad
19	II.1.3 Tiempo de fraguado
20	II.1.4 Peso unitario
21	II.1.5 Módulo de elasticidad
26	II.1.6 Módulo de Poisson
27	II.1.7 Módulo de ruptura
28	II.1.8 Contracción por secado
31	II.1.9 Fluencia
32	II.1.10 Evolución de calor debido a la hidratación
34	II.1.11 Permeabilidad
35	II.1.12 Durabilidad
36	II.2 Comportamiento del material
36	II.2.1 Resistencia a la compresión
38	II.2.2 Resistencia a la tensión
42	II.2.3 Resistencia a la flexión
44	II.2.4 Resistencia ganada con la edad
44	II.2.5 Resistencia a la fatiga
45	II.2.6 Resistencia al fuego
45	II.2.7 Resistencia a la corrosión
46	II.2.8 Resistencia a la congelación y deshielo
46	II.2.9 Deformaciones
47	II.3 Los materiales para su elaboración y su importancia de cada uno de ellos
47	II.3.1 Cemento
48	II.3.2 Gravas
51	II.3.3 Arenas
52	II.3.4 Agua
52	II.3.5 Aditivos
54	II.3.6 Adiciones Minerales
56	II.4 Relación agua-cemento



57	Capítulo III. LA NORMATIVIDAD Y LAS ESPECIFICACIONES QUE SE DEBEN CUMPLIR
57	III.1 Marco de referencia
58	III.2 El Instituto Americano del Concreto (ACI)
59	III.3 La Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM)
60	III.4 La Norma Oficial Mexicana (NOM)
61	III.5 El vínculo de este material con las Normas Técnicas Complementarias (NTC), y con el Reglamento de Construcciones del DF.
64	Capítulo IV. ELABORACION DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA
64	IV.1 Consideraciones preliminares
68	IV.2 Diseño de la mezcla de alta resistencia (proporcionamiento)
86	IV.3 Dosificación
88	IV.4 Mezclado del concreto
88	IV.5 Transporte y colocación
90	IV.6 Compactación
90	IV.7 Métodos de curado
91	IV.8 Control de Calidad
95	Capítulo V. LAS PRUEBAS DE LABORATORIO
95	V.1 Importancia de las pruebas de laboratorio
96	V.2 Pruebas del cemento
97	V.3 Pruebas de los agregados
98	V.4 Pruebas del concreto fresco y endurecido
99	V.5 Interpretación de los resultados



EL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, SU ELABORACIÓN Y SUS ALCANCES EN NUESTRO PAÍS

102	Capítulo VI. ANALISIS ECONOMICO, CONSTRUCTIVO Y DE DISEÑO
102	VI.1 Consideraciones del diseño estructural
106	VI.2 Análisis constructivo
106	VI.3 Análisis económico
107	VI.4 Evaluación del análisis
108	VI.5 Ventajas y desventajas
111	Capítulo VII. APLICACIONES
111	VII.1 En edificaciones
112	VII.2 En cimentaciones
112	VII.3 En obras hidráulicas y sanitarias
113	VII.4 En vías terrestres
113	VII.5 Aplicaciones especiales
115	CONCLUSIONES.
117	BIBLIOGRAFIA



Introducción

El ingeniero civil y la sociedad.

Los ingenieros civiles han contribuido de manera fundamental a conformar nuestra civilización; como sabemos la ingeniería tiene su origen en el momento mismo en que el hombre logró mediante su habilidad e ingenio aprovechar racionalmente los recursos naturales que le rodeaban para su propio beneficio.

A través de la historia los grupos sociales instituidos ya como comunidades, comenzaron a demandar diferentes servicios necesarios para sobrevivir, primero surgieron algunas prioridades importantes, vivienda, agua, alimentos, drenaje, energía y servicios médicos. Este fenómeno social trajo como consecuencia el desarrollo tecnológico que estaba a la par de conocimientos científicos y adelantos técnicos, es entonces en ese momento en que la ingeniería se comienza a especializar en diferentes ramas y en particular la Ingeniería Civil para contribuir al desarrollo socio-económico.

La transformación social continuó su marcha y sus necesidades se acrecentaron y modificaron, en poco tiempo las prioridades de la sociedad comenzaron a requerir de medios de comunicación y transporte conformándose así los propios sistemas de comunicación.

Muy pronto la contribución del ingeniero civil comienza a destacar en todas estas tareas encaminadas al mejoramiento del nivel de vida de la sociedad.

Actualmente, el ingeniero civil conoce y se desarrolla en construcción, estructuras, geotécnica, hidráulica, sanitaria, sistemas, transportes y edificación con una sola finalidad, un trabajo eficiente puesto al servicio del hombre.

En conclusión, el ingeniero civil desarrolla una labor de búsqueda del beneficio, lo que lo lleva a estar estrechamente ligado a la sociedad.



Trascendencia histórica del concreto.

Como sabemos, el concreto es un material pétreo artificial obtenido de la mezcla en proporciones determinadas de dos componentes: agregados y pasta.

La pasta compuesta de cemento y agua y los agregados compuestos de arena y grava o piedra triturada, la pasta rodea a los agregados, conformando un material heterogéneo, esto en cuanto a su composición interna, pero en contraste, sus características externas como versatilidad, durabilidad y economía lo han convertido en el material de construcción más usado.

Sería difícil tratar de definir una fecha exacta de la aparición del concreto, sin embargo este producto es empleado desde los orígenes mismos de la historia con los primeros pueblos sedentarios, también se dice que los orígenes datan del siglo II a.c., con el uso de la piedra Pómez en la antigua Roma, en 1756 se utilizó un mortero con un cementante puzolánico para la construcción de la cimentación del faro de *Edystone*, en 1774 *Loriet* fue conocido por inventar un tipo especial de mortero, pero en el año de 1824 se desarrolló y se patentó el "Cemento Portland" con lo que se impulsó con mayor fuerza el uso de concretos.

Posteriormente, *Lambot* en 1849 y *Monier* en 1865 comenzaron a experimentar con concretos y acero embebido naciendo así lo que conocemos como "Concreto Reforzado".

Los estudios avanzaban y para el año de 1919 se genera un importante descubrimiento "la relación agua - cemento (A/C)", y ya más recientemente en los años 30's se incorporaron los "aditivos" a la mezcla del concreto.

El desarrollo del concreto ha permitido la construcción de innumerables estructuras desde las más simples como losas, vigas, columnas, ménsulas, pilotes, así como sistemas de cimentación, puentes de armado simple, puentes pretensados, carreteras, túneles, tuberías de diferentes diámetros, estructuras prefabricadas, como elemento de construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable y de alcantarillado, acueductos, canales artificiales, conducciones a superficie libre, conducciones a presión, tanques de almacenamiento, presas, represas, hasta la construcción de proyectos como terminales ferroviarias, portuarias, aeroportuarias, plataformas petroleras, proyectos hidroeléctricos, termoeléctricos, nucleoeleéctricos, y un sin fin de aplicaciones ilimitadas; como vemos la historia del concreto está ligada a la búsqueda de los materiales utilizados por el hombre para que sus construcciones resulten seguras y resistentes a la acción del tiempo y elementos, su consumo y producción reflejan el progreso y la prosperidad de la sociedad y del hombre mismo de ahí la trascendencia histórica del concreto.

La búsqueda de nuevas alternativas para solucionar problemas de ingeniería.

Si bien es cierto que la Ingeniería Civil está compuesta de ciertas disciplinas, una de las más importantes sin duda es la de "Sistemas y Planeación"; como sabemos, el ingeniero civil se convirtió en un aliado natural de el progreso, la creatividad productiva, el trabajo eficiente y la planeación.

La Planeación es la manera de proyectar un futuro deseado y los medios efectivos para conseguirlo. Cuando en la práctica profesional se presentan problemas de ingeniería que cada vez se vuelven más complejos, el ingeniero civil se ve en la necesidad de utilizar métodos de planeación para encontrar alternativas de solución.



Una de las herramientas que actualmente utiliza el ingeniero civil es el método de la **Planeación Normativa**, este procedimiento permite identificar tres elementos fundamentales o subsistemas:

- La formulación del problema.
- La identificación y diseño de soluciones, y
- El control de resultados

a su vez estos subsistemas se dividen en las siguientes actividades:

“Formulación del problema”:

- a) Planteamiento de la problemática
- b) Investigación de lo real
- c) Formulación de lo deseado
- d) Evaluación y diagnóstico

“Identificación y diseño de soluciones”:

- a) Generación y evaluación de alternativas
- b) Formulación de bases estratégicas
- c) Desarrollo de la solución

“Control de resultados”:

- a) Planeación del control
- b) Evaluación

Y es precisamente en el subsistema de Identificación y diseño de soluciones dónde el ingeniero civil debe tener la habilidad y la visión para generar y evaluar de una manera eficiente las alternativas de solución para los problemas de ingeniería que se le presenten.

La utilización del concreto como la mejor alternativa.

El uso del concreto en cualquier tipo de obra o como elemento de prefabricación debe representar una alternativa factible, aceptable y bondadosa frente a cualquier otro tipo de material.

La evaluación del uso del concreto debe tomar en cuenta ciertas variables que en su conjunto nos darán un resultado más adecuado.

Algunas de las variables más importantes en la utilización del concreto son:

- Resistencia
- Durabilidad
- Economía
- Calidad



y en torno a estos puntos cuando el concreto cumple con variables como; disponibilidad de materiales, capacidad técnica para producirlo y capacidad organizativa para elaborarlo, entonces se dice que la utilización del concreto es una alternativa "Factible".

Cuando cumple con variables como; conformidad del diseñador, del proyectista, del constructor, de los propietarios, etc., entonces se dice que es una alternativa "Aceptable".

Y cuando cumple con variables como; cumplimiento de los requerimientos de diseño estructural, es decir, que se comporte adecuadamente y que represente en la realidad todas las hipótesis que el ingeniero al diseñar la estructura tomo en cuenta para la estructura misma, requerimientos constructivos así como costos mínimos entonces se dice que la utilización del concreto es una alternativa con un "grado de bondad adecuado".

Las inovaciones en la tecnología del concreto.

En los últimos años se han generado numerosas inovaciones en la tecnología del concreto que han dado como resultado nuevos concretos con propiedades diferentes a las que el ingeniero estaba acostumbrado a utilizar para sus diseños, algunos de estos concretos aún no encuentran aplicación, otros son de valor potencial comprobado y otros ya comienzan a utilizarse con mucho éxito.

Algunos de los desarrollos que se comenzaron a gestar desde la segunda mitad de la década de los 80's y que ahora continúan evolucionando exitosamente son los que se presentan en la siguiente tabla;

CONCRETOS ESPECIALES FABRICADOS CON CEMENTO PORTLAND		
Concreto con aire incluido Concreto celular Concreto colado centrifugamente Concreto coloidal Concreto consolidado por apisonamiento energético Concreto modificado con epóxicos Ferrocemento Concreto reforzado con fibras Concreto fluido Concreto con ceniza volante Concreto con granulometría discontinua	Concreto de gran peso Concreto de alta resistencia a edad temprana Concreto de alta resistencia Concreto de alta deformación Concreto pre-empacado Concreto modificado con látex Concreto de baja densidad Concreto masivo Concreto ligero de resistencia moderada Concreto modificado con polímeros Concreto con agregado precolado	Concreto presforzado Concreto compactado con rodillos Concreto para blindaje Concreto lanzado Concreto compensador de contracción Concreto con humo de sílice Suelo-cemento Concreto ligero estructural Concreto superplastificado Concreto tratado al vacío Concreto de revenimiento nulo
CONCRETOS ESPECIALES QUE NO UTILIZAN CEMENTO PORTLAND		
Concreto acrílico Concreto asfáltico Concreto epóxico	Concreto de látex Concreto de fosfato de magnesio Concreto de metacrilato de metilo (MMA)	Concreto de polímeros Concreto de silicato de sodio Concreto de azufre

Tabla 1



Capítulo I

Los antecedentes del concreto de alta resistencia

Objetivo: Definir el significado del concreto de alta resistencia dentro del marco de la tecnología del concreto, además de conocer su desarrollo y evolución.

I.1 Definición.

Partiendo de la definición del concreto convencional de un material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante y de partículas de agregado adoptando diferentes formas, podemos decir que, el concreto de alta resistencia es un material que tiene una resistencia a compresión mayor a la que se considera como convencional en la industria de la construcción.

La resistencia normal varía entre 150 y 300 kg/cm^2 y para concreto presforzado el promedio de resistencia es de entre 350 y 400 kg/cm^2 , por lo tanto, los concretos de alta resistencia son aquellos que soportan 420 kg/cm^2 o mayores resistencias a compresión determinadas en un cilindro de concreto a los veintiocho días de vida.

El valor de 420 kg/cm^2 , (41 Mpa) se toma como definición debido a que es a partir de este donde se comienzan a manifestar los cambios en el uso de cementos, agregados gruesos, agregados finos, incorporación de aditivos, módulos de finura y relaciones agua - cementantes (A/C) distintas a las que comúnmente se utilizan para producir concretos normales, el parámetro de resistencia y los factores mencionados, están ligados al desarrollo de nuestro país con respecto a este tipo de material.

Una de las primeras definiciones que aparecen de una manera más formal es la de *Neville* que dice que los concretos de alta resistencia son aquellos que presentan en cilindros de concreto resistencias a compresión superiores a 410 kg/cm^2 , (40 MPa).

En el primer capítulo del ACI 363 R-92 (Reporte del comité 363 del Instituto Americano del Concreto) se mencionan distintos valores de resistencia a partir de los cuales se considera al concreto como de alta resistencia, en algunas regiones se produce concreto comercial de 630 kg/cm^2 , (62 Mpa), en otras partes se elaboran concretos con fuerzas que van de los 840 kg/cm^2 , (83 Mpa) hasta los $1,050 \text{ kg/cm}^2$ en compresión.



Por otro lado, la FIP (Federación Internacional del Pretensado) y el CEB (Comité Europeo del Concreto) definen al concreto de alta resistencia como aquel cuya resistencia a compresión determinada mediante un cilindro de concreto este comprendida entre los 610 kg/cm^2 , (60 MPa) y los $1,320 \text{ kg/cm}^2$, (130 MPa) con agregados convencionales.

Sin embargo en países como el nuestro donde el desarrollo de este tipo de concreto es relativamente nuevo los 630 kg/cm^2 , (62 Mpa) son considerados como de alta resistencia.

Como vemos, puede ser difícil tratar de determinar algún parámetro base para definir al concreto de alta resistencia, ya que al paso del tiempo la resistencia a compresión sigue aumentando y el desarrollo en los países no es el mismo.

Lo cierto es que actualmente se están consiguiendo resistencias de más de $1,400 \text{ kg/cm}^2$, (20,000 psi) o (138 MPa) en laboratorio.

La curva típica utilizada para visualizar el comportamiento del concreto es la llamada curva esfuerzo - deformación, que es reflejo de ensayos de cilindros sujetos a carga axial; cuando se prueban concretos de alta resistencia se pueden observar los rangos de esfuerzo a compresión que soportan estos concretos.

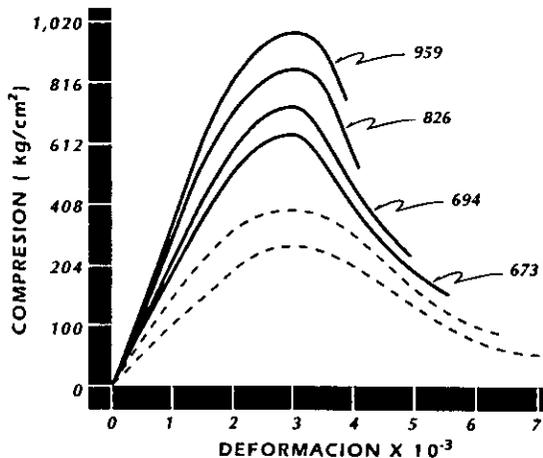


Figura 1

En la gráfica se visualizan las diferencias en resistencia que se derivan del uso de concretos con alta resistencia, aquí se obtienen esfuerzos a compresión que van de los 673 kg/cm^2 hasta los 959 kg/cm^2 ; otro elemento importante que se observa es la marcada inclinación de la curva descendente para las altas resistencias.

El valor de la deformación unitaria para este ensayo se aproxima al valor de los concretos convencionales.

Este tipo de concretos están clasificados dentro de los llamados concretos de alto comportamiento y su principal característica es su alta resistencia a la compresión pero otras características importantes que se derivan de ésta son, su incremento considerable de durabilidad, incrementos en su módulo de elasticidad (rigidez), y muy bajos porcentajes de permeabilidad.

Sus componentes principales son muy similares a los de un concreto normal o convencional; cemento, agregados, aditivo y agua pero se requiere de propiedades especiales de cada uno de ellos, además de



técnicas de colocación, compactación y curado cuidadosamente aplicadas.

Se puede decir que la diferencia más importante está en que se incrementa el contenido de cemento distribuyéndolo de una manera tan uniforme como sea posible, esto tiene por consecuencia que la relación agua - cemento o cementantes se deba reducir a valores menores o por lo menos iguales a 0.4 y por tanto se deberán de agregar aditivos reductores de agua o reductores de agua de alto rango (superplastificantes) para producir mezclas trabajables y en ocasiones fluidas.

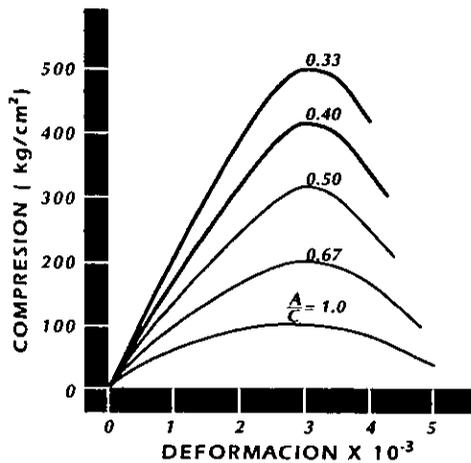


Figura 2

Cuando la relación agua cemento o cementantes disminuye, la curva es muy pronunciada en su parte superior, la rama descendente es más corta y también la pendiente de la tangente inicial a la curva aumenta a medida que crece la resistencia.

1.2 Comienzo de los estudios.

Tal vez en algún momento los ingenieros estructuralistas y constructores se vieron limitados al utilizar concretos que no podían pasar de un cierto rango de resistencia a compresión, y seguramente con la aparición de aditivos en el año de 1938 y con nuevos materiales cementantes se tuvo la iniciativa de comenzar a experimentar con concretos que reportaran esfuerzos a compresión mayores a los que comúnmente se utilizaban.

Como sabemos, gran parte de las innovaciones en ingeniería surgen de alguna necesidad y cuando se tuvo la necesidad de contar con materiales de construcción con mejores propiedades mecánicas, más durables y con mejor calidad entonces comenzaron los estudios de materiales como el concreto de alta resistencia.

Se pueden mencionar tres factores fundamentales que proporcionan la aparición y el comienzo de los estudios del concreto de alta resistencia; Los desarrollos en países como Japón y Alemania en lo que



respecta a los aditivos tiene como resultado nuevos productos químicos, los agentes dispersantes de alto poder que incorporados al concreto permiten una dramática reducción de agua de mezclado. Estos aditivos químicos son llamados superfluidificantes o reductores de agua de alto rango.

Segundo, que los avances de la industria del cemento propician la aparición de nuevos cementos con mejores características, en especial la de resistencia, y por último, las investigaciones realizadas a los subproductos volátiles de la industria de las ferroleaciones que permiten incorporar nuevos minerales al concreto que mejoran sus propiedades. Este mineral tiene el nombre de humo de sílice o microsilíce.

El desarrollo y el uso del concreto de alta resistencia ha sido un proceso evolucionario que comienza con la resistencia máxima de concretos convencionales y que continúa hacia concretos de resistencias más grandes.

Los concretos con alta resistencia se comenzaron a elaborar y desarrollar desde los años sesentas pero es hasta nuestros días cuando se ha comenzado a comercializar y como veremos más adelante, en nuestro país la práctica de este material es todavía incipiente.

Las necesidades de la industria del prefuerzo en el mundo condujeron a las primeras aplicaciones del concreto de alta resistencia y el desarrollo de edificios altos fue un poderoso incentivo para la investigación del material, lógicamente, las grandes resistencias en concreto requirieron de nuevas estimaciones de las ecuaciones que determinan sus características y de estudios minuciosos de todas y cada una de sus propiedades tanto físicas como químicas.

Cuando la aparición de este material se hizo una realidad, instituciones como la PCA, (Asociación del Cemento Portland) comenzaron a realizar investigaciones, revisiones y a recopilar información ya que consideraban que era un gran atractivo para la industria de la construcción. Estos estudios e investigaciones se encaminaron a revisar las características de las proporciones de las mezclas, las técnicas de compactación, condiciones de curado, y una revisión profunda de los factores que afectan el aumento de resistencia en concretos.

Es evidente que a medida que progresaban los avances en cuanto a los materiales y a la elaboración del concreto de alta resistencia, también era necesario recabar información para actualizar los criterios de diseño y así poder tener mejores bases para el diseño estructural de cualquier miembro.

Con el paso del tiempo y con los avances sobre este material se comenzaron a gestar cambios en el reglamento de construcciones ACI de tal manera que se creó el ACI 363-R, (State - of - the - Art Report on High - Strength Concrete), el cuál es constantemente actualizado.

1.3 Desarrollo de los estudios.

Durante el comienzo y el desarrollo de los estudios se ha llegado a determinar un elemento importante que es, que el comportamiento estructural del concreto de resistencia normal y de alta resistencia es similar. En un programa de investigaciones de tres años que inició en 1989 encabezado por la PCA (Asociación del Cemento Portland) y en base a pruebas y evaluaciones se encontró que muchas de las reglas para la práctica del concreto convencional se aplican también al concreto de alta resistencia, y así como esta investigación, otras confirmaron la adaptabilidad de muchos parámetros y procedimientos de pruebas establecidos para concreto normal.

En Japón se inició un programa llamado "Desarrollo de concretos para la construcción de edificios",



usando concretos de alta resistencia en el año de 1988, el proyecto duró cinco años realizado por el Ministerio de Construcción.

En Canadá el gobierno estableció el "Network of Centers of Excellence" apoyando estudios e investigaciones de diferentes universidades y empresas privadas sobre concretos de alto comportamiento.

En 1994, los Estados Unidos realizaron dos programas de investigación que son de lo más actual en lo que respecta a este material, se llevaron a cabo por laboratorios, organismos gubernamentales, productores de concreto, consultores de la PCA y el ACI, el primero de ellos "Cube Test Program", destinado a estudiar cuestiones relacionadas con el desarrollo de la resistencia, calor de hidratación, resistencia in situ, para concretos con relación (A/C) de 0.22 a 0.32 y resistencias entre (70 y 140 MPa), 710 y los 1,421 kg/cm². Se analizaron las mezclas con y sin aire incluido. El segundo programa "Caisson Test Program" se dirigió a obtener información en cuanto al uso de concretos de alta resistencia en estructuras como pilotes de gran diámetro para fundar estructuras de edificios, fundamentalmente, hacia las influencias del calor de hidratación, permeabilidad, fisuración y disipación de calor.

En general, el desarrollo de los estudios ha permitido determinar el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, el módulo de ruptura, los esfuerzos de tensión, los esfuerzos de fatiga, las propiedades térmicas, la generación de calor debido a la hidratación, la resistencia ganada con la edad, la resistencia al deshielo y heladas, la durabilidad, la permeabilidad, la contracción por secado, la resistencia al fuego y a la corrosión, etc.

Por otra parte, se han desarrollado los criterios de diseño para columnas, para miembros estructurales sujetos a flexión, elementos sujetos a fuerza cortante, además de revisar el espesor de grietas y el comportamiento por adhesión.

Sin embargo, no podemos hablar del desarrollo de un material si no se mencionan los primeros usos en proyectos reales; como ya se dijo, los primeros concretos catalogados como de alta resistencia aparecen en la década de los sesentas, y una de las aplicaciones más importantes a partir de su aparición fueron los edificios altos. En la tabla 2 se enumeran algunos edificios altos que se construyeron con concretos de alta resistencia en algunos de sus elementos estructurales:

EDIFICIO	UBICACION	AÑO	RESISTENCIA DEL CONCRETO	
			Mpa	kg/cm ²
Lake Point Tower	Chicago	1965	52	528
One Shell Plaza	Houston	1968	41	416
Royal Bank Plaza	Toronto	1975	61	620
River Plaza	Chicago	1976	55	560
Helmsley Palace Hotel	Nueva York	1978	62	630
SE Financial Center	Miami	1982	48	487
Petrocanada Building	Calgary	1982	50	507
Chicago Mercantile Exchange	Chicago	1982	62	630
Pacific Park Plaza	Emeryville, CA	1983	45	457
Columbia Center	Seattle	1983	66	670
Interfirst Plaza	Dallas	1983	69	700
900 N. Michigan Annex	Chicago	1986	97	985
Two Union Square	Seattle	1988	115	1,167

Tabla 2



El concreto de alta resistencia también se ha utilizado en proyectos como puentes desde finales de la década de los sesentas. En la tabla 3 se muestran algunos desarrollos de puentes fabricados con concretos de alta resistencia;

PUENTE	UBICACION	AÑO	CLARO (mts.)	RESISTENCIA DEL CONCRETO	
				Mpa	kg/cm ²
Willows Bridge	Toronto	1967	48	41	416
San Diego a Colorado	California	1969	43	41	416
Pasco - Kennewick	Washington	1978	299	41	416
Huntington a Proctorville	Ohio	1984	274	55	560
Annacis	British Columbia	1986	465	55	560
Tower Road	Washington	1987	49	62	630
Boknasunder	Noruega	n/d	190	60	610

Tabla 3

Como vemos, el desarrollo de los estudios ha permitido incrementar los rangos de resistencia a compresión, actualmente en lugares como Australia se manejan concretos con 900 Kg/cm² en columnas y muros de edificios, en Alemania, Francia, Noruega y Estados Unidos de Norteamérica se reportan concretos especiales de hechos en laboratorio de hasta 2,000 Kg/cm².

Los desarrollos actuales y futuros se dividen en dos vertientes, el desarrollo de los materiales y, los problemas de diseño estructural. Los estudios sobre materiales está encaminado hacia la cuantificación de las características del cemento que afecta la resistencia y hacia proporciones de las mezclas para resistencias que rebasen los 1,400 Kg/cm².

Con lo que respecta al diseño estructural, los estudios están dirigidos hacia la provisión de datos técnicos de pruebas sobre longitudes de desarrollo del acero de refuerzo.

Los desarrollos futuros buscarán proporcionar más datos para el reglamento de construcción ACI.

También se trabajará sobre estudios de carga axial y refuerzo en columnas, cortante por punzonamiento, ductilidad, resistencia al esfuerzo cortante en muros, resistencia al esfuerzo de vigas peraltadas, transferencia de cargas a columnas a través de losas, torsión y deflexión a largo plazo.

En cuanto al desarrollo de los materiales del concreto de alta resistencia, se proporcionará más información sobre las propiedades de mezclas de mayor resistencia, se amplían los conocimientos sobre el módulo de elasticidad, los efectos del tamaño del cilindro de pruebas, y resistencias de corazón v.s. cilindro, así como la realización de más investigaciones sobre la durabilidad particularmente en el área de los requisitos de inclusión de aire.

Como vemos el desarrollo y estudio de los concretos de alta resistencia se convierten en un esfuerzo conjunto entre:

- laboratorios
- productores de concreto
- calculistas de estructuras
- los constructores para su colocación, compactación y curado y,
- el tecnólogo del concreto, para el control de calidad y la normatividad.



1.4 Los resultados encontrados.

Los primeros estudios en la década de los años 50's y 60's arrojaron ciertos resultados que fueron la base del desarrollo de los concretos de alta resistencia.

El trabajo desarrollado por *Klieger* definió las características de las proporciones de las mezclas, técnicas de compactación, y condiciones de curado.

Las pruebas se basaron en concretos con resistencias al primer día de:

- 2,000 psi [140 kg/cm²] para cemento tipo I
- 4,000 psi [280 kg/cm²] para cemento tipo III

Las resistencias a los veintiocho días f'c, fueron de (7,500 a 8,500 psi), 525 a 595 kg/cm², las relaciones agua - cemento fueron de 0.29 a 0.47, los contenidos de cemento fueron de 279 a 670 kg/m³, los revenimientos fueron muy bajos. Los primeros resultados que dio a conocer *Klieger* en base a sus pruebas fueron los siguientes:

USAR MEZCLAS DE BAJA RELACION AGUA - CEMENTO.

USAR CEMENTO DEL TIPO III.

USAR VIBRACION MECANICA PARA PERMITIR MAS AGREGADOS POR UNIDAD DE VOLUMEN.

USAR VAPOR SATURADO A PRESION ATMOSFERICA A TEMPERATURAS POR DEBAJO DEL PUNTO DE EBULLICION DEL AGUA, JUNTO CON AISLAMIENTO.

CONTROLAR CUIDADOSAMENTE LA GRANULOMETRIA DEL AGREGADO, LOS PESOS DE LA MEZCLA DE PRUEBA, EL MEZCLADO, LA COMPACTACION Y EL CURADO.

USE CURADO POR AGUA DURANTE LAS PRIMERAS HORAS DE LA HIDRATACION.

Con respecto a la resistencia a congelación y deshielo, fluencia y contracción para concretos presforzados se probaron especímenes con inclusión y sin inclusión de aire, las relaciones agua - cemento fueron de 0.30 a 0.50, los contenidos de cemento fueron de 335 a 474 kg/m³ y resistencias a veintiocho días de 534 kg/cm², (7630 psi) los contenidos de aire fueron de 2.2 a 3.0 % para mezclas de alto contenido de cemento y de 3.9 a 6.0 % para las mezclas de bajo contenido de cemento. Los resultados de estas pruebas arrojaron los siguientes datos:

TODOS LOS CONCRETOS REQUIRIERON DE INCLUSION DE AIRE INTENCIONADA PARA UN ALTO GRADO DE RESISTENCIA AL CONGELAMIENTO Y DESHIELO Y AL DESCASCARAMIENTO.

LOS CONCRETOS HECHOS CON LOS CEMENTOS DEL TIPO I Y TIPO III FUERON IGUALMENTE DURABLES.

EL CURADO A TEMPERATURAS ELEVADAS NO IMPIDIO LA DURABILIDAD DE LOS CONCRETOS CON INCLUSION DE AIRE.



LAS MEZCLAS MAS RICAS CON RELACIONES DE AGUA - CEMENTO BAJAS MOSTRARON DEFORMACIONES POR FLUENCIA MAS BAJAS QUE LAS MEZCLAS MAS POBRES DE MAS ALTA RELACION AGUA - CEMENTO.

En el año de 1973, *Perenchio* realizó estudios relacionados con la producción de los concretos de alta resistencia, entre otras variables consideró proporciones de mezclas, composición y finura de los cementos, relación agua - cemento, curado, composición de agregados, granulometría, y aditivos. Las relaciones agua - cemento estuvieron entre 0.22 y 0.35 las resistencias a compresión a veintiocho días con curado por humedad fueron de hasta 927 kg/cm^2 , (13,240 psi). *Perenchio* reportó los siguientes resultados:

LAS PASTA DE CEMENTO FUE UN FACTOR PRIMARIO PARA OBTENER ALTAS RESISTENCIAS, LOS CEMENTOS CON PROPORCIONES MAS ALTAS DE SILICATO TRICALCICO PRODUJERON PASTAS DE MAYOR RESISTENCIA.

EN RELACIONES EQUIVALENTES DE AGUA - CEMENTO, LOS CEMENTOS MAS FINOS PRODUJERON ALTAS RESISTENCIAS A ETAPAS MAS TEMPRANAS, PERO LA FINURA ERA DE POCO SIGNIFICADO EN LAS ETAPAS POSTERIORES.

LAS RELACIONES MAS BAJAS DE AGUA - CEMENTO CONSISTENTES CON LAS MEZCLAS TRABAJABLES PROPORCIONARON LAS RESISTENCIAS MAS ALTAS.

FUE MUY IMPORTANTE PROPORCIONAR CURADO POR HUMEDAD PARTICULARMENTE DENTRO DE LAS PRIMERAS HORAS, PARA EL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA.

EL USO DE AGREGADOS SATURADOS PROPORCIONA UNA FUENTE INTERNA DE AGUA PARA EL CURADO.

LOS MAS PEQUEÑOS DE LOS TAMAÑOS DE LOS AGREGADOS PROPORCIONARON CONCRETOS DE MAYORES RESISTENCIAS.

LAS PROPIEDADES DE IMPORTANCIA DE LOS AGREGADOS FUERON, SU RESISTENCIA, EL POTENCIAL DE ADHERENCIA Y LA ABSORCION.

Posteriormente *Perenchio* y *Klieger* realizaron un trabajo para probar el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la fluencia, contracción por secado, y resistencia al congelamiento y deshielo. Probaron concretos con inclusión y sin inclusión de aire, las resistencias a compresión fueron de hasta 811 kg/cm^2 , (11,580 psi). De este trabajo se dieron a conocer los siguientes resultados:

LA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y EL MODULO DE ELASTICIDAD SE INCREMENTARON CON EL DECREMENTO EN LAS RELACIONES AGUA - CEMENTO.

LA FLUENCIA ESPECIFICA, EN MILLONESIMAS POR (PSI) DISMINUYERON CON LA PROPIA DISMINUCION DE LA RELACION AGUA - CEMENTO.



LA CONTRACCION POR SECADO GENERALMENTE NO FUE AFECTADO POR EL CAMBIO DE LA RELACION AGUA - CEMENTO, PARECIA REQUERIR UN PERIODO DE SECADO MAS LARGO PARA ALCANZAR EL EQUILIBRIO.

LOS CONCRETOS CON INCLUSION Y SIN INCLUSION DE AIRE TUVIERON UNA EXCELENTE RESISTENCIA A LA CONGELACION Y DESHIELO; ESTO FUE ATRIBUIDO AL BAJO CONTENIDO DE AGUA CONGELANTE Y A LAS RESISTENCIAS A LA TENSION INCREMENTADAS DE LAS MEZCLAS DE RELACION MAS BAJA DE AGUA - CEMENTO.

En lo que respecta a estudios sobre diseño estructural, en 1977, *Kar, Hanson y Capell* realizaron un estudio que definió las constantes para el diseño de miembros a flexión de concretos de alta resistencia,

SE CONFIRMO EL VALOR DE LA CONSTANTE QUE DEFINE LA FRACCION DEL EJE NEUTRO DEL BLOQUE DE ESFUERZOS RECTANGULAR DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES ACI.

