



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

01146 3
25

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA CON
COMPONENTES COMUNES DE LA CIUDAD DE
MÉXICO**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA EL :

ING. MARIO XICOTÉNCATL GUZMÁN RAMÍREZ

DIRIGIDA POR: ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

MÉXICO, D. F.

1999

**TESIS CON
ALLA 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.

LIBRARY
UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LIBRARY

A MIS PADRES Y HERMANOS
CON MUCHO AMOR Y CARIÑO

AGRADECIMIENTOS:

Al Ing. Juan Luis Cottier Caviedes por su gran paciencia y valiosa participación y asesoría en la realización de este trabajo.

A los miembros del jurado Ing. Salvador Díaz Díaz, Ing. Juan Luis Cottier Caviedes, Ing. Roberto Sosa Garrido, Dr. Hugo Meza Puesto y Dr. Jorge Abraham Díaz Rodríguez por formar parte de esta empresa.

A las autoridades y personal del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Ing. Héctor Guzmán Olguín, Don Mario Gutiérrez y Francisco Javier Valencia Maqueda por su valiosa ayuda durante mi estancia en el laboratorio.

A los Ingenieros Alberto Fuentes (Instituto Ingeniería), Felipe de Jesús García (Sika Mexicana) y Gustavo Gutiérrez Ochoa (Grupo Corporativo Interestatal), por sus atenciones y ayuda para la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros por el gran apoyo y amistad que siempre me han brindado.

Concreto de alta resistencia con componentes comunes de la Ciudad de México

Indice

Introducción	i
Capítulo 1. Antecedentes	
1.1 Reseña histórica	1
1.2 Concreto de alta resistencia	5
1.3 Objetivos	8
1.4 Alcance	8
Capítulo 2. Selección de materiales	
2.1 Generalidades	10
2.2 Cementos	10
2.3 Aditivos químicos	12
2.4 Aditivos minerales	15
2.5 Agregados	19
Capítulo 3. Proporcionamiento de Mezclas	
3.1 Generalidades	23
3.2 Resistencia requerida	23
3.3 Edad de prueba	24
3.4 Relación agua/cemento o relación agua/cementantes	25
3.5 Contenido y tipo de cemento	26
3.6 Proporcionamiento de agregados	27

3.7 Proporcionamiento con aditivos	30
3.8 Trabajabilidad	32
3.9 Mezclas de prueba	33
Capítulo 4. Propiedades del concreto de alta resistencia	
4.1 Generalidades	38
4.2 Trabajabilidad	38
4.3 Resistencia a compresión axial	39
4.4 Relación esfuerzo deformación a compresión axial	45
4.5 Módulo de elasticidad	46
Capítulo 5. Aplicaciones	
5.1 Generalidades	52
5.2 Edificios	52
5.3 Puentes	53
5.4 Pavimentos	54
5.5 Aplicaciones especiales	54
5.6 Aplicaciones potenciales	55
Conclusiones	56
Referencias	59

INTRODUCCIÓN

Las crecientes necesidades de adecuados centros de vivienda y servicios, plantean la obligación de optimizar recursos y buscar mejores tecnologías para satisfacer dichas necesidades. Es aquí, donde materiales como el concreto y más específicamente el concreto de alta resistencia juega un papel trascendente y de ahí la necesidad de investigarlos.

Surge entonces la pregunta, ¿Es posible producir concreto de alta resistencia utilizando materiales disponibles en la Ciudad de México?.

El presente trabajo pretende, dentro de las posibilidades y sin pretender abarcar todo el campo, responder a la pregunta anterior.

Así pues los principales objetivos del estudio son: 1) Producir un concreto de alta resistencia utilizando materiales comunes y disponibles en la Ciudad de México, mediante la elaboración en laboratorio de especímenes de prueba; y 2) Determinar las propiedades de resistencia a compresión axial, la relación esfuerzo-deformación y el módulo de elasticidad de los concretos producidos.

Para lograr dichos objetivos se recurrió primero a una investigación documental sobre el estado del arte y los avances en materia de concreto de alta resistencia. Una vez seleccionada la información se procedió a la segunda parte del estudio que consistió en el desarrollo de ensayos de laboratorio.

El presente trabajo está formado por cinco capítulos, un apartado de conclusiones y la bibliografía consultada. El primer capítulo muestra el desarrollo histórico del concreto, los objetivos y alcances del estudio y por último una breve descripción de las ventajas que se han obtenido con el uso del concreto de alta resistencia en otros países.

El capítulo segundo presenta las principales recomendaciones en cuanto a las características deseables de los materiales a utilizar en el concreto de alta resistencia, dichas

recomendaciones están basadas en las investigaciones realizadas tanto en México como en el extranjero.

El capítulo tres es una descripción de los materiales, diseño de mezclas y procedimiento de mezclado utilizados en la investigación.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, así como un análisis de los mismos.

Las aplicaciones que ha tenido el concreto de alta resistencia y sus aplicaciones potenciales se presentan en el capítulo quinto.

En seguida se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo de la investigación; y por último las referencias consultadas para el mismo.

Además de las referencias se consultaron otras fuentes como: el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, el Instituto de Ingeniería de la UNAM y productores de aditivos.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

1.1 Reseña histórica

El cemento portland

La historia del cemento portland es la historia de la búsqueda por parte del ser humano de materiales de construcción superiores a los proporcionados por la naturaleza. Los antropólogos y arqueólogos creen que el hombre primitivo vivió en cavernas naturales o en frías chozas construidas con hojas, lodo y rocas. Tales estructuras primitivas no pudieron haber sido muy satisfactorias. Las rocas son un material básico de construcción, pero su valor depende del mortero usado para integrarlo en una estructura permanente. Las primeras culturas usaron lodo. Los babilonios y asirios emplearon depósitos naturales de material bituminoso; los egipcios usaron bloques colocándolos juntos. Una excavación arqueológica en Irak en 1968 desenterró una estructura en forma de templo. La construcción que data tentativamente del 4000 A. C., fue construida parcialmente de concreto (su primera aplicación conocida). Culturas egipcias posteriores, además de los bloques de construcción , utilizaron una especie de cemento, un mortero de caliza con agua para unir las piedras usadas en grandes estructuras.

Los romanos fueron los primeros en utilizar mortero de cemento una mezcla de caliza, ceniza volcánica dio como resultado el cemento romano que era durable e hidráulico, desafortunadamente el proceso romano desapareció con el imperio. Una sustancia permanente, hidráulica para construcción no apareció nuevamente hasta el siglo XVIII.

Durante la turbulencia de la edad media, el conocimiento de la producción de cementos hidráulicos se perdió.

Fue hasta 1756 cuando el ingeniero británico John Smeaton descubrió el cemento hidráulico, al utilizar la marga calcinada de cal, para la construcción del faro de Eddingstone. En 1819, el alemán John fundamenta el conocimiento científico del calcinado de cemento. En 1824 un albañil inglés Joseph Aspdin, patentó un cemento que denominó "Portland" por su similitud a una roca encontrada en la Isla de Portland. La patente de Aspdin consistía en una mezcla de piedra caliza y tierra arcillosa calentada hasta que se había escapado el ácido carbónico. Aunque se reconoce a Aspdin como el padre del cemento portland moderno, la patente de Joseph Parker describe un material mucho más cercano al cemento portland actual.

El procedimiento fue perfeccionándose paulatinamente por Johnson, Lürman, Fremy y Langen.

En 1904 la Sociedad Americana para pruebas de materiales (ahora la ASTM) estableció algunas especificaciones que fueron adoptadas por muchos productores de cemento.

En México desde los inicios de este siglo se presentaron las primeras necesidades de consumo de cemento. Estas necesidades fueron cubiertas por importaciones provenientes de Inglaterra, Bélgica y Alemania.

Fue hasta 1906 cuando inició sus actividades Cementos Hidalgo, S. A. , en Nuevo León. Esta empresa funcionó como Sociedad Anónima independiente hasta el año de 1931, cuando se fusionó con Cementos Portland Monterrey S. A. dando origen a Cementos Mexicanos S. A.

A fines del mismo año se constituyó la Cía. Cementos Portland Hidalgo S. A., en Toluca, Estado de Hidalgo, cambiando posteriormente su denominación a La Toluca, Compañía de Cementos Portland S. A.

El concreto

Uno de los primeros usos del concreto y de los morteros fue la construcción de tuberías de agua y alcantarillado. Siglos antes del nacimiento de Cristo los romanos construyeron una línea de agua con cemento hidráulico la cual permaneció en servicio hasta 1928.

En cuanto a la mampostería de concreto, ésta es tan antigua como el cemento portland. Edificios de concreto se construyeron antes de que se colaran muros de concreto. La primera máquina designada para fabricar mampostería de concreto data de 1895. Durante los inicios de 1900 la mampostería de concreto fue a menudo utilizada con propósitos decorativos tanto como material de construcción.

Durante los años de 1920 y 1940 , la mampostería de concreto creció significativamente y recibió una gran aceptación pública. El crecimiento paralelo de la industria de la mampostería de concreto y las mejoras generales en la capacidad y la producción del concreto datan de mediados de 1930. El uso de bloques de concreto con fines decorativos creció rápidamente después de 1960. La industria creció conforme al desarrollo de los equipos para producir y manejar los bloques.

El concreto reforzado.- Otra área del cemento y el concreto es el campo del concreto reforzado. En 1855 Lambot obtiene una patente para la fabricación de barcas de hormigón armado. W. B. Wilkinson fue quizá el primero en reforzar concreto, el usó una soga para reforzar una losa. La primera patente de refuerzo de concreto se adjudica a Monier, en 1867 introdujo un alambre en el concreto para aumentar la resistencia del producto final. Más tarde, Monier Extendió su patente a tuberías de concreto reforzado, pisos, vigas y puentes.

En 1877 Hyatt publica sus trabajos sobre ensayos en la construcción de concreto armado. Hyatt descubría ya con claridad el efecto de la unión de ambos materiales. Construyó, en Londres, una casa de concreto armado y efectuó en ella una prueba de resistencia al fuego.

En 1878 nuevas patentes de Monier dan la base, para introducir el concreto armado en otros países.

Hacia principios de este siglo y a partir de entonces la construcción de concreto armado está caracterizada aún por diversos sistemas que surgen unos junto a otros, siendo patentados la mayoría de ellos.

En 1904 surge el primer cuerpo de especificaciones, El Código prusiano para la construcción sirvió de base para las subsecuentes en todo el mundo. En esta labor inicial se distingue Emil Mörsch.

Durante los primeros 20 años de este siglo, se efectuaron grandes cantidades de pruebas de concreto reforzado. Las pruebas aún continúan.

En México, el concreto armado aparece en los primeros años del presente siglo.

El concreto presforzado.- En lo que respecta al concreto presforzado, Peter H. Jackson puede quizá haber recibido la primera patente de concreto presforzado en 1888 ya que sus métodos descritos en la patente se asemejan mucho a las técnicas actuales de postensado. También en 1888 Döring de Berlín, obtiene una patente, según la cual, se puede aumentar la resistencia de placas y pequeñas vigas por medio del pretensado de la armadura de lambrones. Con ello aparece, por primera vez, el concepto de pretensado provocado deliberadamente.

En 1919 Wettstein empieza en Bohemia la fabricación de tableros pretensados con alambres de cuerda de piano de alta resistencia y obtiene en 1922 una patente, en la que se describen las ventajas de los alambres delgados, para su anclaje por adherencia.

El concreto presforzado se uso primero en Europa. Eugene Freyssinet había utilizado ya en 1924 el pretensado para reducir la dilatación de los tirantes de las cerchas utilizadas para cubrir edificios de gran luz, y es el primer ingeniero proyectista que reconoce la considerable importancia del pretensado de la armadura de las construcciones de ingeniería.

De 1943 a 1953 se preparan las primeras especificaciones para concreto pretensado en Alemania. Y se utiliza cada vez más la colocación de refuerzo de pretensado en el interior de tubos protectores embebidos en los elementos de concreto. Una vez fraguado y endurecido el concreto, se tensa el refuerzo creándose la adherencia entre el refuerzo y el concreto inyectando morteros especiales (postensado). Dicho sistema se convierte en el fundamento para la construcción de estructuras de grandes claros.

El concreto premezclado.- En 1909 nace la industria del concreto premezclado; antes de la Primera Guerra Mundial, el concreto se preparaba en plantas mezcladoras estacionarias y se trasladaba a la construcción en camiones. La práctica de entregar concreto premezclado se originó en Baltimore.

Se intentaron muchos diseños de camiones de entrega. Muchos fueron equipados con agitadores para evitar el fraguado durante el traslado; otros fueron equipados con unidades de mezclado en cada camión.

En 1921, una firma de Milwaukee agregó una mezcladora al camión y mezcló el concreto durante el traslado al sitio de trabajo y la descarga se efectuaba por gravedad. Los primeros camiones mezcladores fueron fabricados con el eje del tambor horizontal. Sin embargo, en 1937 apareció una mezcladora que tenía el punto de descarga del tambor elevado. Esta descarga alta con el eje inclinado permitió expulsar el concreto de forma más rápida del camión. Desde entonces el crecimiento de esta industria ha sido increíble. Este crecimiento ha sido acompañado de mejoras en los métodos y equipo utilizados por los operadores.

El concreto prefabricado.- Desde su descubrimiento ha sido utilizado para prefabricar piezas especiales. En Europa ingenieros británicos estuvieron experimentando con estructuras residenciales desde inicios de 1905. Después de la Segunda Guerra Mundial, la construcción prefabricada se convirtió en una parte fundamental de los mercados de construcción europeos. La devastación ocasionada por la guerra demandó un plan de reconstrucción que fuera extenso y rápido. La respuesta, el sistema de construcción prefabricada.

1.2 El concreto de alta resistencia

El crecimiento de la población en muchas partes del mundo, principalmente en los países en desarrollo, los cuales carecen de adecuados centros de vivienda, sistemas de agua potable y alcantarillado, y sistemas de transporte adecuados; hacen evidente la necesidad de buscar mejores tecnologías para satisfacer estas necesidades, estas tecnologías deben hacer un uso más eficiente de los materiales existentes y en algunos casos abundantes (como los agregados, arena, puzolanas) y es aquí donde materiales económicos como el concreto cobran gran importancia para satisfacer las crecientes necesidades de una población en crecimiento. Por lo tanto, se hace notoria la necesidad de duplicar o triplicar el uso del concreto hacia el próximo siglo, para poder así resolver las

necesidades de infraestructura de estas áreas en crecimiento dentro de los que se encuentra México.

El concreto de alta resistencia es un término sobre el que se ha tratado en las últimas décadas para satisfacer las nuevas necesidades.

A principios del siglo XX una resistencia de 130 kg/cm² se consideraba adecuada.

En 1954, una estructura de 35 niveles se construyó en Cuba usando concreto de 550 kg/cm² cuando se consideraban 340 kg/cm² como el estándar para concretos de alta resistencia.

En 1972, el primer concreto de 620 kg/cm² se produjo para su uso en el edificio Mid-Continental Plaza en Chicago con una altura de 50 niveles.

Actualmente concretos con resistencias de aproximadamente 1380 kg/cm² se están utilizando en columnas de edificios altos y en algunos puentes europeos. En Francia se han producido concretos con resistencias entre 7000 y 8000 kg/cm² para aplicaciones especiales.

En la actualidad, el Comité ACI 363 define al concreto de alta resistencia como “concretos con resistencias de diseño de 410 kg/cm² o mayores, pero actualmente, no se incluyen concretos fabricados con materiales o técnicas exóticas.”

El desarrollo acelerado en las investigaciones de concreto en los últimos 20 años han abierto una nueva y prominente utilización de componentes disponibles en la naturaleza, incluyendo desechos industriales. La confianza en esta actividad se ha justificado debido a las ganancias económicas obtenidas al producir estructuras más fuertes con miembros de dimensiones menores y mayor disponibilidad de espacio.

Los principales factores que intervienen en la producción, utilización y costo del concreto de alta resistencia pueden resumirse como sigue:

- 1.- Investigación y desarrollo.
- 2.- Areas de aplicación y necesidades de comportamiento.
- 3.- Reglamentos, normas y especificaciones de ingeniería.
- 4.- Selección de los componentes materiales y de la mezcla de diseño.
- 5.- Aseguramiento y control de la calidad en la producción.

De acuerdo con las experiencias en otros países, las principales ventajas que se han obtenido con la utilización del concreto de alta resistencia son:

- 1.- Reducción en el tamaño de los miembros, dando como resultado un incremento en el área rentable y una reducción en el volumen de concreto producido con el correspondiente ahorro de tiempo en la construcción.
- 2.- Reducción en el peso propio de la estructura y la carga muerta lo que resulta en cimentaciones más pequeñas.
- 3.- Reducción en el área y costo de cimbrado con la correspondiente reducción de tiempo de cimbrado y descimbrado debido a la alta ganancia de resistencia a edades tempranas.
- 4.- Construcción de edificios más altos con los beneficios correspondientes en áreas congestionadas.
- 5.- Claros más largos y vigas más pequeñas para la misma magnitud de la carga.
- 6.- Reducido acortamiento axial de miembros cargados a compresión.
- 7.- Reducción en el número de apoyos y en las cimentaciones debido al incremento en los claros.
- 8.- Reducción en el espesor de losas y en la sección de trabes. Este es uno de los mayores componentes del peso y costo de las estructuras.
- 9.- Comportamiento de servicio superior a largo plazo bajo carga estática, dinámica, y de fatiga.
- 10.- Poco flujo plástico y agrietamiento.
- 11.- Gran rigidez debido un muy alto módulo de elasticidad.
- 12.- Alta resistencia al deshielo y al congelamiento, ataque químico y una significativa mejora en la durabilidad a largo plazo.
- 13.- Reducción en los costos de mantenimiento y reparación.

En México, país con grandes necesidades, se hace evidente la necesidad de investigar estas nuevas tecnologías así como su posible aplicación.

1.3 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivos:

1. Obtener un concreto de alta resistencia utilizando cementos y agregados disponibles en la Ciudad de México, aditivo reductor de agua de alto rango y humo de sílice, mediante la elaboración y ensaye de especímenes de prueba fabricados en el laboratorio.
2. Determinar las siguientes propiedades mecánicas de los concretos fabricados: resistencia a compresión axial, relación esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad.

1.4 Alcance

Para obtener concretos por encima de los 410 kg/cm² es necesario un mayor cuidado en la selección de los cementos y los agregados, el uso de aditivos químicos y minerales, así como en la fabricación de los especímenes.

Con el propósito de determinar si se pueden obtener concretos de alta resistencia a compresión axial mediante la utilización de cementos y agregados comunes de la Ciudad de México y auxiliándose de la utilización de aditivos químicos y humo de sílice se llevó a cabo el presente estudio como se describe a continuación.

En principio se realizaron ensayos utilizando agregado grueso de origen basáltico y agregado fino de origen andesítico disponibles localmente, utilizando cemento Gris Portland-Puzolana y cemento blanco; con el fin de observar cual de estos cementos mostraba un mejor comportamiento.

Los diseños de las mezclas se realizaron en base a métodos obtenidos en otras investigaciones realizadas en el extranjero.

En la siguiente fase se incluyó la utilización de un aditivo químico del tipo reductor de agua de alto rango, para observar su comportamiento con ambos tipos de cemento. Los resultados de esta fase motivaron desechar la utilización del cemento blanco debido a su comportamiento menos satisfactorio y su alto precio.

La selección del tipo de aditivo químico se realizó tomando en cuenta los resultados y recomendaciones obtenidos en otras investigaciones realizadas tanto en el país como en el extranjero.

En la última fase se incluyó la utilización de un aditivo mineral a base de humo de sílice en combinación con el cemento gris portland-puzolana el cual mostró un mejor comportamiento en combinación con el aditivo reductor de agua de alto rango.

El aditivo de humo de sílice se utilizó como reemplazante del cemento en una proporción determinada mediante pruebas para obtener una trabajabilidad adecuada.

Se presentan los resultados y el análisis de los resultados obtenidos con los dos tipos de cemento y la utilización del humo de sílice, además se evalúan los resultados de las propiedades estudiadas.

Capítulo 2

Selección de materiales

2.1 Generalidades

La producción de concreto de alta resistencia, puede o no requerir de la compra de materiales especiales.

El concreto de alta resistencia ha sido producido utilizando materiales de un alto rango de calidad basados en los resultados de mezclas de prueba.

Estos concretos pueden alcanzarse mediante la optimización de los siguientes factores: (1) las características del medio cementante, (2) características del agregado, (3) proporcionamiento de la pasta, (4) interacción pasta-agregado, (5) mezclado, consolidación y curado, y (6) procedimientos de ensayo.

2.2 Cementos

La elección del cemento portland para concreto de alta resistencia es extremadamente importante. A menos que una alta resistencia inicial sea requerida, como en los concretos presforzados, no es necesario utilizar cemento Tipo III..

Se recomienda tomar en cuenta lo siguiente con respecto al cemento utilizado: si el contenido de silicato tricálcico varía por más de 4 %, la pérdida por ignición por más del 0.5 %, o la finura por más de 375 cm²/g (Blaine), entonces se pueden tener problemas para mantener uniformidad en la alta resistencia. El nivel de sulfato (SO₃) deben mantenerse óptimo con variaciones limitadas a ± 0.20 %.

Contenido de cemento

El efecto de las características del cemento en la demanda de agua son más visibles en el concreto de alta resistencia debido a los altos contenidos de cemento.

Debido a estos altos contenidos puede esperarse un crecimiento alto de temperatura dentro del concreto. Una consideración adicional es la optimización del sistema cemento-aditivo. El efecto preciso de un agente reductor de agua en los requerimientos de agua, por ejemplo, dependerá de las características del cemento. El desarrollo de la resistencia dependerá tanto de las características como del contenido de cemento.

Contenidos comunes de cemento en programas de ensayo de concretos de alta resistencia van desde 392 a 557 kg./m³.

Para cualquier lote de materiales en una mezcla de concreto, existe un contenido de cemento que produce una máxima resistencia del concreto. Esta máxima resistencia no siempre puede ser incrementada agregando cemento más allá de este contenido óptimo de cemento. La elección debe basarse en pruebas comparativas de resistencia de concretos probados a 28 y 90 días.

Una consideración importante para establecer el contenido de cemento deseable deberá ser la identificación de combinaciones de materiales que produzcan resistencias óptimas.

La eficiencia en la resistencia del cemento variará para diferentes tamaños máximos de agregados a diferentes niveles de resistencia.

Existen muchos factores que pueden limitar la máxima cantidad de cemento que puede ser deseable en una mezcla de alta resistencia. El contenido máximo de cemento puede variar dependiendo de la eficiencia de agentes dispersantes, como los reductores de agua de alto rango. El endurecimiento y pérdida de trabajabilidad se incrementarán tanto como se incorporen cantidades de cemento más altas en la mezcla. Combinaciones de cemento, puzolanas y arena deberán ser evaluadas por el efecto que el contenido de cementantes produce en la colocación de la mezcla..

La temperatura máxima deseada en el elemento de concreto puede limitar la cantidad o tipo de cemento en la mezcla. Además, mezclas ricas en cemento tienen frecuentemente alta demanda de agua, por lo que es importante que se tomen precauciones para proveer un curado adecuado.

2.3 Aditivos químicos

Los aditivos químicos para concreto, incluyendo concreto de alta resistencia, deben cumplir con los requisitos de la especificación ASTM C494.

Los aditivos son usados de forma extensa en la producción de concreto de alta resistencia. La selección del tipo, marca y los rangos de dosificación de todos los aditivos debe basarse en su relación con los demás materiales que están siendo considerados para su uso en el proyecto.

Aditivos inclusores de aire

El uso de inclusores de aire es recomendado para aumentar la durabilidad cuando el concreto está sujeto a ciclos de congelación y deshielo.

La inclusión de aire tiene el efecto de reducción en la resistencia, particularmente en mezclas de alta resistencia (se puede tener una pérdida potencial de resistencia del 5 % por cada 1 % de aire incluido). Casi todos los concretos de alta resistencia colados en sitio son usados para aplicaciones que no requieren aire incluido. Por lo tanto, no se recomienda que se utilicen agentes inclusores de aire en estos concretos.

Retardantes

Un retardante frecuentemente es benéfico en el control de una hidratación temprana. Además, un retardante puede controlar el porcentaje de endurecimiento en las cimbras para eliminar juntas frías y provee mayor flexibilidad en los programas de colocación.

Debido a que los retardantes proveen un incremento en la resistencia que será proporcional al porcentaje de dosificación, las mezclas pueden diseñarse a diferentes dosis si se espera que diferentes porcentajes significativos puedan usarse.

Los retardantes reductores de agua generalmente proveen una resistencia mayor en el concreto si el contenido de agua se reduce y si el contenido de cemento y el revenimiento se mantienen constantes. En concretos de alta resistencia, la reducción en la

relación agua-cemento alcanzada por la eliminación de excesos en el agua de mezclado puede producir grandes mejoras en la resistencia como las obtenidas por una reducción similar debida al aumento de cemento. Los retardantes reductores de agua normalmente son más baratos y más efectivos que los reductores de agua.

Reductores de agua de fraguado normal

Estos aditivos proveen incrementos de resistencia sin alterar el porcentaje de endurecimiento. Su selección debe basarse en el desarrollo de la resistencia. Incrementos en las dosis por arriba de las cantidades normales generarán incrementos en la resistencia, pero extenderá el tiempo de fraguado.

La cantidad de estos aditivos así como de los retardantes usados en mezclas de concretos de alta resistencia ha variado dependiendo de la aplicación particular del aditivo. Generalmente, la tendencia ha sido usar cantidades más grandes que las cantidades máximas normales. Reducciones típicas de agua de entre 5 a 8% se pueden incrementar a 10%. Incrementos correspondientes en la arena se han hecho para compensar la pérdida de volumen debida a la reducción de agua en la mezcla.

Reductores de agua de alto rango

Estos aditivos pueden usarse para incrementar significativamente el revenimiento sin agregar más agua, o para reducir enormemente el contenido de agua sin pérdida de revenimiento.

Los reductores de agua de alto rango pueden usarse en el concreto para: incrementar el revenimiento; incrementar la resistencia mediante la reducción del contenido de agua y la relación agua/cemento; o disminuir los contenidos de agua y cemento..

Los efectos primarios de estos aditivos en la resistencia a compresión del concreto se derivan de su efecto en la relación agua/cemento. Cuando se usan para bajos requerimientos de agua al mismo revenimiento y mismo contenido de material cementante, la reducción resultante en la relación agua/cemento incrementará significativamente la resistencia del concreto a todas las edades . Si se mezcla con la misma relación agua/cemento exhibe un ligero incremento en la resistencia debido a su efecto dispersante.