Otra investigación realizada en la década de los 80's por *Roller y Russell* se concentro en obtener datos acerca de los esfuerzos cortantes de vigas con refuerzo de acero, éste iba de la cantidad mínima requerida a la que se calcula como máxima. Los resultados fueron los siguientes:

PARA MIEMBROS DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA NO PRESFORZADOS SUJETOS SOLAMENTE A ESFUERZOS CORTANTES Y FLEXION, SE DEBE INCREMENTAR EL REFUERZO MINIMO POR CORTANTE CON EL AUMENTO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION.

Con respecto a la permeabilidad, se realizaron pruebas de concretos que tenían relaciones agua - cemento que iban de 0.26 a 0.75 los contenidos de cemento fueron de 245 a 445 kg/m^3 y revenimientos de 8.9 a 12.4 cm, se utilizaron aditivos reductores de agua y humo de sílice, se proporcionó un curado de humedad de 7 días y las resistencias a compresión fueron de 289 a 1,054 kg/cm^2 , (4,120 a 15,000 psi) a los noventa días. Los resultados fueron los siguientes:

CONFIRMO LA FUERTE INFLUENCIA DE LA RELACION AGUA - CEMENTO SOBRE LA PERMEABILIDAD.

CONFIRMO LA IMPORTANCIA DE UN CURADO ADECUADO PARA CONSEGUIR PERMEABILIDADES MAS BAJAS, PARTICULARMENTE A RELACIONES MAS ALTAS DE AGUA - CEMENTO.

SE DEMOSTRO QUE LOS CONCRETOS CON RELACIONES AGUA - CEMENTO MENORES QUE 0.3 ESPECIALMENTE CUANDO SE USABA HUMO DE SILICE, LOS CONCRETOS ERAN VIRTUALMENTE IMPERMEABLES AL AGUA Y A LOS IONES DE CLORO.

SE DEMOSTRO QUE LOS PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS COMO LA PRUEBA RAPIDA DE LA PERMEABILIDAD DEL CLORO AASHTO T-27 Y LA DE VOLUMEN DE VACIOS PERMEABLES ASTM C 642 PUEDEN USARSE PARA ESTIMULAR LA PERMEABILIDAD, EN VEZ DE LA PRUEBA DE FLUJO.

También se emprendió un programa que estuvo dirigido a estudiar la durabilidad en congelación y deshielo, la resistencia a compresión a veintiocho días iba de los 422 y 562 kg/cm^2 , (6,000 y 8,000 psi)



hasta los 703 kg/cm^2 , (10,000 psi), se utilizaron reductores de agua y cenizas volantes, los contenidos de aire fueron de 0%, 3 a 4%, de 4 a 6% y de 7 a 9%, por volumen. Los ciclos de congelación y deshielo tuvieron los siguientes resultados:

TODOS LOS CONCRETOS SIN INCLUSION DE AIRE SE COMPORTARON POBREMENTE, SIN IMPORTAR EL CURADO TANTO EN LAS PRUEBAS DE CONGELACION Y DESHIELO COMO EN EL DESCASCARAMIENTO POR DESCONGELANTES.

TODOS LOS CONCRETOS CON INCLUSION DE AIRE SE COMPORTARON SATISFACTORIAMENTE CUANDO SE EXPUSIERON A LA CONGELACION Y DESHIELO EN AGUA DE LA LLAVE.

PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA Y DE LOS NIVELES DE CONTENIDO DE AIRE, LOS CONCRETOS DE 550 Y 690 KG/CM^2 , (8,000 Y 10,000 PSI) EXHIBIERON DESCASCARAMIENTO SEVERO EN LAS PRUEBAS DE ANTICONGELANTES, SIN TOMAR EN CUENTA EL CURADO, LOS CONCRETOS DE 415 KG/CM^2 (6,000 PSI) A LOS NIVELES DE CONTENIDO DE AIRE RECOMENDADOS, SE COMPORTARON SATISFACTORIAMENTE.

En el año de 1989, el programa encabezado por la PCA, el Centro Canadiense para la Tecnología de Minerales y Minas CANMET y otros productores de concreto premezclado, dieron a conocer sus resultados; Se trato de seis mezclas producidas comercialmente, dosificaciones de humo de sílice y de ceniza volante, aditivos reductores de agua de alto rango y con resistencias a compresión que fueron desde los 700 hasta los $1,400 \text{ kg/cm}^2$. Ninguna mezcla tenía aire incluido. Las dimensiones de los especímenes, fueron de 10 X 20 cm y de 15 X 30 cm además de cubos de 1.20 cm.

LA RESISTENCIA A COMPRESION DE LOS ESPECIMENES DE 10 X 20 CM VARIARON EN 1% CON RESPECTO A LOS ESPECIMENES DE 15 X 30 CM MEDIDAS A 18 MESES; Y LA DE LOS CORAZONES VARIO DE 83% A 94% CON RESPECTO A LOS ESPECIMENES DE 15 X 30 CM A LOS NOVENTA Y UN DIAS.

LA CONTRACCION POR SECADO VARIO DE 300 A 700 MILLONESIMAS A UN AÑO.

LOS CONCRETOS SIN AIRE INCLUIDO SE DETERIORARON O FALLARON EN LAS PRUEBAS DE CONGELACION Y DESHIELO MAS RAPIDO. PERO LAS MEZCLAS CON ALTO CONTENIDO DE CEMENTO Y HUMO DE SILICE 563 Y 89 KG/M^3 RESPECTIVAMENTE, "NO MOSTRO SEÑALES DE DETERIORO".

EL HUMO DE SILICE DISMINUYO LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO PROTEGIENDO EL ACERO DE REFUERZO CONTRA LA CORROSION, EN MENOR MEDIDA LA CENIZA VOLANTE TUVO EL MISMO EFECTO; TODAS LAS VELOCIDADES DE ABSORCION DE AGUA FUERON BAJAS Y REFLEJARON TENDENCIAS SIMILARES A LA PERMEABILIDAD AL CLORURO.

LAS TEMPERATURAS DE LAS MEZCLAS DE ALTO CONTENIDO DE CEMENTO SE ELEVARON EN 2°C POR CADA 59 KG/M^3 .

LOS REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO, O LOS SUPERPLASTIFICANTES EN DOSIFICACIONES DE 14.8 KG/M^3 PERMITIERON VARIACIONES DE LA RELACION AGUA - CEMENTO DE 0.22 A 0.32.



Cabe señalar, que se han realizado muchos estudios aparte de los mencionados pero que ya son particulares de cada proyecto, llámense puentes, edificios, plataformas etc., pero también son reflejo del comportamiento de este material y se basan en las mismas líneas de estudio.

1.5 La experiencia en nuestro país.

La experiencia práctica en nuestro país es realmente poca y podríamos mencionar por ejemplo, que en la construcción del "Puente Tampico" se utilizaron concretos de alta resistencia para nuestro país; el concreto se fabricó con gravas trituradas de piedra caliza y arena del mismo origen, se utilizó cemento Portland tipo II y agua potable de pozo la $f'c$ vario desde los 250 kg/cm^2 hasta los 400 kg/cm^2 . Básicamente el concreto de 400 kg/cm^2 se utilizó en piezas precoladas que sirven de apoyo a las cabezas de los anclajes del presfuerzo.

Más recientemente, se construyó un conjunto de edificios ubicados en la colonia Polanco de la Cd. de México, se trató de dos torres de 130 metros de altura donde se utilizaron concretos con un $f'c$ de 450 kg/cm^2 .

Y con respecto a la experiencia teórica podríamos decir que se han realizado trabajos como el de el *Dr. Jorge Gómez Domínguez* que tuvo como objeto principal producir concretos de alta resistencia con agregados accesibles a la zona metropolitana del Distrito Federal. En esta investigación se produjeron veintinueve mezclas con resistencias que variaron desde los 500 kg/cm^2 a siete días, $1,030 \text{ kg/cm}^2$ a cincuenta y seis días, hasta $1,050 \text{ kg/cm}^2$ a los noventa días. Los consumos de cemento variaron de 447 a 590 kg/m^3 utilizando cemento Portland tipo I y II. También se empleó ceniza volante clasificada como de tipo "F", en algunas de las mezclas se utilizó un aditivo fluidificante de alto rango que desarrollo relaciones (A/C) entre 0.21 y 0.31. Con respecto a los agregados se utilizó arena de mina de Sta. Fe, el módulo de finura tuvo un valor promedio de 3.36; con respecto a la grava se utilizó basalto triturado en un 65% cribada en malla 3/4".

Las siguientes gráficas son reflejo de las resistencias obtenidas en el laboratorio;

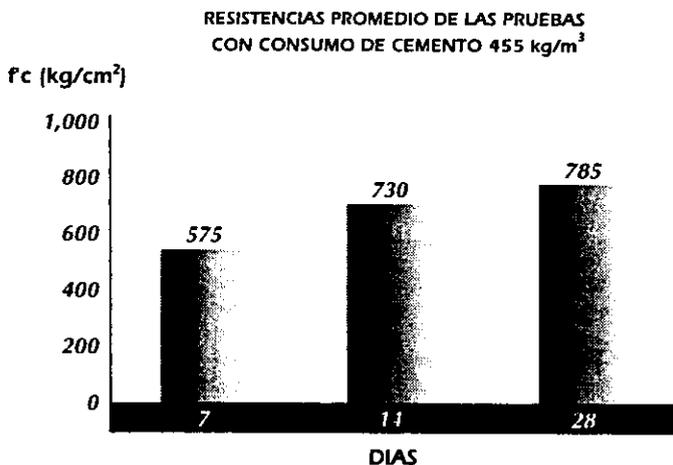


Figura 3



RESISTENCIAS PROMEDIO DE LAS PRUEBAS
CON CONSUMO DE CEMENTO 479 kg/m³

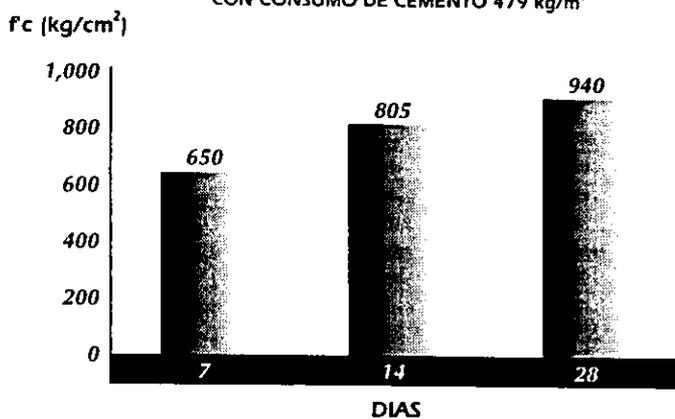


Figura 4

RESISTENCIAS PROMEDIO DE LAS PRUEBAS
CON CONSUMO DE CEMENTO 590 kg/m³

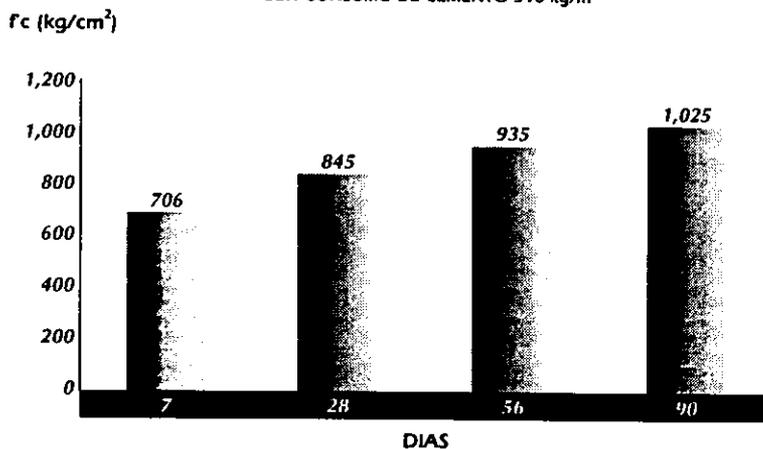


Figura 5



Capítulo II

Características generales del concreto de alta resistencia

Objetivo: Conocer y analizar las características más importantes en este tipo de concreto, así como también conocer los elementos que lo constituyen.

II.1 Propiedades físicas y químicas.

II.1.1 Trabajabilidad.

La trabajabilidad está definida como la facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado.

La trabajabilidad esta considerada como una de las propiedades del concreto en estado fresco y envuelve no sólo al término de consistencia del concreto sino también las condiciones bajo las cuales se colocará, forma y tamaño del elemento estructural, espaciamiento de las varillas de refuerzo u otros detalles que se relacionan con el llenado fácil de las cimbras.

Bajo este contexto, el concreto de alta resistencia debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente.

La producción de concretos de alta resistencia implica como ya se dijo, una inminente disminución de la relación agua - cemento (A/C), y también la eliminación de vacíos en la mezcla (aire incluido), estos dos factores con la finalidad de aumentar los valores de resistencia.

Sin embargo, una reducción de la relación agua - cemento, también es sinónimo de reducción de la trabajabilidad, ya que la mezcla se vuelve más densa, más seca y con poca docilidad para manejarse, y por otro lado, la disminución de aire incluido y la ausencia de burbujas de aire en la pasta de una mezcla producen una baja plasticidad.

Por lo tanto, en términos generales y en un sentido estricto se puede decir que un concreto de alta resistencia en estado fresco es poco trabajable.

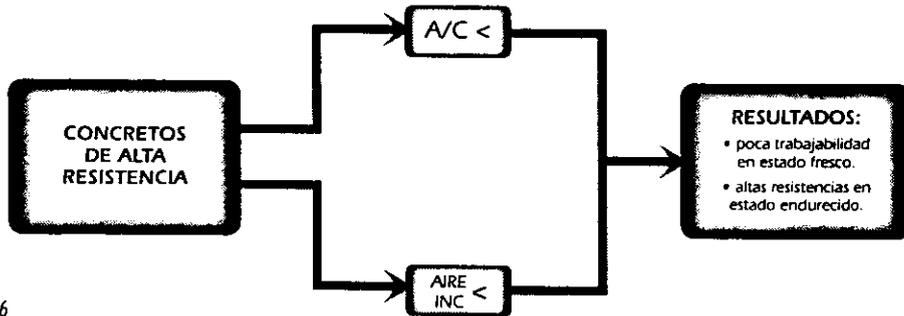


Figura 6

Las anteriores reflexiones nos llevan a buscar alternativas para solucionar esta problemática y cumplir con una de la propiedades del concreto en estado fresco.

Existen dos posibles alternativas de solución, la primera es la inclusión de aire que por supuesto queda eliminada y la segunda, la incorporación de aditivos reductores de agua y reductores de agua de alto rango (superplastificantes).

El uso de este tipo de aditivos permite llevar el intervalo de relaciones agua - cemento por debajo del rango de 0.3 sin que por ello disminuya la trabajabilidad de la mezcla, y sin efectos especialmente perjudiciales sobre el fraguado del cemento.

Por lo tanto la adición de aditivos reductores de agua van a garantizar la trabajabilidad del concreto de alta resistencia

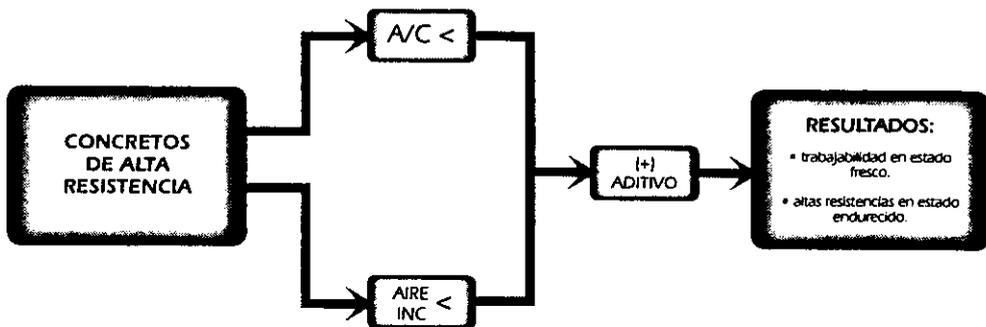


Figura 7

Cuando se habló en el primer capítulo de la definición de concreto de alta resistencia se hizo referencia a la incorporación necesaria de aditivos tanto químicos como minerales, las adiciones minerales como la ceniza volante y el humo de sílice van a producir efectos en la trabajabilidad del concreto de alta resistencia.

En primer término si tenemos una mezcla de concreto de alta resistencia con ceniza volante entonces se producirán mejoras a la trabajabilidad en cambio, la utilización de humo de sílice puede producir disminución de trabajabilidad en la mezcla, ésto hace todavía más necesario el uso de reductores de agua o de superplastificantes.



II.1.2 Bombeabilidad.

La bombeabilidad es la facilidad de colocación de la mezcla de concreto por medio de procedimientos de bombeo.

La bombeabilidad dependerá en gran medida de la consistencia, plasticidad, fluidez, y la trabajabilidad. Se puede decir que las mezclas de concreto de alta resistencia con ausencia de aditivos químicos y minerales es catalogada como una mezcla de concreto no bombeable, en consecuencia el empleo de aditivos es inminente.

Esta propiedad es muchas veces deseable ya que algunos procesos constructivos demandan mezclas de concreto bombeables y si tomamos en cuenta que muchos concretos de alta resistencia se pudieran utilizar en edificios de gran altura, entonces la mezcla debe ser bombeable.

II.1.3 Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado es el período en el cuál la mezcla de concreto pasa de un estado fresco a un estado de endurecimiento. El tiempo de fraguado indica que la pasta esta desarrollando sus reacciones de hidratación.

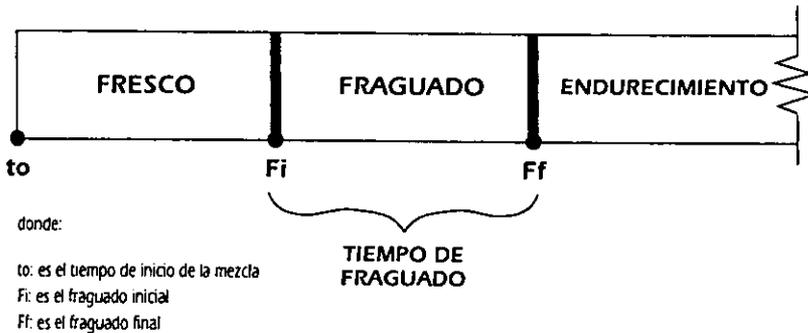


Figura 8

El tiempo de fraguado está determinado por medio de dos valores que son:

Fraguado inicial, que es aquel tiempo que limita a la mezcla entre el estado fresco y el período de fraguado, teniendo en cuenta que el fraguado inicial no debe ocurrir demasiado pronto y,

Fraguado final, que es aquel tiempo que limita a la mezcla de concreto entre el período de fraguado y el estado de endurecimiento, el fraguado final no debe ocurrir demasiado tarde.

En cuanto a los componentes de la mezcla, el factor que influye en la regulación del tiempo de fraguado es la cantidad de yeso contenida en el cemento además de que influyen en gran medida la finura del cemento, la relación agua - cemento, los aditivos utilizados y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.



Pero en lo que respecta a factores externos como el clima, podemos decir que en presencia de climas cálidos la mezcla de concreto puede experimentar velocidades de fraguado elevadas reduciéndose considerablemente el tiempo de fraguado, contrario a esto, la presencia de climas fríos, es decir, temperaturas bajas, retardan la hidratación y el endurecimiento provocando incrementos en el tiempo de fraguado. Por su parte, la presencia de humedad relativa en el ambiente pudiera beneficiar al proceso de fraguado siempre y cuando permita una hidratación total entre la cantidad de cemento y el agua de mezclado. La producción de concretos de alta resistencia nos llevan a la utilización de cementos que proporcionen las mejores resistencias, por su parte, la resistencia está directamente relacionada con la finura del cemento y a su vez la finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación, a mayor finura del cemento mayor rapidez de hidratación del cemento y por tanto mayor desarrollo de resistencia.

Esto nos lleva a determinar que los períodos de fraguado de un concreto de alta resistencia sin aditivo son menores que los períodos de concretos convencionales.

Sin embargo la utilización de cenizas volantes provoca retardos en el tiempo de fraguado del concreto, existen evidencias de que el fraguado inicial de un concreto se prolonga de 10 a 55 minutos y el fraguado final de 5 a 130 minutos la consecuencia es que el periodo de tiempo de fraguado se incrementa.

Las reflexiones anteriores nos conducen a pensar que existen variaciones en el tiempo de fraguado provocadas en mayor medida por los componentes de la mezcla de concreto de alta resistencia, empero será importante cuidar que la reacción inicial del fraguado sea suficientemente lenta para desarrollar labores de transporte y colocación y cuando esté el concreto colocado y acabado será deseable tener un endurecimiento rápido.

II.1.4 Peso Unitario

El peso unitario (densidad) del concreto varía dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado, de la cantidad de aire atrapado, de los contenidos de agua y de cemento, mismos que a su vez, se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado.

El peso unitario de los concretos de alta resistencia presenta un incremento debido a su alto contenido de cemento, a su disminución del contenido de aire al mínimo y a su densidad de agregados.

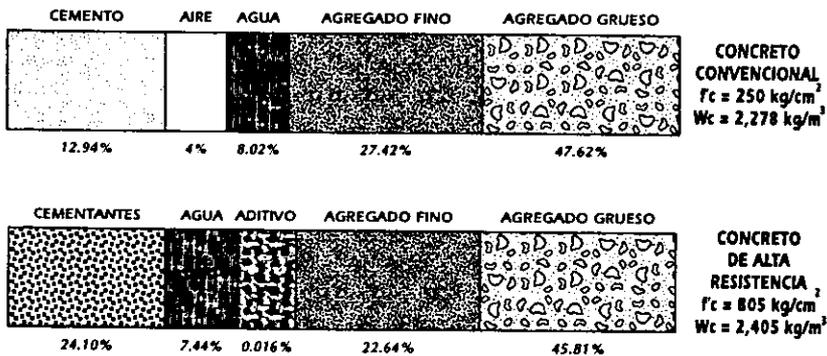


Figura 9



La figura 9, muestra dos esquemas de proporciones, uno de concreto convencional y uno de concreto de alta resistencia, el peso unitario del concreto convencional es menor que el peso unitario del concreto de alta resistencia debido a que la proporción de aire disminuye la densidad total del concreto convencional, además de que el contenido de cemento es menor, cosa que no sucede con el concreto de alta resistencia; en algunas investigaciones se habla de que el peso unitario de un concreto de alta resistencia es del orden de un 10% mayor que un concreto convencional elaborado con los mismos materiales.

Este parámetro se vuelve más importante durante el cálculo de los elementos mecánicos de algún diseño estructural.

Cabe señalar que el peso del concreto seco es igual al peso del concreto recién mezclado menos el peso del agua evaporable; como sabemos, una parte del agua de mezclado se combina químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, transformando al cemento en gel de cemento.

II.1.5 Módulo de elasticidad

Para poder calcular el módulo de elasticidad se debe recurrir a definiciones arbitrarias basadas en consideraciones empíricas debido a que como sabemos, en un sentido estricto, el concreto no es elástico, solamente presenta este comportamiento en un intervalo de carga, por lo tanto, la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del intervalo elástico de una curva esfuerzo - deformación unitaria para el concreto define al módulo de elasticidad E_c de aquel concreto.

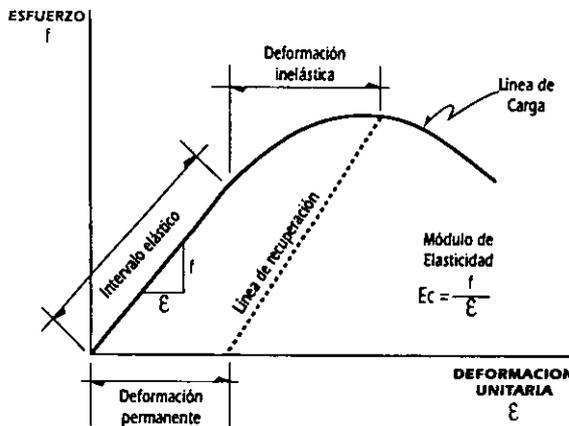


Figura 10

Geoméricamente, el módulo de elasticidad es la secante a la curva en su intervalo de elasticidad, para ensayos de laboratorio donde se busca encontrar la deformabilidad del concreto, matemáticamente, E_c es la pendiente de la recta en el diagrama esfuerzo - deformación; puesto que ϵ es adimensional, E_c tiene las unidades del esfuerzo; en este contexto, la ASTM recomienda la pendiente a la línea que une a los puntos de la curva correspondiente a una deformación de 0.0005 y al 40% de la carga máxima, por su parte el reglamento ACI 318R-95 determina un esfuerzo a compresión del 45% de la resistencia f'_c .

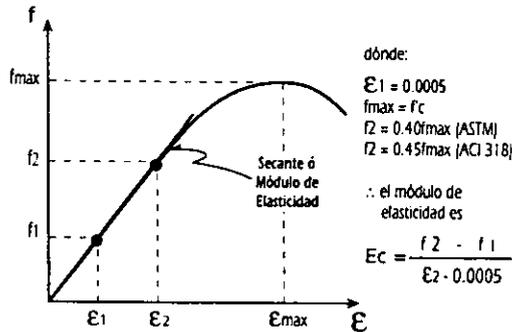


Figura 11

El módulo de elasticidad es reflejo de la rigidez que presenta el material (en este caso el concreto) cuando está sujeto a cargas y consecuentemente solicitado a los elementos mecánicos de carga axial (AE), flexión (EI), Torsión (GI), y cortante (KGA) tomando en cuenta que (G) módulo de elasticidad al esfuerzo cortante es función del módulo de elasticidad (E) en compresión.

Cuando el concreto presenta un mayor módulo de elasticidad, por consecuencia tendrá menores deformaciones a un mismo tipo de esfuerzo, figura 12, es decir que, el concreto será más rígido si tiene un mayor módulo de elasticidad.

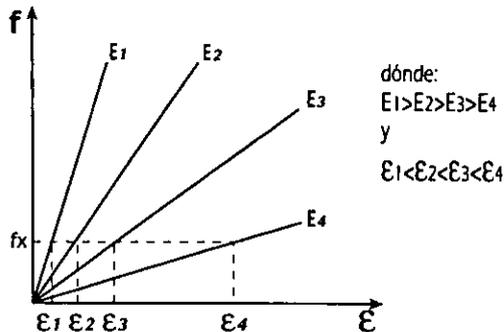


Figura 12

Como es de suponerse, los concretos de alta resistencia presentan módulos de elasticidad mayores que los concretos convencionales principalmente porque al aumentar la resistencia, por consecuencia aumenta su módulo de elasticidad, esto debido fundamentalmente a la calidad del agregado, a las adiciones minerales, a las bajas relaciones agua - cemento y a las dosificaciones con aditivos, sin embargo, es necesario reconsiderar las fórmulas tradicionales empleadas en el reglamento ACI y en las Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones de nuestro país.

El reporte del comité ACI 363R-92, dice que para los años 30's *Thoman y Reader* determinaron módulos de elasticidad en pruebas de compresión uniaxial en un 25% del esfuerzo máximo de $(4.2 \times 10^6$ a 5.2×10^6 psi) (29,000 a 36,000 Mpa) [294,000 a 364,000 kg/cm²] para concretos con resistencias a compresión del rango de los (10,000 a 11,000 psi) (69 a 76 Mpa) [700 a 770 kg/cm²], y por otro lado, también se reportaron módulos de elasticidad para concretos de alta resistencia que fueron del orden de los $(4.5 \times 10^6$ a 6.5×10^6 psi) (31,000 a 45,000 Mpa) [315,000 a 455,000 kg/cm²].



La recopilación de todos estos datos experimentales y de otros más sirvieron como base para realizar un análisis sobre el módulo de elasticidad de concretos de alta resistencia, en particular con las ecuaciones que predicen su propio valor.

El análisis está basado en una comparación de datos experimentales con la ecuación dada en el reglamento ACI 318 sección 8.5 para concretos de menor resistencia,

$$E_c = 33 W_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \text{ , en (psi) ó}$$

$$E_c = W_c^{1.5} 0.14 \sqrt{f'_c} \text{ , en (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\text{para } 1,440 \leq W_c \leq 2,480 \text{ , en (kg/m}^3\text{)}$$

y la ecuación 5-1 dada en el propio reporte 363R-92, capítulo 5 sección 5.3 para concretos de alta resistencia,

$$E_c = (40,000 \sqrt{f'_c}) + 1.0 \times 10^6 \text{ , en (psi)}$$

Se trata de la correlación del módulo de elasticidad E_c , y de la resistencia del concreto f'_c , se grafican los valores experimentales de concretos de peso ligero y de peso normal con diferentes resistencias a compresión, además también se grafican las dos expresiones de cálculo del módulo de elasticidad tanto de concretos convencionales como de concretos de alta resistencia, figura 13.

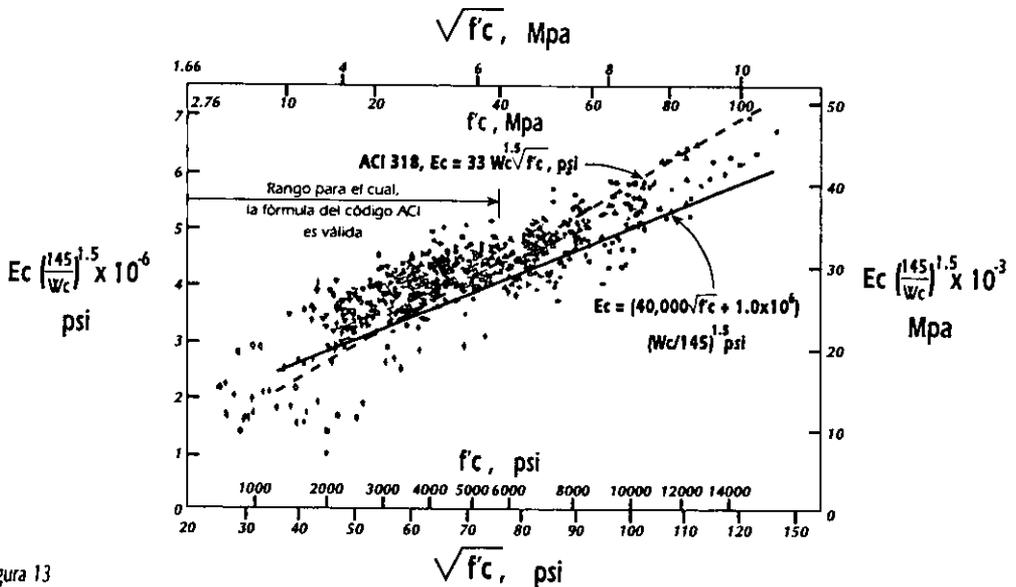


Figura 13

Cabe señalar que la expresión del ACI 318 está en función del peso propio del concreto y de la resistencia específica al igual que la expresión dada por el comité ACI 363R-92, además en el eje de las ordenadas el valor del módulo de elasticidad se ve afectado por un coeficiente que está en función del peso propio



del concreto tanto en (Mpa), como en (psi);

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6}, \text{ en (psi)}$$

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-3}, \text{ en (Mpa)}$$

Para el caso de concretos de alta resistencia que se presenta a partir de los (6,000 psi), 420 kg/cm², la expresión del ACI 318 esta por arriba de los valores experimentales de concretos de alta resistencia y por otra parte, la expresión dada por el comité ACI 363R-92 está por debajo de los valores experimentales de concretos de alta resistencia.

Tomando en cuenta que el análisis se basa en un valor de peso propio de (145 lb/ft³), 2,322 kg/m³ para la determinación de las ecuaciones empíricas se tiene que:

por ejemplo, para valores de $f'_c = 6,000$ psi;

el valor de la expresión ACI 318 nos proporciona una ordenada de:

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6} \Leftrightarrow 4.463$$

el valor de la expresión ACI 363R-92 nos proporciona una ordenada de:

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6} \Leftrightarrow 4.098$$

se observa que los valores experimentales están por debajo de las dos expresiones.

para valores de $f'_c = 10,000$ psi;

el valor de la expresión ACI 318 nos proporciona una ordenada de:

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6} \Leftrightarrow 5.7619$$

el valor de la expresión ACI 363R-92 nos proporciona una ordenada de:

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6} \Leftrightarrow 5.0000$$

se observa que todos los valores experimentales están por debajo de la expresión ACI 318 y la mayor parte de los valores están por arriba de la expresión ACI 363R-92.

para valores de $f'_c = 14,000$ psi;

el valor de la expresión ACI 318 nos proporciona una ordenada de:

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6} \Leftrightarrow 6.817$$

el valor de la expresión ACI 363R-92 nos proporciona una ordenada de:

$$E_c(145/W_c)^{1.5} \times 10^{-6} \Leftrightarrow 5.732$$

se observa que se tienen tres valores experimentales que se encuentran por debajo de la expresión ACI 318 y por arriba de la expresión ACI 363R-92.

Las tendencias de los valores experimentales quieren decir por un lado, que la expresión del ACI 318 sobrestima el módulo de elasticidad para concretos con resistencias por arriba de los (6,000 psi), 420 kg/cm² no siendo recomendable para este tipo de concretos, y por otro lado, que los valores experimentales están muy cercanos o por arriba de la expresión dada por el comité ACI 363R-92 siendo la más recomendable para los concretos que están por arriba de los (6,000 psi), 420 kg/cm², es decir, los concretos de alta resistencia.

Las ecuaciones propuestas por el comité ACI 363R-92 para el cálculo del Módulo de elasticidad, son las siguientes;

$$E_c = (40,000 \sqrt{f'_c}) + 1.0 \times 10^6, \text{ en (psi)}$$

$$\text{para } 3,000 < f'_c \leq 12,000 \text{ (psi)}$$



$$E_c = (3,320 \sqrt{f'c}) + 6,900, \text{ en (Mpa)}$$

para $21 < f'c \leq 83$ (Mpa)

en caso de que los concretos tengan densidades diferentes de 145 (lb/ft³), 2322 kg/m³, la ecuación para el cálculo de E_c se deberá modificar por el factor de corrección $(Wc/145)^{1.5}$ en (psi).

Por otro lado, el planteamiento realizado por el Código Modelo (CEB - FIP) propone la siguiente ecuación:

$$E_c = 10^4 (f_{ck} + 8)^{1/3}, \text{ en (Mpa)}$$

para $f_{ck} > 45$ Mpa

dónde;

f_{ck} : es la resistencia a compresión del espécimen, en (Mpa)

Y también, una expresión propuesta por la norma Noruega NS 3473 E para estimar módulos de elasticidad de concretos de alta resistencia:

$$E_c = 10,000 (f_{cn})^{0.3}, \text{ en (Mpa)}$$

para $f_{cn} \leq 85$ Mpa

dónde;

f_{cn} : es la resistencia a compresión, en (Mpa)

Sin embargo la experiencia que se tuvo en los laboratorios del IMCYC en México revelaron datos interesantes, se obtuvieron datos experimentales de módulos de elasticidad del orden, de los (298,500 a 339,700 kg/cm²) a los 28 días y de (315,600 a 367,570 kg/cm²) a los 56 días teniendo evidencias aisladas de valores mayores.

Los valores experimentales del módulo de elasticidad estuvieron por debajo de la ecuación propuesta por el comité 363R -92, (figuras 14 y 15), es decir que los valores experimentales y su curva de ajuste resultaron estar defasados por debajo de la curva 363R-92 en un promedio de 20% para 28 días y en un 16% en promedio para los 56 días.

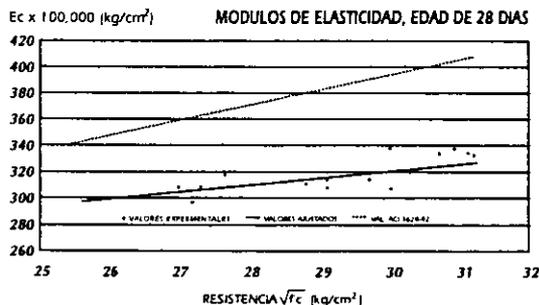


Figura 14

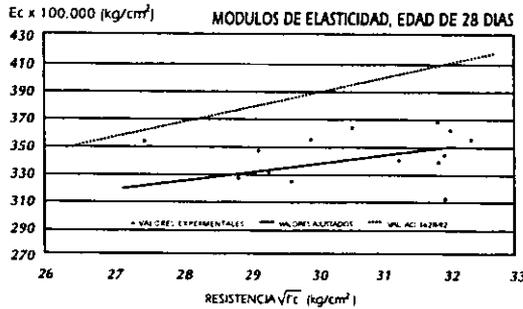


Figura 15

Se trata de un testimonio de gran importancia ya que fueron mezclas realizadas con materiales que comúnmente se encuentran en el área metropolitana de la Cd. de México, y puede ser un reflejo del comportamiento del módulo de elasticidad de concretos de alta resistencia elaborados con materiales de nuestro país.

11.1.6 Módulo de Poisson

De acuerdo con las leyes de deformación de la mecánica de los sólidos, sabemos que a la relación entre la deformación en la dirección del esfuerzo normal aplicado y la deformación perpendicular al esfuerzo aplicado, se le denomina módulo de Poisson.

Cuando tenemos un bloque de concreto que se carga a compresión uniaxial, por la definición anterior, se acortará y al mismo tiempo desarrollará una deformación unitaria lateral o abombamiento, figura 16. El módulo de Poisson es el cociente de dividir a las deformaciones.

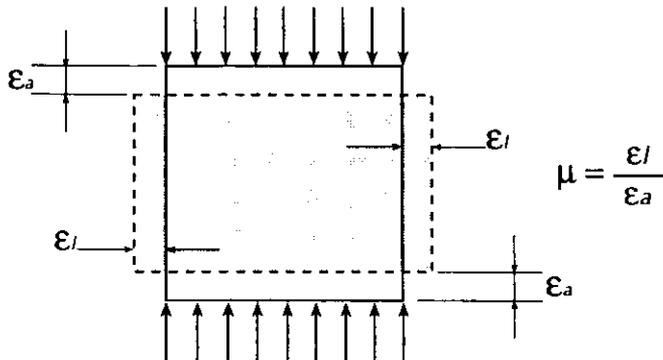


Figura 16

La literal μ , es el módulo de Poisson, ϵ_l es la deformación lateral o deformación en la dirección del esfuerzo normal, y ϵ_a es la deformación axial o deformación perpendicular al esfuerzo aplicado.

El módulo de Poisson que se presenta en los concretos de alta resistencia ha sido analizado con datos experimentales; investigadores como *Shideler* y *Carrasquillo* entre otros, reportaron valores del módulo de Poisson del orden de 0.20 a 0.28 para concretos de (10,570 psi) (73 Mpa), 740 kg/cm² a los 28 días. Por otro lado *Perenchio* y *Klieger* reportaron valores del orden de 0.20 a 0.28 para concretos de (8,000



a 11,600 psi) (55 a 80 Mpa) [560 a 812 kg/cm²] concluyendo que el incremento de la relación (ν) produce un decremento en el módulo de Poisson.

En base a los datos experimentales se ha determinado que en la fase elástica de deformación, el módulo de Poisson en los concretos de alta resistencia se pueden comparar con los generalmente adoptados para concretos de resistencias menores, y para la fase plástica, debido a su estado de menor microfisuración, la deformación lateral es inferior por consecuencia en ese rango el módulo de Poisson será menor.

Y por su parte el reporte del ACI 363R-92 también recomienda que para los rangos de intervalo elástico los valores del módulo de Poisson serán comparables con los concretos de menor resistencia por lo tanto, podemos considerar valores de 0.12 a 0.25 que son los que comúnmente se utilizan, esto dependiendo del agregado, contenido de humedad, edad del concreto, relación agua - cemento y principalmente, de la resistencia a compresión.

II.1.7 Módulo de Ruptura.

Si bien es cierto que el concreto no se diseña normalmente para resistir tensión directa, el conocimiento de este valor es de gran interés para estimar la carga bajo la cuál se desarrollará el agrietamiento.

En realidad no existe ninguna prueba estandar en la que se emplee tensión directa, por tanto, es preferible medir la resistencia a tensión del concreto sometiendo a flexión una viga simple.

El esfuerzo máximo teórico de tensión que se alcanza en la fibra inferior de la viga de prueba se conoce como el módulo de ruptura.

El módulo de ruptura depende de las dimensiones de la viga y de la distribución de las cargas.

Teniendo en cuenta el tipo y distribución de carga, valores reportados por varios investigadores de el módulo de ruptura de concretos de alta resistencia de peso ligero y peso normal caen en el rango de $7.5\sqrt{f'_c}$ a $12\sqrt{f'_c}$, donde ambos módulos de ruptura y resistencias a compresión están expresados en (psi).

El reporte del comité ACI 363R-92 recomienda la siguiente ecuación para la predicción de la resistencia a tensión de concretos de alta resistencia de peso normal, como medida del módulo de ruptura f'_r , en función de la resistencia a compresión:

$$f'_r = 0.94 \sqrt{f'_c} \text{ ,en (Mpa)}$$

$$\text{para } 21 < f'_c < 83 \text{ (Mpa)}$$

$$f'_r = 11.7 \sqrt{f'_c} \text{ ,en (psi)}$$

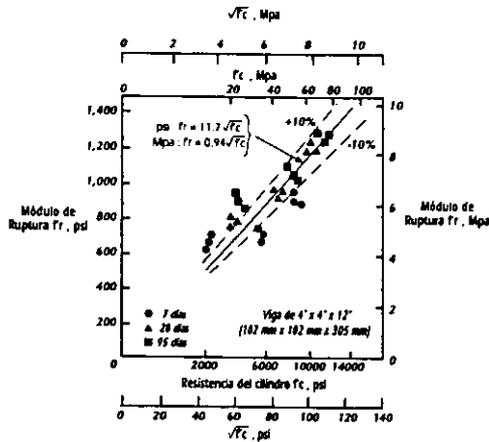
$$\text{para } 3,000 < f'_c < 12,000 \text{ (psi)}$$

En la gráfica de la figura 17, se muestra el comportamiento de la resistencia a tensión basada en el módulo de ruptura que a su vez, está en función de la resistencia a compresión de una viga de sección cuadrada de 10.2 cm de base, por 10.3 cm de altura y con un claro de 30.5 cm a diferentes edades, 7, 28, y 95 días, así como la representación de la ecuación propuesta por el comité ACI 363R-92.

Los valores experimentales revelan un margen de error con respecto a la ecuación ACI 363R-92 de aproximadamente $\pm 10\%$.



Figura 17



II.1.8 Contracción por secado.

Cuando el concreto se encuentra sometido a cambios de humedad, se van a producir expansiones y contracciones dependiendo de la cantidad de humedad, es decir, que se producirá una expansión con el aumento de humedad y una contracción con la pérdida de la misma (contracción por secado). Según las pruebas realizadas, la contracción por secado de especímenes pequeños de concreto simple es del orden de 400 a 800 millonésimas expuesto al aire a una humedad del 50% y para el concreto reforzado se dice que es menor debido a que el acero de refuerzo restringe a la propia contracción por secado; para este tipo de estructuras reforzadas se supone una contracción por secado del orden de 200 a 300 millonésimas.

El valor de la contracción por secado se puede obtener mediante la ecuación propuesta por el comité ACI 209 para concretos normales:

$$(Esh)t = \frac{t}{35 + t} (Esh)ult$$

dónde:

(Esh)ult : es la contracción última para humedad relativa del 40%.

t : es el tiempo en días después del curado inicial de 7 días.

(Esh)t : es la contracción por secado en el tiempo t.

La cantidad de humedad en el concreto se ve afectado por la humedad relativa del exterior. Después de que el concreto está seco, para un contenido de humedad constante bajo una cierta condición de humedad relativa, un descenso en la humedad relativa provocará que se pierda contenido de humedad, el concreto va a experimentar una contracción debido principalmente a la respuesta de la pasta cementante en relación a la pérdida de humedad. A medida que avanza el proceso de secado, el concreto en las cercanías de la superficie se seca y se contrae con mayor rapidez que el concreto en el interior,



provocando esfuerzos de tensión y posibles agrietamientos.

La manifestación de esta propiedad en los concretos de alta resistencia a sido estudiada y aún no existe un criterio homogéneo entre los investigadores como ocurre con otras propiedades y características en dónde la mayoría de los investigadores establecen prácticamente los mismos resultados y conclusiones; lo cierto es que la contracción por secado de este tipo de concretos tiende a ser muy parecida a la de los concretos convencionales.

Primeramente podemos mencionar lo citado por el comité ACI 363R-92, el cuál dice que la contracción no se ve afectada por cambios en la relación (A/C), pero si es proporcional a el porcentaje de agua por volumen de concreto. Esta premisa nos hace pensar en primer término, que los procedimientos de dosificación utilizados en la actualidad que modifican la cantidad de agua y a su vez la optimizan, producen disminuciones en la contracción por secado.

También, un investigador llamado *Smeplass*, analizó la contracción por secado de un concreto de alta resistencia dosificado con un 8% de humo de sílice y una relación (A/C) de 0.35, se llevaron a cabo tres tipos de curado, uno de ellos se aisló de las condiciones ambientales mediante el sellado de su superficie confirmando su contracción que, el fenómeno de autodesecación que se presenta en los concretos de baja relación (A/C), implica un largo proceso de contracción, además de que la escasa cantidad de agua no combinable, limita el valor máximo posible de contracción, figura 18.

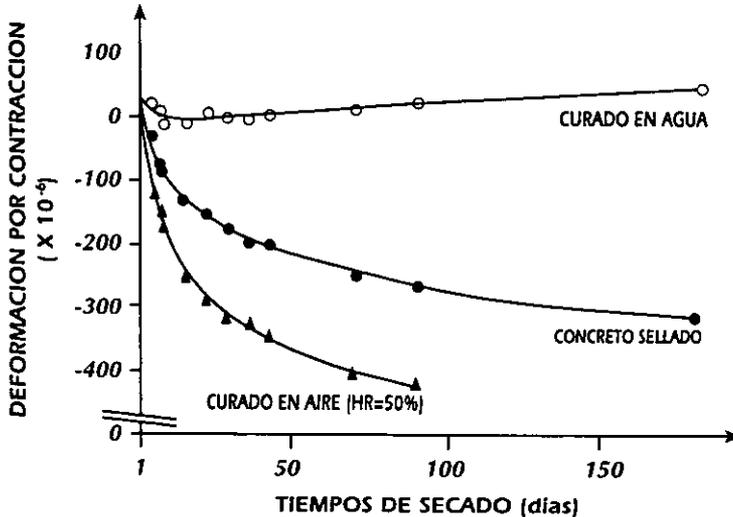


Figura 18

Como consecuencia de este análisis podemos decir que, los valores de la contracción por secado para estos concretos puede ser mayor o menor que los concretos convencionales dependiendo según esta investigación, de las condiciones de curado, del tamaño del elemento estructural y de su configuración geométrica.

Por su parte *Fiorato*, determinó los valores de contracción por secado de cinco mezclas de diferente composición y de dos años de vida.



COMPONENTES INCORPORADOS	NUMERO DE MEZCLA				
	1	2	3	4	5
Cemento kg/m ³	564	475	487	564	475
Humo de sílice kg/m ³	--	24	47	89	74
Ceniza volante kg/m ³	--	59	--	--	104
Superfluidificante l/m ³	8.87	8.87	8.58	15.38	12.57
Relación (A/C)	0.281	0.287	0.291	0.220	0.231

Tabla 4

La figura 19 muestra el comportamiento de las mezclas a la contracción a diferentes tiempos de secado, se utilizaron para el estudio, prismas de 28.6 X 7.6 X 7.6 cm., y cilindros de 15.2 cm. de diámetro por 30.5 cm. de altura;

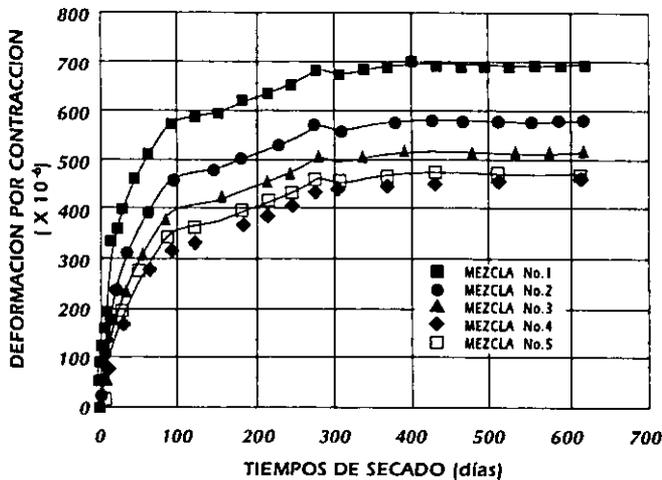


Figura 19

La investigación hace hincapié en los valores más pequeños de contracción por secado de las mezclas con incorporación de humo de sílice:

Probeta prismática \Leftrightarrow 400 a 600 X 10⁻⁶ (mezclas 2 a 5)

Probeta cilíndrica \Leftrightarrow 300 a 600 X 10⁻⁶ (mezclas 2 a 5)

a comparación de las mezclas sin la adición mineral:

Probeta prismática \Leftrightarrow 700 X 10⁻⁶ (mezcla 1)

Probeta cilíndrica \Leftrightarrow 550 X 10⁻⁶ (mezcla 1)

de los resultados de este análisis podemos decir que, las adiciones minerales como el humo de sílice específicamente, producen disminuciones en la contracción por secado que sin embargo son muy pequeñas al momento de cuantificarlas.



II.1.9 Fluencia

Cuando un elemento de concreto es cargado, la deformación que se experimenta se puede dividir en dos partes, la primera:

- una deformación que ocurre de manera inmediata como la deformación unitaria elástica, y segunda,
- una deformación que depende del tiempo, es decir, que empieza inmediatamente pero que continúa a una proporción decreciente durante el tiempo en que el concreto se encuentre cargado,

Precisamente a esta última deformación se le conoce como fluencia.

Se dice que la fluencia depende de la magnitud del esfuerzo, de la edad del concreto, de la resistencia del concreto cuando se aplica el esfuerzo y del período durante el cuál, el concreto se encuentre cargado. Existen otros factores que afectan a la fluencia en menor medida.

Un gran número de investigadores han determinado que el valor de la fluencia de los concretos de alta resistencia es menor que la de los concretos convencionales y a este respecto, el Código modelo CEB/FIP establece un valor del coeficiente de fluencia de un concreto en función de cuatro elementos;

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta(t - t_0)$$

dónde;

φ_{RH} : es el coeficiente relativo de fluencia que depende de la humedad relativa del aire y del espesor ficticio del elemento, $h_0=2Ac/u$.

$\beta(f_{cm})$: es un factor en función de la resistencia media del concreto a los 28 días de edad en probeta cilíndrica.

$\beta(t_0)$: es un factor que está en función de la edad del concreto (t_0) en el momento de la carga.

$\beta(t - t_0)$: es una función que toma en cuenta la influencia de la deformación diferida.

tomando en cuenta éste coeficiente en función de la deformación diferida dos investigadores *Charif y Jaccoud* representan valores del coeficiente de fluencia y su recta de correlación entre resistencia del concreto y el valor del propio coeficiente, figura 20

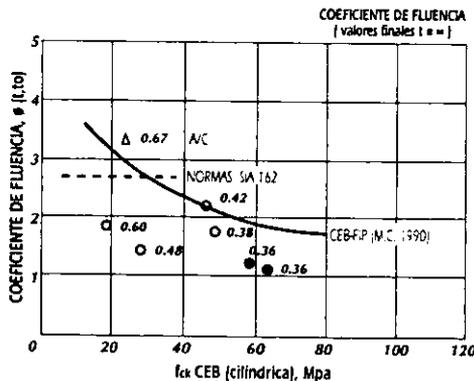
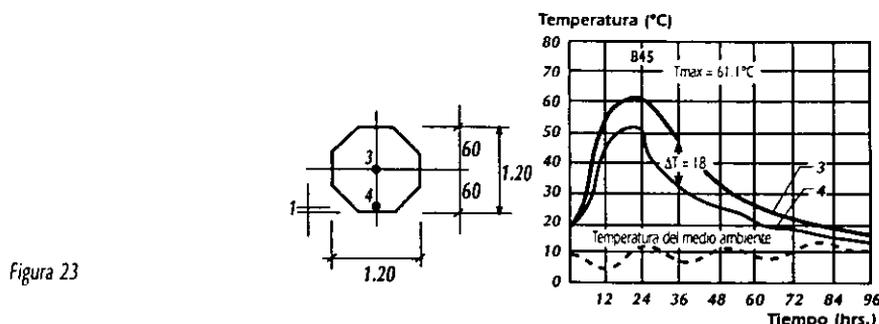
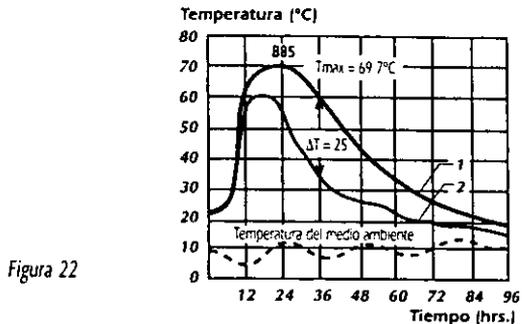


Figura 20



Se trató de dos pruebas, una de resistencia normal y otra con el mencionado, el concreto de alta resistencia alcanzó una temperatura máxima de 70°C en su interior, en comparación, el concreto de resistencia normal alcanzó una temperatura máxima de 61°C en su interior, figuras 22 y 23.



El reporte de comité ACI 363R-92, indica por su parte que, la elevación de temperatura es de (11°F a 15°F) (6°C a 8°C) por cada (100 lb/yd³), 59 kg/m³ de cemento. La elevada evolución del calor por la hidratación del cemento en concretos de alta resistencia es inminente, y si se trata de grandes volúmenes de concreto se presenta otro inconveniente por la generación elevada de calor, una fisuración o agrietamiento significativamente importante en las estructuras. Para solucionar ésta problemática, las mezclas de este tipo de concretos incluyen aditivos minerales que entre otras cosas, ayudan a reducir el calor de hidratación, la proporción de estos aditivos minerales en la mezcla se presenta como sustitución parcial del contenido de cemento, con esta sustitución, los incrementos de temperatura disminuyen además de mejorar otras características que se mencionarán más adelante. Las cenizas volantes y escorias molidas reducen la cantidad de calor que se produce en una estructura de concreto de alta resistencia debido a su menor calor de hidratación, por su parte, algunas puzolanas presentan rangos de temperatura de aproximadamente un 40% del presentado por un cemento portland. El humo de sílice puede o no reducir el calor de hidratación, sin embargo, este calor de hidratación se puede elevar en presencia de los aditivos superplastificantes hasta una cantidad mayor de la que se obtendría con el cemento portland ordinario.



II.1.11 Permeabilidad

La permeabilidad en un concreto está definida como la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentre a presión, o como la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua y otras sustancias como líquidos, gases, iones, etc.

La permeabilidad total de un concreto al agua es función de la permeabilidad de la pasta cementante, de la granulometría de los agregados y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado.

La permeabilidad de la pasta cementante es de gran importancia ya que la pasta recubre a todos los elementos del concreto. La permeabilidad de la pasta depende de la relación (A/C) y del grado de hidratación del cemento o duración del curado húmedo.

Los concretos de baja permeabilidad requieren de relaciones (A/C) bajas y un período de curado húmedo adecuado.

La consecuencia de tener bajas permeabilidades en un concreto nos va a dar como resultado concretos de gran calidad con respecto a su durabilidad.

La disminución de la permeabilidad mejora en gran medida la resistencia del concreto a la restauración, al ataque de sulfatos, de productos químicos y, a la penetración del ión cloruro, además de que afecta la capacidad de destrucción por congelamiento en condiciones de saturación, sin embargo, todas estas ventajas, podrían pasar a un segundo termino si tomamos en cuenta que la baja permeabilidad nos va a proporcionar una excelente protección al refuerzo de acero.

Los concretos de alta resistencia tienen permeabilidades muy bajas, comparadas con los concretos convencionales lo que hace afirmar que se trata de un concreto de excelente calidad, en el primer capítulo de este trabajo, se habló de los resultados encontrados de diferentes estudios, en estos se confirman los rangos de permeabilidad que presentan los concretos de alta resistencia, de algunas pruebas realizadas podemos destacar aquella que demostró que a relaciones (A/C) menores a 0.3 y utilizando humo de sílice, los concretos eran prácticamente impermeables al agua y a los iones de cloruro.

En la figura 24 se aprecia la tendencia que sigue el coeficiente de permeabilidad a diferentes relaciones (A/C).

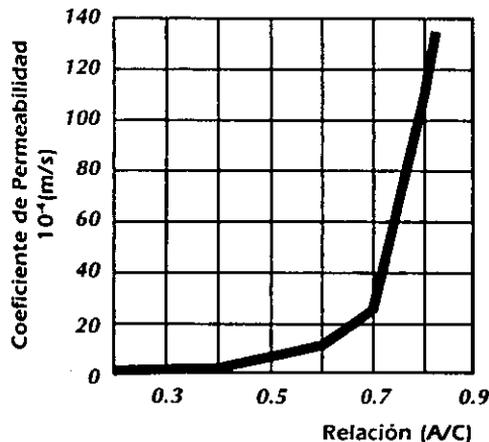


Figura 24



Con respecto a las condiciones minerales el uso de humo de sílice es especialmente efectivo ya que disminuye la permeabilidad del concreto a iones de cloruro. En menor medida, la ceniza volante tiene el mismo efecto.

La absorción de un concreto con ceniza volante es de casi la misma de un concreto sin ceniza, aunque algunas cenizas pueden reducir la absorción en un 20% o más, por lo tanto, si se busca esa característica en el concreto, se debe tener especial cuidado en seleccionar el tipo de ceniza a utilizar.

En combinación con dosificaciones altas de cemento ambas adiciones minerales pueden producir concretos con niveles de permeabilidad a iones de cloruro comparables a los del concreto modificado por látex.

II.1.12 Durabilidad

La durabilidad está considerada como el parámetro más importante de la calidad de un concreto, y se podría decir que es una de las características más apreciables.

Cuando una estructura de concreto es durable estamos hablando de una excelente calidad y esa cualidad va a depender de ciertos factores; es precisamente en este contexto dónde los concretos de alta resistencia responden óptimamente a los requisitos de calidad y como consecuencia tienen grados excelentes de durabilidad.

Como primer factor, podemos mencionar a la permeabilidad que para el caso de los concretos de alta resistencia es prácticamente impermeable, como segundo factor podemos mencionar, un proporcionamiento correctamente formulado que para el caso de estos concretos, el proporcionamiento se ve optimizado; la conjunción de estos dos factores producen una protección adecuada contra las agresiones químicas y físicas. Los concretos de alta resistencia se vuelven más durables frente a las agresiones externas, sulfatos, cloruros, carbonatación, abrasión debido a su impermeabilidad y composición química. También se vuelven más durables frente a las agresiones internas, álcali - agregado y corrosión de armaduras.

El tercer factor es el relacionado con las cualidades reológicas del concreto entendiendo por reológicas a la fluidez del material, la viscosidad y la plasticidad, a este respecto los concretos de alta resistencia se comportan plásticamente tienen una nula exudación y segregación, su trabajabilidad se debe a su granulometría basada en la tecnología de los concretos fluidos y a su reducción del tamaño máximo de grava 12 mm. Se compacta mediante una suave vibración, aunque debido a su especial reología necesita siempre de esa vibración.

La adición de cenizas volantes reducen la relación (A/C) para la misma consistencia y el humo de sílice aumenta la viscosidad del concreto, incrementando la demanda de energía de mezcla y compactación, de manera que los concretos con esta adición es necesaria la incorporación de aditivos superfluidificantes garantizando una reología óptima. Lo mismo sucede con los tiempos de fraguado, dependientes del conglomerante, de la consistencia y del efecto retardador del aditivo en su caso.

El último factor es el relacionado con las características mecánicas, los concretos de alta resistencia se comportan excelentemente sobre todo a la falla en compresión en dónde se procura que la fractura ocurra en los agregados gruesos y no en la interface del agregado y la pasta, por eso la calidad del agregado grueso debe tener un cuidado especial.



II.2 Comportamiento del material.

II.2.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión es el parámetro más importante y característico de los concretos de alta resistencia.

Como sabemos la resistencia a compresión es reflejo del ensaye de cilindros, cubos o prismas sujetos a carga axial repartida uniformemente en la sección transversal del elemento o espécimen. Este ensaye de especímenes a compresión simple, está considerado como el índice de resistencia más común ya que mide la característica fundamental del concreto y es un indicativo de la resistencia en la estructura.

En la mayor parte de los casos, se ha correlacionado ésta característica con la resistencia de elementos estructurales de diversos tipos sujetos a distintas sollicitaciones pero se debe tener cuidado en pensar que la resistencia a compresión del concreto en la estructura ante cualquier combinación de sollicitaciones es el resultado que estamos buscando.

Para realizar los ensayes de resistencia a compresión de los concretos en estudio debemos tomar en consideración, el tipo de espécimen, ya sea cualquiera de los mencionados anteriormente, para el caso de los concretos con altas resistencias, los especímenes cilíndricos de relación de esbeltez igual a dos con 15 X 30 cm son los recomendados.

La segunda consideración es la referente a la edad de prueba. Normalmente, las resistencias se determinan a los 28 días que es la edad parámetro de determinación de $f'c$, pero diversos estudios sobre el concreto de alta resistencia han tomado en cuenta edades de 56 y 90 días ya que muchas estructuras que se elaboran con estos concretos pueden ser sollicitadas hasta esos periodos (edificios de gran altura).

Posteriormente, es necesario considerar las condiciones de muestreo, la propia fabricación del concreto, el tipo de curado y el ensaye; para ésta última consideración es de peculiar importancia la velocidad de carga que para el caso de los concretos de alta resistencia también se regirán por las Normas NOM y las Normas ASTM al igual que los concretos convencionales.

Una consideración que debemos tomar en cuenta es la referente a las resistencias de obra y resistencias de laboratorio de un mismo tipo de concreto, muchas veces los distintos procedimientos de curado, colado y compactación llevan a generar valores diferentes de resistencia en una misma mezcla, a este respecto el Código Modelo 1990 de la CEB-FIP proporciona una relación entre ambas resistencias;

$$\frac{f'c \text{ obra}}{f'c \text{ lab}} = 1 - \frac{fck \text{ (Mpa)}}{250} \text{ ,en (Mpa)}$$

$$\text{con, } \frac{f'c \text{ obra}}{f'c \text{ lab}} \leq 0.68$$

$$\text{para } fck \geq 80 \text{ (Mpa)}$$



La representación gráfica de los ensayos también se lleva a cabo mediante la curva esfuerzo deformación dónde tendremos por un lado a los esfuerzos que son resultado de la carga entre el área en contacto y por otro lado a las deformaciones unitarias instantáneas que son resultado de la relación entre el acortamiento y la longitud inicial, figura 25;

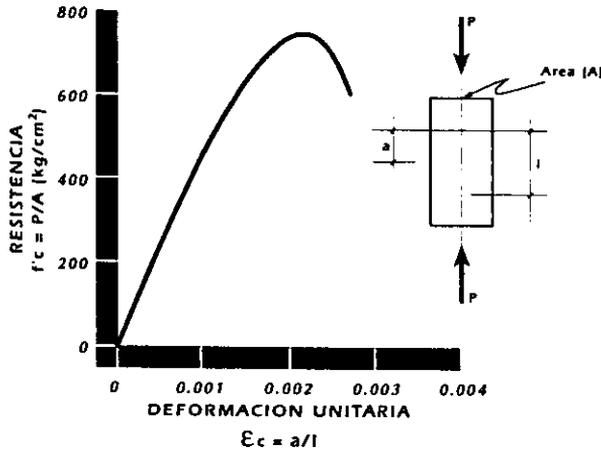


Figura 25

El reporte ACI 363R-92 menciona tres diferencias de los concretos de alta resistencia en su curva esfuerzo - deformación;

- La rama ascendente de la curva presenta en los concretos de alta resistencia un tramo de proporcionalidad lineal mayor y de pendiente más pronunciada.
- La deformación para el máximo esfuerzo es ligeramente mayor en los concretos de alta resistencia.
- La rama descendente de la curva presenta una pendiente más pronunciada en los concretos de alta resistencia.

Estas diferencias son consecuencia directa de la mejor adherencia de la interfase agregado - pasta en este tipo de concretos. La mayor proporcionalidad lineal de la relación carga - deformación es fiel reflejo del menor nivel de microagrietamiento que presentan dichos concretos frente a sollicitaciones moderadas. En concretos convencionales del orden de los (4450 psi) (31 Mpa), 313 kg/cm², el microagrietamiento de la interfase agregado - pasta comienza a progresar al alcanzarse un estado de sollicitación equivalente al 65% del de ruptura, en cambio para concretos de alta resistencia con (11000 psi) (76 Mpa), 770 kg/cm² los primeros síntomas de falla en la adherencia de la interfase citada se manifiestan al alcanzarse el 90% de la ruptura, a partir de dicho estado de carga, la ruptura del material se produce súbitamente y con menor deformación que en los concretos convencionales.

El menor nivel de microagrietamiento es confirmado en el reporte del Comité ACI 363R-92.

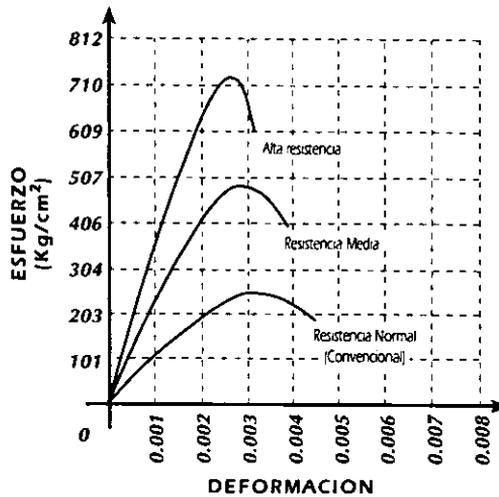
Con respecto al comportamientos de falla en compresión de estos concretos, *Fernández Canovas* dice en su investigación que la falla en compresión de los concretos de alta resistencia es frágil y explosiva, por su parte *Nilson*, agrega además de la fragilidad del material que aún cuando el límite de proporcionalidad entre esfuerzo y deformación se alcanza para un porcentaje del esfuerzo de falla muy superior al de los



concretos convencionales, la deformación límite útil es mucho menor, menciona que el comportamiento de concretos con resistencias superiores a los (69 Mpa) (10000 psi), 700 kg/cm² es aproximadamente lineal y elástico y frágil.

La figura 26 muestra los diagramas esfuerzo - deformación adoptados por Nilson representando al concreto de alta resistencia y otras dos categorías de concreto.

Figura 26



II.2.2 Resistencia a la tensión.

Siendo el concreto un material frágil, la determinación de la resistencia a la tensión se vuelve un poco difícil; sin embargo, se desarrolló un ensaye de resistencia a tensión indirecta que es muy utilizado, se trata de la prueba brasileña que consiste en someter un cilindro a compresión lineal diametral, la carga se transmite a través de un material relativamente suave como triplay o corcho.

Según la teoría de la elasticidad, los esfuerzos de tensión se distribuyen según la figura 27,

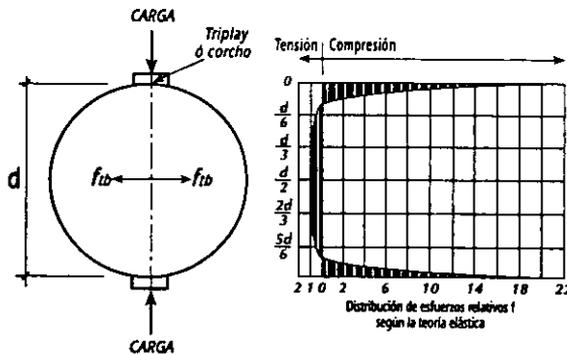


Figura 27



y según ésta teoría, los esfuerzos de tensión se calcularían con la siguiente expresión:

$$(ftb)_{\text{máx}} = \frac{2P}{\pi dl}$$

dónde:

P: es la carga máxima

d: es el diámetro del espécimen

l: es la longitud del espécimen

pero como ya sabemos, el concreto es un material no elástico y este tipo de pruebas no miden la tensión uniaxial por lo tanto los resultados bajo ésta teoría no son verdaderamente representativos del fenómeno de tensión.

No obstante a estas desventajas el conocimiento y cuantificación de la resistencia a la tensión es importante porque influye en el desarrollo del esquema de fisuración de los concretos y como consecuencia en sus características de deformación y durabilidad además de influir en su adherencia, resistencia a cortante y torsión.

El comportamiento de los concretos de altas resistencias a la tensión es reportado por el comité ACI 363R-92, Dewar, un investigador, estudió la relación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la tensión indirecta, los concretos de esta investigación soportaban hasta (12,105 psi) (83.79 Mpa), 850 kg/cm² a los 28 días, sus resultados indicaron que a bajas resistencias, la tensión indirecta era tan alta como el 10% de la compresión, pero a mayores resistencias a compresión la tensión indirecta se redujo al 5%.