Debido a su efectividad en la reducción de la relación agua/cemento, los reductores de agua de alto rango son benéficos en la producción de concretos con resistencias a compresión mayores de 410 kg/cm^2 a 28 días.

Estos aditivos proporcionan desarrollo de altas resistencias, particularmente a edades tempranas (24 hrs.). La característica de pérdida de revenimiento de estos aditivos determinará si este debe aplicarse en la planta, en el sitio o una combinación de ambos.

Los ajustes hechos a concreto de alta resistencia hechos con aditivos reductores de agua de alto rango han sido similares a los hechos con reductores de agua convencionales. Estos ajustes han sido normalmente más grandes debido a una cantidad más grande de reducción de agua, aproximadamente de 12 a 25%.

Una dosificación de 1 a 2.5 por ciento por el peso del cemento es permisible. Dosificaciones más altas pueden resultar en un decremento en la resistencia a compresión a menos que el contenido de cemento se incremente para balancear este efecto de reducción. Debe subrayarse que estos aditivos basan su función en el decremento en la tensión superficial del agua y por una carga equidireccional en las partículas de cemento. Estas propiedades, acopladas con la adición de humo de sílice, ayudan al concreto a alcanzar altas resistencias y reducción de agua sin pérdida de la trabajabilidad.

Acelerantes

Los acelerantes no son utilizados normalmente en concretos de alta resistencia a menos que un descimbrado temprano sea crítico.

Los acelerantes utilizados para incrementar el porcentaje de endurecimiento normalmente serán contraproducentes en el desarrollo de resistencia a largo plazo.

2.4 Aditivos minerales

Humo de sílice

Humo de sílice y aditivos conteniendo humo de sílice se han utilizado en concretos de alta resistencia para propósitos estructurales y para aplicaciones superficiales y como material de reparación en situaciones donde la resistencia a la abrasión y baja permeabilidad son ventajosas.

El humo de sílice es un subproducto resultante de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico en la producción de silicona y ferrosilicon.

El humo de sílice consiste de partículas vítreas muy finas con un área superficial del orden de 20000 m²/kg. cuando se mide con técnicas de absorción de nitrógeno (la ceniza volante tiene una área superficial de 400 a 700 m²/kg.).

La distribución de partículas por tamaño de un humo de sílice típico muestra que la mayoría de las partículas es menor de una micra con un diámetro promedio de cerca de 0.1 µm. Esto es aproximadamente 1/100 del tamaño de una partícula promedio de cemento.

El peso específico del humo de sílice es normalmente 2.2, pero puede llegar hasta 2.5.

Debido a su extrema finura y alto contenido de sílice, es un material puzolanico altamente efectivo. El humo de sílice se uso inicialmente como un sustituto del cemento. En aplicaciones generales , parte del cemento puede ser reemplazado por una cantidad mucho menor de humo de sílice, sin pérdida de resistencia, cuidando que el contenido de agua permanezca constante. Su uso normalmente incrementa la demanda de agua. Si se desea mantener la misma relación agua/cementantes se deben usar aditivos reductores de agua o aditivos reductores de agua de alto rango. Debido a su limitada disponibilidad y alto precio el humo de sílice se ha utilizado como un material para mejorar propiedades. En este papel el humo de sílice se ha utilizado para proporcionar concreto con muy alta resistencia a la compresión o con muy altos niveles de durabilidad o ambos.

Efectos del humo de sílice en el concreto fresco

Demanda de agua.- La demanda de agua de un concreto que contiene humo de sílice se incrementa con el incremento en las cantidades de humo de sílice (Scali, Chin, y

Berke 1987; Carette y Malhotra 1983). Este incremento se debe primeramente a la alta área superficial. Con el fin de obtener una máxima mejoría en resistencia y durabilidad, se deben utilizar aditivos reductores de agua o reductores de agua de alto rango.

Trabajabilidad.- El concreto fresco conteniendo humo de sílice es más cohesivo y menos propenso a la segregación que el concreto sin humo de sílice. Con el incremento de contenido de humo de sílice el concreto aparenta ser menos fluido.

Pérdida de revenimiento.- La presencia en si mismo del humo de sílice no cambiará significativamente el porcentaje de pérdida de revenimiento. Sin embargo, el humo se usa normalmente en conjunción con reductores de agua y reductores de agua de alto rango, por lo tanto, puede haber un cambio en las características de la pérdida de revenimiento causada por los aditivos seleccionados.

Tiempo de fraguado.- Los aditivos usados normalmente pueden afectar el tiempo de fraguado del concreto. La experiencia indica que el tiempo de fraguado no es afectado por el uso del humo de sílice por si mismo.

Segregación.- El concreto con humo de sílice generalmente no se segrega apreciablemente debido a la finura del mismo y el uso de aditivos.

Sangrado y contracción plástica.- El concreto conteniendo humo de sílice muestra significativamente menor sangrado. Esto se debe principalmente a la alta área superficial a ser cubierta por la pasta, por lo que existe muy poca agua libre en la mezcla para el sangrado. Adicionalmente, el humo de sílice reduce el sangrado por bloqueo físico de los poros en el concreto fresco.

Las grietas por contracción plástica generalmente ocurren cuando el porcentaje de evaporación del agua de la superficie del concreto excede el porcentaje por el cual el agua aparece en la superficie debido al sangrado. Debido a que el sangrado se reduce significativamente por el uso del humo el potencial de agrietamiento por contracción plástica se incrementa.

Efectos del humo de sílice en el concreto endurecido

Porosidad.- El porosímetro de intrusión de mercurio muestra que el humo de sílice hace la estructura de los poros de la pasta (Metha y Gjorv 1982) y el mortero (Huang y Feldman 1985, Yamato, Emoto y Soeda 1986) más homogénea disminuyendo el número

de poros grandes. Sin embargo la porosidad total , aparece sin ser afectada por el humo de sílice.

Permeabilidad.- La permeabilidad del concreto es determinada por la medida del porcentaje de líquido o vapor que pasa a través del medio. Debido a que la permeabilidad está relacionada con la porosidad capilar (Powers y col.), la permeabilidad a líquidos y vapores se reduce mediante la adición de humo de sílice.

Absorción de agua.- Sellevold y Nielsen (1987) reportaron que la absorción de agua en concretos conteniendo humo de sílice fue mucho más baja que en el concreto de referencia.

Zona de transición pasta de cemento-agregado.- Grandet y Ollivier (1982) describen el proceso de hidratación en esta zona para pastas con ceniza volante, escoria y humo de sílice. Ellos concluyen que todos estos materiales afectan la morfología de la zona de transición y particularmente reducen el grado de orientación de los cristales de hidróxido de calcio que se forman junto a las partículas de agregado.

Bentur, Goldman y Cohen (1988) han mostrado que el humo de sílice no muestra los mismos efectos de resistencia en la pasta que en el concreto. Por lo que se concluye que sólo la adición de humo de sílice en el concreto conduce a un incremento en la resistencia.

Mucho del mejoramiento en las propiedades del concreto es debido a las modificaciones interfaciales causadas por la adición de humo de sílice. Debido a su pequeño tamaño, las partículas de humo de sílice, cuando existe suficiente aditivo reductor de agua de alto rango presente para sobrepasar los efectos de las fuerzas superficiales, están mejor capacitadas para adherirse alrededor de las partículas de agregado durante el mezclado y la colocación lo que reduce el sangrado.

El contenido normal de humo de sílice varía desde 5 hasta 15 % del contenido de cemento portland.

Cenizas volantes (Fly ash)

La ceniza volante para concreto de alta resistencia se clasifica en dos clases. Ceniza volante clase F producida normalmente por la calcinación de antracita o carbón bituminoso y que tiene propiedades puzolanicas, pero pocas o ninguna propiedad cementante. Ceniza volante clase C producida normalmente por la calcinación de lignito o

carbón subbituminoso, y además de tener propiedades puzolánicas, tiene algunas propiedades cementantes.

Las variaciones en las propiedades físicas o químicas de los aditivos minerales, aún dentro de las tolerancias de las especificaciones (ASTM C 618), pueden causar variaciones apreciables en las propiedades en el concreto de alta resistencia.

En concretos con alta resistencia los materiales puzolánicos han sido usados como un suplemento del cemento portland desde 10 hasta 40% por peso del contenido de cemento. En esos casos donde se experimenta un incremento neto en el volumen absoluto de los materiales cementantes debido a la adición de puzolanas, una reducción correspondiente en el volumen absoluto de arena es usualmente hecho.

2.5 Agregados

Agregado fino

Se ha encontrado que el agregado fino con partículas redondas y textura lisa requiere menos agua de mezclado en el concreto y por esto son preferibles en el concreto de alta resistencia. La graduación óptima del agregado fino es determinada más por su efecto en el requerimiento de agua que por su empaquetamiento físico. Arena con un módulo de finura entre 2.70 y 3.20 con aproximadamente un máximo de 2% que pasa la malla No. 100, 0 a 10% que pasa la No. 50, y de 35 a 45% que pasa la malla No. 30, da mejor trabajabilidad y resistencia a la compresión.

Los concretos de alta resistencia contienen cantidades tan altas de materiales cementantes finos que la graduación de los agregados usados carece relativamente de importancia comparado con los concretos convencionales. Sin embargo, en algunas ocasiones ayudan a incrementar el módulo de finura.

El lavado de la arena puede ser necesario, y arenas naturales que contengan grandes cantidades de mica, ciertos minerales arcillosos u otros materiales deletéreos deben evitarse ya que pueden incrementar la demanda de agua y afectar la hidratación y la adhesión de la pasta de cemento.

En el proporcionamiento de la mezcla de concreto, normalmente se conviene que el agregado fino o arena tiene más impacto que el agregado grueso. El agregado fino contiene mucho más área superficial para un peso determinado que el agregado grueso. Debido a que toda el área superficial de todas las partículas debe ser cubierto con la pasta cementante, la proporción de agregado fino tiene un efecto cuantitativo directo en el requerimiento de pasta.

Contenidos bajos de agregado fino con altos contenidos de agregado grueso han dado como resultado una reducción en los requerimientos de pasta y normalmente han sido más económicos. Tales proporciones también han hecho posible el producir grandes resistencias para una cantidad dada de materiales cementantes. Sin embargo, si la proporción de arena es muy baja, se tendrán serios problemas de trabajabilidad.

Agregado grueso

Cuando las partículas de los agregados son duras y resistentes, la resistencia mecánica del concreto tiende a ser gobernada por la resistencia de la pasta de cemento y/o por la adherencia de ésta con los agregados. Para concretos de alta resistencia, la resistencia intrínseca de los agregados adquiere mayor relevancia y sus requisitos se vuelven más estrictos, no sólo en cuanto a resistencia, sino también en los aspectos que determinan la adherencia con la pasta de cemento, pues se ha observado que para niveles muy altos de resistencia en el concreto, si los agregados son de resistencia apropiada, lo que tiende a limitar la obtención de esos niveles es la adherencia entre la pasta y el agregado grueso.

Para mejorar la adhesión de la pasta con los agregados, cuando su deficiencia es imputable a éstos, existe la posibilidad de modificar la forma, textura superficial y tamaño de las partículas, en la medida que lo inconveniente de estas características sea causante de las deficiencias observadas en la adherencia.

En lo relativo a la modificación del tamaño de las partículas, es necesario tener presente que al aumentar el tamaño máximo del agregado se manifiestan dos tendencias con efectos opuestos en la resistencia mecánica del concreto: 1) por un lado, el aumento del tamaño máximo reduce el requerimiento de agua de mezcla y en consecuencia disminuye la relación agua/cemento, con lo cual se tiende a incrementar la resistencia del concreto, y 2) en contraposición, al aumentar el tamaño de las partículas disminuye la superficie de contacto de los agregados con la pasta, y con ello tiende a reducirse la resistencia del concreto porque para una misma condición de carga se incrementan los esfuerzos de adherencia en el contacto pasta-agregado. Al hacer el balance de esas tendencias, resulta que en los concretos de baja resistencia (menos de 200 kg./cm² aproximadamente) domina el efecto de la reducción del agua de mezclado, y por consiguiente al aumentar el tamaño máximo del agregado tiende a incrementarse la resistencia del concreto; en tanto que para los concretos de mayor resistencia se manifiesta lo contrario pues domina el efecto de la superficie de adherencia disminuida, de manera que un aumento en el tamaño máximo tiende a reducir la resistencia del concreto en sus niveles altos.

Resumiendo la resistencia del concreto abajo de los 350 kg./cm² depende esencialmente de la calidad pasta de cemento endurecida que cubre las partículas de agregado. Los agregados a estos niveles de resistencia casi siempre tienen mucha más

grande resistencia que la pasta de cemento. Dos factores adicionales se vuelven importantes en el concreto de alta resistencia: (1) la resistencia del agregado, y (2) la adhesión entre la pasta de cemento y el agregado.

Muchos estudios han mostrado que para una resistencia a la compresión óptima con un alto contenido de cemento y relaciones agua-cemento bajas el tamaño máximo del agregado grueso debe mantenerse a un mínimo, a $\frac{1}{2}$ pulgada (12.7 mm) o $\frac{3}{8}$ de pulgada (9.5 mm). También se han utilizado con éxito tamaños máximos de $\frac{3}{4}$ pulgadas. (19.0 mm) y 1 pulgada. (25.4 mm).

En mezclas de concreto de alta resistencia ricas en cemento, el efecto del tamaño en si mismo, usualmente es suficiente para igualar los efectos de una demanda de agua de mezclado más alta, e incrementos en la resistencia con reducción en el tamaño del agregado.