Otros investigadores como Carrasquillo, Nilson y Slate, modelaron la resistencia a tensión mediante una ecuación que relaciona a los esfuerzos en compresión y al esfuerzo de falla en tensión, ellos encontraron que el esfuerzo de falla no variaba mucho del rango usual que se observa en la figura 28;

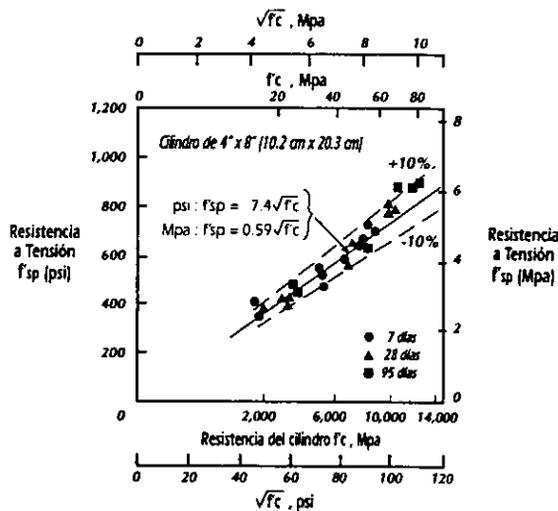


Figura 28



para pruebas con resistencias a compresión a partir de los (6000 psi) (41 Mpa), 420 kg/cm², los porcentajes de resistencia a tensión correspondientes están en el rango del 7.4 al 8.1% aproximadamente, cabe señalar que para estos ensayos se utilizaron cilindros de 10.2 X 20.3 cm.

Las ecuaciones propuestas para determinar el esfuerzo de falla en tensión para concretos de peso normal son:

$$f_{sp}' = \bar{f}_t = 7.4 \sqrt{f'c} \text{ (psi)}$$

para 3000 psi < f'c < 12,000 psi

$$f_{sp}' = \bar{f}_t = 0.59 \sqrt{f'c} \text{ (Mpa)}$$

para 21 Mpa < f'c < 83 Mpa

En el año de 1992, se realizaron estudios que tuvieron como finalidad encontrar la correlación resultante entre las resistencias a compresión y a tensión indirecta, se utilizaron concretos de alta resistencia con microsilíce, superfluidizantes, curados de 50, 20 y 30°C, edades de ensaye de 7, 28 y 90 días, además de disponer en ese momento de 150 pares de valores para la determinación buscada. La tabla 5 resume los primeros resultados encontrados;

PARAMETROS DETERMINADOS	COMPRESION f'c	TENSION INDIRECTA
Valor máximo (Mpa)	104.00	8.00
Valor medio (Mpa)	82.00	6.50
Valor mínimo (Mpa)	57.00	5.00
Desviación Estandar (Mpa)	11.00	0.60
Coefficiente de Variación (Mpa)	13.40	9.24
Coefficiente de correlación (Mpa)	0.666	
Ecuación de la correlación obtenida	$f_t = 0.9 f'c^{0.45}$	
Intervalo de variación (Mpa)	± 0.9	
Campo de validez (Mpa)	$50 \leq f'c \leq 120$	

Tabla 5

La gráfica de la figura 29 muestra la representación de la citada correlación que se obtuvo, su intervalo de variación así como también los valores de cada una de las edades de ensaye consideradas indicando su estado de saturación.

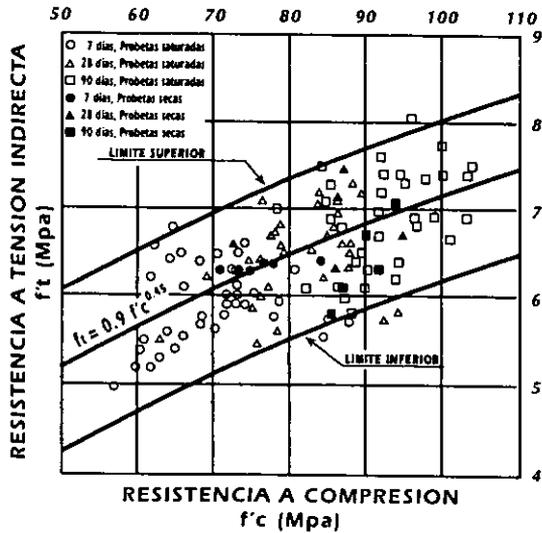


Figura 29

A partir de los valores de la gráfica anterior se determinaron los valores medios de los esfuerzos a compresión y tensión indirecta, mismos que se resumen en la tabla 6; ésta nos proporciona un valor final de la resistencia a tensión indirecta de aproximadamente 8% de su resistencia a compresión.

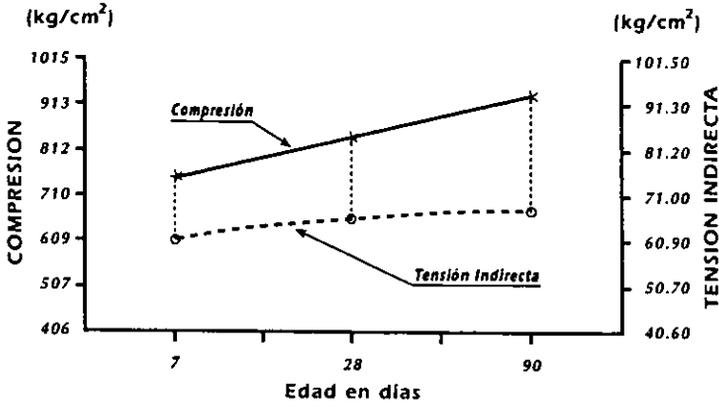
EDAD (Días)	RESISTENCIA A COMPRESION		RESISTENCIA A TENSION INDIRECTA		RELACION ENTRE RESISTENCIAS
	(Mpa)	(kg/cm ²)	(Mpa)	(kg/cm ²)	(%)
7	71.4	724.71	6.0	60.9	8.40
28	81.8	830.27	6.5	65.97	7.94
90	90.2	915.53	6.8	69.02	7.54
VALORES MEDIOS	81.13	823.50	6.43	65.29	7.9 = 8.0

Tabla 6

La investigación finaliza determinando mediante una representación gráfica de los valores anteriores, figura 30; la falta de proporcionalidad directa entre ambos esfuerzos, los valores de compresión y tensión indirecta están en función del tiempo (edad de ensaye en días);



Figura 30



II.2.3 Resistencia a la Flexión.

El conocimiento de la resistencia a flexión del concreto es necesario para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico y otras aplicaciones que se verán en el capítulo VII de este trabajo; la determinación de los esfuerzos de flexión se basan en la teoría de la flexión elástica y particularmente en el módulo de ruptura que se mencionó en el subtema II.1.7, en donde se dijo que la manera de medir la resistencia a tensión del concreto es sometiendo a la flexión una viga simple de concreto obteniendo así el módulo de ruptura; la teoría elástica nos dice que el esfuerzo de tensión en la fibra inferior correspondiente a la rotura se determina mediante la expresión:

$$f_r = \frac{M}{I} C$$

dónde:

f_r : es el módulo de ruptura [kg/cm²]

M: es el momento flexionante [kg-cm]

I : es el momento de inercia en la sección en la sección de la viga [cm⁴]

C : es la distancia del eje neutro a la fibra más alejada en tensión [cm]

como podemos darnos cuenta, la prueba de flexión es también una medida indirecta de la tensión que genera un esfuerzo llamado módulo de ruptura.

Sin embargo, el cálculo del módulo de ruptura debe tomar en cuenta que la suposición de distribución de esfuerzos desde el eje neutro hasta la fibra en tensión no es triangular como lo dice la teoría, si no que realmente es parabólica, debido a esto se han realizado estudios del fenómeno de flexión en concretos de alta resistencia y Dewar en su estudio de concretos con resistencias de hasta (12,105 psi) (83.79 Mpa) 850 kg/cm², encontró que la resistencia a tensión indirecta es de al rededor del 70% de la resistencia a la flexión a los 28 días de edad;

$$\text{RESISTENCIA A TENSION INDIRECTA} \approx 0.70 \left(\text{RESISTENCIA A LA FLEXION} \right)$$



despejando la resistencia de flexión:

$$\frac{\text{RESISTENCIA A TENSION INDIRECTA}}{0.70} \approx \text{RESISTENCIA A LA FLEXION}$$

que expresado en literales es igual a:

$$f'flx = \frac{f'r}{0.70}$$

o también:

$$f'flx = 1.428 f'r$$

dónde;

$f'flx$: es el esfuerzo de flexión en $[kg/cm^2]$

$f'r$: es el esfuerzo de tensión indirecta en $[kg/cm^2]$

1.428: coeficiente que varía dependiendo de el tipo de prueba a flexión, de la relación (A/C), de la carga de prueba, del tipo de agregados y del tipo de curado

Según el reporte del comité ACI 363, se establece un coeficiente que varía entre 1.4 y 1.6.

El estudio realizado en el año de 1992 al que se hace referencia en el subtema anterior II.2.2, se realiza un análisis del coeficiente que afecta a la tensión indirecta ($f'r$). Se utilizaron materiales de tipo español y se realizaron las pruebas bajo las normas que rigen en ese lugar (España); los resultados proporcionaron un valor medio del coeficiente de 1.81; el resumen del estudio se presenta en la tabla 7;

DETERMINACION EFECTUADA	DOSIFICACION No.1 EDAD DE ENSAYO		DOSIFICACION No.2 EDAD DE ENSAYO		
	7 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	
Revenimiento (cm)	16		15.5		
Resistencia a Compresión (Mpa)	85.1	105.3	81.0	103.5	
Resistencia a la tensión indirecta (Mpa)	7.10	7.20	6.25	7.10	
Resistencia a flexión (Mpa)	12.40	12.70	12.05	12.85	
Módulo de Elasticidad (Mpa)	37,920	41,300	36,820	40,960	
RELACION $f'flx / f'r$	VALORES UNITARIOS	1.75	1.76	1.93	1.81
	VALOR MEDIO	1.81			

Tabla 7



Finalmente, podemos decir que, debido a la relación existente entre el módulo de ruptura y la resistencia a compresión, es lógico pensar que entre más alta sea la resistencia a compresión mayor será el módulo de ruptura del concreto, por consiguiente se tendrá una mayor resistencia a la flexión.

II.2.4 Resistencia ganada con la edad.

El fenómeno de incremento de resistencia al paso del tiempo en concretos con alta resistencia es muy similar al de los concretos convencionales en cuanto a su tendencia, es decir, que en el período de los primeros 28 días se desarrolla un elevado porcentaje de lo que será la resistencia del material y posteriormente a los 56 o 90 días el aumento de resistencia es pequeño y gradual al paso de los días, sin embargo, los estudios realizados al respecto establecen que los concretos de alta resistencia tienen diferencias en su ganancia de resistencia a medida que transcurre el tiempo, como primer punto podemos mencionar que el concreto de alta resistencia presenta un mayor rango de ganancia de resistencia a edades tempranas en comparación con los concretos convencionales, el reporte del comité ACI 363 - 92 menciona dos posibles causas del fenómeno;

el rango más alto del desarrollo de resistencia a edades tempranas es causado por:

- el incremento en la temperatura interna del concreto debido al calor excesivo de hidratación.
- las distancias tan reducidas entre partículas hidratadas debido a las bajas relaciones (A/C).

y como segundo punto mencionar que el incremento de resistencia a edades posteriores a los 28 días es inferior que en los concretos convencionales, la posible causa sería;

- la ausencia de agua libre en la masa del concreto que posibilite más hidratación a edades tardías de las partículas de cemento.

II.2.5 Resistencia a la fatiga.

Entendiendo a la fatiga como el elemento que falla después de un número muy grande de repeticiones de carga, podemos decir, que los estudios realizados con respecto a éste fenómeno de concretos de alta resistencia han arrojado resultados interesantes principalmente la confirmación de la influencia que tienen las condiciones de saturación (estado de humedad) y el tamaño de las probetas de ensaye, los estudios realizados por *Waagaar* de concretos de alta resistencia de (55 a 75 Mpa) [558 a 761 kg/cm²] establecen un mejor comportamiento de los especímenes secos en relación con los especímenes saturados para un mismo nivel de carga.

Otros investigadores encontraron que el período de agotamiento por fatiga resulta sensiblemente inferior en los concretos saturados.

Por otra parte el CEB, en 1988, señala que para los concretos de resistencias mayores la capacidad de carga cíclicas será similar cuanto más próxima esté de un concreto convencional.

El reporte del comité ACI 363R - 92 señala que para efectos prácticos y en base a la experiencia la resistencia a la fatiga de los concretos de alta resistencia es la misma que para concretos de resistencia normal.

Las consideraciones anteriores nos hacen pensar que el fenómeno de resistencia a la fatiga no depende



de la alta resistencia a compresión del concreto y dejaría de ser una característica principal y destacable pasando a un segundo término en grado de importancia.

11.2.6 Resistencia al fuego.

Algunos proyectos desarrollados con éste tipo de concreto han sido aprovechados para evaluar la resistencia al fuego de los mismos.

Se llevaron a cabo pruebas en estructuras reforzadas fabricadas con concreto de alta resistencia con y sin humo de sílice con rangos de resistencia de los 491 a los 1,229 kg/cm².

Las muestras fueron expuestas al fuego por 4 hrs. evaluándose la integridad física y monitoreando los incrementos de temperatura. Los estudios representan un testimonio importante ya que se encontró que las muestras no tuvieron comportamientos diferentes comparados con los concretos normales y ninguna de las muestras exhibió fragmentación de las superficies expuestas.

Como sabemos, la resistencia al fuego constituye uno de los parámetros importantes para evaluar la durabilidad de un concreto, por tanto, si los estudios manifiestan un comportamiento aceptable con respecto a pruebas de fuego, la durabilidad estará garantizada.

11.2.7 Resistencia a la corrosión.

La corrosión de los aceros ahogados en concreto afecta el desempeño mecánico de las estructuras y repercute en mantenimientos y reparaciones muchas veces costosas; a éste respecto la resistencia a la corrosión del refuerzo de acero en concretos de alta resistencia es excelente principalmente por las bajas permeabilidades del material; cuando se estudió el fenómeno de permeabilidad en el subtema 11.1.11, se dijo que la disminución de la permeabilidad mejoraba la resistencia al ataque de sulfatos, productos químicos, penetración del ión cloruro y por supuesto, la elevada disminución en la absorción de agua.

La incorporación de adiciones minerales en el concreto de alta resistencia es una de las principales causas de que la permeabilidad disminuya y tenga como consecuencia la mencionada reducción de corrosión en el acero.

En el programa de investigación del año de 1989 al que se hace referencia en el capítulo I de este trabajo, se realizó un análisis sobre la velocidad de corrosión de los concretos de alta resistencia, las velocidades de corrosión se midieron por la resistividad interna de los especímenes contra la impedancia de corriente alterna, las mediciones indicaron que el acero de refuerzo sería pasivo a la corrosión, todas las velocidades de absorción fueron bajas y reflejaban tendencias similares a las correspondientes permeabilidades al cloruro.

La gran calidad en cuanto a la durabilidad del concreto de alta resistencia es resultado del conjunto de características como la de la baja corrosión del acero de refuerzo.



II.2.8 Resistencia a la congelación y deshielo.

El fenómeno de congelación y deshielo en concretos se puede presentar en algunas estructuras dónde las condiciones climáticas son severas; cuando en un concreto húmedo (estado saturado), se congela el agua, se producen presiones osmóticas e hidráulicas en los capilares y poros de la pasta de cemento y del agregado, si la presión sobrepasa la resistencia a tensión de la pasta o del agregado, la cavidad se dilatará y llegará a romperse.

El efecto acumulativo de este proceso causa deterioros en forma de agrietamiento, descascaramientos y desmoronamientos. Debido a esto se recomienda que los concretos en estas condiciones tengan inclusión de aire, los vacíos de aire incluido actúan como cámaras huecas en la pasta para que penetre el agua congelable, liberando así las presiones evitando que el concreto sufra daños.

Por otra parte, se dice que los requerimientos del contenido de aire en concretos de alta resistencia debe ser mínimo o prácticamente nulo, ésta es una de las principales premisas de la elaboración de concretos de alta resistencia, por lo tanto si se eliminan vacíos de agua y de aire para provocar altas resistencias a compresión, entonces se está tratando de una incompatibilidad entre el fenómeno de resistencia a congelación y deshielo y entre la elaboración del propio concreto.

Con respecto a los estudios y ensayos realizados sobre congelación y deshielo de concretos de alta resistencia, en su mayoría reportan deterioros y fallas cuando hay ausencia de contenido de aire, sin embargo el reporte ACI 363R - 92 señala que *Perenchio* y *Klieger* obtuvieron una excelente resistencia al congelar y descongelar concretos de relación (A/C) de 0.30, 0.35 y 0.40 y resistencias de hasta (11,580 psi) 810 kg/cm² a los 28 días, más recientemente el estudio de la PCA y CANMET se encontró que las mezclas de alta resistencia con altos contenidos de cemento 563 kg/m³ y humo de sílice 89kg/m³ no mostraron señales de deterioro aún en exposiciones poco comunes de ciclos congelación y deshielo. Los investigadores atribuyen estos resultados a la reducción significativa de contenido de agua congelable y al incremento de la resistencia a tensión de los concretos de alta resistencia.

II.2.9 Deformaciones.

Para evaluar las deformaciones que se producen en concretos de alta resistencia es necesario basarnos en las propiedades analizadas anteriormente como el módulo de elasticidad, contracción por secado, fluencia etc., determinando así el comportamiento de cambios volumétricos y deformaciones unitarias pudiendo establecer como consecuencia una comparación real contra los concretos de resistencia normal o convencional.

La deformación unitaria instantánea se ve reducida debido a que el módulo de elasticidad es mayor en este tipo de concretos (ver figura 12), por otro lado la gran rigidez produce disminuciones en la deformación permanente.

Los estudios sobre fluencia de concretos de alta resistencia revelaron disminuciones significativas en comparación con los concretos convencionales.

En lo que respecta a cambios por humedad, la contracción por secado se vio reducida sobre todo por la inclusión de adiciones minerales, los cambios de temperatura son similares a los concretos convencionales y



cambios mínimos de volumen a productos y reacciones químicas debido a la mayor durabilidad del concreto de alta resistencia.

Muchos de los programas de investigación se abocaron a investigar las deformaciones dependientes del tiempo en estructuras reales como edificios de gran altura instrumentando vigas, columnas y muros hechos con mezclas de alta resistencia, las pruebas de campo realizadas revelaron disminuciones en las deformaciones a largo plazo y la influencia significativa de fenómenos como el de contracción por secado, fluencia, coeficiente de expansión térmica y módulo de elasticidad.

El reporte del comité ACI 363R - 92 da a conocer los resultados de estudios sobre el flujo plástico o deformación diferida se hace destacar que cuando se hacen concretos de alta resistencia con reductores de agua de alta rango la deformación diferida se reduce aún más. La disminución de la deformación total de concretos de alta resistencia es inminente y está puede constituir un parámetro importante en la determinación de las ventajas y desventajas además detener aplicaciones estructurales como se verá en el capítulo VII de este trabajo.

II.3 Los materiales para su elaboración y su importancia de cada uno de ellos.

II.3.1 Cemento.

El cemento Portland que se utiliza para elaborar concretos de alta resistencia no tiene que ser especial, sin embargo deben tenerse ciertas consideraciones; como primer punto podemos establecer que el cemento que se utilice debe tener la mayor resistencia a compresión posible, sobre todo a edades prolongadas (90 días).

Como segundo punto, debemos entender que los contenidos de cemento dependerán de la cantidad de resistencia deseada o de proyecto, a su vez la resistencia es función de la relación (A/C).

El tercer punto, es el relacionado con la compatibilidad que debe existir entre el cemento y la inminente incorporación de aditivos químicos.

El cuarto y último punto es el relacionado con la cuestión económica, si bien es cierto que la incorporación de aditivos químicos y adiciones minerales en el concreto nos van a dar como resultado un material más costoso de lo normal, debemos tratar de optimizar los contenidos de cemento de tal manera que el uso de estos concretos no se vea limitado.

En relación al primer punto, es importante establecer la manera en que se desarrolla la resistencia de la pasta de cemento; la resistencia de la pasta depende de su contenido de silicato tricálcico (SC_3), silicato bicálcico (SC_2) y aluminato tricálcico (AC_3). El (SC_3), contribuye grandemente en la resistencia en las primeras edades y a la resistencia final, el (SC_2) tiene menor incidencia al principio pero se vuelve más trascendente tiempo después, y el (AC_3) tiene una particular influencia en las primeras edades.

Cuando no sea necesaria una alta resistencia inicial, la disminución en el contenido de (AC_3), y el incremento de los contenidos de (SC_3), y (SC_2) especialmente, tendrá efectos muy favorables en la resistencia final del concreto, además de que en estas condiciones, el calor de hidratación es menor.

La influencia que tienen los otros componentes del cemento en la resistencia es mínima, la otra consideración que es de importancia hacer mención es la referente a la finura de molido del cemento, una alta superficie específica favorece la velocidad de reacción pero puede reducir el desarrollo posterior de resistencias.



En relación al contenido de cemento citado en el segundo punto, se dice que el consumo de cemento necesario para alcanzar altas resistencias depende también de la técnica que se utilizará para consolidar el concreto, un ejemplo claro está en el concreto compactado con rodillos o los concretos que se utilizan en la fabricación de los durmientes, con cantidades de 300 kg/m^3 aproximadamente se llegan a alcanzar resistencias de 700 kg/cm^2 , (69 Mpa), pero en condiciones dónde el concreto debe ser colado en cimbras estrechas con refuerzo de acero, las cantidades varían desde los 400 hasta los 600 kg por metro cúbico. Se debe tener cuidado en utilizar altos contenidos de cemento ya que podemos ocasionar una liberación muy rápida de calor de hidratación produciendo fisuras y grietas en la masa de concreto que no son deseables, normalmente existe una dosis óptima de cemento, en cuanto a resistencia se refiere, es por eso que se deben realizar los ensayos variando el contenido de cemento y tomando en cuenta la incorporación de las llamadas adiciones minerales.

Algunas publicaciones recomiendan rangos de contenido de cemento de entre los 380 y 560 kg por metro cúbico y otras publicaciones más conservadoras recomiendan rangos de entre los 400 y los 500 kg por metro cúbico.

La compatibilidad que se menciona en el tercer punto va a depender de la composición química del cemento, si existen diferencias en ésta composición se podrían presentar problemas de efectividad con los superplastificantes, además de que un determinado superplastificante puede comportarse de manera diferente con cementos distintos.

A este respecto, también será necesario ensayar distintas combinaciones de diferentes cementos con distintos aditivos hasta encontrar el mejor comportamiento.

Para tratar de establecer un patrón de referencia en cuanto al tipo de cemento necesario en la elaboración de concretos de alta resistencia en nuestro país, se presentan en la tabla 8 los valores de composición química exigidos por la norma ASTM C-150 a los cementos del tipo II que se utilizan en los Estados Unidos para la fabricación de concretos de alta resistencia;

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	AC_3	PERDIDA AL FUEGO	RESIDUO INSOLUBLE
$\geq 20.0 \%$	$\leq 6.0 \%$	$\leq 6.0 \%$	$\leq 6.0 \%$	$\leq 3.0 \%$	$\leq 8.0 \%$	$\leq 3.0 \%$	$\leq 0.75 \%$

Tabla 8

II.3.2 Gravas.

Los agregados gruesos utilizados en la elaboración de concretos de alta resistencia deben poseer ciertas características que proporcionen los mejores resultados en cuanto a:

- CALIDAD
- RESISTENCIA MECANICA
- MODULO DE ELASTICIDAD
- COEFICIENTE DE FORMA, Y
- TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO



el buen y adecuado comportamiento de estos factores es resultado de ciertas características en el propio agregado, en éste sentido las que ejercen mayor influencia en la elaboración de concretos de alta resistencia son:

- Configuración geométrica y estado superficial,
- Granulometría,
- Propiedades mecánicas, y
- Estabilidad química.

En la tabla 9, se indican las características de los agregados que influyen en las propiedades del concreto de alta resistencia en estado fresco:

PROPIEDADES DEL CONCRETO	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
Dosificación	- Granulometría - Forma - Textura
Trabajabilidad	- Granulometría - Forma y tamaño - Absorción - Contenido de huecos
Bombeabilidad	- Granulometría - Forma - Textura - Densidad

Tabla 9

Y en la tabla 10 de la siguiente página, se muestran las características de los agregados que influyen en las propiedades del concreto de alta resistencia en estado endurecido.

En lo que respecta a la forma más adecuada del agregado, se dice que las gravas deben presentar la forma más cúbica posible evitando las formas lajosos o aciculares que son menos resistentes y producen concretos con menos trabajabilidad además de que también se debe buscar una cierta rugosidad superficial de los agregados gruesos ya que mejora en gran medida la necesaria adherencia a la pasta del cemento.

En cuanto a la granulometría, el agregado grueso debe tener un tamaño máximo pequeño para conseguir una superficie de contacto pasta - agregado mayor y aumentar así la superficie de adherencia, algunos autores recomiendan usar un T.M.A. de entre 10 y 15 mm, otros recomiendan 12 y 14 mm pero algunos estudios han descubierto que los agregados con T.M.A. de entre 9.5 mm (3/8") y 12.7 mm (1/2") parecen dar la resistencia óptima buscada.

Para cada fuente de agregado y nivel de resistencia del concreto existe un tamaño óptimo de agregado que producirá la mayor resistencia a compresión por kilogramo de cemento, para encontrar el tamaño óptimo se deberán hacer mezclas de prueba con agregados y contenidos variables de cemento.

El agregado grueso debe tener una excelente resistencia ya que ésta es proporcional a la resistencia del concreto en conjunto, es decir, que si se quiere conseguir un concreto de elevada resistencia, entonces los agregados deberán tener una resistencia muy elevada.



PROPIEDADES DEL CONCRETO	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO	PROPIEDADES DEL CONCRETO	CARACTERISTICAS DEL AGREGADO
DURABILIDAD Resistencia a la congelación y deshielo Permeabilidad Resistencia a la erosión Reactividad Resistencia a los ácidos	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura de poros - Permeabilidad - Resistencia a la tensión - Sensibilidad al agua - Estabilidad de volumen - Estructura de poros - Módulo de elasticidad - Permeabilidad - Sensibilidad al agua - Solubilidad en agua - Dureza - Composición mineralógica - Composición mineralógica 	CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS Coeficiente de dilatación térmica Conductividad térmica Calor específico	<ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de dilatación térmica - Densidad - Composición mineralógica
		CAMBIOS DE VOLUMEN Contracción por Secado Contracción diferencial Contracción por carbonatación	<ul style="list-style-type: none"> - Gramulometría - Forma - T. M. A. - Textura - Absorción - Estructura de poros - Composición mineralógica - Módulo de Poisson - Módulo de elasticidad
		DENSIDAD	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad
		MÓDULO DE ELASTICIDAD	<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de elasticidad
		ECONOMÍA Costo	<ul style="list-style-type: none"> - Limpieza - Forma - Granulometría
RESISTENCIA MECÁNICA Compresión Tensión y Flexión Cortante y Torsión Fatiga	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia mecánica - Textura superficial - Forma - Composición Mineralógica - Granulometría - Absorción - Módulo de elasticidad 		

Tabla 10

En la tabla 11 se presentan datos relativos a la resistencia a compresión de rocas que se utilizan para elaborar concretos de alta resistencia;

TIPO DE AGREGADO	RESISTENCIA A COMPRESION (kg/cm ²)
SIENITA, GRANITO	1,269 - 2,436
DIORITA GABRO	1,725 - 3,045
BASALTO	2,537 - 4,060
DIABASA	1,675 - 2,537
SILICE	1,522 - 3,045
OFITA	1,522 - 3,045
CALIZA	508 - 2,030

Tabla 11

Y con respecto al módulo de elasticidad, sabemos que en los concretos convencionales la relación agua - cemento es la que incide principalmente en éste parámetro siendo las zonas más débiles la pasta hidratada del cemento y la zona de transición alrededor de la grava, en contraste, en los concretos de



alta resistencia se produce una transferencia de tensiones entre el mortero y la grava, por lo que el agregado grueso está involucrado en el comportamiento mecánico del concreto desde el comienzo de la carga aún cuando ésta sea pequeña, debido a la anterior causa el módulo de elasticidad del concreto en estudio se ve fuertemente influenciado por las propiedades elásticas de la grava.

Tomando en cuenta ésta relación de módulos elásticos es aconsejable utilizar agregados procedentes de rocas cuyo módulo sea igual o superior a (40,000 Mpa), 406,000 kg/cm² y mayor cuanto más alta sea la resistencia de proyecto buscada.

La tabla 12 proporciona valores del módulo de elasticidad de rocas potencialmente utilizables en la elaboración de concretos con altas resistencias;

TIPO DE AGREGADO	MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²) X 1,000
Granitos sanos	406 a 711
Riolitas	711 a 812
Sienitas	609 a 812
Dioritas	406 a 609
Microdioritas	914 a 1,015
Ofitas	914 a 1,015
Basaltos	609 a 792
Cuarcitas	924
Calizas y Dolomitas duras	508 a 711

Tabla 12

II.3.3 Arenas.

Con respecto a los agregados finos (arenas), diversos investigadores y publicaciones coinciden en establecer que debido al alto contenido de cemento y adiciones minerales como humo de sílice o ceniza volante, la cantidad de partículas finas es suficiente para garantizar la trabajabilidad y la cohesión, por lo tanto es recomendable el empleo de arenas con módulos de finura (M.F.) comprendidos entre 3.00 y 3.25; se dice que estos valores producen buenas trabajabilidades además de proporcionar también elevadas resistencias a compresión.

Las investigaciones realizadas con respecto al módulo de finura de concretos de alta resistencia indican que para valores de 2.5 a 2.7, se producen mezclas pegajosas de menor resistencia.

La procedencia de las arenas debe ser preferentemente obtenida de procesos naturales ya que las partículas de agregado fino presentan formas regulares las cuáles también favorecen la unión con la pasta de cemento.

Cuando las arenas se obtienen por procedimientos de machaquéo presentan formas excesivamente angulosas que son poco recomendables en la elaboración de concretos de alta resistencia debido a la enorme demanda de agua que su uso implica para conseguir concretos trabajables, aspecto que se contraponen a los principios de elaboración del concreto en estudio.

Cuando no es posible la utilización de arenas obtenidas naturalmente se puede utilizar una mezcla que contenga en mayor porcentaje arenas naturales y se complemente por arenas de machaquéo.

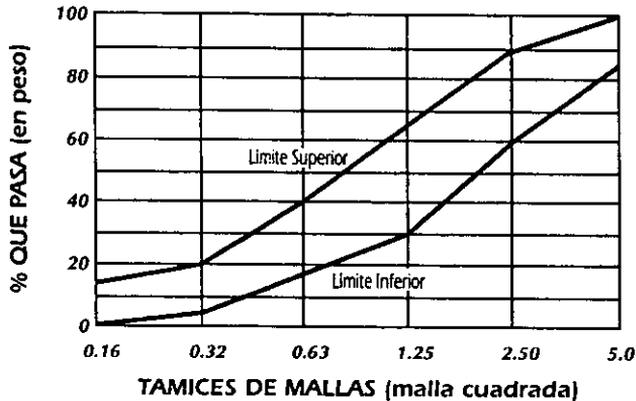
Un último aspecto que es de importancia es el relacionado con el cuidado de la cantidad de humedad



de la arena, las variaciones de humedad en la misma pueden afectar la relación (A/C) que repercute a su vez en la resistencia final del concreto debido a esto, se recomienda que el almacenamiento del agregado fino no se haga a la intemperie y también tener especial cuidado en la incorporación a la mezcla de arenas con contenidos de humedad incontrolados o variables en su masa.

En la figura 31 se representa la curva granulométrica recomendada por *García Ballester* y otros, para la composición del agregado fino (arenas) en concretos de alta resistencia;

Figura 31



II.3.4 Agua.

En el reporte del comité ACI 363-92 se recomienda cualquier agua natural que sea potable para elaborar concretos de alta resistencia, sin embargo, la calidad de los materiales de éste concreto nos hace suponer la utilización de aguas que tengan un menor aporte de sustancias nocivas a la resistencia del concreto principalmente, debido a esto, la utilización de las aguas de mar queda restringida por su composición química.

En éste sentido también será inconveniente la incorporación de aguas que mezcladas en el concreto produzcan resistencias mínimas iguales al 90% del patrón, norma ASTM C 94-92.

El reporte indica también que cuando se tengan dudas en cuanto a la naturaleza de la posible agua de mezclado en concretos de alta resistencia, se realice la prueba ASTM C 109.

Es importante señalar también, que algunas impurezas del agua pueden afectar de manera adversa a la durabilidad del concreto de alta resistencia, por lo tanto, cuando se tengan aguas con 2,000 ppm de sólidos disueltos o mayores, se debe tener cuidado en su utilización siendo más recomendable un análisis previo para evaluar los posibles efectos adversos.

II.3.5 Aditivos.

Sin el empleo de los aditivos químicos sería prácticamente imposible elaborar concretos de alta resistencia ya que son precisamente éstos los responsables de la reducción del contenido de agua, manteniendo o aumentando la trabajabilidad de la mezcla.

La norma ASTM C 494-92 considera siete tipos de aditivos y la norma ASTM C 1017 considera dos tipos;



TIPO DE ADITIVO	COMPOSICION	TIPO DE ADITIVO	COMPOSICION
ASTM C 494 - 92			
TIPO A: Reductores de Agua	Lignosulfonatos Acidos caboxilicos hidroxilados Carbohidratos	TIPO F: Reductores de agua de alto rango	Condensados de formaldehido de melamina sulfonatados Condensados de formaldehido de naftaleno sulfonatados Lignosulfonatos
TIPO B: Retardantes del fraguado	Lignina Bórax Azucares Acido tartárico y sales	TIPO G: Reductores de agua de alto rango y retardantes	Ver composición Tipo A y F.
TIPO C: Aceleradores del fraguado	N/D	ASTM C 1017	
TIPO D: Reductores de agua y retardantes del fraguado	Ver composición Tipo A y B	TIPO 1: Superplastificante	Ver composición Tipo F
TIPO E: Reductores de agua y acelerantes del fraguado	Ver composición Tipo A	TIPO 2: Superplastificante y retardante	Ver composición Tipo A y F

Tabla 13

de todos estos aditivos los reductores de agua de alto rango ASTM C 494-92 y los superplastificantes ASTM 1017, son los más adecuados y utilizados para mezclas de concreto de alta resistencia; a su vez éstos aditivos se clasifican en cuatro categorías según su composición:

- Categoría A : Condensados de melamina - formaldehido sulfonado
- Categoría B : Condensados de naftaleno - formaldehido sulfonado
- Categoría C : Lignosulfonatos modificados
- Categoría D: Otros componentes orgánicos tales como ésteres del ácido sulfónico, ésteres de carbohidratos, etc.

El papel que desempeñan éstos aditivos y sus compuestos es reducir la porosidad y permeabilidad por la disminución del agua y además como mejoradores de la durabilidad. También disminuyen la tendencia de las partículas de cemento al flocularse como consecuencia de la acción de fuerzas electrostáticas entre los granos de cemento y la elevada tensión superficial del agua que está a su alrededor.

Los reductores de agua son productos químicos que incorporan un cierto número de moléculas orgánicas capaces de neutralizar las cargas eléctricas de los granos de cemento y por consecuencia, su capacidad de floculación. Las moléculas orgánicas son relativamente cortas por lo que, al no poder recubrir en su totalidad la superficie exterior de los granos de cemento, el efecto producido tiene un carácter local.

Debido a dos efectos secundarios negativos intrínsecos al uso de éstos productos (retraso de los tiempos de fraguado del concreto y oclusión de burbujas de aire en su masa), su dosificación no puede ser aumentada a voluntad, por lo que su poder dispersante es limitado, la reducción de la cantidad de agua de amasado necesaria puede alcanzar valores próximos al 8 o 10 %.

Los lignosulfonatos son moléculas extraídas de los desechos de pasta de papel, se caracterizan por



poseer una estructura molecular más larga que la de los reductores de agua, lo que permite un recubrimiento más efectivo de las partículas de cemento, como consecuencia, la reducción en la cantidad de agua de amasado que es posible está entre el 10 y 15 %, los efectos secundarios de retraso de tiempos de fraguado y oclusión de burbujas de aire también son manifestadas.

Los superplastificantes son polímeros pilocondensados de melamina formaldehído sulfonado o de naftaleno - formaldehído sulfonado que poseen cadenas de gran longitud y pocas ramificaciones laterales, prácticamente están exentos de impurezas y permiten su uso en dosificaciones elevadas sin poseer en general, efectos colaterales indeseables. Estos polímeros dan mayor cohesión a la pasta sin alterar su fluidez, pudiendo por tanto, producirse concretos de muy baja relación (A/C) y con gran plasticidad dando lugar también a una microestructura muy densa con propiedades equivalentes o superiores a la de los agregados empleados en concretos.

Los efectos más importantes de los superplastificantes son consistencias más bajas que pueden ser fluidas para la misma relación (A/C) y la misma cantidad de agua en la mezcla si se añade una cantidad suficiente de aditivo, se reduce la cantidad de agua de un 20 hasta un 30 % manteniendo la misma consistencia de la mezcla obteniendo por tanto, mezclas con relación (A/C) menor y mayor resistencia además de mejor durabilidad como consecuencia de la reducción de la permeabilidad.

Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta, es el de la compatibilidad del cemento y el superplastificante, se ha comprobado que cementos y aditivos que satisfacen respectivamente las exigencias normativas correspondientes, desarrollan al ser puestos en contacto, comportamientos reológicos inexplicables que conducen a pérdidas de trabajabilidad en el concreto, en esos casos, se habla de incompatibilidad del cemento y aditivo, de esta posibilidad surge la necesidad de realizar ensayos previos en condiciones controladas de laboratorio.

Se recomienda incorporar el aditivo en dos partes; la primera durante el mezclado de los materiales en una cantidad que permita conseguir docilidad en el transporte y la segunda, a pie de colado para compensar la pérdida de docilidad durante el transporte.

11.3.6 Adiciones minerales.

Las adiciones minerales en su mayor parte son minerales provenientes de subproductos industriales considerados como residuos, su empleo en los concretos presenta elevados beneficios por la economía, consumo de energía, protección ambiental y conservación de recursos naturales. Técnicamente los beneficios más importantes se presentan en forma de aumento de resistencias, disminución de la permeabilidad y por la tanto, aumento de durabilidad.

En el caso de concretos de alta resistencia las más utilizadas son el microsílíce o humo de sílice y en menor escala las cenizas volantes.

Debido a la finura de estos materiales puzolánicos se consiguen mejoras importantes de las propiedades reológicas de los concretos como la cohesión y la viscosidad. Por la segmentación que las partículas finas producen de los capilares de flujo de agua se reduce la segregación y exudación, principales fuentes de heterogeneidad en los concretos. Las partículas actúan como puntos de precipitación de los productos de hidratación del cemento, dando lugar a un cierre de poros y concretos más homogéneos. De ésta forma se consigue reducir el tamaño de los poros de una forma más eficaz que la que se conseguiría por la simple reducción de la relación (A/C) que da lugar a los aditivos químicos. Por ésta vía los mecanismos de resistencia de la microestructura quedan reforzados de una forma muy eficaz, figura 32;

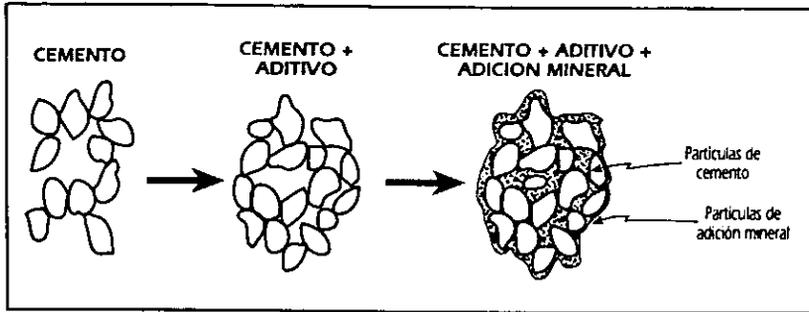


Figura 32

El microsílíce o humo de sílice es un subproducto que se obtiene en el proceso de fabricación del metal sílice y del ferrosílice. Al producirse en el horno la reducción del cuarzo, se desprenden unos gases que contiene un polvo de extremada finura, cuya composición química indica que se trata en un porcentaje muy elevado (normalmente superior al 90 %), de dióxido de sílice.

Esta adición mineral tiene un doble efecto sobre el concreto; produce un refinamiento de su sistema de poros y además tiene una actividad puzolánica muy intensa, reaccionando con el hidróxido cálcico desprendido en las reacciones de hidratación del cemento, para producir silicatos de calcio hidratados. Estas dos características que presenta la microsílíce provienen de su composición química (dióxido de sílice casi puro) y de su extremada finura, que la hace altamente reactiva. Aún cuando se paralice su reactividad al consumirse el total del hidróxido cálcico, la parte que queda inerte en el seno de la masa produce una disminución de la porosidad, especialmente de los poros de mayor tamaño. Los dos efectos, puzolanidad y refinamiento, dan lugar a un concreto más compacto y de mayor resistencia.

La dosis de microsílíce para concretos de alta resistencia es de entre 5 y 10 % del peso de cemento, produciendo incrementos de resistencia de aproximadamente 30 %, sin embargo se pueden alcanzar mayores resistencias con dosis del 15 al 20 %.

Para conseguir concretos con resistencias cercanas o superiores a los (100 Mpa), $1,015 \text{ kg/cm}^2$, será necesaria la incorporación de microsílíce.

Las cenizas volantes se obtienen como subproducto en el proceso de combustión del carbón de las centrales térmicas al filtrarse electrostáticamente los gases procedentes de la combustión. Tienen un tamaño superior al microsílíce, y su composición química es muy variable según se trate de la materia prima utilizada en la combustión siendo menos ricas en sílice reactiva.

Las cenizas se utilizan por su acción puzolánica, que es menos activa y más tardía que la producida por el microsílíce, debido al mayor tamaño de las partículas y a una composición más pobre en sílice. Existe una gran variedad de cenizas y no todas pueden ser utilizadas, por eso es necesario conocer las características y uniformidad de la fuente de ceniza elegida, además deben ser de calidad, la norma ASTM propone una clasificación y de ésta las de clase C y F son las más convenientes. La dosis de ceniza para concretos de alta resistencia es de entre 15 y 25 % del peso de cemento, porcentaje mayor al microsílíce. En total, la cantidad de material cementante (cemento más adición mineral) empleando en las mezclas con ceniza es bastante superior al empleado en las mezclas con microsílíce.

El aumento de resistencia con ceniza volante se produce a edades prolongadas, es decir, más allá de los 7 días.



II.4 Relación agua - cemento.

El hecho de particularizar a la relación (A/C) en un sólo tema de éste capítulo es necesario ya que se trata de un factor fundamental para la elaboración de concretos de alta resistencia.

En la figura 2 del primer capítulo de éste trabajo se observa la influencia que tiene la disminución de la relación (A/C), en el aumento de resistencia a compresión estableciéndose ésta relación en el análisis de los materiales constituyentes de concretos de alta resistencia, la necesaria incorporación de aditivos químicos para equilibrar la trabajabilidad y la presencia de adiciones minerales para aumentar la resistencia y disminuir el calor de hidratación.

Algunos investigadores establecen que para obtener resistencias de (50 Mpa), 508 kg/cm², será recomendable utilizar valores de 0.40, siendo comunes valores de 0.35, para concretos de muy alta resistencia (100 Mpa), 1,015 kg/cm², valores menores o iguales a 0.30

Para efectos de diseño de la mezcla la incógnita sería, que valor de relación (A/C) debemos tomar y hasta dónde es posible disminuir ésta relación; para despejar esa incógnita se debe tener en cuenta que, cuando la relación (A/C) se aproxima al valor necesario para completar una correcta hidratación del cemento, la resistencia no continúa aumentando e incluso puede llegar a disminuir, a éste valor se le conoce como valor límite; otra consideración que debemos tomar en cuenta es la de la incorporación de adiciones minerales, cuando se utilizan éstas, la acción puzolánica necesita la presencia de agua y esta reacción también se combina con parte del agua añadida a la mezcla hidratando los productos resultantes de las reacciones puzolánicas, restándose a la hidratación del cemento. Por éste motivo, en las mezclas con adiciones minerales el valor crítico de la relación (A/C) puede ser superior al de la hidratación completa del cemento, ya que parte del agua colabora en las reacciones puzolánicas. El valor de la relación (A/C) crítica, por debajo de la cuál no se produce aumento de resistencia, e incluso se puede producir una disminución depende entre otros factores, del tipo de adición y de la cantidad de ésta presente en la mezcla.

Teniendo en cuenta éstas consideraciones, podemos establecer que para determinar el valor óptimo de la relación (A/C), la tradicional ecuación agua - cemento, para el caso de los concretos de alta resistencia pasa a convertirse en la relación agua - cementantes (A/C+Ad)

dónde:

A : es la cantidad de agua de mezclado

C : es la cantidad de cemento

Ad : es la cantidad de adición mineral

y por otro lado establecer también, que cuanto menor sea la relación (A/C+Ad) del concreto, mayor será su resistencia, siempre y cuando el agua añadida a la mezcla sea suficiente para hidratar convenientemente el cemento y complementar las reacciones puzolánicas de las adiciones activas. Si el agua de la mezcla es inferior a este valor, en el menor de los casos no obtendremos incrementos de resistencia y además tendremos unas mezclas intrabajables.



Capítulo III

La normatividad y las especificaciones que se deben cumplir

Objetivo: Identificar las reglamentaciones concernientes al concreto de alta resistencia necesarias para su diseño, elaboración, producción y colocación.

III.1 Marco de referencia.

Cuando los ingenieros desarrollamos proyectos en dónde intervienen materiales de construcción como el acero, el concreto, la madera o elementos prefabricados, nos vemos en la necesidad de recurrir a ciertas normas y reglamentaciones que sirven de base para establecer las especificaciones de proyecto con la finalidad de que todos los elementos se comporten adecuadamente y que proporcionen seguridad. En éste contexto, materiales como el concreto han sido estudiados durante mucho tiempo dando como resultado, un órgano rector que tal vez sea el más reconocido, el Instituto Americano del Concreto ACI, es precisamente de éste organismo del que podemos referirnos para comenzar a establecer las bases de normatividad y reglamentación de los concretos de alta resistencia.

Cuando se analizó el capítulo primero concerniente a los antecedentes del material en estudio, se estableció que una de las primeras y principales aplicaciones del concreto de alta resistencia fue en la construcción de edificios altos, es decir, en edificaciones; para el caso de nuestro país y en especial para el Distrito Federal, la posible utilización de este material se vería vinculada con el Reglamento de Construcciones y con las Normas Técnicas que se desprenden del propio Reglamento, por tanto es necesario establecer algunas consideraciones con respecto al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, a las Normas Técnicas Complementarias, a los comités ACI, así como a las Normas ASTM y NOM que sirven de base para estos organismos.



III.2 El Instituto Americano del Concreto (ACI).

Realmente existen muy pocos documentos oficiales que contemplen concretos que tengan resistencias iguales o mayores a los 600 kg/cm², sin embargo la mayor parte de los estudios y análisis se pueden encontrar en los reportes ACI 363, "Estado del Arte de Concretos de Alta Resistencia", del reporte ACI 211, "Guía para la selección de proporciones de Concreto de Alta Resistencia con Cemento Portland y Ceniza Volante", y otros documentos como la Norma Noruega NS347E.

El tratar de encontrar una base que nos permita diseñar y elaborar mezclas de concreto de alta resistencia, así como calcular sus índices de resistencia, de calidad y conocer sus criterios de diseño, es posible gracias a la consulta de estos documentos.

El conocimiento de los reportes ACI que se mencionaron, nos proporcionan una visión detallada de las propiedades del concreto de alta resistencia, de las consideraciones estructurales y procedimientos de producción de mezclas en el caso del comité ACI 363 y los requerimientos necesarios para el proporcionamiento de mezclas con adición de ceniza volante en el caso del comité ACI 211.

Sin embargo, como el propósito de éste trabajo no se limita a establecer sólo los criterios de elaboración del concreto de alta resistencia, podemos analizar la relación que existe entre el propio material y el "Reglamento para las Construcciones de Concreto Estructural ACI 318" con la finalidad de discutir enfoques distintos que de éste tipo de concreto se puedan derivar.

El Reglamento ACI 318 se utiliza para establecer las normas mínimas de aceptación de diseño y construcción, mismas que proporcionan seguridad tratando de abarcar todas las edificaciones de tipo común ya sean grandes o pequeñas; bajo éste contexto la utilización del concreto de alta resistencia tendría relación con los requisitos mínimos relativos a las pruebas de materiales especificadas en el capítulo 3o. de éste reglamento, en el punto 3.2 relativo a cementos se especifican las normas ASTM necesarias que deberán cumplir aquellos cementos que se utilicen para elaborar la mezcla del concreto. En el punto 3.3 relativo a los agregados se especifican las normas ASTM que deberán cumplir los agregados así como las restricciones sobre su tamaño máximo de agregado. Para el punto 3.4 relativo al agua de la mezcla, podemos encontrar las características del agua que se deberán tomar en consideración para su incorporación, cabe señalar, que en su apartado 3.4.3.2 relativo a las aguas no potables queda descartado para la utilización de concretos de alta resistencia debido a lo analizado en el subtema II.3.4 de éste trabajo.

En lo que respecta a los aditivos, el Reglamento ACI 318 en su capítulo 3o. punto 3.6 especifica las normas necesarias que deben cumplir los aditivos reductores de agua, es decir, la norma ASTM C 494 y la norma ASTM C 1017. La ceniza volante deberá cumplir con la norma ASTM C 618, y el humo de sílice la norma ASTM C 1240.

El Reglamento ACI 318 también determina los requisitos de durabilidad que se relacionan con una de las características fundamentales del concreto de alta resistencia, a éste respecto el capítulo 4o. del reglamento determina la forma en que deberán calcularse los valores de la relación agua - cementantes (A/C+Ad) bajo condiciones de congelación y deshielo, exposición a los sulfatos, así como parámetros mínimos de resistencia a la corrosión. El capítulo 5o. relativo a la calidad del concreto, mezclado y colocación deberá ser aplicado teniendo un mayor cuidado en las normas que especifican el manejo, la dosificación y el propio mezclado de los materiales; como se señaló anteriormente, el éxito de poder elaborar un concreto de alta resistencia está en el cuidado que se tenga al aplicar normas como la ASTM C 94, la colocación no



será menos importante y con respecto al curado del concreto será fundamental cumplir con lo que especifique el Reglamento, el curado de concretos de alta resistencia es otro factor fundamental para garantizar las resistencias de proyecto.

También se deberán tomar en cuenta los requisitos de resistencia y servicio que marca el Reglamento en relación con cargas axiales, de flexión, esfuerzos cortantes y de torsión. Para aplicaciones en sistemas de losas, muros o zapatas, deberemos cumplir las especificaciones que nos marca la parte correspondiente a los sistemas o elementos estructurales, así como aplicaciones en elementos preesforzados.

III.3 La sociedad americana de pruebas de materiales (ASTM).

La sociedad americana de pruebas de materiales ASTM es un organismo regulador de pruebas en los Estados Unidos que toma en cuenta entre muchos otros, materiales utilizados en la industria de la construcción como el concreto, de éste se determinan las pruebas y especificaciones tanto para el propio concreto como para el cemento, los agregados, los aditivos y las adiciones minerales.

Eminentemente, reglamentos como el ACI 318 basan sus normas de concreto en pruebas y especificaciones ASTM, el cumplimiento de éstas garantizan la calidad de las mezclas en su diseño, elaboración, producción y comportamiento.

Con el propósito de evaluar éstas características en los concretos de alta resistencia, se resumen las especificaciones más importantes que debemos tomar en cuenta por medio de la siguiente tabla:

Especificación ASTM	Nombre:
C 33	Especificación para agregados de concreto.
C 94	Especificaciones para mezclas de concreto.
C 150	Especificaciones para cemento Portland.
C 260-94	Especificaciones para el contenido de aire de concreto.
C 330	Especificaciones de agregados de peso ligero para concreto estructural.
C 494	Especificaciones de componentes químicos (aditivos) para concreto.
C.618	Especificaciones para carbón, ceniza volante y puzolana natural pura o calcinada para usarse como adición mineral en concretos con cemento Portland.
C 1017	Especificación de componentes químicos para usarse en la producción de concretos fluidos.
C 1240	Especificación de humo de sílice para usarse en concretos y morteros.

Tabla 14



Cabe señalar, que las normas ASTM determinan también los métodos de prueba para evaluar las características del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido; en el capítulo V, de éste trabajo se analizarán las pruebas más importantes para los concretos de alta resistencia.

III.4 La Norma Oficial Mexicana (NOM).

En nuestro país, el organismo oficial que regula las pruebas es la subdirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial emitiendo las Normas Oficiales Mexicanas NOM; algunas de las normas NOM que son equivalentes a las ASTM y que pueden ser de gran importancia para evaluar la calidad de los concretos de alta resistencia, se presentan en la tabla 15;

Especificación NOM	Nombre:
C -1-80	Cemento Portland.
C -30-86	Agregados muestreo.
C -111-88	Concreto agregados, Especificaciones.
C -122-82	Agua para concreto.
C -155-87	Concreto premezclado, Especificaciones.
C -161-87	Muestreo de concreto fresco.
C -248-78	Elementos de concreto preesforzados.
C -255-88	Aditivos que reducen la cantidad de agua y/o modifican el tiempo de fraguado del concreto.
C -146-83	Aditivos para concreto, puzolana natural cruda o calcinada y ceniza volante para usarse como aditivo mineral en concreto con cemento Portland.
C-305-80	Agregados para concreto, descripción de sus componentes minerales naturales.

Tabla 15

Las norma NOM al igual que las ASTM determinan métodos de prueba para evaluar las características del concreto, las más importantes serán también analizadas en el capítulo V de éste trabajo.



III.5 El vínculo de éste material con las Normas Técnicas Complementarias (NTC), y con el Reglamento de construcciones del D.F.

Las normas técnicas complementarias del Reglamento de construcciones cuenta entre otros aspectos, con normas para el diseño y construcción de estructuras de concreto, siendo precisamente en éste apartado en dónde podemos vincular al concreto de alta resistencia.

Es necesario determinar la clase a la que pertenecerían los concretos de alta resistencia, las normas especifican que los concretos con peso volumétrico en estado fresco mayor a los 2.2 ton/m³, son concretos de clase 1, es decir, que los concretos de alta resistencia pertenecen a esta clasificación.

Para el Reglamento de construcciones, el concreto de alta resistencia podrá ser usado en obras catalogadas como del grupo A o B1.

Las normas del Reglamento señalan que los concretos de clase 1 tendrán una resistencia especificada $f'c$ igual o mayor que 250 kg/cm², especificación que cumple éste tipo de concreto.

Las normas indican por tanto que el valor nominal f^*c de diseño para concretos de alta resistencia será:

$$f^*c = 0.8 f'c \quad ; \text{ en kg/cm}^2$$

Con respecto a la resistencia a tensión \bar{f}_t , las normas del Reglamento indican un valor equivalente a $[1.5\sqrt{f'c}]$ en kg/cm², para concretos de clase 1, pero será necesario tomar en consideración las ecuaciones analizadas en la figura 28 de éste trabajo, éstas ecuaciones indicaron valores de $[7.4\sqrt{f'c}]$ en psi y de $[0.59\sqrt{f'c}]$ en Mpa de resistencia en tensión.

La resistencia a tensión por flexión f_f que determinan las normas del Reglamento para concreto clase 1 es de $[2\sqrt{f'c}]$ en kg/cm² pero tomando en cuenta lo analizado en el subtema II.1.7, los valores pueden ser calculados mediante las expresiones $[11.7\sqrt{f'c}]$ en psi y $[0.94\sqrt{f'c}]$ en Mpa.

El valor nominal de diseño por tensión será;

$$f^*t = 0.75 \bar{f}_t \quad ; \text{ en kg/cm}^2$$

y el valor nominal del módulo de ruptura;

$$f^*r = 0.75 \bar{f}_r \quad ; \text{ en kg/cm}^2$$

es importante señalar que las ecuaciones del concreto de alta resistencia expresadas en (psi) y en (Mpa) tienen que ser convertidas a unidades del sistema decimal para poderse sustituir en los valores nominales señalados anteriormente.

El cálculo del Módulo de elasticidad de concretos de clase 1 está determinado mediante la ecuación $[14,000\sqrt{f'c}]$ en kg/cm² pero tendremos que considerar las ecuaciones analizadas en el subtema II.1.5

En lo que respecta a la contracción por secado y tomando en cuenta los resultados del análisis del subtema II.1.8 podríamos asumir una contracción por secado final de concretos de alta resistencia de 0.0001 según éstas normas, sin embargo es necesario seguir revisando investigaciones sobre la contracción por secado de estos concretos.

En relación a la deformación diferida, analizamos que los concretos de alta resistencia se presentaban menores valores, pero las normas técnicas determinan un coeficiente de deformación axial diferida final que se calcula mediante la ecuación;

$$C_f = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\sigma_i}$$

y que supone un valor de 2.4 para concretos de clase 1.



Las normas técnicas realizan también una revisión de los estados límite tanto de falla como de servicio; dentro de los estados límite de falla, la hipótesis de resistencia de diseño referente a la deformación unitaria del concreto en compresión con un valor de 0.003 se considera como satisfactoria para concretos de alta resistencia. El esfuerzo uniforme relativo a la hipótesis de distribución de esfuerzos de compresión se calculará con la ecuación;

$$\left[1.05 - \frac{f^*c}{1250} \right] f^*c ; \text{ en kg/cm}^2$$

Tomando como base todas las consideraciones anteriores podremos estar en condiciones de realizar la revisión de los estados límite de falla para flexión, flexocompresión, aplastamiento, fuerza cortante y torsión.

Para el estado límite de servicio, se utilizarán las hipótesis de la teoría elástica de vigas tomando en cuenta el módulo de ruptura determinado anteriormente para calcular el momento de agrietamiento. Se deben considerar los límites de deflexión que marca el reglamento teniendo cuidado en las dimensiones del elemento de concreto de alta resistencia, así como también teniendo cuidado en la aplicación del criterio de agrietamiento en elementos no preesforzados.

Con respecto a requisitos de adherencia, anclaje y longitud de desarrollo los concretos de alta resistencia reforzados se deberán apegar a todas las normas que nos marque el reglamento ya que aún no existen investigaciones y datos convincentes.

Para elementos de concreto preesforzado elaborados con concretos de alta resistencia, se deberán seguir los requisitos de revisión de los estados límite de falla como la flexión, flexocompresión, fuerza cortante y pandeo, pero se tendrá que hacer un análisis profundo respecto a la revisión de los estados límite de servicio, tanto de preesfuerzo total como parcial ya que existen muchas expectativas respecto a la disminución de deformaciones inmediatas y diferidas de los concretos de alta resistencia. Las disposiciones de control de concreto fresco y de concreto endurecido deberán ser cumplidas para este tipo de concretos en base a las normas NOM correspondientes, así como las disposiciones de transporte, colocación, compactación y temperatura teniendo especial cuidado en el curado del concreto de alta resistencia.

En lo que respecta al Reglamento de Construcciones, será importante resaltar ciertos aspectos que afectan al concreto de alta resistencia, en primer término es necesario destacar que el artículo 3 del título primero indica, que de conformidad con las disposiciones, el departamento tiene la facultad de fijar los requisitos técnicos a que deberán sujetarse las construcciones e instalaciones en predios y vías públicas a fin de que satisfagan las condiciones de habitabilidad, seguridad, higiene, comodidad y buen aspecto; esto quiere decir, que el concreto de alta resistencia se deberá apegar a los requisitos técnicos que marque el Gobierno del Distrito Federal (G.D.F.), cuando sea parte de construcciones en predios y vías públicas.

En segundo término, analizar la relación que existe entre este tipo de concreto y el Título Sexto de Seguridad Estructural de las construcciones; asumiendo que la utilización del concreto de alta resistencia podría constituir estructuras no convencionales dentro de las disposiciones del Reglamento, se determina



que los procedimientos de revisión de la seguridad para éstos casos deberán de ser aprobados por las autoridades competentes del Gobierno del Distrito Federal.

Dentro del capítulo 3o. (Criterios de Diseño Estructural) de éste Título, se puede resaltar el cumplimiento de los artículos 183 de estados límite de falla y 184 de estados límite de servicio, además de poner mucho énfasis en el artículo 195 que señala, que se podrán emplear criterios de diseño diferentes de los especificados en el capítulo 3o. y en las Normas Técnicas Complementarias si se justifica a satisfacción del G.D.F. que los procedimientos de diseño empleados dan lugar a niveles de seguridad no menores que los que se obtengan empleando los previstos en ese ordenamiento, ésto en relación a los criterios que podamos adoptar para el cálculo de estructuras elaboradas con concretos de alta resistencia. Otra consideración que podemos mencionar es la referente al peso propio del concreto determinado en el artículo 196, se especifica un peso propio mínimo de concreto reforzado de 2.20 ton/m³ y uno máximo de 2.40 ton/m³, se tendrá que determinar un rango similar de pesos propios para el concreto de alta resistencia en relación al cálculo de las cargas muertas.

Finalmente destacar el cumplimiento del artículo 255 del capítulo 3o. (Materiales y procedimientos de construcción) del Título Séptimo y en especial, su inciso II que señala, cuando se proyecte utilizar en una construcción algún material nuevo del cual no existan Normas Técnicas Complementarias o Normas de calidad de la SECOFI, el Director Responsable de Obra, deberá solicitar la aprobación previa del G.D.F., para lo cual presentará los resultados de las pruebas de verificación de calidad de dicho material.



Capítulo IV

Elaboración del concreto de alta resistencia

Objetivo: Reconocer todos los elementos y factores necesarios para elaborar concretos con alta resistencia.

IV.1 Consideraciones preliminares.

Las consideraciones preliminares están enfocadas básicamente al diseño de la mezcla de concreto de alta resistencia y toma en cuenta los siguientes aspectos;

- requerimientos de resistencia
- trabajabilidad
- durabilidad
- enfoques para la determinación de la relación $(A/(c+Ad))$
- métodos de diseño existentes

El primer aspecto que debemos determinar es **el requerimiento de resistencia** mediante el cálculo de la resistencia promedio requerida (f'_{cr}) que, se utiliza como base para seleccionar las proporciones de la mezcla de concreto, ésta depende de dos parámetros, la resistencia de proyecto (f'_c) o valor característico y de la desviación estandar (S) que se obtiene de registros de pruebas a compresión; el reglamento ACI 318R-95 especifica que la resistencia promedio requerida debe ser la mayor de las siguientes dos ecuaciones;

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34S, \text{ en (kg/cm}^2\text{) ó}$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33S - 35, \text{ en (kg/cm}^2\text{)}$$

el cálculo de la desviación estandar se deberá realizar conforme lo marca el mismo reglamento en cualquiera de sus tres posibilidades, cuando se tengan registros de al menos 30 pruebas consecutivas o dos grupos de pruebas consecutivas, cuando se tengan registros de 15 a 29 pruebas consecutivas, y cuando no existan registros de pruebas, con respecto a ésta última posibilidad, el comité ACI 211.4 recomienda un valor de resistencia promedio requerida para concretos de alta resistencia elaborados



con ceniza volante cuando no existan registros de pruebas a compresión de;

$$f'_{cr} = \frac{f'c + 1,400}{0.90}$$

dónde;

f'_{cr} : es la resistencia promedio requerida en (psi)

$f'c$: es la resistencia de proyecto en (psi)

El objeto de diseñar las mezclas de concreto en base a la resistencia promedio requerida es limitar la probabilidad de ocurrencia a un grado factible haciendo que el valor promedio f'_{cr} sea suficientemente mayor que el valor característico $f'c$ especificado.

Por otra parte, la **trabajabilidad** de los concretos de alta resistencia se ve afectada por su alto contenido de materiales cementantes y su baja relación $(A/(C+Ad))$, sin embargo, como se dijo, la incorporación de los aditivos químicos compensan éstas desventajas proporcionando revenimientos de 5 a 10 cm que son satisfactorios para la mayoría de la aplicaciones y cuando las exigencias sean mayores se pueden alcanzar revenimientos excesivos de hasta 20 cm sin problemas de segregación.

Se dice que las mezclas de alta resistencia tienden a perder el revenimiento más rápidamente que las mezclas convencionales debido a esto, las mezclas de prueba serán de gran importancia para prescribir los tiempos de incorporación del aditivo químico en la mezcla y para restaurar la trabajabilidad por medio de la redosificación o incorporación parcial en dos partes.

Otro aspecto importante en la elaboración de concretos de alta resistencia es el cumplimiento de los requisitos de **durabilidad** cuando las estructuras de concreto estén expuestas a condiciones severas de su entorno, el reglamento ACI 318R-95 hace referencia a la exposición en congelación y deshielo determinando porcentajes de aire incluido, no obstante, un cierto contenido de vacíos o contenido de aire va en contra de las premisas de elaboración de concretos de alta resistencia, es entonces en dónde se establece una controversia sobre la inclusión de aire, es decir, diseñar la mezcla cumpliendo con los requisitos de contenido de aire sacrificando un poco la resistencia o por otro lado, disminuir al máximo el contenido de aire produciendo mezclas de concreto con elevada resistencia; se pueden generar ciertas posibilidades;

- predominio de altas resistencias en el diseño sobre los requisitos de durabilidad
- predominio de la exposición a congelación y deshielo sobre los requisitos de resistencia mecánica
- predominio de la exposición a congelación y deshielo sobre los requisitos de protección contra corrosión del refuerzo de acero
- predominio de la protección contra corrosión del refuerzo de acero sobre la exposición a congelación y deshielo
- una combinación de las anteriores.

en base a éstas posibilidades y a las condiciones de obra, se determina si es necesaria la inclusión de aire, en caso de que así lo sea, se tomarán en cuenta los requisitos del capítulo 4 del Reglamento ACI 318R-95 referente a la durabilidad de concretos dónde se especificarán las relaciones $(A/(C+Ad))$, porcentajes de aire y de adiciones minerales suficientes para cumplir con este requisito.



En lo que respecta a la **determinación de la relación (A/(C+Ad))** existen dos enfoques que se pueden considerar como equivalentes a la relación (A/C) de una mezcla que solo contiene cemento Portland:

- i) Peso equivalente del material aglutinante, y
- ii) Volumen absoluto equivalente del material aglutinante en la mezcla

Para el primer enfoque, se establece la siguiente equivalencia de peso:

$$\frac{A}{C + Ad} = \frac{A}{C}$$

relación de peso = equivalencia de peso

dónde;

$\frac{A}{C + Ad}$: peso del agua dividido entre el peso del cemento más la adición mineral

$\frac{A}{C}$: relación agua - cemento deseada por peso

Cuando se emplea el enfoque de equivalencia de peso, el porcentaje o fracción de adición mineral empleado en el material aglutinante se suele expresar por peso, por lo tanto Fw, porcentaje de adición mineral por peso del total de cemento más adición mineral, expresado como un factor decimal es:

$$Fw = \frac{Ad}{C + Ad}$$

dónde;

Fw: es el porcentaje de adición mineral por peso, expresado como factor decimal

Ad: peso de la adición mineral

C: peso del cemento

cuando solamente se conozca el factor deseado de porcentaje de adición mineral por volumen absoluto Fv, éste se puede convertir a Fw de la siguiente manera:

$$Fw = \frac{1}{1 + (3.15/G_{Ad})((1/Fv)-1)}$$

dónde;

Fv : es el porcentaje de adición mineral por volumen absoluto del cemento más adición mineral expresado como factor decimal.

G_{Ad}: es el peso específico de la adición mineral.

3.15: peso específico del cemento Portland.



Para el segundo enfoque, se establece la siguiente equivalencia de volumen absoluto:

$$\frac{A}{C + Ad} = \frac{(3.15)(A/C)}{(3.15)(1-Fv) + G_{Ad}(Fv)}$$

dónde;

$\frac{A}{C + Ad}$: es el peso del agua dividido entre el peso del cemento más la adición mineral

$\frac{A}{C}$: es la relación agua - cemento deseada por peso

Fv : es el porcentaje de adición mineral por volumen absoluto del volumen absoluto total del cemento más adición mineral, expresado como factor decimal

en este enfoque se puede conocer únicamente el porcentaje deseado de adición mineral por peso Fw pudiendo convertirse a Fv de la siguiente manera;

$$Fv = \frac{1}{1 + (3.15/G_{Ad})((1/Fw)-1)}$$

En lo que respecta a los **métodos de diseño de mezclas de alta resistencia**, podemos decir que se han utilizado métodos tradicionales de base como el de proporcionamiento por peso y el de volumen absoluto pero contemplando algunas adaptaciones y modificaciones ya que estos métodos no toman en cuenta la incorporación de adiciones minerales y están desarrollados solamente para agregados de tamaños máximos superiores a los que se emplean en concretos de alta resistencia y los contenidos de cementos son inferiores, no obstante, los últimos estudios sobre concretos de alta resistencia han generado un procedimiento alternativo llamado "Método de Larrard", que se basa en dos parámetros básicos;

- la resistencia establecida a partir de la fórmula de Feret modificada y controlada principalmente por la naturaleza de la pasta, y
- la trabajabilidad, estrechamente relacionada con la viscosidad de la mezcla que, a su vez, depende de la concentración de la pasta y de su fluidez.

Cabe señalar que, tanto los métodos tradicionales modificados como el método de Larrard para diseñar mezclas de alta resistencia deben aplicarse produciendo numerosos ensayos de laboratorio (mezclas de prueba) y con un estricto control de calidad en cuanto a la selección de materiales con la finalidad de que se garanticen las resistencias requeridas tomando en cuenta que las proporciones resultantes serán aplicables únicamente para los materiales empleados en los ensayos.