Tamaños más pequeños de agregado son también considerados para producir resistencias más altas del concreto debido a sus menos severas concentraciones de esfuerzo alrededor de las partículas. Muchos estudios han mostrado que la roca triturada produce resistencias más altas que las gravas redondeadas. El agregado ideal debe ser limpio, cúbico, angular, 100 por ciento triturado y con un mínimo de lascas y partículas alargadas.

En la fabricación de mezclas de prueba de concreto de alta resistencia, es muy importante seleccionar agregados gruesos relativamente duros y fuertes que no se quiebren y produzcan finos durante el mezclado.

La mineralogía del agregado deberá ser tal que promueva la adhesión química. Se presume que muchos materiales síliceos han probado tener mejor potencial de adhesión con el cemento portland.

Absorción.- El curado es extremadamente importante en la producción de concreto de alta resistencia. Para producir una pasta de cemento con un contenido tan alto de sólidos como sea posible, el concreto debe contener la mínima cantidad de agua de mezclado como sea posible. Sin embargo, después de que el concreto es colocado y se ha establecido la estructura de la pasta, el agua debe estar libremente disponible, especialmente durante las etapas iniciales de hidratación. Si los agregados son capaces de absorber una cantidad moderada de agua, pueden actuar como una delgada reserva de agua de agua de

curado distribuida dentro del concreto, y así proveer el agua de curado adicional que es benéfica a pastas con relaciones agua-cemento bajas.

Cantidad.- La cantidad y tamaño óptimos de agregado grueso para una arena dada dependerán en gran medida de las características de la arena. Más particularmente depende del módulo de finura de la arena. Esto se ve en la tabla siguiente obtenida del ACI 211.1.

	Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.			
<i>Tamaño máximo</i>	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

Algunos autores sugieren que la proporción mostrada en la tabla debe incrementarse en un 4% si se utilizan arenas con bajo contenido de vacíos. Si las partículas de arena son muy angulares, entonces se sugiere que la cantidad de agregado grueso deberá disminuirse en un 4% de los valores de la tabla.. Tales ajustes en las proporciones de agregado grueso y arena se han intentado para producir concretos de trabajabilidad equivalente.

Capítulo 3

Proporcionamiento de mezclas

3.1 Generalidades

El proporcionamiento de mezclas para concretos de alta resistencia han variado extensamente dependiendo de muchos factores. El nivel de resistencia requerida, la edad de prueba, las características de los materiales, y el tipo de aplicación que se le dará han influenciado estas proporciones. Además, la economía, los requisitos estructurales, la práctica de elaboración, el ambiente de curado anticipado y la época del año han afectado la selección de mezclas.

El proceso de proporcionamiento de mezclas para concreto de alta resistencia es más crítico que para mezclas normales.

3.2 Resistencia requerida

La resistencia mecánica del concreto endurecido ha sido tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material de construcción, lo cual se ha considerado atribuible a tres principales razones: 1) en la mayoría de los casos, la resistencia mecánica tiene influencia directa en la capacidad de carga de la estructura, 2) es la propiedad más fácilmente determinable en el concreto endurecido, y 3) los resultados de su determinación pueden ser utilizados como datos índice de otras propiedades del concreto.

En términos generales, la resistencia mecánica que potencialmente pueda

desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales.

Normalmente se ha proporcionado el concreto de tal manera que la media de los resultados de pruebas de resistencia a compresión han excedido la resistencia especificada en una cantidad suficientemente alta para minimizar la frecuencia relativa de resultados de pruebas por abajo del valor de resistencia especificado.

Muchos factores pueden influenciar la variabilidad de los resultados de las pruebas, incluyendo los materiales individuales, la planta, los contratistas, la supervisión y las condiciones ambientales. Todos los factores que puedan afectar la variabilidad de resistencias deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar la proporción de la mezcla y cuando se establezca la desviación aceptable para los resultados.

Normalmente, el concreto se ha juzgado como aceptable si se cumplen los siguientes requisitos:

a) El promedio de todos los lotes de resultados de tres pruebas consecutivas deberá ser igual o exceder la $f'c$ especificada.

b) Ninguna prueba individual (promedio de dos cilindros) deberá caer por debajo de la $f'c$ en más de 34 kg./cm^2 .

Los concretos de alta resistencia continúan ganando resistencia por arriba de los requisitos de diseño con el paso del tiempo.

3.3 Edad de prueba

La selección del proporcionamiento de la mezcla puede ser influenciado por la edad de prueba. Esta edad de prueba ha variado dependiendo de los requerimientos de la construcción. A menudo, se ha pensado como edad de prueba la edad a la cual los criterios de aceptación están establecidos, por ejemplo 28 días. La prueba, sin embargo, se ha guiado principalmente por la edad de prueba de aceptación, o después de esa edad; dependiendo de la información que se requiera.

Una edad de prueba muy común para la resistencia a la compresión del concreto ha sido 28 días. El desempeño de las estructuras ha sido relacionado empíricamente con el

tiempo de curado de cilindros de concreto preparados de acuerdo a la norma ASTM C 31 y C 192. Lo anterior ha producido buenos resultados para concretos con rangos de resistencia menores sin requerimiento de resistencias o evaluación tempranas. Los concretos de alta resistencia ganan resistencia considerablemente a edades posteriores, además, son evaluadas a edades mayores cuando los requerimientos de la construcción permiten más tiempo para el desarrollo de resistencias antes de que se tengan las cargas. Las proporciones, principalmente los materiales cementantes, se han ajustado dependiendo de la edad de prueba.

Los concretos de alta resistencia frecuentemente son probados a edades de 56 y 90 días. Los concretos de alta resistencia han sido colocados en columnas de edificios de gran altura. Además, es deseable tomar ventaja de la ganancia de resistencia a edades mayores así que debe buscarse el uso eficiente de materiales de construcción. Esto se ha justificado en edificios de gran altura donde las cargas completas no ocurren hasta edades avanzadas.

En relación con el curado, cuando se seleccionan los proporcionamientos, el tipo de curado que se anticipe deberá ser considerado junto con la edad de prueba, especialmente cuando se diseñe para altas resistencias tempranas. Los concretos ganan resistencia en función de la madurez, la cual usualmente se define como una función del tiempo y la temperatura de curado.

3.4 Relación agua/cemento o relación agua/cementantes

La correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión, que ha sido identificada en concretos de baja resistencia, se ha encontrado como válida también en los concretos de alta resistencia. Los altos contenidos de cemento y bajos contenidos de agua han producido resistencias más altas. El proporcionamiento de grandes cantidades de cemento en la mezcla de concreto, sin embargo, ha incrementado también la demanda de agua de la misma.

Cuando se usan materiales puzolánicos en el concreto, una relación agua/cemento

más puzolana se ha considerado en lugar de la tradicional relación agua/cemento.

Por supuesto que el revenimiento del concreto está relacionado con la relación agua/cemento y la cantidad total de agua en el concreto. El uso de reductores de agua de alto rango ha proporcionado relaciones agua/cemento más bajas y resistencias más altas. Las relaciones agua/cemento para concretos de alta resistencia normalmente van de 0.27 a 0.50.

Influencia en la resistencia a compresión.- La resistencia a compresión que un concreto puede desarrollar con una determinada relación agua/cemento ha variado extensamente dependiendo del cemento, agregados y aditivos empleados.

La causa principal de la variación en la resistencia a compresión a una determinada relación agua/cemento incluyen las capacidades potenciales del cemento y el potencial para la reacción con las puzolanas.

3.5 Contenido y tipo de cemento

Como se mencionó anteriormente contenidos comunes de cemento utilizados en concretos de alta resistencia varían desde 392 a 557 kg./cm².

Una consideración importante para establecer el contenido deseado de cemento deberá centrarse en la identificación de combinaciones de materiales que produzcan resistencias óptimas. Idealmente, evaluaciones de cada fuente potencial de cemento, puzolana, aditivo líquido y agregados en concentraciones variadas deberá indicar la cantidad óptima de cemento y la combinación óptima de materiales.

La temperatura es otro factor que limita la cantidad o el tipo de cemento en la mezcla. La modificación de la mezcla con hielo, puzolanas y retardantes puede ser conveniente.

Mezclas ricas en cemento frecuentemente tienen una demanda de agua mayor. Por lo que, si es posible, tomar precauciones para proveer agua de curado adecuada y suficiente para producir la hidratación.

Cemento utilizado en el presente estudio

En el presente estudio se utilizaron dos tipos de cemento: un cemento gris Portland-puzolana Tipo I, para uso general en construcciones de concreto que cumple con la NOM-C1.

Y un cemento Portland blanco, que puede ser clasificado como Tipo I ó Tipo III. Cuya principal diferencia es su bajo o nulo contenido de óxido férrico y se observa una mayor finura que el cemento gris portland-puzolana. Su principal uso es en trabajos arquitectónicos y decorativos , en donde no se requieran grandes consumos de cemento, debido a su precio relativamente alto.

Las cantidades de cemento a utilizar serán determinadas de acuerdo con el diseño de la mezcla, más adelante se presentarán dichas cantidades.

3.6 Proporcionamiento de agregados

Ya se ha dicho que en el proporcionamiento de concretos de alta resistencia, los agregados son una parte muy importante ya que ocupan más volumen que cualquier otro ingrediente del concreto.

Debido a lo anterior se deben usar agregados que al final puedan tener la misma resistencia de la pasta. Mientras más alta sea la resistencia requerida, el tamaño del agregado deberá disminuirse. Es normal limitar el tamaño del agregado a ¾” como máximo para resistencias hasta de 620 kg./cm², para resistencias mayores se recomienda ½” como tamaño máximo.

Se debe tener también precaución de elegir agregados triturados, de textura rugosa y forma cúbica y no muy alargada para evitar su fractura dentro del concreto con una consecuente disminución en la resistencia del concreto, así como evitar también las formas redondeadas para procurar una adherencia adecuada con la pasta de cemento, que como se mencionó en estos concretos puede ser la causa de un mal comportamiento.

Agregado grueso utilizado en el presente estudio.

En el presente estudio se usó grava basáltica con tamaño máximo del agregado de 3/4", al material se le sometió a un proceso de lavado para eliminar las impurezas que pudiera contener, así como para disminuir la cantidad de finos. Después del lavado se obtuvieron las siguientes características de la grava:

Densidad = 2.47

Absorción = 1.83 %

Peso Volumétrico suelto = 1347.1 kg./m³

Peso Volumétrico compactado = 1462.6 kg./m³

Con la granulometría presentada en la ilustración 3.1.

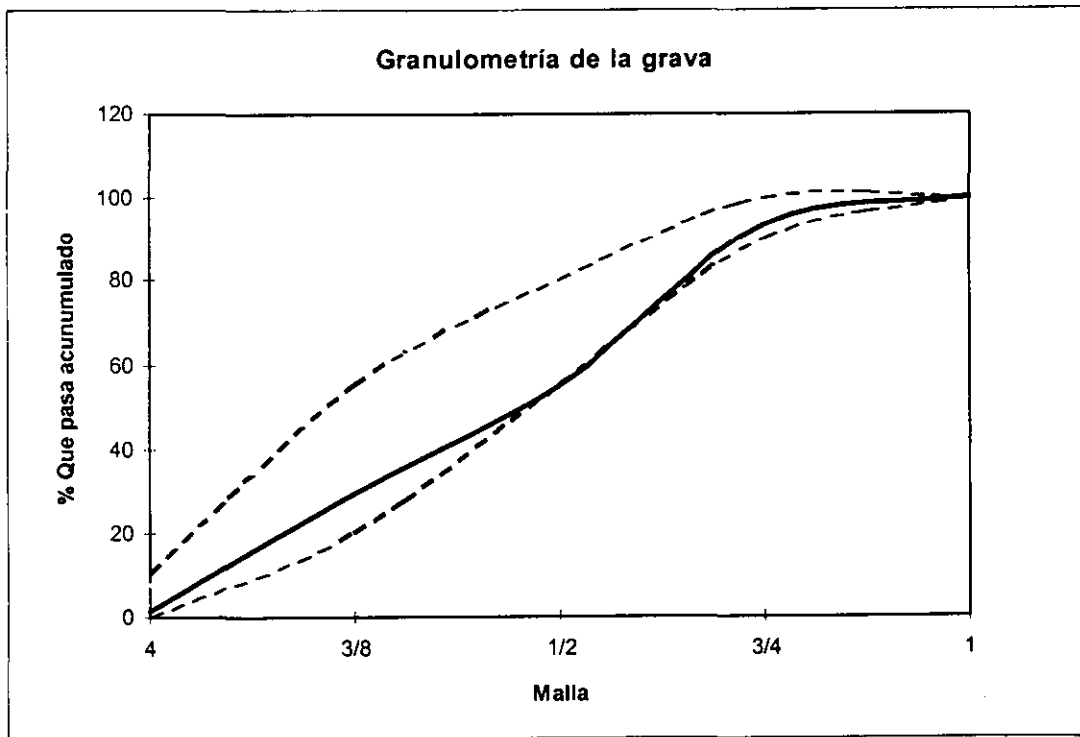


Ilustración 3.1 Granulometría del agregado grueso.

Agregado fino utilizado en el presente estudio.

Con respecto al agregado fino, el módulo de finura es recomendable que varíe de 2.7 a 3.2 para facilitar la trabajabilidad. Valores más bajos resultan en un decremento de la trabajabilidad y valores más altos en una demanda mayor de agua.