IV.2 Diseño de la mezcla de alta resistencia (proporcionamiento).

El desarrollo de éste tema contemplará dos métodos de diseño de mezclas;

- el primero, proporcionamiento mediante el método de Larrard con incorporación de humo de sílice, y
- el segundo, proporcionamiento mediante un método tradicional con incorporación de ceniza volante.

Antes de exponer el procedimiento del método de Larrard es necesario determinar tres elementos que complementan dicho procedimiento;

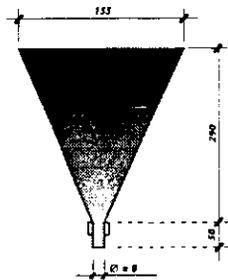
Primero, “ el método de mezcla experimental”, que tiene como finalidad definir un proporcionamiento específico para los concretos de alta resistencia y que consiste en el siguiente proceso operativo:

- I) Se define y mantiene durante todo el proceso una relación (A/C) y un volumen de pasta por metro cúbico de concreto determinados.
- II) Se ajusta una relación óptima (arena/grava) que permita obtener la mejor trabajabilidad posible.
- III) Con la misma composición granulométrica, se producen concretos con distintos contenidos de cemento hasta obtener la trabajabilidad crítica.
- IV) Se realizan ensayos de compresión a 28 días y se determina el proporcionamiento más conveniente por interpolación entre los parámetros analizados.

la mezcla experimental resultante tiene trabajabilidades óptimas que en ocasiones no coinciden exactamente con la máxima resistencia que sin embargo es susceptible de mejorarse incrementando el contenido de agregado grueso.

El segundo elemento, es el referente a la determinación de “la fluidez de una pasta cementante”, caracterizada por el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido situado por debajo de un cono normalizado ó cono de Marsh que contiene la pasta en estudio, para el caso de los concretos de alta resistencia la pasta estará compuesta de cemento, agua, aditivo y/o adición mineral dosificada de tal manera que el tiempo de flujo sea igual a uno establecido como patrón. El tiempo patrón se define en función del correspondiente a una pasta de referencia.

Las dimensiones del cono de Marsh se muestran en la figura 33, fijándose un tiempo patrón de referencia de 5 a 20 segundos para llenar un volumen de 200 cm³.



Cono de Marsh (rotas en mm)

Figura 33



La determinación de la fluidez de una pasta cementante consiste en el siguiente método operatorio:

- I) Se incorpora la porción de humo de sílice y el 50% del agua prevista, se mezclan ambos componentes en una mezcladora planetaria ó similar de dos velocidades durante 3 minutos a velocidad alta para conseguir la dispersión de las partículas en una mezcla uniforme y sin grumos.
- II) Se añade el resto del agua, un tercio del total del aditivo superplastificante y la cantidad total del retardador (si es que lo hay) mezclándose durante 3 minutos a baja velocidad.
- III) Se añade el cemento, mezclándose durante un minuto a velocidad baja y otro minuto adicional a velocidad alta.
- IV) Se añade el resto del superplastificante, mezclándose la totalidad de los componentes durante 2 minutos a velocidad alta.
- V) Una vez concluido el mezclado se mide inmediatamente el tiempo de flujo de la pasta.

Por último, mencionar otro elemento necesario para el proporcionamiento de la mezcla, la estimación de la resistencia a compresión por medio de "la fórmula de Feret modificada" expresada de la siguiente manera;

$$f'c = \frac{(kg) \cdot (Rc)}{\left[\frac{3.1(a/c)}{[1.4 - 0.4^{(-11s/c)}]^2} \right]}$$

dónde;

- $f'c$: es la resistencia a compresión de un cilindro de concreto a los 28 días.
 a,c,s : son las masas de agua, cemento y humo de sílice respectivamente, por unidad de volumen de concreto fresco.
 kg : es un parámetro dependiente del tipo de agregado
(para el caso de gravas comunes tiene un valor de 4.91)
 Rc : es la resistencia del mortero de cemento normalizado a los 28 días de edad.

Esta fórmula modificada permite cuantificar con gran precisión la influencia que la variación de cualquier componente pueda ejercer en la resistencia del concreto obtenido.

En torno a ésta fórmula se obtuvo una gráfica que facilita la aplicación de la misma, (figura 33), la gráfica fue diseñada para morteros de 558 kg/cm², (55 Mpa) y relaciones (humo de sílice/cemento) de hasta 20%.

Para morteros de distintas resistencias la gráfica es aplicable multiplicando el valor obtenido por la relación entre la resistencia real del mortero y la adoptada en la representación gráfica.

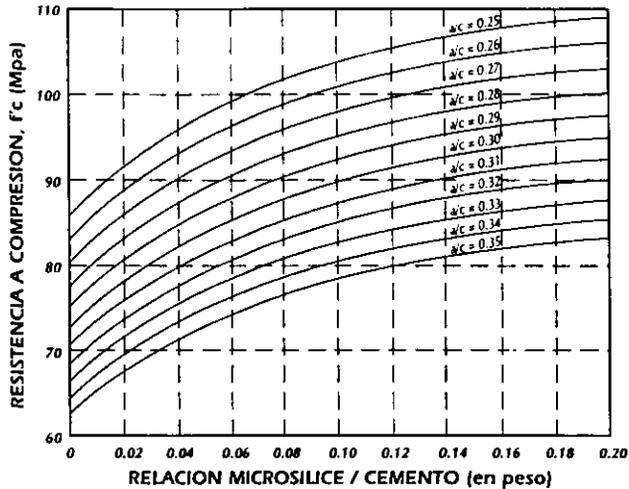


Figura 34

Teniendo en cuenta estos tres elementos, el proceso del diseño de una mezcla de concreto de alta resistencia propuesto por Larrard es el siguiente;

METODO DE LARRARD.

PRIMER PASO. Definir y adoptar una composición granulométrica adecuada determinada mediante el método de mezcla experimental o algún otro que tenga una curva granulométrica válida, se dosifica una mezcla de control que contenga gran cantidad de superplastificante y una cantidad de cemento que corresponda a la menor demanda de agua, como primera aproximación se puede adoptar un contenido de 425 kg/m^3 . El contenido de agua debe ajustarse para obtener una trabajabilidad correcta.

SEGUNDO PASO. Se determina la fluidez de la pasta de la mezcla de control mediante la medida de su tiempo de flujo a través del cono de Marsh. La relación (A/C) de esta pasta debe establecerse en condiciones controladas de humedad de los agregados.

TERCER PASO. Se dosifican diferentes lechadas mediante la variación de los porcentajes de composición de cemento y adiciones.

CUARTO PASO. Por cada lechada, se añade una pequeña cantidad de superplastificante y se ajusta la cantidad de agua para obtener una pasta adhesiva (si bien que pase a través del cono de Marsh en un tiempo de flujo de aproximadamente 20 segundos). Con la relación (A/C) fijada momentáneamente, se añaden cantidades crecientes de superplastificante hasta que el tiempo de flujo deje de disminuir, esta cantidad de superplastificante representa el valor de saturación, como se muestra en la figura 35, manteniéndose fija en ese momento.

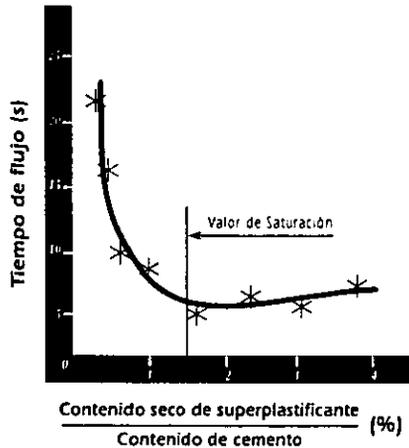


Figura 35

QUINTO PASO. Se ajusta el contenido de agua para obtener el mismo tiempo de flujo que en la lechada de control. En consecuencia, la relación (A/C) debe ajustarse para cada pasta.

SEXTO PASO. Se determina la variación de las características de flujo en el tiempo de duración previsto para la puesta en obra del concreto. Si el tiempo de flujo se incrementa en exceso, debe añadirse un agente retardante para mantenerlo en el valor de referencia.

SEPTIMO PASO. Se determina la resistencia a compresión de los diferentes morteros dosificados, mediante ensayos directos y/o estimativamente utilizando la fórmula de Feret modificada.

OCTAVO PASO. Se establece una primera proporción de concreto de alta resistencia utilizando los materiales granulares y el mismo volumen de pasta que la mezcla de control e incorporando la corrección de agua que corresponda en función de la humedad de los agregados en el momento del mezclado, la trabajabilidad de la mezcla de control y de la primera proporción elaborada debe ser muy similar.

NOVENO PASO. Se verifica la consistencia y resistencia resultantes de la proporción de mezcla.

Para la realización de mezclas con este procedimiento, será importante elaborar un proporcionamiento con el mínimo de pasta cementante ya que la mayoría de los componentes de precio elevado en un concreto de alta resistencia se encuentran precisamente en la propia pasta.

A continuación se presenta un ejemplo de un diseño de mezcla de alta resistencia por medio del método de Larrard;

EJEMPLO 1. Se requiere de concreto para una sección estructural que no estará expuesta a condiciones ambientales severas ni al ataque de sulfatos, las consideraciones estructurales exigen que tenga una resistencia de compresión a 28 días de 910 kg/cm^2 , (90 Mpa). Se determina que las condiciones en que se hará el colado implica una consistencia fluida.



El reglamento ACI 318R-95 recomienda una resistencia promedio requerida f'_{cr} , cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estandar de:

$f'_{cr} = f'_c + 98 \text{ kg/cm}^2$, cuando la resistencia a compresión específica sea mayor de 350 kg/cm^2
 por lo tanto, $f'_{cr} = 910 + 98 = 1,008 \text{ kg/cm}^2$

$$\frac{6}{f'_{cr} = 100 \text{ Mpa}}$$

una vez determinada la resistencia promedio requerida partiremos de la composición de un concreto de 406 kg/cm^2 , (40Mpa) proporcionada de la siguiente manera:

COMPONENTES CARACTERISTICAS	Granulometría de las gravas (caliza) (mm)			Arena	Cemento	Agua
	12.5/20	5/12.5	0/5	0/5	-	-
Fracción	12.5/20	5/12.5	0/5	0/5	-	-
Peso (kg)	825	400	315	315	410	180
Densidad Relativa (Kg/m ³)	2,620	2,620	2,580	2,550	3,100	1,000
Volumen (m ³)	0.3147	0.1526	0.1220	0.1233	0.1323	0.1800

Peso volumétrico = $2,445 \text{ kg/m}^3$

Volumen total = 1.0249 m^3 de concreto

Relación (A/C) = 0.44

1º Se define la dosificación correspondiente a la mezcla de control incorporando 425 kg/m^3 de cemento, una cantidad de aditivo superplastificante y una cantidad de agua tal que produzca un revenimiento de 20 cm.

- para ésta mezcla de control la pasta cementante presenta un tiempo de flujo en el cono de Marsh de 5 segundos con las siguientes proporciones por peso:

Cemento 425 kg/m^3

Superplastificante 6.4 kg/m^3

Agua 130 kg/m^3

- para la composición de la mezcla de control se incremento el contenido de las distintas fracciones de agregado hasta conseguir el mismo volumen de mezcla que en el proporcionamiento inicial. El incremento se realiza manteniendo invariable la composición inicial de cada fracción incrementando el volumen del agregado de mayor tamaño a menor tamaño en 44.2%, 21.4%, 17.1%, 17.3% es decir que;



si el volumen es igual a 1.0249 m³

$$V_{\text{cemento}} = 0.1371 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{aditivo}} = 0.0053 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agua}} = 0.1300 \text{ m}^3$$

por lo tanto:

$$\text{Gr}(12.5/20) + \text{Gr}(5/12.5) + \text{Gr}(0/5) + \text{Ar}(0/5) + 0.1371 + 0.0053 + 0.1300 = 1.0249$$

$$\text{Gr}(12.5/20) + \text{Gr}(5/12.5) + \text{Gr}(0/5) + \text{Ar}(0/5) + 0.2724 = 1.0249$$

$$\text{Gr}(12.5/20) + \text{Gr}(5/12.5) + \text{Gr}(0/5) + \text{Ar}(0/5) = 1.0249 - 0.2724 = 0.7525$$

los volúmenes son:

$$\text{Gr}(12.5/20) = (0.442)(0.7525) = 0.3326 \text{ m}^3$$

$$\text{Gr}(5/12.5) = (0.214)(0.7525) = 0.1611 \text{ m}^3$$

$$\text{Gr}(0/5) = (0.171)(0.7525) = 0.1287 \text{ m}^3$$

$$\text{Ar}(0/5) = (0.173)(0.7525) = 0.1301 \text{ m}^3$$

obteniendo una mezcla de control con el siguiente proporcionamiento;

COMPONENTES CARACTERÍSTICAS	Granulometría de las gravas (caliza) (mm)			Arena	Cemento	Super-plastificante	Agua
	12.5/20	5/12.5	0/5				
Fracción	12.5/20	5/12.5	0/5	0/5	-	-	-
Peso (kg)	871	422	332	332	425	6.4	130
Densidad Relativa (Kg/m ³)	2,620	2,620	2,580	2,550	3,100	1,210	1,000
Volumen (m ³)	0.3326	0.1611	0.1287	0.1301	0.1371	0.0053	0.1300

$$\text{Peso volumétrico} = 2,518 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen total} = 1.0249 \text{ m}^3 \text{ de concreto}$$

$$\text{Volumen de la pasta cementante} = 0.2724 \text{ m}^3$$

$$\text{Relación (A/C)} = 0.44$$

2º Se preparan tres pastas cementantes con distintos porcentajes de humo de sílice (5%, 10% y 15% respectivamente) determinándose las cantidades de saturación del superplastificante para los tres casos como se muestra en la figura 35 y las cantidades de agua necesarias para obtener el mismo tiempo de flujo que para la mezcla de control (5 segundos).



COMPOSICION No.	Volumen total de la pasta (m ³)	Cemento (kg) (m ³)	Humo de Sílice (kg) (m ³)	Super-plastificante (kg) (m ³)	Agua (m ³)	Relación (Ad/C)	Relación (A/C)
1 (5%)	0.2724	455 0.1467	22.8 0.0103	7.8 0.0064	0.1090	0.05	0.25
2(10%)	0.2724	438 0.1413	43.8 0.0199	8.7 0.0072	0.1040	0.10	0.25
3(15%)	0.2724	422 0.1361	63.3 0.0287	9.3 0.0076	0.1000	0.15	0.25

Una vez determinadas las relaciones (A/C) (agua/cemento) y (Ad/C) (Adición/cemento) entramos a la gráfica de la figura 34 obteniendo la resistencia a compresión previsible por la fórmula de Feret;

COMPOSICION No.	Volumen total de la pasta (m ³)	Cemento (kg) (m ³)	Humo de Sílice (kg) (m ³)	Super-plastificante (kg) (m ³)	Agua (m ³)	Relación (Ad/C)	Relación (A/C)	Resistencia a compresión	
								Mpa	kg/cm ²
1 (5%)	0.2724	455 0.1467	22.8 0.0103	7.8 0.0064	0.1090	0.05	0.25	98	995
2(10%)	0.2724	438 0.1413	43.8 0.0199	8.7 0.0072	0.1040	0.10	0.25	104	1,056
3(15%)	0.2724	422 0.1361	63.3 0.0287	9.3 0.0076	0.1000	0.15	0.25	107	1,086

3º A partir de los valores obtenidos de resistencia a compresión se comparan con el valor de la resistencia promedio requerida que para el caso de éste ejemplo es $f'_{cr} = 100 \text{ Mpa}$ ó $1,008 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$, adoptando la composición no. 2 para garantizar un valor de $910 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$, es decir, la resistencia de proyecto f'_c .

El proporcionamiento final es el que se presenta en la siguiente tabla;



COMPONENTES CARACTERÍSTICAS	Granulometría de las gravas (caliza) (mm)			Arena	Cemento	Humo de Sílice	Superplastificante	Agua
	Fracción	12.5/20	5/12.5	0/5	0/5	-	-	-
Peso (kg)	871	422	332	332	438	43.8	8.7	104
Densidad Relativa (Kg/m ³)	2,620	2,620	2,580	2,550	3,100	2,200	1,210	1,000
Volumen (m ³)	0.3326	0.1611	0.1287	0.1301	0.1413	0.0199	0.0072	0.1040

Peso volumétrico = 2,552 kg/m³

Volumen total = 1.0249 m³ de concreto

Relación (Ad/C) = 0.10

Relación (A/C) = 0.25

4º En base al proporcionamiento obtenido, se realizan los ajustes correspondientes verificando la consistencia, plasticidad y trabajabilidad de la mezcla variando los contenidos de agua y superplastificante. Las pruebas de consistencia, tiempos de fraguado y ensayos de resistencia a 28 días serán determinantes para aprobar el diseño de ésta mezcla.

En caso de que la resistencia promedio requerida no sea alcanzada, se incrementará el volumen de pasta cementante inicialmente adoptada, en ocasiones éste incremento puede conducir a mezclas de consistencia pegajosa imponiéndose la necesidad de replantear nuevamente el proceso de selección de constituyentes.

El proceso de diseño de una mezcla de concreto de alta resistencia mediante el método ACI modificado es el siguiente;

NOTA: todas las tablas de cálculo están tomadas del reporte del comité ACI-211.4 R93.

PRIMER PASO. Selección del revenimiento y de los requisitos de resistencia del concreto.

Las recomendaciones para el revenimiento de estos concretos se encuentran en el comité ACI 211.4 en su sección 4.1 generando la siguiente tabla;

Concreto elaborado con aditivo superplastificante	
revenimiento antes de añadir el aditivo	2.5 a 5.0 cm
Concreto elaborado sin aditivo superplastificante	
revenimiento	5.0 a 10.0 cm

Tabla 16



Los requerimientos de resistencia se regirán por lo señalado en el Reglamento ACI 318R-95 y en el capítulo 2 del comité ACI 211.4

SEGUNDO PASO. Selección del tamaño máximo de agregado.

Basados en los requerimientos de resistencia calculados en el paso anterior y en la siguiente tabla, se selecciona el tamaño máximo de los agregados gruesos;

Resistencia requerida del concreto (kg/cm ²)	Tamaño máximo de agregado (in)
< 630	3/4 a 1
> 630	3/8 a 1/2

Tabla 17

TERCER PASO. Selección del contenido óptimo de agregado.

Basados en el módulo de finura del agregado fino y en el tamaño máximo nominal que se usará, se determina el porcentaje de volumen por medio de la siguiente tabla;

Contenido óptimo de agregado grueso con arena de M.F. 2.5 a 3.2				
Tamaño máximo nominal (in)	3/8	1/2	3/4	1
Porcentaje de volumen de agregado grueso (estado seco)	0.65	0.68	0.72	0.75

Tabla 18

Posteriormente se podrá calcular el peso del agregado por m³ de concreto con la ecuación;

$$W_{\text{seco}} = (\% \text{volumen})_{\text{seco}} \times (\text{Peso volumétrico})$$

CUARTO PASO. Estimación del agua de mezclado y del contenido de aire.

La cantidad de agua por unidad de volumen de concreto requerida para producir un revenimiento dado, depende del tamaño máximo de agregado y se determinará mediante la siguiente tabla que además, proporciona el contenido de aire atrapado;

revenimiento (cm)	Agua de Mezclado (kg/m ³)			
	Tamaño máximo nominal (in)			
	3/8	1/2	3/4	1
2.5 a 5.0	184	175	169	166
5.0 a 7.6	190	184	175	172
7.6 a 10.1	196	190	181	178
Contenido de aire (%)	3.0 (2.0)	2.5 (2.0)	2.0 (1.5)	1.5 (1.0)

() para concretos hechos con aditivo superplastificante

Tabla 19



Como las cantidades de agua están calculadas para agregados finos que tienen un contenido de vacíos de 35%, se deberá calcular el ajuste en caso de que el porcentaje de vacíos de la arena no sea equivalente a ese porcentaje. El contenido de vacíos se calculará con la siguiente ecuación;

$$\%V \text{ del contenido de vacíos} = [1 - (\text{Peso volumétrico}/\text{Peso específico})] \times 100$$

y el ajuste se calculará con la ecuación;

$$\text{Ajuste de la mezcla de agua (kg/m}^3\text{)} = (\%V-35) \times 4.75$$

QUINTO PASO. Selección de la relación (A/(C+Ad)).

Se determinará el valor de la relación (A/(C+Ad)), por medio de las dos siguientes tablas que están en función del tamaño de agregado y de la resistencia requerida previamente calculada ya sea a los 28 días o a los 56 días.

Relación máxima (A/(C+Ad)) para concretos hechos sin superplastificante

Resistencia Requerida (kg/cm ²)		Relación (A/(C+Ad)) Tamaño máximo nominal (in)			
		3/8	1/2	3/4	1
490	28	0.42	0.41	0.40	0.39
	56	0.46	0.45	0.44	0.43
560	28	0.35	0.34	0.33	0.33
	56	0.38	0.37	0.36	0.35
630	28	0.30	0.29	0.29	0.28
	56	0.33	0.32	0.31	0.30
700	28	0.26	0.26	0.25	0.25
	56	0.29	0.28	0.27	0.26

Tabla 20

Relación máxima (A/(C+Ad)) para concretos hechos con superplastificante

Resistencia Requerida (kg/cm ²)		Relación (A/(C+Ad)) Tamaño máximo nominal (in)			
		3/8	1/2	3/4	1
490	28	0.50	0.48	0.45	0.43
	56	0.55	0.52	0.48	0.46
560	28	0.44	0.42	0.40	0.38
	56	0.48	0.45	0.42	0.40
630	28	0.38	0.36	0.35	0.34
	56	0.42	0.39	0.37	0.36
700	28	0.33	0.32	0.31	0.30
	56	0.37	0.35	0.33	0.32
770	28	0.30	0.29	0.27	0.27
	56	0.33	0.31	0.29	0.29
840	28	0.27	0.26	0.25	0.25
	56	0.30	0.28	0.27	0.26

Tabla 21

SEXO PASO. Cálculo del contenido del material cementante.

El contenido de material cementante por m³ de concreto se calcula dividiendo el contenido de agua de mezclado (cuarto paso) dividido entre el valor de la relación (A/(C+Ad)) (quinto paso), cabe señalar que se deberá cumplir cualquier especificación que determine un valor mínimo en la cantidad de material cementante por m³ de concreto.

SEPTIMO PASO. Proporcionamiento de la mezcla básica únicamente con cemento.

Para determinar el proporcionamiento de la mezcla óptima, el diseñador necesitará preparar varias mezclas preliminares con diferentes contenidos de ceniza volante y a su vez, las mezclas preliminares basarán sus proporciones en una mezcla básica por lo tanto se deberán completar los siguientes pasos para el proporcionamiento de la mezcla;



A) Contenido de cemento. Para la mezcla básica, el peso del material cementante será igual al contenido de cemento.

B) Contenido de arena. Después de haber determinado los pesos por m³ de agregado grueso, de cemento, de agua y el contenido de aire, el contenido de arena se calculará para producir un m³ de concreto utilizando el método de volumen absoluto.

OCTAVO PASO. Proporcionamiento de las mezclas preliminares con ceniza volante y cemento Portland. El cálculo del proporcionamiento de las mezclas con la incorporación de ceniza volante cumplirá los siguientes incisos;

A) Tipo de ceniza volante. Se elegirá la ceniza más adecuada según la norma ASTM.

B) Contenido de ceniza volante. Los límites recomendados para sustitución de cemento por ceniza los encontramos en la siguiente tabla;

Ceniza Volante	Porcentaje de ceniza por peso (%)
Clase F	15 a 25
Clase C	20 a 35

Tabla 22

C) Peso de la ceniza volante. Una vez que el porcentaje de sustitución ha sido escogido, el peso de la ceniza se determina multiplicando el total del peso de los materiales cementantes (sexto paso) por el porcentaje elegido, el peso restante es el correspondiente al del cemento.

D) Volumen de la ceniza volante. Debido a las diferencias en el peso específico del cemento y la ceniza, el volumen del material cementante por m³ de concreto cambia, siendo calculado con la suma del volumen del cemento y el volumen de la ceniza.

E) Contenido de arena. Una vez calculado el volumen de cada material por m³ de concreto para cada mezcla, se determinará el contenido de arena de cada mezcla utilizando el método de volumen absoluto.

NOVENO PASO. Proceso de mezcla.

Para cada una de las mezclas proporcionadas, tanto los agregados como el agua de mezclado deberán ser ajustados para condiciones de saturación de los agregados, posteriormente se calcularán los pesos de materiales para fabricar el número de especímenes de prueba requerido.

DECIMO PASO. Ajuste de mezcla.

Si las propiedades deseadas del concreto no son obtenidas, el proporcionamiento de la mezcla original será ajustado según las siguientes directrices;

A) Revenimiento inicial. Si el revenimiento inicial del proceso de mezcla no está dentro del rango deseado, se ajustará el agua de mezclado, el peso del material cementante manteniendo la relación $(A/(C+Ad))$ constante y el contenido de arenas.

B) Dosificación del aditivo superplastificante. Diferentes dosificaciones serán probadas para determinar



el efecto en la resistencia y trabajabilidad de la mezcla, poniendo cuidado en los efectos de segregación con cada dosificación así como en los gradientes de temperatura para finalmente realizar un ajuste que este acorde a las condiciones de obra.

C) Contenido de agregado grueso. Una vez que se ajustó el revenimiento deseado, se determina si la mezcla es apta para trabajos de colocación y acabado, en cada caso de ser necesario, el contenido de agregado grueso puede reducirse ajustando en consecuencia el contenido de arena, si se incrementa la demanda de agua se modificará el contenido de material cementante manteniendo constante la relación $(A/(C+Ad))$.

D) Contenido de aire. Si el contenido de aire moderado difiere significativamente de la proporción calculada, la dosificación será reducida o el contenido de arena será ajustado convenientemente.

E) Relación $(A/(C+Ad))$. Si el requerimiento de resistencia a compresión no es alcanzado, se ensayarán mezclas adicionales con menor relación $(A/(C+Ad))$, si éstas mezclas no incrementan su resistencia a compresión, la idoneidad de los materiales usados será revisada.

ONCEAVO PASO. Selección de la proporción de mezcla óptima.

Una vez que la proporción de mezcla ha sido ajustada para producir la trabajabilidad deseada y las propiedades de resistencia, se evaluará la mezcla tomando en cuenta las recomendaciones del comité ACI 211.1 sobre las condiciones de obra. El resultado de las pruebas de resistencia será presentado de tal manera que permita la selección de la proporción óptima para el trabajo, basada en los requerimientos de resistencia y economía.

A continuación se presenta un ejemplo de diseño de mezcla de alta resistencia mediante el método ACI modificado;

Ejemplo 2. Se requiere de concreto de alta resistencia para columnas en el primero de varios pisos en un edificio de gran altura. La resistencia a compresión especificada es de 630 kg/cm^2 , (9,000 psi), a los 28 días. Debido al espaciamiento entre el acero de refuerzo de las columnas, el tamaño máximo de agregado es de (3/4 in) (19 mm), se usará arena natural con las siguientes características;

Módulo de Finura, M.F. = 2.90

Peso específico (seco) = $2,590 \text{ kg/m}^3$

Absorción = 1.1 %

Peso volumétrico = $1,649.90 \text{ kg/m}^3$

Se dosificará un aditivo retardante y un superplastificante.

1º Utilizando superplastificante, el diseño se basará en un revenimiento de 2.5 a 5.0 cm como lo indica la tabla 16.

Como no existen antecedentes de otras mezclas de alta resistencia, la resistencia promedio requerida se puede calcular como sigue:

$$f'_{cr} = (9,000 + 1,400)/0.90 = 11,560 \text{ psi aprox. } 11,600 \text{ psi ó } 812 \text{ kg/cm}^2$$

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



2° Basados en la tabla 17, se utilizará una grava caliza con T.M.A. de (1/2 in) (12.5 mm) con las siguientes características;

T.M.A. = 1/2 in = 12.5 mm
Peso específico (seco) = 2,760 kg/m³
Absorción = 0.70 %
Peso volumétrico = 1,617.86 kg/m³

3° Basados en la tabla 18, el porcentaje de volumen de grava por m³ de concreto es igual a 0.68, por lo tanto, el peso del agregado grueso en estado seco por m³ de concreto es;

$$(0.68)(1,617.86) = 1,100.14 \text{ kg}$$

4° Basados en la tabla 19, la primera estimación de agua de mezclado requerida es de 175 kg/m³ de concreto, y el contenido de aire para mezclas con aditivo superplastificante es de 2.0 %.

El contenido de vacíos de la arena usada es:
 $[1 - (1,649.90/2,590)] \times 100 = 36 \%$

y el ajuste del agua de mezclado es:
 $(36 - 35) \times 4.75 = 4.75 \text{ kg/m}^3 \text{ de concreto}$

por lo tanto, el total de agua de mezclado será:
 $175 + 4.75 = 179.75 \text{ kg/m}^3 \text{ de concreto}$
(incluye aditivo retardante).

5° Basados en la tabla 21, y con los datos necesarios el valor de la relación $(A/(C+Ad))$ interpolado es de 0.31. como las resistencias a compresión de las tablas 20 y 21 están diseñadas para condiciones de obra, el valor de resistencia requerida en laboratorio de 812 kg/cm² es mayor, por lo tanto el valor de resistencia es:

$(0.90) (812) = 728 \text{ kg/cm}^2$
que proporciona una relación de 0.31

6° El peso del material cementante por m³ de concreto es:

$(179.75/0.31) = 579.83 \text{ kg}$
la especificación no proporciona un valor mínimo de material cementante por lo tanto 579.83 kg, es correcto.

7° A) Contenido de arena. El volumen por m³ de los materiales es;

Cemento	0.18407 m ³
Grava	0.39860 m ³
Agua	0.17975 m ³
Aire	0.02000 m ³
TOTAL	0.78240 m ³



por lo tanto el volumen de arena por m³ de concreto es:
 $(1 - 0.78240) = 0.21760 \text{ m}^3$

el peso del arena por m³ de concreto es:
 $(0.21760) (2,590) = 563.77 \text{ kg}$

los pesos por m³ de concreto son:

Cemento	579.83 kg
Grava (seca)	1,100.14 kg
Arena (seca)	563.77 kg
Agua (inc. retardante)	179.75 kg

8° A) El peso específico de la ceniza tipo C es de 2,640 kg/m³

B) Los límites de reemplazo de cemento por ceniza están en la tabla 22 y son de 20 a 35 %. Cuatro mezclas serán proporcionadas con ceniza volante en los siguientes porcentajes:

MEZCLA # 1	20 %
MEZCLA # 2	25 %
MEZCLA # 3	30 %
MEZCLA # 4	35 %

C) El peso de la mezcla por m³ de concreto para la mezcla #1 es:

$$(0.20) (579.83) = 115.96 \text{ kg}$$

y el peso del cemento,
 $(579.83 - 115.96) = 463.87 \text{ kg}$

de la misma manera para todas las mezclas se calculan los pesos;

	CEMENTO	CENIZA VOLANTE	TOTAL
MEZCLA # 1	463.87	115.96	579.83 kg
MEZCLA # 2	434.88	144.95	579.83 kg
MEZCLA # 3	405.88	173.95	579.83 kg
MEZCLA # 4	376.89	202.94	579.83 kg

D) El volumen de cemento por m³ de concreto para la mezcla # 1 es:

$$(463.87) (3,150) = 0.14726 \text{ m}^3$$

y de la ceniza volante:

$$(115.96) (2,640) = 0.04392 \text{ m}^3$$



de la misma manera para todas las mezclas se calculan los volúmenes;

	CEMENTO	CENIZA VOLANTE	TOTAL
MEZCLA # 1	0.14726	0.04392	0.19118 m ³
MEZCLA # 2	0.13805	0.05490	0.19295 m ³
MEZCLA # 3	0.12885	0.066589	0.19474 m ³
MEZCLA # 4	0.11964	0.07687	0.19651 m ³

E) Para todas las mezclas, el volumen de gravas, agua y aire es el mismo que el de la mezcla básica, por lo tanto, el contenido de arena por m³ de concreto para la mezcla # 1 es:

COMPONENTE	VOLUMEN <i>por m³</i>
Material cementante	0.19118
Gravas	0.39860
Agua (inc. retardante)	0.17975
Aire	0.02000
TOTAL	0.78953

por lo tanto, el volumen de arena será:
 $(1 - 0.78953) = 0.21047 \text{ m}^3$

que convertidos a peso en estado seco por m³ de concreto resulta ser:
 $(0.21047) (2,590) = 545.11 \text{ kg}$

las proporciones de cada mezcla preliminar por m³ de concreto son:

MEZCLA PRELIMINAR # 1	PESO en (kg)
Cemento	463.87
Ceniza Volante	115.96
Arena (seca)	545.11
Grava (seca)	1,100.14
Agua (inc. retardante)	179.75

MEZCLA PRELIMINAR # 2	PESO en (kg)
Cemento	434.88
Ceniza Volante	144.95
Arena (seca)	540.53
Grava (seca)	1,100.14
Agua (inc. retardante)	179.75

MEZCLA PRELIMINAR # 3	PESO en (kg)
Cemento	405.88
Ceniza Volante	173.95
Arena (seca)	535.89
Grava (seca)	1,100.14
Agua (inc. retardante)	179.75

MEZCLA PRELIMINAR # 4	PESO en (kg)
Cemento	376.89
Ceniza Volante	202.94
Arena (seca)	531.37
Grava (seca)	1,100.14
Agua (inc. retardante)	179.75



9° Dentro del proceso de mezcla se encontró que la arena tiene un contenido de humedad de 6.4% y la grava un contenido de 0.5%.