Al igual que con el agregado grueso, al agregado fino también fue lavado, y después de el proceso se obtuvieron las siguientes propiedades:

Densidad = 2.42

Absorción = 5.48%

Peso Volumétrico suelto = 1434.95 kg./m³

Peso Volumétrico compactado = 1523.23 kg./m³

Módulo de finura = 3.09

Con la granulometría presentada en la ilustración 3.2.

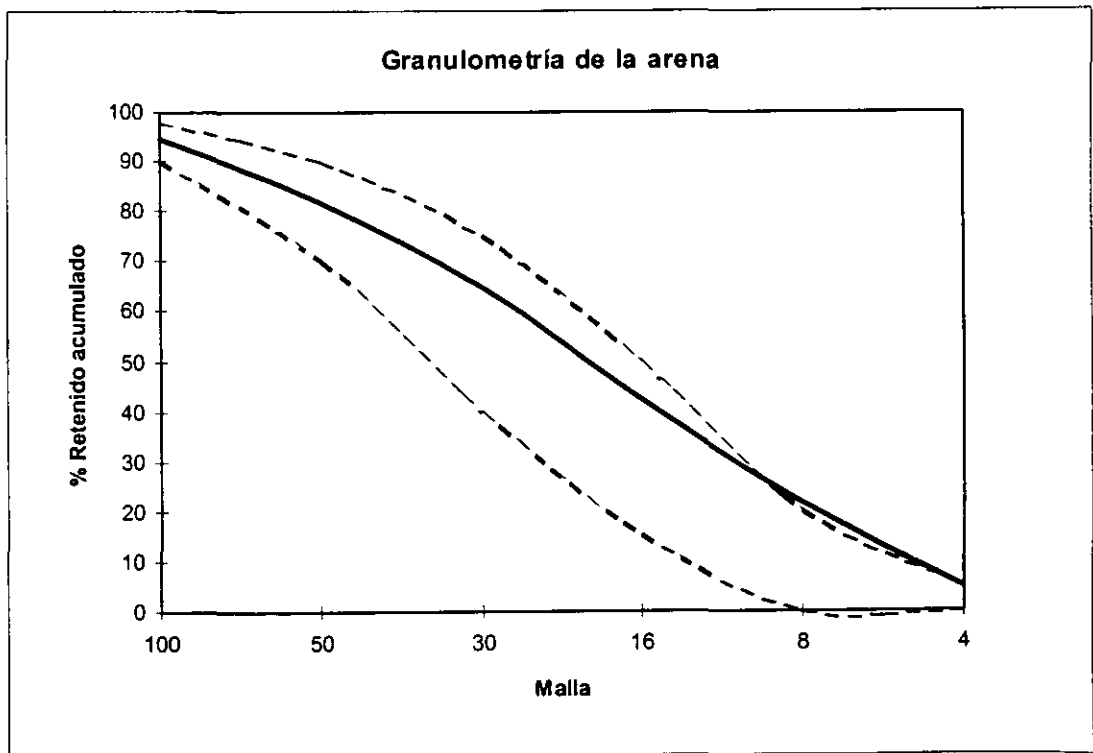


Ilustración 3.2 Granulometría del agregado fino

3.7 Proporcionamiento con aditivos

Aditivos químicos

En el presente trabajo se utilizó un aditivo químico del tipo reductor de agua de alto rango que cumple con la norma ASTM C494 tipo F, disponible comercialmente, con las siguientes características de acuerdo con el fabricante:

Es un aditivo que imparte una consistencia superfluida de alta trabajabilidad, alta reducción de agua en el concreto, obteniéndose altas resistencias a edades tempranas.

Se caracteriza por un alto poder dispersante permitiendo una perfecta distribución de las partículas de cemento en el concreto, provocando su hidratación completa, obteniendo el máximo efecto adherente del cemento.

Tipo: Aditivo líquido polímero tipo dispersión a base de melamina formaldehído.

Color: Café oscuro.

pH: 10 aproximadamente.

Tiene 30% de contenido de sólidos y una densidad de 1.165 g/cm³.

No contiene cloruros.

Se puede utilizar de dos formas como superfluidizante, se recomienda adicionar al concreto ya mezclado y ampliar el tiempo de mezclado medio minuto más por cada metro cúbico de concreto. Como reductor de agua de alto rango, se recomienda dosificar junto con el agua de mezclado.

En este estudio se utilizó como reductor de agua de alto rango por lo que se utilizó en una dosificación de 10 ml/kg. de cemento, el aditivo se mezcló junto con el agua de mezclado.

El concreto fabricado con este aditivo debe colocarse y acabarse sin demora. La permanencia del efecto de superfluidéz, se mantiene alrededor de 30 minutos. El lapso de la permanencia de fluidéz obedece al revenimiento inicial y a las temperaturas del concreto fresco y del ambiente.

Aditivos minerales

Se utilizó además, un aditivo mineral disponible comercialmente, con las siguientes características de acuerdo con el fabricante:

Aspecto: Polvo fino.

Color: Gris.

Contenido de SiO₂: 99.0% mínimo.

Superficie específica: 150 m²/g aproximadamente.

Es un aditivo con base en humo de sílice para producir mezclas de concreto con altas características de impermeabilidad, resistencias química, mecánica y de cohesividad . Reacciona químicamente con la cal libre del cemento, mejorando las resistencias de la mezcla.

Permite tener concreto con iguales o mayores resistencias mecánicas, utilizando menor cantidad de cemento, que en una mezcla normal.

Es un aditivo con tamaño de partícula fina, lo que hace que en la mezcla de concreto se tenga una alta demanda de agua, por lo tanto debe ser usado siempre en compañía de aditivos superplastificantes o reductores de agua de alto rango.

El aditivo se encuentra listo para su utilización, debe ser incorporado en la mezcla de concreto por los medios normales como si se tratara de una adición. Se recomienda una dosificación de entre el 5 al 25 % del peso del cemento.

Este aditivo se mezcló con el cemento por separado para conseguir un mezclado más homogéneo, y después se mezcló con los demás materiales con el procedimiento normal.

3.8 Trabajabilidad

El Comité ACI 116R define la trabajabilidad como “aquella propiedad del concreto fresco mezclado... que determina la facilidad y homogeneidad con que puede ser mezclado, colocado, compactado y terminado.”

El desarrollo de concretos de alta resistencia demanda una masa densa libre de vacíos con contacto total con el acero de refuerzo. Normalmente un revenimiento de 102 mm (4”) provee la trabajabilidad requerida; sin embargo, los detalles de las formas y el espaciamiento del acero de refuerzo deben ser considerados para el desarrollo del diseño de las mezclas.

Las mezclas de alta resistencia tienden a perder revenimiento más rápidamente que un concreto de menor resistencia. Si el revenimiento se utilizará como un control de campo, la prueba deberá efectuarse en un tiempo preestablecido después del mezclado.

3.9 Mezclas de prueba

Se realizaron 5 mezclas, en dichas mezclas se utilizaron relaciones agua/cemento de 0.43 y 0.37. En las primeras dos mezclas se utilizó una relación agua/cemento de 0.43 sin la utilización de ningún tipo de aditivo, en esta mezcla se observó poca trabajabilidad lo que dificultó la colocación del concreto en los moldes. Conforme a los resultados obtenidos se diseñaron las siguientes dos mezclas con una relación agua/cemento de 0.37 incorporando el aditivo reductor de agua de alto rango para dar una mejor trabajabilidad.

Por último se diseñó la mezcla con una relación agua/cemento de 0.37, adicionando además del reductor de agua de alto rango, el aditivo basado en humo de sílice como reemplazante del cemento en un 20% en peso, este porcentaje se determinó mediante pequeñas mezclas de prueba para obtener una buena trabajabilidad.

A continuación se presentan los procedimientos de diseño y elaboración de las mezclas, dentro del procedimiento de diseño se muestra como ejemplo el diseño de la última mezcla.

Procedimiento de diseño

Como se mencionó anteriormente el proceso de diseño de mezclas de concreto de alta resistencia es un proceso más crítico que para concretos normales. Aún cuando la disponibilidad de ayudas de diseño para mezclas de concretos de resistencia normal son bastante conocidas en la actualidad no existe un procedimiento de diseño avalado o recomendado expresamente por ninguna institución para el diseño de concretos de alta resistencia, por lo que el procedimiento de diseño se basa en recomendaciones y resultados obtenidos en trabajos realizados anteriormente o en guías y ayudas proporcionadas por algunas entidades o instituciones que han efectuado estudios sobre el tema.

El presente estudio se efectuó tomando como guía la ilustración 3.3 desarrollada por el U. S. Army Waterways Experiment Station tomada de la referencia 11. En el presente estudio se tomó como una ayuda únicamente para obtener las cantidades de cemento y la relación arena/agregado aproximadas ya que dicha gráfica se aplica a agregados de tamaño máximo de ½ pulgada y en el presente estudio se utilizó un agregado

con tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ".

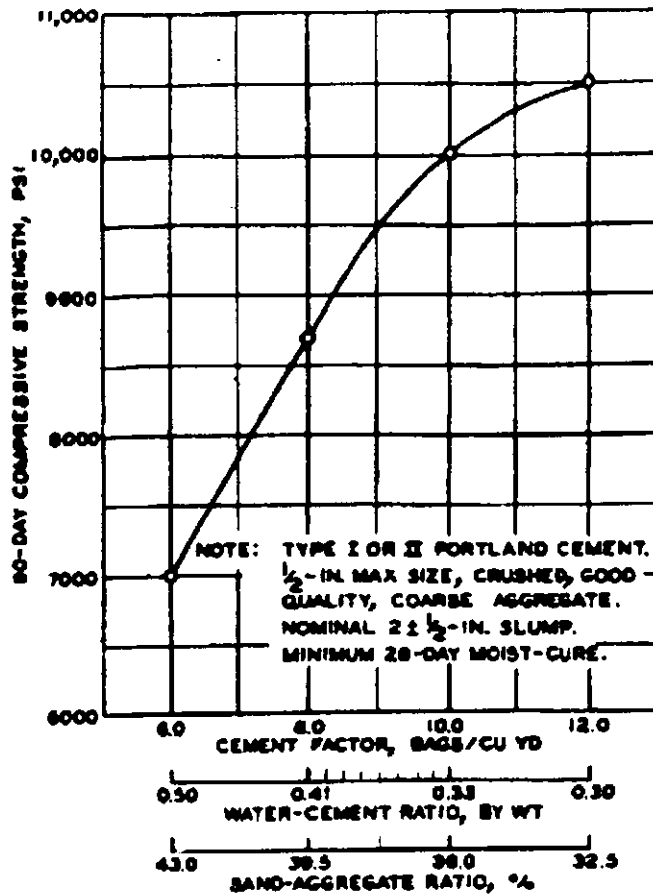


Ilustración 3.3. Gráfica para dosificación de concretos de alta resistencia, para un revenimiento constante de 2".

A continuación se presenta la dosificación para una relación agua/cemento de 0.37 y el uso de aditivo reductor de agua de alto rango y humo de sílice, para mostrar la forma en que se utilizó la gráfica.

1. Una vez elegida la relación de 0.37 se va a la gráfica y se obtiene la cantidad de cemento y la relación arena/agregado, obteniéndose los siguientes valores:

$$\text{Relación agua cemento} = 0.37$$

$$\text{Resistencia esperada de acuerdo a la gráfica} = 665 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Relación arena/agregado} = 37.75\%$$

$$\text{Cantidad de cemento} = 588.54 \text{ Kg por m}^3$$

2. Con los datos anteriores se obtienen las cantidades necesarias de cada uno de los componentes como sigue:

$$\text{Agua} = 0.37 * 588.54 = 217.75 \text{ Kg}$$

En volumen (m³):

$$\text{Agua} = \frac{217.75}{1000} = 0.21775$$

$$\text{Volumen de agregado} = 1 - (0.21775 + 0.1868) = 0.5954$$

Utilizando la relación arena/agregado:

$$\text{Cemento} = \frac{588.54}{3150} = 0.1868$$

$$\text{Arena} = 0.3775 * 0.5954 = 0.2248$$

$$\text{Grava} = 0.5954 - 0.2248 = 0.3706$$

En peso:

$$\text{Cemento} = 588.54 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua} = 217.75 \text{ Kg}$$

$$\text{Arena} = 0.2248 * 2420 = 544.01 \text{ Kg}$$

$$\text{Grava} = 0.3706 * 2470 = 915.38 \text{ Kg}$$

Ajustes de agua por absorción:

$$\text{Arena} = 544.01 * 0.0548 = 29.81 \text{ Kg de agua.}$$

$$\text{Grava} = 915.38 * .0183 = 16.75 \text{ Kg de agua}$$

Uso de aditivos:

Humo de sílice: Se determinó remplazar el 20% de cemento con humo de sílice basándose en una mezcla de prueba que mostró buena trabajabilidad de la mezcla con este porcentaje. Conforme a lo anterior la cantidad final de cemento y humo de sílice quedo como sigue:

$$\text{Cemento} = 470.83 \text{ Kg}$$

$$\text{Humo de sílice} = 117.71 \text{ Kg}$$

Reductor de agua de alto rango:

Se utilizó la dosificación de 10 ml. De aditivo por Kg de cemento, utilizándose en total 4.7083 lts de aditivo.

En la tabla 3.1 se muestra un resumen de los diferentes diseños utilizados en el estudio.

Materiales utilizados							
a/c	Cemento (kg.)	Clase de cemento	Agua (kg.)	Arena (kg.)	Grava (kg.)	Reductor de agua (ml)	Humo de sílice (kg.)
0.43	477.75	Gris	205.43	448.91	1079.46	----	----
0.43	477.75	Blanco	205.43	448.91	1079.46	----	----
0.37	588.54	Gris	217.75	544.01	915.38	5885.4	----
0.37	588.54	Blanco	217.75	544.01	915.38	5885.4	----
0.37	470.83	Gris	217.75	544.01	915.38	4708.3	117.71

Tabla 3.1 Diseños de mezclas utilizados en el estudio

Elaboración de las mezclas

El mezclado se efectuó mecánicamente, el procedimiento utilizado fue el siguiente:

1. Primero se colocaron los agregados y se homogeneizaron en seco.
2. Se le agregó el agua de absorción y se volvieron a mezclar dejándolos reposar un tiempo, para que absorbieran el agua.
3. Se agregó el cemento (mezclado con humo de sílice en su caso) y un porcentaje del agua de mezclado (con el reductor de agua en su caso).
4. Se revolvió la mezcla durante tres minutos y durante la misma se le agregó el agua de mezclado restante, se dejó reposar un minuto y se volvió a mezclar durante otros dos minutos.
5. Durante el proceso de mezclado, fue necesario en algunos casos ajustar el agua de mezclado para satisfacer los requisitos de revenimiento.

En el capítulo siguiente se presentan los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas a los concretos anteriores.

Capítulo 4

PROPIEDADES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

4.1 Generalidades

En el diseño de concreto estructural, otras propiedades físicas además de la resistencia a compresión son de considerable importancia para los diseñadores. Un ejemplo es el módulo de elasticidad y la relación esfuerzo-deformación. Existe suficiente información disponible sobre estas propiedades para concretos normales, sin embargo, en el caso del concreto de alta resistencia es necesario aún más investigación al respecto.

Las propiedades del concreto tales como la resistencia a compresión, la relación esfuerzo-deformación y el módulo de elasticidad, usualmente se expresan en términos de la resistencia a compresión axial de cilindros de concreto de 152 x 305 mm.

4.2 Trabajabilidad

Durante la elaboración de las mezclas se tuvieron ajustes de agua en el caso del cemento gris portland-puzolana se redujo el agua en un 8% para obtener un revenimiento de 6.5 cm, mientras que para el cemento blanco se agregó agua en un 3% para obtener un revenimiento de 4.5 cm, lo anterior para los concretos sin aditivos. El comportamiento anterior se puede adjudicar a la mayor finura presentada por el cemento blanco lo que se traduce en una mayor generación de calor de hidratación y mayor requerimiento de agua.

En los concretos con aditivo reductor de agua de alto rango el ajuste en el agua, fue como sigue el concreto con cemento gris portland-puzolana se redujo el agua hasta en

9% para obtener un revenimiento de 12 cm. En el concreto con cemento blanco se redujo el agua en un 3.4% para un revenimiento de 4.5 cm. Observándose nuevamente el mayor requerimiento de agua del concreto con cemento blanco. El revenimiento se obtuvo una vez incluido el reductor de agua de alto rango en la mezcla.

En el concreto con humo de sílice no se efectuó ningún ajuste durante la mezcla, obteniéndose un revenimiento de 12 cm. Se observó también cierta tendencia a la segregación de los agregados, debida en parte a lo fluido de la pasta ocasionado a su vez por la finura del humo de sílice.

Como puede observarse la inclusión del aditivo reductor de agua de alto rango permite la disminución del consumo de agua de la mezcla de concreto, y por lo tanto, una disminución en la relación agua/cemento.

4.3 Resistencia a compresión axial

La resistencia mecánica del concreto se acostumbra medir de manera convencional en especímenes estándar de concreto simple que se someten a condiciones de carga reglamentada, ya sea a compresión o tensión. De este modo, la resistencia correspondiente se identifica como el esfuerzo máximo generado en el concreto por la carga que produce la falla del espécimen.

De conformidad con lo ya mencionado, la resistencia mecánica del concreto como un todo es influida por las resistencias individuales de los agregados y la pasta de cemento y por la adherencia entre ambos componentes, y a fin de cuentas la resistencia del conjunto es dictada por la que resulta más débil de las tres.

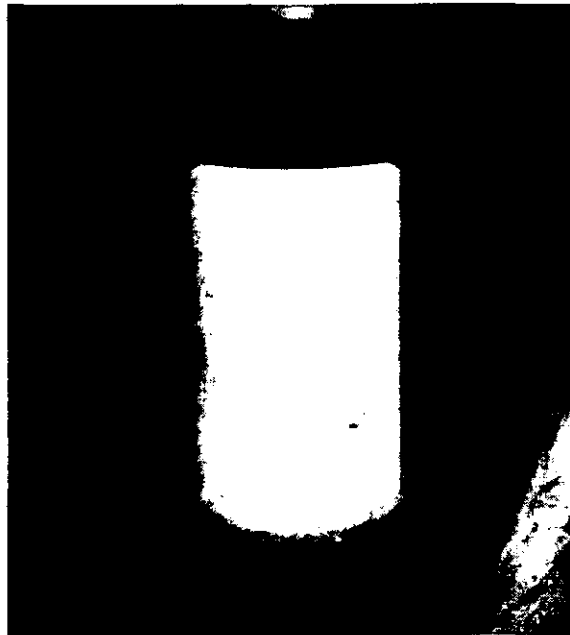
En los concretos de baja resistencia (menos de 200 kg./cm² aproximadamente) a la edad de servicio (más de 28 días) es frecuente que la resistencia propia de la pasta sea el factor predominante, mientras que en los niveles altos (más de 500 kg./cm²) tiende a predominar la adherencia pasta-agregado como factor determinante de la resistencia del concreto. En los niveles intermedios que son los más usuales en las estructuras ordinarias, la resistencia del concreto puede ser limitada indistintamente por la resistencia de la pasta, la adherencia pasta-agregado, o una combinación de ambas, dependiendo

significativamente de las características de forma, textura superficial y tamaño máximo de los agregados.

Resultados de los ensayos

Para el presente estudio se efectuaron pruebas de resistencia a compresión axial a 7, 14 y 28 días en cilindros de 15 x 30 cm, para diferentes relaciones agua/cemento, utilizando cementos Tipo I gris portland-puzolana y blanco, aditivo reductor de agua de alto rango y aditivo a base de humo de sílice. Dichas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería y en el Instituto de Ingeniería.

En la fotografía 4.1 se muestra uno de estos especímenes sometidos a prueba.



Fotografía 4.1. Prueba de cilindros a compresión axial

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas.

Relación a/c	Resistencia a compresión (kg/cm ²), a la edad de			Cemento Tipo I
	7 días	14 días	28 días	
0.43	328.22	384.81	436.87	Gris
0.43	367.30	441.80	470.60	Blanco
0.37	440.26	519.50	563.80	Gris
0.37	404.00	440.82	531.20	Blanco
0.37	506.20	638.10	771.11	Gris + Humo de sílice.

Tabla 4.1 Resistencia a compresión de cilindros, para diferentes relaciones agua/cemento y diferentes edades.

En las ilustraciones 1 y 2, se presentan gráficas comparativas de los resultados obtenidos para los diferentes tipos de cementos con una relación agua/cemento determinada.

1. La resistencia a compresión máxima alcanzada a los 28 días fue de 771 kg/cm². Los valores correspondientes de resistencia a los 7 y 14 días fueron de 506.2 y 638.1 kg/cm², respectivamente (tabla 4.1). Esta corresponde a la mezcla elaborada con cemento gris portland-puzolana, con un consumo de cemento de 470.83 kg/m³, con una relación agua cemento de 0.37, agregado grueso de ¾" (19 mm), un consumo de aditivo reductor de agua de alto rango de 4.7 l/m³ y utilización de humo de sílice como reemplazante del cemento en un 20% en peso para tener un consumo de 117.71 kg./m³.

2. En los concretos sin aditivo reductor de agua la relación promedio entre la resistencia a compresión a los 7 y 28 días fue de 0.75 para el concreto utilizando cemento gris portland-puzolana y de 0.78 para el cemento blanco. Con la incorporación del aditivo

reductor de agua de alto rango el comportamiento se revirtió mostrando un mejor comportamiento el cemento gris portland-puzolana con una relación de 0.78 contra una relación de 0.76 del cemento blanco.

En el caso del concreto fabricado con humo de sílice la relación de resistencia de 7 a 28 días cayó hasta un 0.66, muy por debajo de los concretos con reductor de agua de alto rango y de los concretos sin aditivos.

3. En la ilustración 4.1, se muestra el comportamiento de los cementos gris y blanco para una relación agua/cemento de 0.43, en esta mezcla no se utilizó ningún aditivo. Se puede observar que el cemento blanco presentó un mejor comportamiento en la prueba de resistencia teniendo una ganancia de 34 kg/cm² a los 28 días con respecto a la mezcla realizada con cemento gris portland-puzolana.

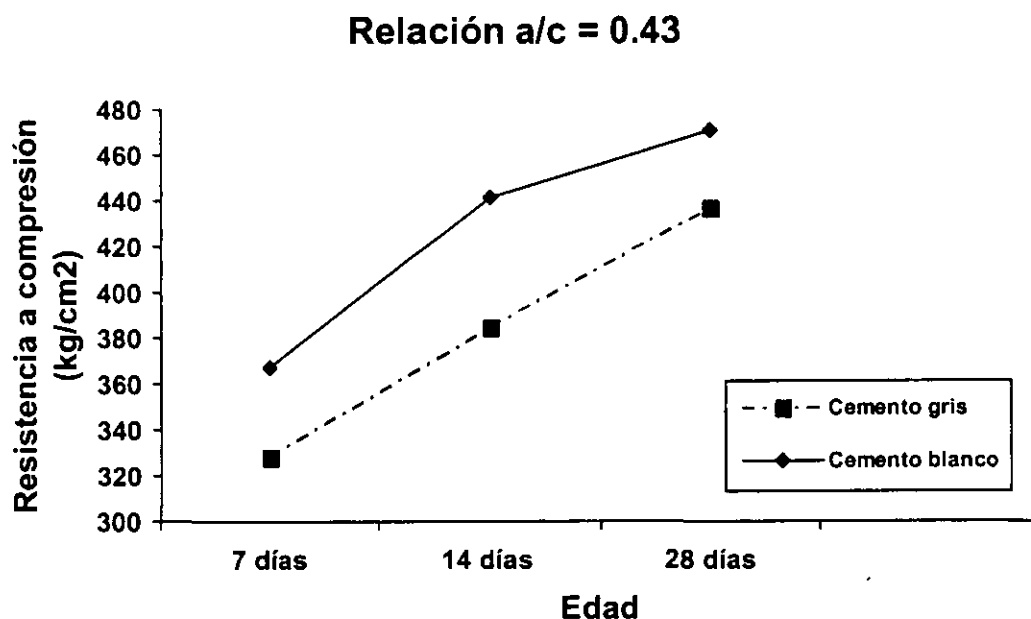


Ilustración 4.1. Resistencia a compresión para agua/cemento = 0.43

● Fuente: "Elaboración propia con base en pruebas de laboratorio"

En la ilustración 4.2, se observa el comportamiento del concreto a diferentes edades para una relación agua/cemento de 0.37, en estos cilindros se utilizó el aditivo reductor de agua de alto rango así como la elaboración de cilindros utilizando cemento gris y humo de sílice como sustituto de cemento en un 20% de peso de éste último. Se puede observar en la ilustración que en los concretos en los que se utilizaron únicamente los dos tipos de cemento y el reductor de agua de alto rango se observa un cambio drástico en el comportamiento, ya que a diferencia de los concretos sin aditivo el cemento gris portland-puzolana presenta una mayor resistencia (32 kg/cm² más) que los cilindros con cemento blanco.

5. La utilización del humo de sílice como sustituto del cemento gris (20% en peso), permitió una mayor resistencia con respecto a la mezcla sin su utilización, presentando una ganancia a 28 días de 207.31 kg/cm² que representa un 37% más que la mezcla realizada con cemento gris portland-puzolana y el aditivo reductor de agua de alto rango sin la utilización de humo de sílice.

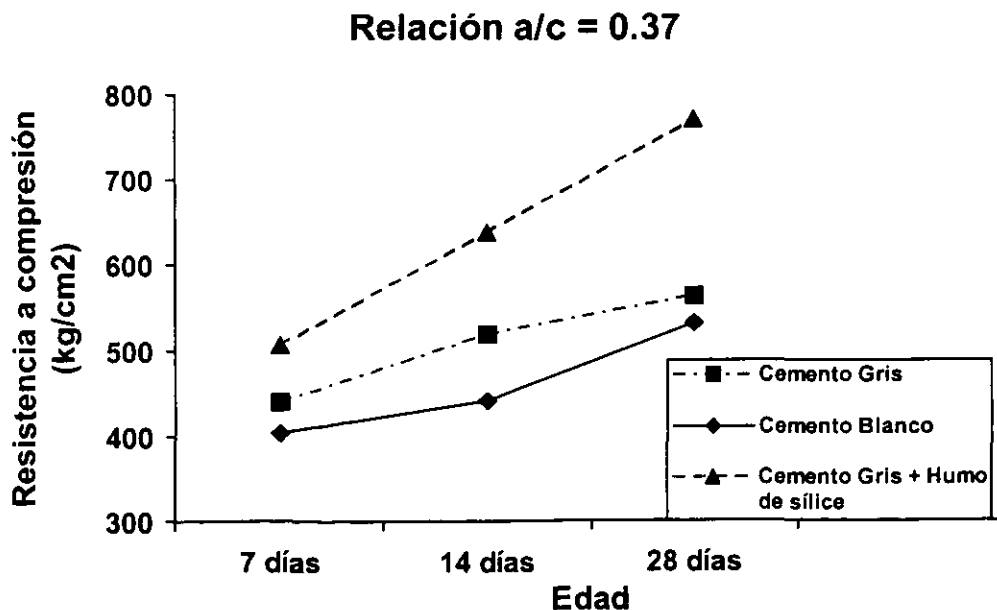


Ilustración 4.2. Resistencia a compresión para agua/cemento = 0.37 con uso de reductor de agua de alto rango

● Fuente: "Elaboración propia con base en pruebas de laboratorio"

En las fotografías siguientes se observan diferentes tipos de falla de los cilindros, en la mayoría de los cilindros se presentó falla por cortante, presentándose además en varias ocasiones degollamiento de los agregados.