A este respecto, las correcciones para determinar los pesos por m³ de concreto de la mezcla básica son:

$$\text{Arena(humeda)} = (563.77) \times (1 + 0.064) = 599.85 \text{ kg}$$

$$\text{Grava(humeda)} = (1,100.14) \times (1 + 0.005) = 1,105.64 \text{ kg}$$

$$\text{Agua} = [179.75] - [(563.77) \times (0.064 - 0.011)] - [(1,100.14) \times (0.005 - 0.007)] = 152.08 \text{ kg}$$

los nuevos pesos corregidos de la mezcla básica son:

"MEZCLA BASICA"	Peso(seco) [kg]	Peso(estimado) [kg]
Cemento	579.83	579.83
Arena	563.77	599.85
Grava	1,100.14	1,105.64
Agua (inc. retardante)	179.75	153.66
TOTAL	2,423.50	2,438.98

de la misma manera para las mezclas preliminares se realizan las correcciones;

"MEZCLA # 1"	Peso (seco) [kg]	Peso (estimado) [kg]
Cemento	463.87	463.87
Ceniza volante	115.96	115.96
Arena	545.11	579.99
Grava	1,100.14	1,105.64
Agua (inc. retardante)	179.75	153.666
TOTAL	2,405.00	2,419.00

"MEZCLA # 2"	Peso (seco) [kg]	Peso (estimado) [kg]
Cemento	434.88	434.88
Ceniza volante	144.95	144.95
Arena	540.53	575.12
Grava	1,100.14	1,105.64
Agua (inc. retardante)	179.75	153.666
TOTAL	2,400	2,414

"MEZCLA # 3"	Peso (seco) [kg]	Peso (estimado) [kg]
Cemento	405.88	405.88
Ceniza volante	173.95	173.95
Arena	535.89	570.18
Grava	1,100.14	1,105.64
Agua (inc. retardante)	179.75	153.66
TOTAL	2,395.61	2,430

"MEZCLA # 4"	Peso (seco) [kg]	Peso (estimado) [kg]
Cemento	376.89	376.89
Ceniza volante	202.94	202.94
Arena	531.37	565.31
Grava	1,100.14	1,105.64
Agua (inc. retardante)	179.75	153.66
TOTAL	2,391	2,425



Para éste ejemplo, se produjeron mezclas preliminares de 85 litros (0.085 m³), los pesos reducidos de cada mezcla son:

MEZCLA COMPONENTE	MEZCLA BASICA	MEZCLA # 1	MEZCLA # 2	MEZCLA # 3	MEZCLA # 4
Cemento [kg]	49.25	39.40	36.94	34.47	32.01
Ceniza volante [kg]	-	9.85	12.31	14.77	17.23
Arena [kg]	50.95	49.26	48.45	48.43	48.02
Grava [kg]	93.91	93.91	93.91	93.91	93.91
Agua [kg]	12.95	13.00	13.00	13.05	13.05

10° Se realizaron los ajustes de cada mezcla para obtener el revenimiento deseado antes y después de la incorporación del superplastificante revisando la trabajabilidad deseada.

A) Para la mezcla # 4 , la cantidad de agua de mezclado requerida incluyendo el retardante para producir (2.5 a 5.0 cm) de revenimiento fue menor que la calculada, 12.62 kg, por lo tanto, los pesos estimados y en estado seco fueron;

CORRECCIONES PARA PESO EN ESTADO SECO:

Cemento 32.01 kg

Ceniza volante 17.23 kg

Arena (seca): $(48.02)/(1.064) = 45.13$ kg

Grava (seca): $(93.91)/(1.005) = 93.44$ kg

Agua: $(12.62 + 2.545^* - 0.187^*) = 14.97$ kg

- ♦ corrección de arena humeda
- ▲ corrección de grava humeda

por lo tanto los pesos corregidos para la mezcla # 4 son:

"MEZCLA # 4"	Peso (seco) [kg]	Peso (estimado) [kg]
Cemento	32.01	32.01
Ceniza volante	17.23	17.23
Arena	48.02	45.13
Grava	93.91	93.44
Agua (inc. retardante)	12.662	14.97

con los siguientes volúmenes;

Cemento	$(32.01)/(3,150) = 0.01016$ m ³
Ceniza volante	$(17.23)/(2,640) = 0.00652$ m ³
Arena (seca)	$(45.13)/(2,590) = 0.01742$ m ³
Grava (seca)	$(93.44)/(2,760) = 0.03385$ m ³
Agua	$(14.97)/(1,000) = 0.01497$ m ³
Aire	$(2.0/100) \times (0.085) = 0.00170$ m ³

TOTAL = 0.0846 m³



y para un metro cúbico de concreto el ajuste resulta ser;

Cemento	379.11 kg
Ceniza volante	204.09 kg
Arena (seca)	532.78 kg
Grava (seca)	1,107.09 kg
Agua (inc. retardante)	175.61 kg

La nueva relación $(A/(C+Ad))$ es de 0.30, para mantener la relación 0.31 el peso de material cementante debe ser reducido, es decir;

$$(175.61)/(0.31) = 566.60 \text{ kg}$$

de esta cantidad, el 35% es de ceniza volante, es decir, 198.16 kg y la cantidad restante de 368.44 kg, corresponde al cemento.

El cambio de volumen debido a la reducción del material cementante resulta ser;

$$[(379.11 - 368.44)/(3,150)] + [(204.09 - 198.16)/(2,640)] = 0.00563 \text{ m}^3$$

por lo tanto 0.00563 m³ de arena será adicionada, el incremento en peso de la arena es;

$$(0.00563) \times (2,590) = 14.58 \text{ kg}$$

$$(532.78) + (14.58) = 547.36 \text{ kg}$$

resultando un proporcionamiento de mezcla por m³ de:

Cemento	368.44 kg
Ceniza volante	198.1 kg
Arena (seca)	547.3 kg
Grava (seca)	1,107.09 kg
Agua (inc. retardante)	175.61 kg

B) La incorporación de superplastificantes para ajustar una mezcla fluida, resultó ser de 255 gr por 45.3 kg de material cementante (9oz/100lb), obteniéndose un revenimiento de 24 cm en condiciones de laboratorio. Se incorporó el aditivo retardante en 57 gr al agua de mezclado y el superplastificante se incorporó 15 min después del mezclado inicial.

C) Se presentaron adecuadas trabajabilidades para su colocación, siendo innecesario el ajuste de agregado grueso.

D) El contenido de aire para la mezcla fue de 2.1%.

E) La resistencia a compresión fue de 796 kg/cm²

El mismo procedimiento de ajuste se realizó para todas las mezclas arrojando los resultados que se muestran en el siguiente resumen tabulado,



MEZCLA COMPONENTE	MEZCLA BASICA	MEZCLA # 1	MEZCLA # 2	MEZCLA # 3	MEZCLA # 4
Cemento [kg]	579.09	463.87	437.85	398.10	368.44
Ceniza volante [kg]	-	115.96	145.95	170.27	198.16
Arena [kg]	542.7	545.11	542.27	544.05	547.3
Grava [kg]	1,092.2	1,100.14	1,107.09	1,099.97	1,107.09
Agua [kg]	184.51	179.75	178.58	176.21	175.1
Revenimiento [cm]	2.5	3.2	2.5	3.8	5.0
Retardante [gr]	85.05	70.87	70.87	5.70	5.70
Superplastificante [gr]	311.85	311.85	283.50	269.32	255.15
Revenimiento [cm]	25	26	23	26	24
Resistencia a compresión [kg/cm ²]	822	805	833	812	796

11° Las mezclas que no alcanzaron la resistencia requerida fueron la preliminar # 1 y la # 4, el proporcionamiento de estas mezclas queda descartado.

La elección de la proporción óptima está en función de la resistencia a compresión y de la economía, sin embargo el gradiente de temperatura puede constituir un factor fundamental en la elección de la proporción óptima. Para efectos del ejemplo, la proporción de mezcla # 3, tiene la resistencia a compresión más cercana a la requerida además de tener el menor contenido de cemento.

IV.3 Dosificación.

Las recomendaciones del comité ACI 363R-92, destacan que todos los materiales necesarios para producir concretos de alta resistencia se pueden dosificar en plantas manuales, semiautomáticas y automáticas.

Será importante que cualquier equipo de dosificación que se utilice, cumpla con las tolerancias de peso de carga usualmente especificadas, las tolerancias usadas en la dosificación de concretos convencionales serán aplicables también a los concretos de alta resistencia y se muestran en la siguiente tabla;



TOLERANCIAS TÍPICAS DE DOSIFICACION				
INGREDIENTES	Peso de carga mayores al 30% de la capacidad de la báscula		Peso de carga menores al 30% de la capacidad de la báscula	
	MEZCLADO INDIVIDUAL	MEZCLADO ACUMULADO	MEZCLADO INDIVIDUAL	MEZCLADO ACUMULADO
Cemento y otros materiales cementantes	±1% y ±3% de la capacidad de la báscula (el que sea mayor)		No menor que el peso requerido ni más del 4% del peso requerido	
Agua (por volumen o pesos)	±1%	no recomendado	±1%	no recomendado
Agregados	±2%	±1%	±2%	±0.3% de la capacidad de la báscula ó ±0.3% del peso acumulado requiendo, el que sea menor
Aditivos (por volumen o pesos)	±3%	no recomendado	±3%	no recomendado

Tabla 23

La **dosificación manual** como su nombre lo indica, las operaciones de pesado y dosificación de los ingredientes del concreto se llevarán a cabo manualmente, éstas plantas son aceptables para trabajos que no requieren grandes volúmenes de dosificación, cabe señalar que, por su característica de dosificación, se deberán realizar mayores esfuerzos para evitar excesivas inexactitudes en el pesado de los ingredientes de concretos de alta resistencia.

Para el sistema de **dosificación semiautomática**, las compuertas de las tolvas de los agregados para cargar las tolvas medidoras, se operan manualmente mediante botones o interruptores de presión. Las compuertas se cierran automáticamente cuando el peso estipulado del material ha sido pesado. Con un mantenimiento satisfactorio de la planta, la exactitud de la dosificación se mantendrá dentro de las tolerancias indicadas.

La **dosificación automática** de los ingredientes del concreto se maneja eléctricamente por medio de un sólo control de mando, existen dos tipos de dosificación automática, la **automática acumulada**, que requiere de interruptores en secuencia, éste tipo de sistema proporciona mayor exactitud en la producción a alta velocidad que en los anteriores casos, y también la **dosificación individual automática** que cuenta con básculas y tolvas medidoras separadas para cada tamaño de agregado y para cada ingrediente de la mezcla, cuenta con un interruptor sencillo y las tolvas medidoras individuales se cargan simultáneamente.

En lo que respecta a los ingredientes de la mezcla, a excepción del agua de mezclado y los aditivos líquidos los demás componentes de las mezclas de alta resistencia se dosificarán por peso, el agua y los aditivos líquidos se dosificarán por volumen requerido en un medidor de líquidos, en un tanque calibrador o en algún recipiente que tenga precisión.



IV.4 Mezclado del concreto.

El proceso de mezclado de los concretos de alta resistencia es similar al de los concretos convencionales con la diferencia de que es conveniente la incorporación del superplastificante en dos etapas, la primera en planta, con una cantidad tal que permita una docilidad adecuada para su mezclado inicial y transporte teniendo en cuenta que las características de la mezcla como altos contenidos de material cementante y menores cantidades del agua de mezclado, en ocasiones produce dificultades en el proceso de mezclado, disminuyendo su eficiencia, y una segunda etapa en obra, en la que se ajustará la cantidad necesaria para obtener el revenimiento previsto.

El tiempo de mezclado requerido de los concretos de alta resistencia está basado en el informe ACI 304 que especifica un minuto por cada 0.75 m^3 de concreto, más un cuarto de minuto por cada 0.75 m^3 incrementados, pero algunos autores consideran que el tiempo de mezclado se debería incrementar en 50% con respecto al especificado, es decir, un minuto y medio por cada 0.75 m^3 de concreto a fin de obtener los mejores efectos de los agentes químicos, sin embargo, prolongar el tiempo de mezclado puede causar una pérdida de humedad que traería como consecuencia una disminución de la trabajabilidad debiendo restaurar el revenimiento reduciendo así la resistencia potencial, por lo tanto sería recomendable realizar pruebas de tiempo de mezclado.

En general, el mezclado de los concretos de alta resistencia seguirá las recomendaciones del comité ACI 304 (Guía para la colocación, mezclado, transporte y colocación del concreto), sin ningún problema pero tomando en cuenta la consideración mencionada.

IV.5 Transporte y colocación.

El objetivo del transporte del concreto es que se translade desde la planta de producción hasta el sitio donde será colocado en las cimbras manteniendo las mejores condiciones de trabajabilidad, en ese contexto, los concretos de alta resistencia pueden ser transportados por una gran variedad de métodos y equipos utilizados actualmente en la industria de la construcción, es decir, equipos como los camiones revoladora que son los que normalmente se encargan de transportar el concreto fresco desde las plantas de producción hasta el sitio de la obra, posteriormente se lleva a cabo la segunda etapa llamada "transporte - colocación", utilizando equipos como los que se muestran en la siguiente tabla;



EQUIPO	TIPO Y RANGO DE TRABAJO PARA EL CUAL EL EQUIPO ES MAS ADECUADO
Bandas transportadoras	Para transportar horizontalmente concreto a un nivel mayor o menor. Normalmente se emplean entre un punto de descarga principal y un punto de descarga secundario.
Bandas transportadoras montadas sobre camiones mezcladores	Para transportar concreto a un nivel inferior, al mismo nivel o a un nivel más elevado.
Cucharones	Empleados junto con grúas, cablevías y helicópteros para la construcción de edificios y de presas. Transportan concreto directamente desde el punto central de descarga hasta la cimbra o a un punto de descarga secundario.
Canalones	Para transportar concreto a niveles inferiores, normalmente a niveles bajo el terreno, en todos los tipos de construcción de concreto.
Canalones de desnivel	Utilizados para colar concreto en cimbras verticales de todo tipo. Algunos canalones son de una pieza, otros se arman con segmentos sueltos conectados entre sí.
Extendedores de tornillo	Usados para extender concreto en áreas planas, como en los pavimentos.
Tubo embudo (Tubo Tremie)	Para colocar concreto bajo el agua.
Bombas	Empleadas para transportar directamente concreto desde el punto central de descarga hasta la cimbra o hasta el punto de descarga secundario.

Tabla 24

El bombeo de los concretos de alta resistencia es de especial mención ya que en muchos casos o aplicaciones, estas mezclas deberán ser bombeadas, se dice que el alto contenido de cemento y el relativo tamaño máximo de agregado menor contribuyen a facilitar el bombeo de estas mezclas, además de que un concreto con incorporación de superplastificante es mucho más fluido, la fricción es menor reduciendo así la presión de bombeo sin afectar el caudal de flujo; la facilidad de bombeo de estos concretos es inminente constituyendo el método más recomendable a utilizar, el comité ACI 304 (Guía para la colocación, mezclado y transporte del concreto), proporciona una guía para el transporte - colocación de los concretos de alta resistencia por bombeo.

Los equipos de bombeo con los que se cuenta en la actualidad son;

BOMBAS:

- Estacionarias
- de Pluma
- sobre camión
- Telescópicas y
- Combinación de camión revolvedora con bomba



El transporte de los concretos de alta resistencia tendrá que ser rápido y eficiente a fin de evitar la pérdida de humedad y revenimiento garantizando así un control de calidad adecuado, pero no debemos olvidar que, los aditivos reductores de agua de alto rango o superplastificantes que normalmente se incorporan a estos concretos, además de tener otras propiedades, permiten regular la pérdida de trabajabilidad dentro de ciertos límites sobre todo cuando la incorporación se divide en dos partes obteniendo mezclas manejables después de largos acarreos.

IV.6 Compactación.

Al tener mezclas de alta resistencia con valores de revenimiento adecuados es decir, valores de 20 a 25 cm, ausencia de segregación, menores tamaños de agregado grueso, suficiente volumen de partículas finas y con un eficiente transporte y colocación, la labor de compactación se realizará fácilmente y con mayor rapidez.

El comité ACI 363R-92 destaca que el método más conveniente de compactación para los concretos de alta resistencia es la vibración interna, no existen restricciones en cuanto al tipo de equipo vibrador ni a la mano de obra. En realidad la labor de compactación mediante equipos de vibración es la misma que la practicada normalmente, las recomendaciones del comité ACI 309 (Guía para la consolidación de concretos), es aplicable sin ningún problema, lo que no se deberá olvidar sobre todo cuando se utilice concreto de alta resistencia es que, al colocarlo en una estructura, podrá presentar las mismas características de resistencia mecánica, impermeabilidad, etc., analizadas en laboratorio si, y sólo si, las condiciones de compactación son igual de eficaces que las de los concretos de laboratorio; se procurará uniformidad en todos los puntos de vibrado en la estructura.

La eficacia de la compactación depende de la eficiencia del sistema de compactación y de la trabajabilidad del concreto fresco, por tanto, si el concreto de alta resistencia tiene adecuadas trabajabilidades, los esfuerzos deberán encaminarse a seleccionar y ejecutar el método de compactación eficientemente. Los vibradores para colocación que existen en la actualidad son:

- vibradores de combustión interna
 - vibradores eléctricos
 - vibradores de alta frecuencia
 - cabezales de diferentes medidas
- Reglas vibratoras
Allanadoras (pulidoras)

IV.7 Métodos de curado.

Entendiendo al curado de concreto como el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorios durante un período definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito de que se desarrollen las propiedades deseadas, se deberá reconocer la gran importancia y necesidad de adoptar procedimientos de curado efectivos para los concretos de alta resistencia a fin de minimizar los fenómenos de agrietamiento o esfuerzos de tensión provocados por la pérdida de agua por evaporación sobre todo por los altos contenidos de cemento que generan un elevado calor de hidratación.



Por lo tanto, el curado del concreto de alta resistencia será efectivo en la prevención de la pérdida de humedad y en la capacidad de mantener una temperatura favorable durante un periodo definido. Existen tres métodos de curado que mantienen la humedad del concreto y en ciertos casos, con una temperatura favorable;

1° Métodos que mantengan la presencia de agua de mezclado en el concreto durante el periodo inicial de endurecimiento. Entre éstos se incluye al estancamiento o inmersión, al rociado y a las cubiertas húmedas saturadas. Estos métodos proporcionan un cierto enfriamiento a través de la evaporación, lo cual es benéfico en climas cálidos.

2° Métodos que evitan la pérdida del agua de mezclado del concreto sellando la superficie. Esto se puede lograr cubriendo al concreto con papel impermeable o con hojas de plástico, o aplicando compuestos de curado que formen membranas.

3° Métodos que aceleren la ganancia de resistencia suministrando calor y humedad adicional al concreto. Esto se logra normalmente con vapor directo, serpentines de calentamiento, o cimbras o almohadillas calentadas eléctricamente.

En base a estos métodos y sus características se elegirá el más conveniente para este tipo de concretos; diversos estudios realizados indican que los curados en estado de saturación son los más convenientes principalmente para las características de resistencia a compresión, tensión y módulo de elasticidad. Como se mencionó en el primer capítulo I, *Klieger*, recomienda usar vapor saturado a presión atmosférica a temperaturas por debajo del punto de ebullición del agua, junto con aislamiento; añade que el uso de curado por agua se realizará durante las primeras horas de hidratación. Cuando se utilicen estructuras de concreto diseñadas para permeabilidades bajas, el curado será todavía más trascendente.

IV.8 Control de calidad.

El término, control de calidad es un conjunto de actividades cualitativas y cuantitativas que interactúan con las fases o etapas de todo proyecto, a su vez, a la relación entre control de calidad y etapas de proyecto se le denomina sistema total o sistema de aseguramiento de calidad.

La función del control de calidad es asegurar la confiabilidad del comportamiento del sistema diseñado de acuerdo con las resistencias nominales supuestas y esperadas en el diseño.

En este contexto, un concreto de alta resistencia nos demandará por su naturaleza propia, una calidad requerida determinada por las especificaciones contempladas para el material y una calidad de uso entendiendo a ésta como la habilidad del propio material para satisfacer las necesidades del usuario.

Por otra parte, el control de calidad debe afectar a las tareas que conforman la elaboración del concreto de alta resistencia, es decir, selección de materiales, proporcionamiento y proceso de producción; éstas tareas se esquematizan en el diagrama de la siguiente figura;



**ELABORACION
DEL CONCRETO**

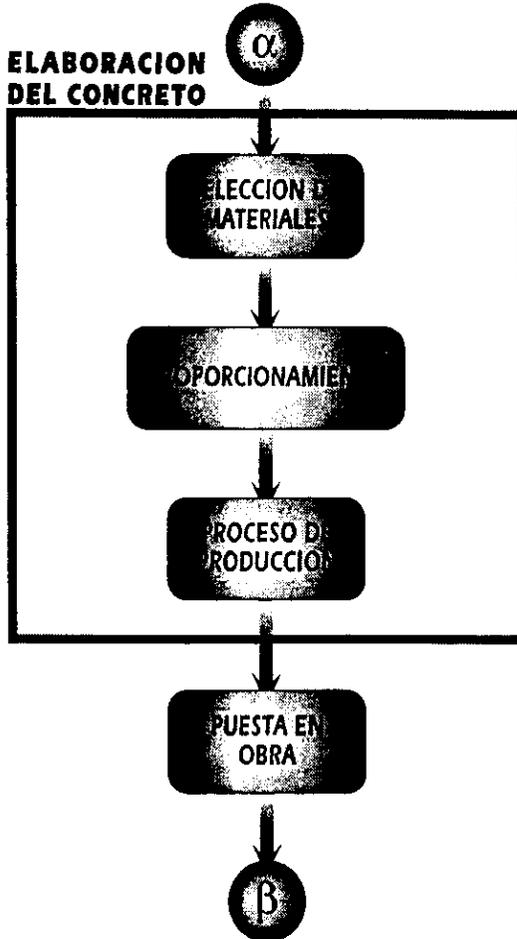


Figura 36

cada una de las tareas mencionadas están a su vez compuestas de otras subactividades que evidentemente estarán obligadas a cumplir con las demandas de calidad de los concretos de alta resistencia, en el siguiente diagrama se observan las subactividades mencionadas;

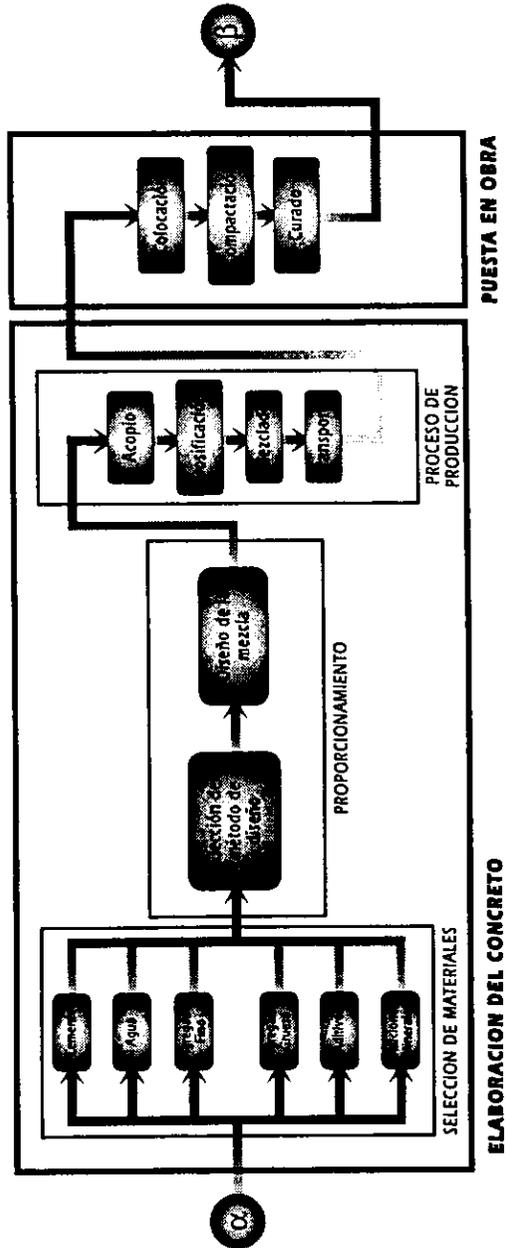


Figura 37



En cuanto a la elaboración del concreto, la manera de garantizar su control de calidad se lleva a cabo con el cumplimiento de los siguientes puntos;

- Organización general del personal de producción y operación.
- Secuencia en la producción y suministro de los materiales constituyentes.
- Control interno que abarque verificaciones, pruebas, análisis de resultados de pruebas, métodos de registro, de observación y los procesos referentes a discrepancias y desviaciones.
- Uso de cartas estadísticas de control para clasificar requisitos especificados de niveles de calidad en las variables principales tanto medibles como no medibles.
- Clasificación de defectos como una medida de las variables no definidas.

Una vez conocido el proceso de control es preciso mencionar los aspectos fundamentales que no se deberán perder de vista en la elaboración de concretos de alta resistencia;

- a) Control estricto de la calidad de los materiales
- b) Selección de agregados con gran resistencia
- c) Atención especial a la invariabilidad de la relación agua - materiales cementantes
- d) Dosificación precisa de los materiales constituyentes
- e) Determinación periódica de la granulometría y humedad de los agregados
- f) Atención especial y constante a básculas y/o elementos de medición en relación a su calibración para evitar errores de cuantificación
- g) Ejecución y supervisión de curado del concreto
- h) Interpretación adecuada de todas las normas y especificaciones concernientes a los procesos de elaboración.
- i) Un laboratorio a pie de planta

Finalmente y sin perder de vista el control de calidad en las etapas de planeación, diseño, construcción y mantenimiento, en la medida en que se complete el sistema total de control habremos alcanzado el objetivo principal de satisfacer las necesidades del usuario de una manera confiable.



Capítulo V

Las pruebas de laboratorio

Objetivo: Identificar y conocer las pruebas de laboratorio necesarias para garantizar la alta resistencia y calidad en los concretos.

V.1 Importancia de las pruebas de laboratorio.

Materiales como el concreto, de acuerdo con el uso al que se le destine, tendrá propiedades que el proyectista puede especificar para obtener la calidad esperada, no obstante, corresponderá al constructor y supervisor verificar el cumplimiento de estas especificaciones en base a la evaluación de los resultados generados por pruebas de laboratorio y campo que se realizan tanto al propio concreto como a sus componentes.

La importancia y veracidad de las pruebas radica en dos aspectos; la utilización de pruebas que verdaderamente reflejen la propiedad que se trata de establecer, y segundo, la correcta interpretación de los resultados por medio de criterios fundamentados científicamente.

En este marco, las pruebas de mayor interés en un concreto de alta resistencia sin perder de vista otras propiedades, serán las que valoran su principal característica, es decir, la resistencia a compresión.



V.2 Pruebas del cemento.

Las mejores características del cemento para producir concretos de alta resistencia fueron discutidas en el subtema II.3.1 de este trabajo y la selección del cemento supone entonces, el cumplimiento de éstas características, sin embargo, bajo un estricto control de calidad del concreto se podrían contemplar pruebas del cemento para realizar investigaciones y mezclas de prueba.

Existen pruebas que determinan la composición química del cemento mediante análisis químicos, además también, como se dijo **la finura del cemento** es de gran importancia para estos concretos y a este respecto, el ensaye del turbidímetro de *Wagner* ASTM C 115, el ensaye *Blaine* de permeabilidad al aire ASTM C 204, o el uso de malla No. 325 de 45 micras ASTM C 430, pueden ser usados.

Realmente existen pruebas del cemento que evalúan la consistencia normal de la pasta, pruebas para el tiempo de fraguado pero una prueba que resulta ser un buen índice de calidad respecto a las propiedades mecánicas del cemento es, **la prueba de resistencia a la compresión**, la manera en que se realiza es la siguiente;

la resistencia a la compresión norma ASTM C 150, es la obtenida a partir de pruebas de cubos de mortero estándar de 5 cm., ensayados de acuerdo a la norma ASTM C 109. Los cubos se hacen y se curan de manera prescrita y utilizando una arena estándar.

Los requisitos de resistencia a compresión para morteros elaborados con diferentes tipos de cemento se presentan en la siguiente tabla;

ASTM C 150 - 85				
TIPO DE CEMENTO	RESISTENCIA A COMPRESION (kg/cm ²)			
	1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
CEMENTOS PORTLAND				
I	-	127	197	281
IA	-	102	158	225
II	-	105	176	281
IIA	-	84	141	225
III	127	24	-	-
IIIA	102	197	-	-
IV	-	-	70	176
V	-	84	155	211

Tabla 25



V.3 Pruebas de los agregados.

Dentro de las pruebas de los agregados del concreto de alta resistencia, existen dos pruebas de gran importancia, la granulometría y el contenido de humedad de los agregados.

La **granulometría**, que influye en gran medida al proporcionamiento del concreto y a su trabajabilidad; la granulometría de los agregados se determina mediante una prueba de análisis de mallas en la que las partículas se dividen en diferentes tamaños por medio de mallas estándar ASTM C 136, los siete tamices estándar ASTM C 33, para agregado fino tienen aberturas que varían desde la malla No. 100 (150 micras) hasta 9.52 mm, y los trece tamices estándar para agregados gruesos varían desde 1.18 mm hasta 102 mm, cabe señalar que la granulometría y los límites de granulometría se expresan usualmente como porcentaje de material que pasa en cada malla.

El módulo de finura (M.F.), del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125 sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100.

Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son;

0.15 mm	(No. 100)
0.30 mm	(No. 50)
0.60 mm	(No. 30)
1.18 mm	(No. 16)
2.36 mm	(No. 8)
4.75 mm	(No.4)
9.52 mm	(3/8")
19.05 mm	(3/4")
38.10 mm	(1 1/2")
76.20 mm	(3")
152.40 mm	(6")

El contenido de humedad, para agregado fino o grueso se prueba conforme a la norma ASTM C 566, según este método una muestra medida de agregado húmedo se seca ya sea dentro de un horno, o sobre una plancha o a fuego directo. A partir de los pesos anterior y posterior al secado, se pueden calcular los contenidos de humedad total y de humedad superficial (libre). El contenido total de humedad se puede calcular con la siguiente ecuación;

$$P = 100(W - D)/D$$

dónde;

P: es el contenido de humedad de la muestra (%)

W: es el peso de la muestra original

D: es el peso de la muestra seca

y el contenido de humedad superficial es igual al contenido total de humedad menos la absorción.



Cabe señalar que, existen otros métodos para determinar el contenido de humedad de agregado pero utilizaremos el más conveniente a fin de cuantificar con exactitud los ajustes por humedad en la dosificación del concreto de alta resistencia.

V.4 Pruebas del concreto fresco y endurecido.

Al realizar el muestreo del concreto en estado fresco, las muestras se deberán obtener y manejar de acuerdo con la norma ASTM C 172.

CONTROL DEL CONCRETO FRESCO:

La prueba del **revenimiento**, norma ASTM C 143, es un índice de trabajabilidad que se realizará una vez por cada entrega y en obra una vez por cada cinco revolturas. El equipo de prueba es el cono de metal con 30 cm. de altura y diámetro de 20 cm. en la base y 10 cm. en la parte superior, además se cuenta con la barra de acero de 15.9 mm., de diámetro y 61 cm. de largo. La prueba deberá iniciarse dentro de los siguientes 5 minutos a la obtención de la muestra y la prueba se deberá completar en 2 1/2 minutos; existen otros métodos de prueba para medir la consistencia del concreto.

El **peso volumétrico** del concreto fresco se determina conforme la norma ASTM C 138 y se hará una vez por cada día de colado pero no menos de una por cada veinte metros cúbicos, el concreto hecho en obra, se hará una vez por cada día de colado; la prueba permite establecer la clase a la que pertenece el concreto. Es necesaria una báscula con precisión de 50 gr. y un recipiente que varía según el tamaño de agregados.

El peso volumétrico también se puede determinar mediante métodos nucleares, norma ASTM C 1040.

La **temperatura** del concreto norma ASTM C 1064, se determina mediante un termómetro de vidrio o con coraza y precisión de 1°C .

El termómetro permanecerá como mínimo 2 minutos en la muestra representativa. La medición de la temperatura deberá completarse dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra.

La **prueba del contenido de aire**, se puede realizar según la norma ASTM por cualquiera de los tres métodos siguientes; método de presión (C 231), método volumétrico (C 173) y método gravimétrico.

El método de presión se basa en la ley de *Boyle*, la cuál relaciona a la presión con el volumen. La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo al que se encuentra en los poros de los agregados.

El método volumétrico requiere la remoción del aire de un volumen conocido de concreto agitando al concreto dentro de un exceso de agua.

En el método gravimétrico se utiliza el mismo equipo de prueba que se emplea para la determinación del peso volumétrico del concreto. El peso volumétrico medido en el concreto se sustrae del peso volumétrico teórico (suponiendo que no existe aire), la diferencia expresada como un porcentaje del peso volumétrico teórico, es el contenido de aire.



CONTROL DE CONCRETO ENDURECIDO:

Las pruebas que se hacen para valorar las propiedades del concreto endurecido en laboratorio más importantes se enumeran en la siguiente tabla:

PRUEBAS DEL CONCRETO ENDURECIDO	NORMA
Resistencia a compresión simple	ASTM C 39
Resistencia a flexión (módulo de ruptura) - con carga en los tercios - con carga central	ASTM C 78 ASTM C 293
Módulo de elasticidad y Relación de Poisson	ASTM C 469 y C215
Resistencia a tensión	ASTM C 496
Contracción por secado	ASTM C 157
Contenido de aire	ASTM C 457
Densidad relativa, Peso específico, Absorción y Vacíos	ASTM C 642
Durabilidad - Congelación y deshielo - Descascaramiento - Corrosión del acero - Reactividad álcali - agregado - Reactividad alcali - sílice - Resistencia a los sulfatos - Resistencia a la abrasión	ASTM C 666, C671 y C682 ASTM C 672 ASTM C 876 ASTM C 227 ASTM C 289, C342 y C441 ASTM C 452 y C1012 ASTM C 418, C 779 y C 944
Permeabilidad	AASHTO T 259 y T277

Tabla 26

V.5 Interpretación de los resultados.

El resultado de las pruebas de laboratorio concernientes al cemento constituyen un factor importante para elegir la composición química más adecuada, los cementos con mayores finuras, así como las mayores resistencias a compresión que en términos generales, son los parámetros fundamentales de la selección de los cementos en la elaboración de concretos de alta resistencia.

Por su parte, los resultados de las pruebas de granulometría y contenido de humedad de los agregados serán parte esencial del control de calidad del proporcionamiento y proceso de producción.

El resultado de las pruebas de concreto fresco como la del revenimiento cuantifica la consistencia de la mezcla pudiendo en consecuencia, aceptar la puesta en obra siempre y cuando cumpla con lo especificado.



Un buen diseño de la mezcla de alta resistencia, también puede ser verificado con los resultados de pruebas como contenido de aire, peso volumétrico y verificación de la temperatura.

En lo que respecta a la resistencia de los cilindros de concreto, sabemos que se trata de la evidencia de calidad más usada en la industria de la construcción, y por ser además la resistencia a compresión, la principal característica de los concretos de alta resistencia, la interpretación correcta de los resultados de sus pruebas nos proporcionan una evidencia clara del comportamiento de servicio que se tendrá en las diferentes estructuras y de la eficiencia con que se han realizado todos y cada uno de los procesos que intervienen en la elaboración de la mezcla de concreto. Sin embargo, por la naturaleza propia de los concretos, existen muchas fuentes de variación que afectan a los resultados de las pruebas.

En base a la reflexión anterior y a diversas investigaciones, se establece que la resistencia de las muestras de prueba de concreto asumirá un patrón similar a la curva de distribución normal de la figura siguiente,

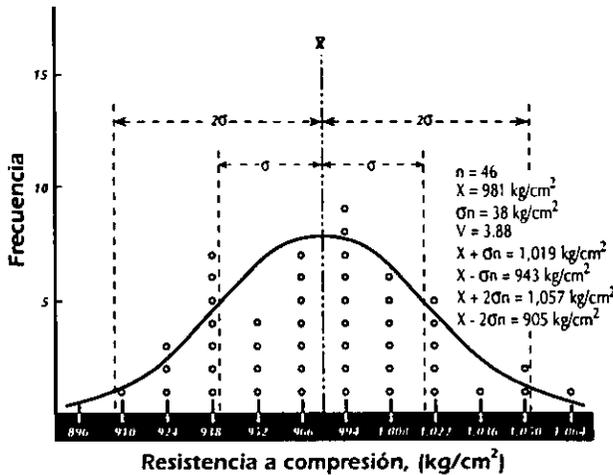


Figura 38

el comportamiento de la muestra permite calcular funciones matemáticas como las siguientes;

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} ; \text{ la media } \bar{X}$$

dónde;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$: son los resultados de las pruebas de resistencia individuales
 n : es el número total de pruebas

la desviación estándar σ_n ;

$$\sigma_n = \{ [(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 + (x_3 - \bar{X})^2 + \dots + (x_n - \bar{X})^2] / (n - 1) \}^{1/2}$$



y el coeficiente de variación;

$$V = (\sigma n / \bar{X}) \times 100$$

En base a estas funciones matemáticas y a el análisis de la curva se desprende la siguiente ecuación;

$$\bar{X} = f'c + \rho\sigma$$

o también;

$$\bar{f}'cr = f'c + \rho\sigma$$

dónde;

$\bar{X} = \bar{f}'cr$: es el valor promedio de resistencia requerida.

ρ : es un factor probabilístico de la desviación estándar que define el porcentaje permitido de las pruebas defectuosas (factor de aumento).

σ : es la desviación estándar.

El significado de la media $\bar{X} = \bar{f}'cr$, corresponde a la resistencia promedio de todas las pruebas individuales de una muestra de tamaño n .

La desviación estándar σ , indica la cercanía con que los resultados de las pruebas individuales se agrupan alrededor del promedio.

Por su parte, el coeficiente de variación V , relaciona la desviación estándar con el valor promedio expresado en porcentaje y compara pruebas distintas en un mismo material o pruebas idénticas en diferentes materiales.

Dentro de la evaluación probabilística de la muestra, es necesario señalar que para una resistencia promedio determinada, si un pequeño porcentaje de los resultados de prueba cae por debajo de la resistencia de diseño, el gran porcentaje correspondiente a los resultados de las pruebas será superior a la resistencia de diseño.

El proceso de evaluación del concreto será inverso al de diseño recopilando de manera cronológica, las pruebas realizadas sobre el material y aplicando sistemática y continuamente los conceptos probabilísticos para obtener las funciones matemáticas mencionadas a fin de encontrar el valor característico $f'c$ buscado mediante la siguiente expresión;

$$f'c = \bar{f}'cr - \rho\sigma$$

a partir del valor obtenido, se puede determinar el cumplimiento de la especificación de proyecto, además de poder también medir la variabilidad del concreto producido.



Capítulo VI

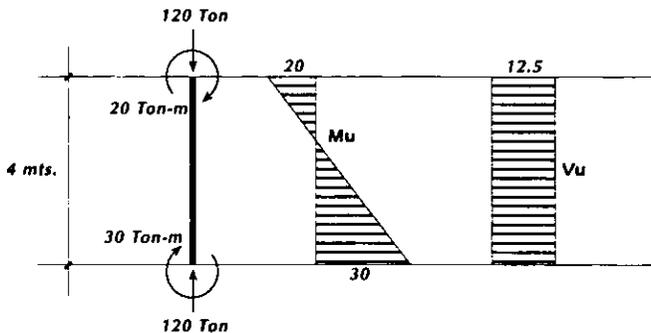
Análisis económico, constructivo y de diseño

Objetivo: Analizar los factores más importantes del concreto de alta resistencia con el objeto de establecer sus ventajas y desventajas.

VI.1 Consideraciones del diseño estructural.

Para el desarrollo de éste capítulo se establece un parámetro de comparación mediante el diseño de una estructura de concreto reforzada que está sometida a ciertas solicitaciones con dos tipos de resistencia de concreto, es decir, un concreto convencional y uno de alta resistencia.

Se trata del dimensionamiento de una columna rectangular sometida a flexocompresión como se muestra en el siguiente diagrama;



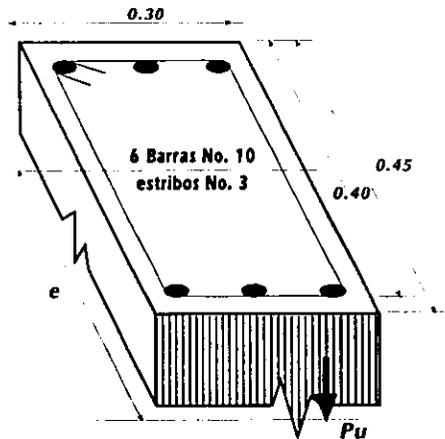
Los datos que se pueden observar son los siguientes;

- $P_u = 120$ toneladas ; carga axial
- $V_u = 12.5$ toneladas ; fuerza cortante
- $M_u = 30$ ton - m ; momento flexionante máximo
- $e = 0.25$ m ; excentricidad
- $r = 0.05$ m ; recubrimiento al centro de las barras
- $F_y = 4,200$ kg/cm²



El resumen del diseño de la columna con concreto de resistencia normal de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, se muestra a continuación;

$f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ $f'c = 170 \text{ kg/cm}^2$	suponiendo una sección de $b=0.30\text{m}$, $h=0.45\text{m} \Rightarrow d=0.40\text{m}$
Factores necesarios para entrar a las gráficas de interacción: $(d/h) = 0.89$ $K = 0.70$ $R = 0.39$ $q = 0.85$ $\therefore p = 0.034$, $As = 46.40 \text{ cm}^2$	
SECCION PROPUESTA: 0.30 X 0.45 Usando 6 barras del No. 10 estribos del No. 3 @ 20 cm centrales y 5 estribos No. 3 @ 15cm en extremos	



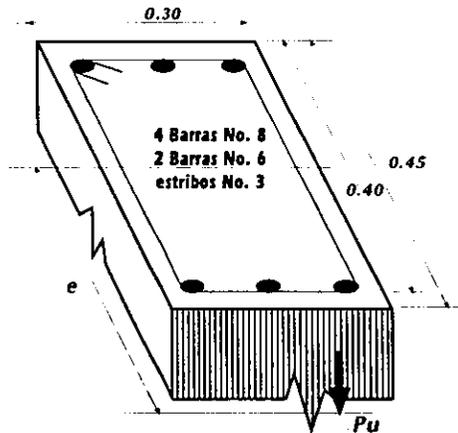
Para el diseño con concreto de alta resistencia se generan tres alternativas;

- la primera, suponer la misma sección del concreto normal reduciendo la cantidad de acero de refuerzo
- la segunda, suponer una sección de menores dimensiones reduciendo el área de concreto y la cantidad de acero de refuerzo
- la tercera, disminuir aun más las dimensiones de la sección a tal grado que la cantidad de acero aumenta respecto a la cantidad de acero del concreto normal.

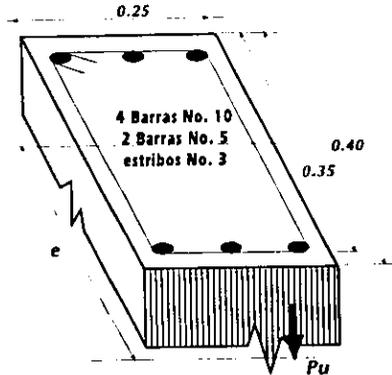
El resumen del diseño de las tres alternativas con concreto de alta resistencia de $f'c = 800 \text{ kg/cm}^2$.



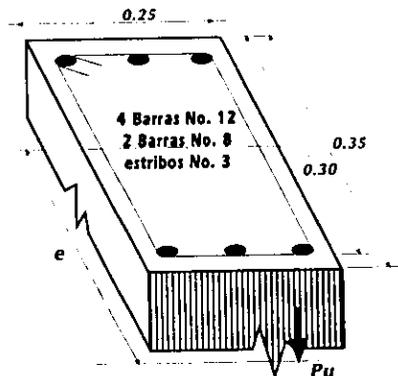
PRIMERA ALTERNATIVA	
$f^*c = 640 \text{ kg/cm}^2$ $f'c = 380 \text{ kg/cm}^2$	con una misma sección de $b=0.30\text{m}$, $h=0.45\text{m} \Rightarrow d=0.40\text{m}$
Factores necesarios para entrar a las gráficas de interacción: $(d/h) = 0.89$ $K = 0.31$ $R = 0.17$ $q = 0.20$ $\therefore p = 0.018$, $As = 24.30 \text{ cm}^2$	
SECCION PROPUESTA: 0.30 X 0.45 Usando 4 barras del No. 8, y 2 barras del No. 6 estribos del No. 3 @ 20 cm centrales y 6 estribos No. 3 @ 12 cm en extremos	



SEGUNDA ALTERNATIVA	
$f^*c = 640 \text{ kg/cm}^2$ $f'c = 380 \text{ kg/cm}^2$	suponiendo una sección de $b=0.25\text{m}$, $h=0.40\text{m} \Rightarrow d=0.35\text{m}$
Factores necesarios para entrar a las gráficas de interacción: $(d/h) = 0.89$ $K = 0.421$ $R = 0.263$ $q = 0.38$ $\therefore p = 0.0343$, $As = 34.38 \text{ cm}^2$	
SECCION PROPUESTA: 0.25 X 0.40 Usando 4 barras del No. 10, y 2 barras del No. 5 estribos del No. 3 @ 17 cm centrales y 7 estribos No. 3 @ 10 cm en extremos	



TERCERA ALTERNATIVA	
$f^*c = 640 \text{ kg/cm}^2$ $f^c = 380 \text{ kg/cm}^2$	suponiendo una sección de $b=0.25\text{m}$, $h=0.35\text{m} \Rightarrow d=0.30\text{m}$
Factores necesarios para entrar a las gráficas de interacción: $(d/h) = 0.85$ $K = 0.481$ $R = 0.343$ $q = 0.70$ $\therefore p = 0.0633$, $As = 55.41 \text{ cm}^2$	
SECCION PROPUESTA: 0.25 X 0.35 Usando 4 barras del No. 12, y 2 barras del No. 8 estribos del No. 3 @ 15 cm centrales y 6 estribos No. 3 @ 12 cm en extremos	





VI.2 Análisis constructivo.

Haciendo un análisis comparativo entre los procesos constructivos de las columnas diseñadas con cada tipo de concreto se desprenden los siguientes puntos;

- la reducción de las dimensiones de la sección reducen la cantidad de cimbra por metro cuadrado disminuyendo mano de obra y materiales
- la gran trabajabilidad de los concretos de alta resistencia facilitan la colocación y compactación de los mismos a comparación de los concretos convencionales, las duraciones de éstas actividades se ve reducida
- la alta resistencia temprana proporciona un más rápido descimbrado de la estructura a comparación de las estructuras de concreto convencional
- cuando es necesario bombear el concreto, la gran trabajabilidad de las mezclas de alta resistencia hacen más rápida y eficiente la labor en comparación con las mezclas de concreto convencional
- la labor de curado se vuelve imprescindible para las estructuras de concreto de alta resistencia por lo que los métodos deben ser más efectivos a comparación de las estructuras de concreto convencional
- las características de calidad del concreto de alta resistencia demandan una mano de obra calificada al igual que una supervisión de obras de concreto calificada
- los equipos de transporte y colocación para colar los concretos de alta resistencia no difieren de los que se usarían para colar el concreto convencional, inclusive la colocación del concreto de alta resistencia se podría facilitar por su gran trabajabilidad

VI.3 Análisis económico.

Para el análisis económico de las columnas se tomó en cuenta los materiales necesarios para las columnas diseñadas de cuatro metros de altura. Los costos por metro cúbico de concreto al mes de noviembre de 1997 son los siguientes;

Concreto hecho in-situ $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ Clase I Revenimiento 10 cm Costo \$ 413.40 por metro cúbico	Concreto premezclado $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ Clase I Revenimiento 10 cm Costo \$ 704.00 por metro cúbico	Concreto premezclado $f'c = 800 \text{ kg/cm}^2$ Clase I Revenimiento 23 cm inc. aditivo superfluidizante y adiciones minerales Costo \$ 1,162.00 por metro cúbico
--	--	--



Los costos del acero de refuerzo longitudinal y transversal con $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$, son los siguientes;

Costo del acero de refuerzo en columna de 0.30×0.45 y $f'c = 250$

\$ 545.72

Costo del acero de refuerzo en primera alternativa de 0.30×0.45 y $f'c = 800$

\$ 344.51

Costo del acero de refuerzo en segunda alternativa de 0.25×0.40 y $f'c = 800$

\$ 438.52

Costo del acero de refuerzo en tercera alternativa de 0.25×0.35 y $f'c = 800$

\$ 648.93

Los costos de materiales generados por las cantidades de obra, se resumen en cinco casos;

COSTO BASICO	RESISTENCIA NORMAL		ALTA RESISTENCIA		
	CASO I f'c 250 IN-SITU	CASO II f'c 250 PREMEZ	CASO III f'c 800 PREMEZ ALT 1	CASO IV f'c 800 PREMEZ ALT 2	CASO V f'c 800 PREMEZ ALT 3
CONCRETO, \$	223.24	380.16	627.48	464.80	406.70
ACERO DE REFUERZO \$	545.72	545.72	344.51	438.52	648.93
COSTO POR MATERIALES \$	768.96	925.88	972.00	903.32	1,055.63

VI.4 Evaluación del análisis.

Haciendo una evaluación de los tres aspectos analizados, es decir, diseño, construcción y economía, se observan los siguientes resultados;

- el primer dimensionamiento con concreto de alta resistencia logra reducir en un 47.63% la cantidad de acero de refuerzo
- el segundo dimensionamiento con concreto de alta resistencia reduce en un 25.92% el área de concreto y en un 25.90% la cantidad de acero de refuerzo
- el tercer dimensionamiento con concreto de alta resistencia reduce en un 35.18% el área de concreto pero incrementa en un 16.26% la cantidad de acero de refuerzo.



De los resultados del análisis económico, se observa que por concepto de materiales, el primer caso resultó ser el menos costoso, sin embargo, la calidad y durabilidad de éste concreto no se garantiza produciendo muy probables gastos de mantenimiento a largo plazo además de que, para proyectos de gran magnitud, los concretos hechos en obra no son prácticos.

El segundo caso representa el costo de materiales típico de estructuras hechas con concreto de resistencia normal.

El tercer caso muestra el incremento en costo debido al uso de concreto de alta resistencia en comparación con los casos de concreto de resistencia normal.

Por su parte, el cuarto caso reduce la cantidad de materiales necesarios para soportar una misma condición de carga disminuyendo en consecuencia la carga muerta de la estructura.

El quinto caso de diseño resultó ser el más costoso pero la durabilidad de esta estructura es excelente incrementando su calidad, los gastos de mantenimiento a largo plazo se minimizan además de que la vida útil se prolonga por muchos años.

Para los diseños con concreto de alta resistencia se observó que, a medida que las dimensiones de la sección disminuyen, el costo del acero de refuerzo se incrementa.

La influencia de la mano de obra y equipo pueden aumentar en mayor medida el costo directo de las columnas hechas con concreto de alta resistencia debido entre otras cosas, a los métodos de curado que no son necesarios para las columnas de concreto normal además de que a mayores cantidades de acero de refuerzo se tendrán mayores costos por mano de obra.

VI.5 Ventajas y desventajas.

El análisis anterior y las características estudiadas sobre concretos de alta resistencia permiten establecer las siguientes ventajas y desventajas;

VENTAJAS

La alta resistencia permite obtener una reducción en las dimensiones de la estructura diseñada estableciéndose las siguientes ventajas;

- mayores superficies utilizables en planta.
- menores cargas muertas que a su vez pueden reducir el número de vigas necesarias para soportar un determinado esfuerzo.
- la disminución en conjunto de las cargas muertas reduce en diferentes proyectos, el volumen de cimentación que sustenta dichos proyectos, los presupuestos se ven reducidos en cuanto a costo.
- la posibilidad de salvar claros más grandes gracias a la mayor capacidad al cortante y a la disminución del peso propio de la estructura.



La vida útil de las estructuras se prolonga debido a;

- el cumplimiento eficiente de los requisitos de durabilidad.
- excelente resistencia a los ambientes agresivos debido a la baja permeabilidad misma que disminuye enormemente la corrosión de sus armaduras de refuerzo.

La gran calidad de las características de comportamiento permite tener;

- un incremento en el módulo de elasticidad que a su vez produce menores deformaciones tanto instantáneas como de largo plazo.
- una mayor rigidez de las estructuras en conjunto que permiten reducir la magnitud de oscilación bajo la presencia de sismos.
- beneficios en el comportamiento a flexión, cortante carga axial y torsión debido al aumento de la resistencia del concreto $f'c$.

Por otro lado, la trabajabilidad de éste tipo de mezclas permite;

- agilizar las labores de colocación y compactación del concreto
- los métodos de bombeo se vuelven más eficientes debido a los revenimientos tan altos de las mezclas, además, los ciclos constructivos se ven reducidos debido a que las altas resistencias a edades tempranas permiten descimbrados mucho más rápidos.

Un aspecto importante que debe ser mencionado es el relacionado con los estudios sobre éste concreto, se dice que se mejora el conocimiento de las propiedades del concreto generando **avances tecnológicos**.

DESVENTAJAS.

Un elevado costo del concreto premezclado al salir de las plantas productoras debido a;

- una selección cuidadosa de los materiales.
- los altos contenidos de cemento.
- la incorporación de aditivos reductores de agua y de adiciones minerales.
- que el diseño de la mezcla es más crítico que el que se requiere para concretos de resistencia normal teniendo como consecuencia controles de calidad más estrictos de los ingredientes de la mezcla y de la producción.
- capacitación de personal encargado del diseño de las mezclas y del personal encargado de la dosificación.
- mayores pruebas de mezclas que garanticen la resistencia requerida.

Una competencia desequilibrada respecto a otros materiales de construcción debido a;

- la falta de difusión de los estudios y aplicaciones sobre concreto de alta resistencia.
- los altos costos del material.
- poco avance y desarrollo en cuanto al diseño y reglamentación de estructuras hechas con este tipo de concreto.
- mínima comercialización por parte de las empresas concreteras.



- poca voluntad de los calculistas de estructuras para incorporar estos concretos en sus proyectos por desconocimiento de los beneficios que le puede traer el uso de este material.

Además también, para grandes elementos de concreto (grandes volúmenes de material), **se deben considerar equipos de enfriamiento o algún otro método que evite los altos gradientes térmicos.**

Se dice que **los imprevistos en obra pueden tener consecuencias graves de caída de resistencia del concreto.**

Se tiene un mayor riesgo de agrietamiento por contracción plástica durante el período de fraguado ya que estos concretos no producen sangrado.

La durabilidad del material en climas fríos es un tema que aún no se define, sin embargo todo parece indicar que **por los mínimos contenidos de aire, éste concreto se comporta deficientemente ante el fenómeno de congelación y deshielo.**

La disminución de secciones y la fragilidad de estructuras de concreto de alta resistencia producen **incrementos en el porcentaje de refuerzo haciendo más costosas dichas estructuras.**



Capítulo VII

Aplicaciones

Objetivo: Conocer las posibles aplicaciones de este tipo de concreto en las distintas obras de ingeniería.

VII.1 En edificaciones.

Probablemente, el mayor uso de los concretos de alta resistencia se ha dado en edificios altos, prueba de ello se menciona en el primer capítulo de este trabajo. Las edificaciones de gran altura, son resultado de la combinación de diferentes esquemas de estructuración o sistemas estructurales y de concretos de altas resistencias mecánicas, éste último elemento permite reducir, como ya se dijo, la sección transversal de columnas y muros de carga teniendo como resultado, mayores superficies rentables.

Por otro lado, el uso de este concreto incrementa la rigidez del sistema estructural reduciendo la magnitud de oscilación bajo la presencia de sismo. Además, constructivamente hablando, el concreto de alta resistencia permite reducir de manera segura y controlada, la duración del ciclo constructivo.

Los edificios que han desarrollado mayores rangos de resistencia a compresión en sus estructuras se presentan en la siguiente tabla;

EDIFICIO	UBICACION	AÑO DE FINALIZACION	No. DE PLANTAS	RESISTENCIA	
				Mpa	kg/cm ²
900 N. Mich. Annex	Chicago	1986	15	97	985
Two Union Square	Seattle	1989	58	115	1,167
Pacific First Center	Seattle	1989	44	115	1,167
Gateway Tower	Seattle	1989	62	94	954

Tabla 27



VII.2 En cimentaciones.

Se ha comenzado a utilizar concreto de alta resistencia en cimentaciones profundas, específicamente en pilas y pilotes de cimentación.

En el noroeste de los E.U. se construyeron pilas para una plataforma marina con resistencias a compresión de (55 a 68 Mpa), 559 a 690 kg/cm².

En Noruega se construyó un centro comercial, "Oslo City", a base de una cimentación sustentada en 250 pilotes hincados a profundidades de hasta 35 metros; las resistencias a compresión del concreto de los pilotes fue de (75 Mpa), 761 kg/cm², y permitió reducir un número importante de pilotes que se tenían contemplados originalmente en el proyecto.

A pesar de que aún no existe experiencia en cuanto a cimentaciones compensadas y superficiales, el concreto de alta resistencia puede constituir una alternativa de solución no sólo por sus características mecánicas, si no que también su excelente durabilidad puede ser benéfica ante la presencia de infiltraciones de niveles de agua freáticas y sustancias agresivas a losas de cimentación, trabes y contratrabes.

VII.3 En obras hidráulicas y sanitarias.

Un estudio realizado menciona que el uso de concretos de alta resistencia en presas de arco delgado pueden redituarse en ahorros económicos debido a la reducción del volumen total de concreto en la presa.

Además se mencionó, que el concreto de alta resistencia ayudaría a reducir las deflexiones generadas por la estructura de arco y se mejora la resistencia de las juntas de construcción.

Otra de las aplicaciones potenciales, se puede presentar en obras para sistemas de agua potable y saneamiento. En la medida en que se establezcan requisitos específicos y más estrictos en relación a las estructuras de concreto reforzado o preesforzados que tienen que resistir sustancias agresivas contenidas en el agua y en el suelo donde se aloja la línea de conducción o donde se desplanten las estructuras, en esa medida se tendrán como resultado estructuras que difieren de las convencionales, requiriendo un tratamiento y diseño especial, es entonces cuando el concreto de alta resistencia puede constituir una alternativa factible.

Aplicaciones en dispositivos de tratamiento de aguas residuales como tanques de contacto de cloro, tanques de sedimentación primarios y secundarios, tanques de aireación, cajas receptoras, canales de llamada y otros dispositivos en donde la durabilidad más que la resistencia es preocupación primordial por la agresión de sustancias químicas desinfectantes y aguas residuales sobre todo de tipo industrial, el concreto de alta resistencia puede constituir una magnífica alternativa ya que se disminuyen los gastos de mantenimiento y se alarga la vida útil del proyecto en conjunto.



VII.4 En vías terrestres.

El concreto de alta resistencia en puentes ha tenido gran desarrollo dadas las características del material, las aplicaciones han ido aumentando tanto en pilares como en vigas pretensadas de tableros, los resultados obtenidos se reflejan en pesos propios de superestructuras reducidos y capacidad para librar mayores claros.

No obstante, investigaciones de vigas de sección sólida, de sección T y de sección cajón postensado han seguido desarrollándose para aplicarse en futuros proyectos de puentes.

La siguiente tabla muestra algunos proyectos que han alcanzado elevadas resistencias a compresión;

PUENTE	UBICACION	AÑO DE CONSTRUCCION	CLARO MAXIMO (m)	RESISTENCIA	
				Mpa	kg/cm ²
Ootnabe Railway	Japón	1973	24	79	802
Fukamitsu Highway	Japón	1974	26	69	700
Akkagawa Railway	Japón	1976	46	79	802
Deutzer	Alemania	1978	185	69	700
Tower Road	Washington	1981	49	62	629
Poun du Pertuiset	Francia	1988	110	65	660
Heigeldandsbrua	Noruega	1990	425	65	660

Tabla 28

Otra de las aplicaciones potenciales del concreto de alta resistencia se puede presentar en la infraestructura carretera y aeroportuaria, específicamente en sus pavimentos.

Los incrementos en el módulo de ruptura y en la resistencia a la abrasión, constituyen parámetros de gran importancia para el diseño y construcción de pavimentos rígidos hechos con concreto de alta resistencia. Por lo tanto, el excelente comportamiento de pavimentos rígidos hechos con este tipo de concreto comparados con pavimentos flexibles podría ser una alternativa muy atractiva no sólo para pavimentos de carreteras y autopistas, si no que también para aquellos pavimentos que son sometidos a cargas muy elevadas y constantes como las que se presentan en los aeropuertos.

Con respecto a pavimentos, no se debe olvidar que la vida útil de un pavimento de concreto hidráulico supera en mucho a la correspondiente de los pavimentos asfálticos generándose grandes ahorros económicos con respecto al mantenimiento de las carpetas asfálticas.

VII.5 Aplicaciones especiales.

Además de los diferentes rubros en los que se puede desarrollar el uso del concreto de alta resistencia, existen otras aplicaciones de especial mención.

La posibilidad de crear elementos más resistentes, más rígidos y más ligeros con concreto de alta resistencia permite desarrollar elementos prefabricados en general de gran calidad, ya sean estructuras preesforzadas o elementos aislados utilizables en la industria de la construcción. Se dice que la baja deformación diferida y la baja contracción son benéficas para elementos preesforzados ya que la mayoría de las pérdidas de preesfuerzo se atribuyen precisamente a éstos dos fenómenos.



El uso masivo del concretos de alta resistencia en plataformas petrolíferas marítimas se ha diversificado debido a la aptitud del material para soportar la acción continua de agentes agresivos, a la disminución de los costos de mantenimiento derivados de la mayor durabilidad y a la facilidad de su puesta en obra. La siguiente tabla muestra una relación de plataformas construidas con concreto de alta resistencia;

PLATAFORMAS	AÑO DE CONSTRUCCION	RESISTENCIA A 28 DIAS (kg/cm ²)			
		f _c	f _{cr}	σ	Real
Statfjord C	1982	558	685	39	629
Gullfaks A	1984	558	662	33	612
T 300, Testmodel	1984	660	858	71	755
Gullfaks B	1984	558	820	51	746
Oseberg A	1985	690	779	37	726
Gullfaks C	1986	660/710	802	35	761
Gullfaks (skirts)	n/d	710	851	55	741

Tabla 29

Otras aplicaciones especiales para este tipo de concreto son;

- Túneles submarinos, amplia aplicación debido a la impermeabilidad y durabilidad.
- Paneles de concreto para fuentes generadoras de energía.
- Techos de tribunas, que aligeran el peso propio y aceleran el proceso constructivo.
- Concreto de alta resistencia para satisfacer necesidades de altos módulos elásticos.
- Estacionamientos.
- Fundiciones.
- Cubiertas para estructuras de muelles en la infraestructura portuaria.
- Pisos industriales de trabajo pesado.
- Estructuras de sustentación para conducciones de gas.
- Durmientes de concreto para vías férreas.



Conclusiones

El desarrollo de este trabajo se realizó en base a el cumplimiento de los objetivos planteados previamente en cada uno de los capítulos. El cumplimiento de los objetivos constituyó un paso más para comprender el tema central de la tesis, la elaboración y los alcances que tiene el concreto de alta resistencia en nuestro país. Por lo tanto, el último paso que finaliza este trabajo es el establecimiento de las siguientes conclusiones:

- A) Que en México, valores de 420 kg/cm^2 o mayores se catalogan como de alta resistencia no siendo así para otros países en donde el desarrollo de este material ha sido mayor.
- B) Que existe un gran interés por parte de centros de investigación en todo el mundo para conocer el comportamiento y la elaboración de concretos de alta resistencia.
- C) Que muchos proyectos avalan y apoyan el desarrollo del material desde hace tres décadas.
- D) Que la alta resistencia en los concretos produce modificaciones en las propiedades físicas y químicas del material así como en el comportamiento del mismo, algunas de estas modificaciones son benéficas dando como resultado un concreto de excelente durabilidad y calidad, sin embargo para evaluar la congelación y deshielo se necesitan realizar mayores investigaciones a fin de determinar si es o no es adecuado el comportamiento de este concreto en dichas condiciones.
- E) Que para elaborar concretos de alta resistencia, se deberá contar con materiales de excelente calidad así como la incorporación de adiciones minerales y aditivos reductores de agua de alto rango.
- F) Que la tradicional relación agua - cemento modificada como relación agua - cementantes se debe llevar a valores menores o por lo menos iguales a 0.4 constituyendo uno de los factores principales para producir concretos que tengan muy altas resistencias.
- G) Que el desarrollo de concretos hechos en laboratorio con cada vez mayores resistencias y su inmediata transferencia tecnológica a las plantas premezcladoras, han evolucionado con mayor velocidad que el proceso evolutivo de los criterios normativos, que las especificaciones y que la reglamentación.
- H) Que existen métodos de diseño efectivos y eficientes para producir mezclas de concreto de alta resistencia siendo totalmente adaptables a las plantas concretoras de nuestro país.
- I) Que los procesos de acopio, dosificación, mezclado, transporte y colocación del concreto de alta resistencia no difieren de los correspondientes al concreto de resistencia normal pero se debe tener un estricto cuidado en la realización de estas actividades implementando sistemas eficientes de aseguramiento de la calidad.



J) La utilización de métodos de curado efectivos que minimicen la pérdida de agua por evaporación y que mantengan contenidos de humedad y temperatura satisfactorios para las mezclas de alta resistencia, la elección del mejor método de curado para este tipo de concretos es otro factor fundamental en la producción de muy altas resistencias.

K) La utilización de pruebas de laboratorio eficaces y actualizadas que reflejen el verdadero comportamiento del material además de la interpretación correcta de los resultados a fin de que en conjunto se compruebe la calidad demandada por la producción de concretos de alta resistencia.

L) Que como ventajas se encontraron la reducción de las dimensiones de estructuras diseñadas, una excelente durabilidad del material, grandes rigideces gran resistencia a la compresión, gran trabajabilidad de la mezcla e indirectamente la generación de avances en la tecnología de materiales.

M) Que como desventajas se encontraron los elevados costos del material elaborado, una competencia desequilibrada debido entre otras cosas a la falta de difusión y falta de demanda del concreto de alta resistencia (específicamente en nuestro país), incrementos en los porcentajes de acero de refuerzo, y deficiencia probable con respecto al comportamiento de resistencia a congelación y deshielo entre las más importantes.

N) Que el campo de aplicación del concreto de alta resistencia abarca los proyectos de infraestructura necesarios para el desarrollo de nuestro país adquiriendo por consecuencia, fundamental importancia para la sociedad en conjunto.

Por todo lo anterior, los alcances de este nuevo concepto denominado "Concreto de Alta Resistencia" en México, son factibles y viables siempre y cuando las condiciones económicas permitan desarrollar proyectos que demanden la utilización de este material y a la vez sean competitivos frente a otras alternativas como el acero (por mencionar alguna); en la medida en que se presente este escenario lo que restará por hacer será conjuntar esfuerzos de colaboración entre:

- universidades e institutos de investigación que desarrollen los estudios del material y que posteriormente se difundan,
- calculistas de estructuras plenamente convencidos de la aplicación de este concepto a sus diseños,
- organismos elaboradores de normas, reglamentos y especificaciones que incorporen el concepto de alta resistencia en dichos documentos,
- productores de concreto premezclado que cuenten con conocimientos sobre el particular, infraestructura adecuada, personal calificado y un estricto control de calidad en toda su producción además de contar con mecanismos atractivos de venta del concreto de alta resistencia,
- laboratorios familiarizados con el concepto de alta resistencia,
- personal de supervisión calificado con respecto a este concepto y consiente de la importancia del cumplimiento de los requisitos de la puesta en obra y finalmente,
- las empresas constructoras que cuenten con la capacidad económica, técnica y de personal necesarias.



Bibliografía

- **La Ingeniería Civil Mexicana**
(Un encuentro con la Historia)
COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE MEXICO
- **Medición, Mezclado, Transporte y Colocación del Concreto**
Nueva Serie IMCYC
EDITORIAL LIMUSA
- **Metodología de la Planeación Normativa**
Fuentes Zenon Arturo
Sánchez Guerrero Gabriel
FACULTAD DE INGENIERIA (APUNTES)
- **Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones**
EDITORIAL TRILLAS
- **Práctica para Dosificar Concreto**
Nueva Serie IMCYC
EDITORIAL LIMUSA
- **Aspectos fundamentales del concreto reforzado**
González Cuevas Oscar
Robles Fernández Francisco
EDITORIAL LIMUSA
- **Práctica Recomendable para la Evaluación de los Resultados de las Pruebas de Resistencia del Concreto**
Nueva Serie IMCYC
EDITORIAL LIMUSA
- **Concreto Reforzado**
G. Nawy Edward
EDITORIAL PRENTICE HALL
- **Producción de Grandes Volúmenes de Concreto**
Nueva Serie IMCYC
EDITORIAL LIMUSA
- **Diseño y Control de Mezclas de Concreto**
IMCYC
- **Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal**
EDITORIAL TRILLAS
- **Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash.**
ACI 211.4
- **Reglamento para las Construcciones de Concreto Estructural y Comentarios**
ACI 318-95 y ACI 318R-95
- **Hormigón de Alta Resistencia**
González Isabel Germán
EDITORIAL INTEMAC
- **State of the Art Report on High Strength Concrete**
ACI 363R-92
- **La Ingeniería en México**
León López Enrique G.
EDITORIAL LIMUSA
- **Tecnología del Concreto**
Tomos I, II, y III
Neville Adam M.
IMCYC Primera Edición



Revistas Técnicas

- **Cemento y Hormigón (España)**
 - No. 709, Año 1992
"Composición y dosificación de los hormigones de alta resistencia"
 - No. 709, Año 1992
"Aridos para hormigones de altas resistencias, sus características"
 - No. 709, Año 1992
"La durabilidad de los hormigones de alta resistencia"
- **Construcción y Tecnología (México)**
 - No. 13, Año 1989
"Concretos de muy alta resistencia"
 - No. 43, Año 1991
"Concretos de resistencia superior"
 - No. 75, Año 1994
"Empleo de concretos de alta resistencia en Europa"
 - No. 97, Año 1996
"Concretos de alta resistencia, se desvanecen los mitos"