Fotografía 4.2. Falla a cortante del cilindro fabricado con cemento blanco, se puede distinguir en esta imagen el degollamiento del agregado



Fotografía 4.3. Falla a cortante del espécimen de prueba fabricado con cemento gris y humo de sílice a 28 días

4.4 Relación esfuerzo-deformación a compresión axial

La relación esfuerzo-deformación, así como el módulo de elasticidad son propiedades importantes. Aunque el concreto no es un material perfectamente elástico, la teoría de la elasticidad puede aplicarse a éste dentro de ciertos límites de deformación y tiempo. Sin embargo, se observa una marcada diferencia de la linealidad cerca de los esfuerzos últimos.

El concreto sin refuerzo tiene cierta ductilidad, sin embargo, ésta disminuye conforme aumenta la resistencia. La relación esfuerzo-deformación, de esta forma, se convierte en una línea recta conforme aumenta la resistencia del concreto.

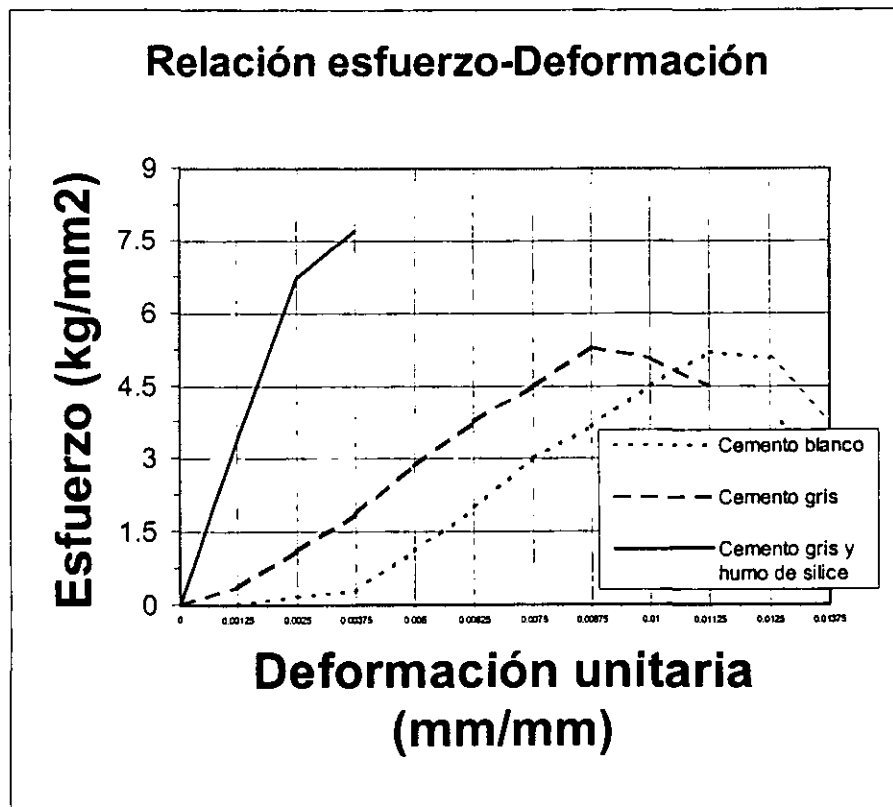


Ilustración 4.3. Gráfica de Relación Esfuerzo-Deformación para los concretos fabricados

- Fuente: "Elaboración propia con base en pruebas de laboratorio"

En la ilustración 3, se puede observar el comportamiento de los concretos fabricados en el laboratorio, puede observarse que conforme aumenta la resistencia las pendientes se vuelven más verticales, alcanzando una mayor verticalidad en el caso del concreto fabricado con cemento gris y humo de sílice, puede verse que la variación en las deformaciones es mucho más pequeña que la variación en las resistencias, puede deducirse entonces que los concretos de alta resistencia tendrán mayores módulos de elasticidad que los concretos normales.

4.5 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto puede variar en función de diversos factores tales como el estado de humedad y compactación del concreto, la relación agua/cemento y edad de la pasta y las características de los agregados, principalmente.

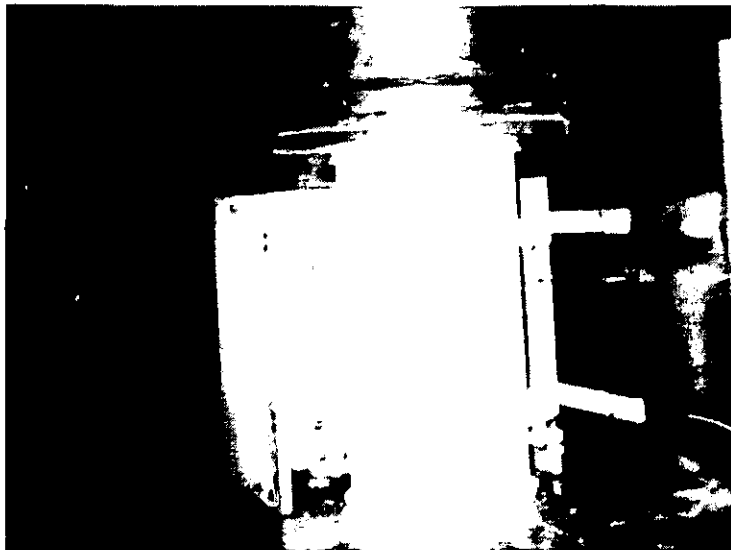
Tanto la relación agua/cemento de la pasta como su edad, son factores que determinan la resistencia a compresión del concreto en el momento de su ensaye, por consiguiente su influencia en el módulo de elasticidad puede considerarse asociada al examinar la relación que normalmente se manifiesta entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del concreto. Con el uso de agregados de buena calidad, el módulo de elasticidad del concreto tiende a incrementarse a medida que aumenta su resistencia a compresión, se aprecia también que al aumentar su resistencia a compresión el concreto tiende a perder su ductilidad, esto es, su forma de falla se vuelve más frágil.

Cuando se requiere definir el módulo de elasticidad del concreto para fines de diseño, es posible determinarlo directamente en el concreto de uso previsto o estimarlo mediante expresiones empíricas que lo relacionan con la resistencia a compresión, en la mayoría de los casos se opta por lo segundo.

Es importante mencionar que un cambio desfavorable en las características intrínsecas de las rocas que constituyen los agregados puede manifestarse relativamente menos en la resistencia a compresión del concreto que en su módulo de elasticidad. De ahí que cuando se suscitan dudas acerca del comportamiento de los agregados en este aspecto, lo conveniente es verificar directamente el módulo de elasticidad ensayando especímenes

representativos del concreto de uso previsto e la estructura que se proyecta , en vez de aplicar expresiones empíricas de carácter general.

En los materiales elásticos cuya gráfica esfuerzo-deformación unitaria es una línea recta, el módulo de elasticidad define la relación de proporcionalidad que existe entre ambas variables, es decir, se identifica con la pendiente de esa recta. Debido a la forma que se manifiesta la relación entre los esfuerzos y las deformaciones en el concreto no es posible asignarle, estrictamente hablando, un módulo de elasticidad; sin embargo para materiales así, cuya gráfica es una curva, suelen considerarse otras variantes del módulo de elasticidad que pueden referirse a la pendiente de la tangente en el origen o en otro sitio, de la secante entre el origen y otro punto, o de la cuerda entre dos puntos sobre la curva.



Fotografía 4.4. Obtención del módulo de elasticidad del concreto fabricado con cemento gris y humo de sílice

Conforme a la norma NOM C-128, el criterio que se aplica para obtener el módulo de elasticidad del concreto experimentalmente consiste básicamente en definir dos puntos (A y B) sobre la curva esfuerzo deformación unitaria del concreto ensayado, a fin de calcular la pendiente de la cuerda AB definida de esta manera. Las coordenadas del punto

A, son: una abcisa fija (ϵ_A) igual a una deformación unitaria de 50 millonésimas, y una ordenada (σ_A) determinada a partir de esa deformación. Por su parte, las coordenadas del punto B son: una ordenada fija (σ_B) igual a un esfuerzo equivalente al 40% del esfuerzo de ruptura del concreto que se ensaya, y una abcisa (ϵ_B) determinada a partir de ese esfuerzo. Una vez conocidas estas coordenadas, el módulo de elasticidad se determina calculando la tangente del ángulo que la cuerda AB forma con el eje horizontal.

Lo anterior se resume en la expresión siguiente:

$$E_c = \frac{f_{0.4} - f_{0.00005}}{\epsilon_{0.4} - \epsilon_{0.00005}}$$

Donde: $f_{0.4}$ es el valor del 40% de la resistencia final

$f_{0.00005}$ es el valor del esfuerzo a una deformación de 0.00005

$\epsilon_{0.4}$ es el valor de la deformación a un 40% de la resistencia final

$\epsilon_{0.00005}$ es la deformación de 0.00005.

Aplicando la expresión anterior a los resultados de la prueba se obtuvo el siguiente módulo de elasticidad para la resistencia promedio de 760 kg/cm²:

$$E_c = 252240 \text{ kg/cm}^2.$$

Existen algunas expresiones experimentales para predecir el módulo de elasticidad, el ACI 363 (ref. 3) proporciona una expresión que correlaciona el módulo de elasticidad E_c y la resistencia a compresión f'_c , para concretos con f'_c entre 210 y 830 kg/cm²:

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \text{ Mpa}$$

Donde f'_c es la resistencia a compresión axial en Mpa.

Las variaciones de los valores obtenidos con la expresión dependen de las propiedades y proporciones del agregado grueso.

Puede utilizarse también la presentada por el Reglamento de Construcciones del Departamento del Distrito Federal (DDF)(ref. 7):

$$E_c = 13200 \sqrt{f'c}$$

Donde $f'c$ es la resistencia a compresión axial en kg/cm^2 .

Si aplicamos las expresiones anteriores para obtener el módulo de elasticidad de un concreto con una resistencia promedio de 760 kg/cm^2 se obtiene:

$$E_c = 358431 \text{ kg/cm}^2 \text{ (ACI 363)}$$

$$E_c = 363899 \text{ kg/cm}^2 \text{ (DDF)}$$

Los valores experimentales generaron valores menores de E_c inferiores a los que predice la expresión del Comité ACI-363 y a los de la expresión del DDF, esto no significa que los valores experimentales estén mal, sino que para los materiales, proporciones, rangos de resistencia y condiciones de prueba que predominaron los valores fueron diferentes.

Lo anterior puede observarse con valores experimentales obtenidos por el Instituto de Ingeniería para diferentes concretos comparados con los valores obtenidos con las expresiones del ACI 363 y del Reglamento del DDF y el valor obtenido en el presente estudio, como se muestra en la ilustración 4.4.

En la ilustración pueden observarse como los valores obtenidos mediante las expresiones de ACI 363 y DDF están muy por debajo de los valores obtenidos experimentalmente por el Instituto de Ingeniería para concretos de resistencia normal mientras que para el concreto de alta resistencia estos valores se encuentran muy por encima del valor obtenido experimentalmente.

Los valores obtenidos por el Instituto de Ingeniería fueron obtenidos utilizando principalmente agregados calizos con arenas combinadas. De lo anterior se subraya nuevamente la importancia del tipo de agregado utilizado en el concreto así como del método utilizado para obtener el módulo.

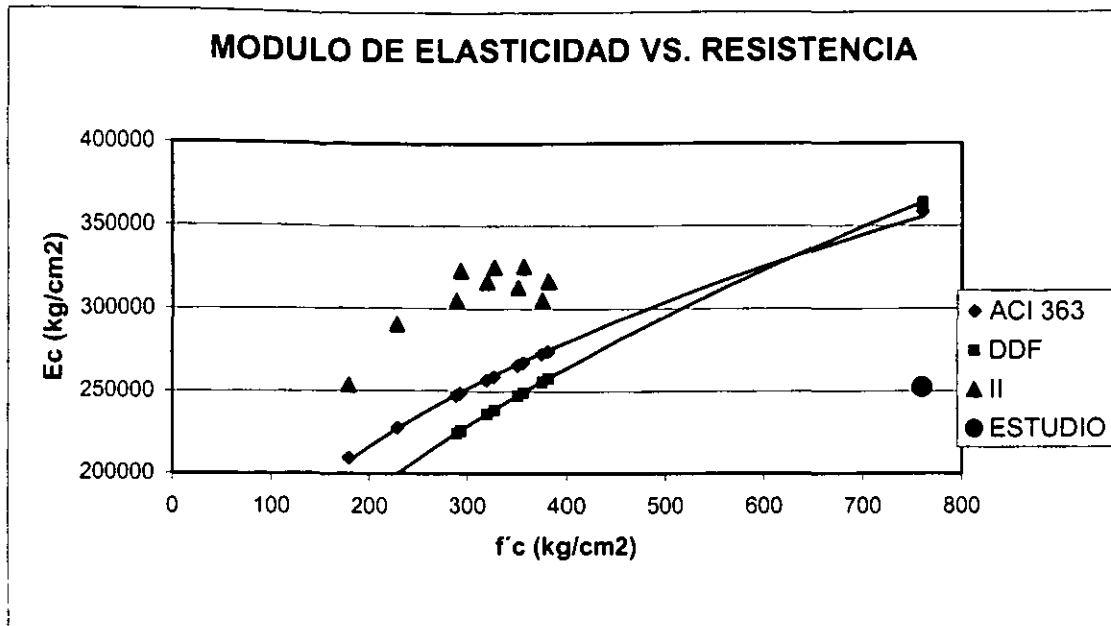


Ilustración 4.4. Comparación de valores de E_c obtenidos en laboratorio contra los valores predichos utilizando las expresiones del ACI 363 y del Reglamento del DDF.

• Fuente: "Elaboración propia con base en pruebas de laboratorio"

En estudios efectuados por Gómez (ref. 8) en promedio el ACI-363 sobrestimó el valor del módulo de elasticidad a los 28 días en un 20%. Por otro lado, según el propio Comité ACI-363, otros investigadores han reportado valores experimentales de E_c mayores que los que predice la expresión citada, esto sugiere la imperiosa necesidad de tomar con cautela dicha expresión. Se han reportado módulos de elasticidad para concretos de alta resistencia del orden de 310000 a 450000 kg/cm^2 pero estos resultados dependen mucho de la forma de obtener el módulo.

Es evidente entonces la necesidad de seguir investigando para obtener una expresión que pueda predecir de forma más aproximada el valor del módulo de elasticidad en concretos de alta resistencia con diferentes agregados, o en su defecto cuando se tenga duda sobre el comportamiento del concreto elaborar mezclas de prueba con los materiales a utilizar y obtener el valor del módulo elástico experimentalmente.

En la siguiente fotografía se presenta la forma de falla de un espécimen después de haber efectuado la obtención del módulo de elasticidad.



Fotografía 4.5. Falla del espécimen de concreto después de obtenerse el módulo de elasticidad

Capítulo 5

APLICACIONES

5.1 Generalidades

El concreto de alta resistencia ha sido considerado como un material del “Estado del Arte”, y como la mayoría de estos materiales, tiene un precio importante. En algunos casos los beneficios obtenidos compensan el esfuerzo y costo adicionales; en otros no.

Básicamente, el concreto de alta resistencia resistirá mayor carga a compresión que los concretos normales. Por ejemplo, debido a que las columnas son muy importantes desde el punto de vista arquitectónico y de renta, la capacidad para limitar su tamaño para estructuras más altas a menudo permite el uso del concreto como solución el lugar de una estructura de acero.

El uso del concreto de alta resistencia ha cubierto otras aplicaciones, losas primarias, vigas y puentes de grandes claros.

Estacionamientos, puentes, y otras instalaciones que requieran mejorar su densidad, baja permeabilidad y un incremento en la resistencia al congelamiento y deshielo y a la corrosión son candidatos primarios para considerar el uso de concreto de alta resistencia.

En los apartados siguientes se presentan aplicaciones un más detalladas del uso del concreto de alta resistencia.

5.2 Edificios

Experiencias en países donde se utilizado han demostrado que en general las ventajas económicas del concreto de alta resistencia se observa mejor cuando se utiliza en columnas de edificios altos. En esta aplicación los ingenieros han utilizado de lleno la ventaja del incremento en la resistencia a compresión: reduciendo la cantidad de acero,

reduciendo el tamaño de las columnas para incrementar el área utilizable, o permitiendo más niveles sin afectar los niveles inferiores.

Desde 1972, se han construido edificios con columnas con una resistencia a compresión de diseño de 620 kg/cm^2 , llegándose a alcanzar resistencias de diseño de 970 kg/cm^2 en Chicago en 1988.

Un ejemplo muy claro es el edificio ubicado en el 311 de la calle South Waker Drive, en Chicago. El edificio es considerado el más alto del mundo, hecho de concreto reforzado, tiene 79 pisos y una altura de 295 m, según Page en el se consumieron 84000 m^3 de concreto con resistencias de diseño de hasta 840 kg/cm^2 especificadas a los 56 días.

5.3 Puentes

El concreto de alta resistencia se ha utilizado también en la construcción de puentes, con beneficios tan importantes como el de poder salvar claros más grandes gracias a la mayor capacidad portante del material y a la reducción del peso propio de la superestructura, ésta reducción se traduce también en una cimentación menos voluminosa.

Se ha utilizado mucho en vigas presforzadas de puentes, Sin embargo no se tiene mucha información actualmente. Se han reportado algunos puentes que han usado concreto de alta resistencia, tal vez la aplicación más significativa en Estados Unidos es el Huntington-Proctorville con una resistencia de diseño a compresión de 550 kg/cm^2 . Se tienen informes del uso de concretos con resistencias a compresión mayores a 760 kg/cm^2 en puentes ferroviarios en Japón.

En México se han construido dos puentes carreteros muy importantes, el puente Coatzacoalcos con un claro máximo de 280 m y el puente Tampico con un claro máximo de 360 m, en ambos puentes se emplearon para su construcción concretos con resistencias hasta de 400 kg/cm^2 . La resistencia máxima considerada en las anteriores aplicaciones es más bien moderada y típica del concreto presforzado.

5.4 Pavimentos

El concreto de alta resistencia no ha sido utilizado aún en forma común en la construcción de pavimentos, aunque en algunas ayudas de diseño se llegan a citar concretos de hasta 500 kg/cm^2 a la compresión, se menciona la cifra anterior como referencia, ya que en realidad el parámetro que se especifica rutinariamente, es el equivalente módulo de ruptura a la flexión. Debido a la relación que existe entre los parámetros anteriores es de esperarse que entre más alta sea la resistencia a la compresión, mayor será el módulo de ruptura.

5.5 Aplicaciones especiales

Se ha especificado el uso de concreto de alta resistencia para proveer un concreto extremadamente denso que pueda resistir la exposición severa. Actualmente se han reportado resistencias a compresión mayores a 620 kg/cm^2 . Se ha indicado el uso de concreto de 690 kg/cm^2 en delgadas presas de arco lo que normalmente da como resultado una gran economía al reducir el volumen de concreto.

El concreto de alta resistencia tiende a reducir las deflexiones en una presa y puede mejorar la resistencia de juntas de construcción y permitir una remoción más temprana de las cimbras. Se han descrito algunas desventajas, incluyendo el desarrollo de concentraciones de esfuerzos, particularmente en la cimentación de la presa; tendencia a mayor agrietamiento del concreto, incremento en los problemas para controlar la temperatura.

Se ha utilizado también en pilas de cimentaciones marinas con resistencias de 550 a 680 kg/cm^2 medidas a 28 días. Otras aplicaciones mencionadas son de concretos colocados en campo con baja permeabilidad y resistencia química para usos industriales.

5.6 Aplicaciones potenciales

La mayoría de las aplicaciones del concreto de alta resistencia han utilizado esta propiedad del material. Sin embargo, el concreto de alta resistencia posee otras características que podrían ser utilizadas ventajosamente en estructuras de concreto.

LeMessurier propuso el uso del concreto de alta resistencia para satisfacer la necesidad de un módulo de elasticidad alto. Asimismo, el concreto de alta resistencia puede ser usado en losas para permitir la rápida remoción de cimbras y evitar el reapuntalamiento.

Rabbat y Russell han presentado que el claro máximo que puede soportar una viga de sección sólida puede incrementarse en un 15% cuando la resistencia a compresión del concreto se incrementa de 340 a 480 kg/cm². Finalmente, Manning ha sugerido que la relación entre concreto de alta resistencia y concreto de alta calidad coloca al concreto de alta resistencia como un material muy atractivo no por su resistencia sino por su servicio a largo plazo.

Más recientemente, el concreto de alta resistencia se ha especificado en almacenes, fundiciones, cubiertas de puentes, aliviaderos de presas y en pisos industriales de trabajo pesado. En estas aplicaciones, el concreto de alta resistencia es utilizado para proveer un concreto con mejor resistencia al ataque químico, mejor resistencia a la abrasión, mayor durabilidad al congelamiento y deshielo, y menor permeabilidad.

Conclusiones

1. Pueden obtenerse concretos de alta resistencia con materiales disponibles en la Ciudad de México, sin embargo la obtención de estos concretos requiere de un control de calidad estricto de los materiales y su manejo.
2. El uso de cemento blanco mostró dar mejores resultados de resistencia en concretos sin aditivo, pero mostró un mayor requerimiento de agua y menos trabajabilidad, esto debido a su mayor finura.
3. En concretos con aditivo el cemento gris portland-puzolana mostró un mejor comportamiento en su interacción con el aditivo que el cemento blanco.
4. El uso de aditivos reductores de agua de alto rango mostró ser una ayuda muy eficaz en la elaboración de los concretos de alta resistencia al permitir una buena trabajabilidad y una reducción de agua y por consiguiente una reducción en la relación agua/cemento. Sin embargo, deben hacerse pruebas para verificar su eficacia en combinación con el cemento a utilizar. Puede concluirse entonces que el uso de aditivos reductores de agua de alto rango es recomendable e imprescindible en la obtención de concretos de alta resistencia.
5. La utilización del humo de sílice permitió alcanzar 37% más resistencia que el concreto donde no se utilizó, para una misma relación agua/cemento, permitiendo también una reducción en la cantidad de cemento utilizada.

6. La utilización del humo de sílice debido a su gran finura y por consiguiente un mayor requerimiento de agua requiere necesariamente el uso de aditivos reductores de agua de alto rango para mantener una relación agua/cemento baja y una trabajabilidad adecuada.
7. La resistencia a compresión máxima alcanzada a 28 días fue de 771 kg/cm^2 .
8. El módulo de elasticidad obtenido en el laboratorio se aleja mucho de los valores obtenidos utilizando expresiones proporcionados por diferentes organismos (ACI 363 y Reglamento de Construcciones del Departamento del Distrito Federal). Debidas estas diferencias principalmente a los tipos de agregados utilizados.
9. De lo anterior se desprende la necesidad de seguir investigando el comportamiento de los concretos de alta resistencia fabricados con diferentes agregados para adecuar las fórmulas teóricas al comportamiento real de estos concretos. O en su defecto, tomar con mucha cautela los resultados obtenidos con dichas fórmulas y efectuar ensayos con los materiales que se vayan a utilizar en la fabricación del concreto.
10. La variación del rango de deformaciones observada en las gráficas esfuerzo-deformación es mucho menor que la variación en el rango de esfuerzos, además este tipo de concretos tienden a fallar de forma frágil. Se recomienda entonces, que en el diseño estructural se de más énfasis al estado límite de falla que al estado límite de servicio, ya que el rango elástico es muy pequeño.
11. En la mayoría de los especímenes de prueba se presentó falla por cortante y en algunos casos hubo degollamiento del agregado grueso.
12. Se recomienda continuar con la investigación en el campo del concreto de alta resistencia, con otros tipos de agregados, aditivos y cementos.

13. Para la elaboración y prueba de estos tipos de concretos es necesario contar con un laboratorio adecuado para tener el control de calidad que exige el concreto de alta resistencia.
14. Se recomienda efectuar estudios de concretos de alta resistencia y su interacción con el acero de refuerzo.
15. Es necesario efectuar estudios para definir las ventajas económicas de la utilización de concreto de alta resistencia contra la desventaja de un mayor costo.

El presente estudio cubre sólo una pequeña parte de los aspectos concernientes a concretos de alta resistencia pues el campo es muy amplio para que se continúe la investigación tanto de otros materiales como de otras características de estos concretos.

Referencias

1. ACI 212.4R-93. **Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete.** ACI Manual of Concrete Practice. 1998.
2. ACI 234R-96. **Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.** ACI Manual of Concrete Practice. 1997.
3. ACI 363R-92. **State of the Art Report on High Strength Concrete.** ACI Manual of Concrete Practice. 1997.
4. American Standards for Testing and Materials. **Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C 33-93).**
5. Comisión Federal de Electricidad. **Manual de Tecnología del Concreto, Tomo III.** Editorial LIMUSA.
6. De La Orta, Fritz. **Concreto Armado.** Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 1965.
7. Departamento del Distrito Federal. **Normas Técnicas Complementarias al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.** Gaceta Oficial de la Federación. 25 de Marzo de 1996.
8. Gómez, Jorge. **Concreto de Resistencia Superior.** Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.

9. Nawy, Edward G. **Fundamentals of High Strength, High Performance Concrete.** Longman Group Limited. England. 1996.
10. Perenchio, W. F. **An Evaluation of Some of the Factors Involved in Producing Very High-Strength Concrete.** Portland Cement Association. 1973.
11. Portland Cement Association. **High Strength Concrete.** Concrete information Bulletin. 1971.
12. Rüsç, Hubert. **Hormigón Armado y Hormigón Pretensado.** CECSA. 1979.
13. Secretaria de Patrimonio y Fomento Industrial. **Norma Oficial Mexicana NOM-C-1-1980. Industria de la Construcción.- Cemento Portland.**
14. Sika Construcción. **Manual de Información Técnica.**